# Сборник докладов
# Седьмой конференции геокриологов России
# «Динамика природных условий в криолитозоне и геокриологический мониторинг»

**с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов**

**МГУ имени М.В. Ломоносова**
**9-10 июня 2026 г.**

УНИВЕРСИТЕТ
книжный дом

Москва, 2026

УДК (551.34+551.345+556.12+528.9)
ББК 26.36
С23

**Сборник докладов Седьмой конференции геокриологов России «Динамика природных условий в криолитозоне и геокриологический мониторинг»** с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов (МГУ имени М.В. Ломоносова, 9-10 июня 2026 г.) : сборник статей. – М.: «КДУ», 2026. – 483 с. – Электронное издание сетевого распространения. – URL: https://bookonlime.ru/node/86046 – doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-00247-166-9-2026-483.

ISBN 978-5-00247-166-9

Всероссийская конференция геокриологов с международным участием проводится в целях представления новейших результатов по динамике природных условий в криолитозоне, координации научных исследований криосферы, обобщения опыта геокриологического мониторинга и прогноза, инженерной защиты, проведения изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации зданий и инженерных сооружений на территории распространения вечной мерзлоты при освоении Арктики и Сибири.

Публикуется в авторской редакции. Ответственность за содержание и достоверность приведенных данных несут авторы публикаций.

© Авторы статей, 2026
© Издательство «КДУ», 2026

ISBN 978-5-00247-166-9

## НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

- Геокриологический мониторинг и прогноз
- Геофизические исследования в криолитозоне
- Динамическая геокриология
- Региональная и историческая геокриология
- Литогенетическая геокриология
- Инженерная геокриология, инженерные изыскания и проектирование в криолитозоне
- Основания и фундаменты зданий и инженерных сооружений
- Автомобильные и железные дороги в криолитозоне
- Экологические и биологические проблемы криолитозоны
- Физикохимия, теплофизика и механика мерзлых грунтов
- Газы и газогидраты в криолитозоне
- Изменения климата и реакция криолитозоны
- История, методология и образование в геокриологии

## ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- Кафедра геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова
- Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН
- Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН
- Кафедра криолитологии и гляциологии географического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова

## ПРОГРАММНЫЙ ОРГКОМИТЕТ
## СЕДЬМОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ГЕОКРИОЛОГОВ РОССИИ
## «*ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ И ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ*»

### Сопредседатели

***Брушков А.В.***- заведующий кафедрой геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

***Железняк М.В.*** - директор Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

***Соромотин А.В***. – директор Института криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН

***Стрелецкая И.Д., Маслаков А.А.***- Кафедра криолитологии и гляциологии географического факультета имени М.В. Ломоносова

### Члены Программного оргкомитета:

Алексеев А.Г.(НИУ МГСУ), Ашпиз Е.С. (МИИТ, Российский Университет Транспорта), Богданов М.И.(ООО ИГИИС), Богоявленский В.И.( Институт проблем нефти и газа РАН), Бровка Г.П. (НАН Беларуси, Институт природопользования), Быстров Н.В. (Росавтодор), Васильчук Ю.К. (МГУ, географический факультет), Вепринк И.А. (Военный Институт ЖДВ и ВОСО), Владов М.Л. (МГУ, кафедра сейсмометрии и геоакустики), Власов А.Н. (Институт прикладной математики РАН), Габбасов М.Р. (Департамент развития Арктической зоны Минвостокразвития РФ), Гончаров А.А. (Научный центр изучения Арктики, г. Салехард), Гордиенко А.Н. (Полярный геофизический институт), Григорьев М.Н. (Институт мерзлотоведения СО РАН), Десяткин Р.В. (ИБПК СО РАН), Дроздов Д.С. (Институт криосферы Земли СО РАН), Дубровин В.А.(ФГБУ Гидроспецгеология), Ефименко С.В. (Томский государственный архитектурно-строительный университет), Жданеев О.В. (Минэнерго РФ), Кершенгольц Б.М. (ИБПК СО РАН), Королев М.В. (Институт прикладной математики РАН), Кудрявцев С.А. (Дальневосточный государственный университет путей сообщения), Кузнецов М.Е. (Востокгосплан), Маслаков А.А. (МГУ, географический факультет), Осокин А.Б. ( ООО «Газпром добыча Надым»), Попова А.А. (ООО «Северные Изыскания»), Прямицкий А.В.

(ПАО ГМК «Норильский никель), Ривкин Ф.М. (Институт криосферы Земли СО РАН), Рязанов А.В. (ООО НИПИИ Фундаментпроект), Садуртдинов М.Р. (Институт криосферы Земли СО РАН), Сергеев Д.О. (Институт геоэкологии РАН), Синицкий А.И. (Научный центр изучения Арктики, Салехард), Трегубов О.Д. (Северо-Восточный КНИИ ДВО РАН), Трофимов В.Т. (МГУ, кафедра инженерной и экологической геологии), Федоров А.Н. . (Институт мерзлотоведения СО РАН), Чеснокова И.В. (Институт водных проблем РАН), Чжан Цзе (Северо-Восточный университет лесного хозяйства, г. Харбин, Китай), Чувилин Е.М. (Сколковский институт науки и технологий), Шепитько Т.В. (МИИТ, Российский Университет Транспорта)

## ОРГКОМИТЕТ КАФЕДРЫ ГЕОКРИОЛОГИИ

Брушков А.В., Адиега З.В., Балихин Е.И., Буйда Т.А., Булдович С.Н., Власенко Д.В., Гагарин В.Е., Горбунова А.А., Гордеева Г.И., Гунар А.Ю., Емельянова Л.В., Игнатов С.Г., Кияшко Н.В., Комаров И.А., Кошурников А.В., Лисицына О.М., Мотенко Р.Г., Оспенников Е.Н., Остарков Н.А., Патрик О.Н., Пустовойт Г.П., Розенберг В.В., Сафронов Е.В., Соболев П.А., Тюрин А.И., Фалалеева А.А., Хилимонюк В.З., Хрусталев Л.Н., Чаушник С.А., Чеверев В.Г., Черняк Ю.В.

## УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРИАТ

***Мотенко Римма Григорьевна***, тел. +7(495)939-2674; +7(977)443-0541
(г. Москва), e-mail: rmotenko@mail.ru
***Куть Анна Алексеевна***, тел.+7(411)233-4019, +7(924)168-1348
(г. Якутск), e-mail: ann.urban@mail.ru
***Хомутов Артём Валерьевич***, тел.+7 (912)924-6405
(г.Тюмень), e-mail: artcryo@yandex.ru
***Устинова Елена Валерьевна***, +7(909)184-9704
(г.Тюмень), e-mail: ustelena71@yandex.ru

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПОНСОРЫ

Научно-практический журнал **Инженерные изыскания**
Научно-практический журнал **Геотехника**
Научный журнал **Инженерная геология**
Научный журнал **ГеоРиск**
Научный электронный журнал **Арктика и Антарктика**
Научно-технический журнал **КриосфераЗемли**

## СПОНСОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирское отделение Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт»

ООО «АПЕКСГЕО»

## МИКРОБИОМ КРИОГЕННЫХ ПОЧВ РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНОВ ЕВРАЗИИ

***Е.В. Абакумов[1], Т.И. Низамутдинов[1], Сиджонг Янг[2], Ксяодонг Ву[2]***
*[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*
*[2]Северо-Западный институт экологии и природных ресурсов, Ланьчжоу, Китайская народная республика*

Микробиом мерзлотных почв изучен недостаточно. Имеющиеся данные очень локальны и касаются, в основном, точечных объектов, изученных разными коллективами. В данном исследовании проведено сопоставление собственных данных о таксономическом разнообразии микробиома мерзлотных почв различных регионов Евразии.

Были получены результаты мета-анализа почвенных микробных сообществ Сибири, северо-восточного Китая и Цинхай-Тибетского плато. Использовали данные NGS-секвенирования ДНК микробных сообществ из 730 образцов почвы, отобранных на территориях Западной Сибири, севера Европейской части России, Полярном Урале, Восточной Сибири, северо-восточного Китая, Цинхай-Тибетского плато и гор Циляньшань. Анализ включал оценку альфа- и бета-разнообразия микробных сообществ, идентификацию коровых таксонов и построение сетевых моделей. Данные были сгруппированы по географическим регионам, экосистемам (тайга, тундра, альпийские луга, альпийские степи) и типам землепользования (сельхозугодья, естественные ландшафты и карьеры). Было установлено, что видовое богатство микробиома в северо-восточном Китае значительно ниже среднего уровня разнообразия всего изученного микробного сообщества. В то же время, в Европейской России, тундре и сельскохозяйственных почвах выявлено статистически более высокое видовое богатство по сравнению с общим набором данных. Было выявлено, что в микробных сообществах доминировали представителями филумов Pseudomonadota, Acidobacteriota, Actinomycetota и Bacteroidota. Относительная численность филумов Pseudomonadota и Actinomycetota продемонстрировала противоположные паттерны распределения по регионам. В совокупности эти четыре филума составили приблизительно 89% от общего состава микробного сообщества. Анализ бета-разнообразия показал, что структура сообществ в целом отражает географическую группировку: образцы с Цинхай-Тибетского плато образовали когерентный кластер с высокой внутрирегиональной схожестью, тогда как некоторые образцы из северо-восточного Китая и Сибири проявляли более сходный микробный состав. Выявлены индикаторные таксоны для групп образцов с Цинхай-Тибетского плато и северо-восточного Китая. В частности, представители бактериальной линии AD3 (также известной как Dormibacteraeota) и семейства Burkholderiaceae были обнаружены с высокой частотой в почвах северо-восточного Китая. В противоположность этому, для сибирского датасета индикаторные таксоны не были выявлены. Сетевой анализ выявил четыре основных модуля (кластера) из общего числа 267 узлов (микробных видов). Представители этих четырех модулей в совокупности вносили вклад от 11,8 до 88,5% в общую численность микроорганизмов и до 85,5% в общую метрику расстояния Брей-Кертиса. Представители модуля M1 встречались лишь эпизодически в почвах лесотундры, однако проявляли повышенную встречаемость в сельскохозяйственных почвах и почвах карьеров почвах и были редки в естественных почвах, что указывает на их экологическую или функциональную роль в антропогенно нарушенных почвах. Аналогичным образом, представители модуля M2 также существенно снижали свое обилие в лесотундре и естественных почвах. Модули M1, M2, M3 и M4 были особенно богаты в таежных почвах. Эти данные свидетельствуют о том, что долгосрочная антропогенная деятельность привела к изменению механизмов формирования микробных сообществ по сравнению с естественными почвами.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 24-44-00006

## ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВЕННО-ИСТОРИЧЕСКОГО ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА

***А.Д. Абрамов[1,2], О.М. Лисицына[1,3]***
*[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*
*[2]Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень*
*[3]Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск*

Одним из важных направлений геокриологии является геокриологический прогноз. В производственных целях уже давно осуществляется техногенный геокриологический прогноз, зачастую отождествляемый с обычным теплотехническим расчетом, тогда как естественно-историческому геокриологическому прогнозу уделяется меньше внимания. Несмотря на то, что мы живем в парадигме глобального изменения климата, процесс повышения температуры воздуха может неоднозначно влиять на геокриологические условия.

По определению В.А. Кудрявцева «задача составления прогноза заранее предопределяет знание всех параметров природной среды, определяющих геокриологическую обстановку. Поэтому прогноз изменения геокриологических условий должен составляться только на базе изучения общих и частных закономерностей формирования и развития мерзлых толщ» [1]. Многофакторность изменения природной среды (и верхних граничных условий) требует более серьезного подхода к прогнозированию, для данных целей существует естественно-исторический геокриологический прогноз (ЕИГП).

Первоначально под естественно-историческим геокриологическим прогнозом В.А. Кудрявцев подразумевал «прогноз изменения мерзлотных условий, связанных с естественным ходом динамики вечной мерзлоты в соответствии с естественным ходом изменения геологической и географической среды» [1]. Позднее С.Ю. Пармузин дал более развернутое определение: «Естественно-исторический прогноз включает прогнозную оценку изменения характеристик многолетнемерзлых пород и протекающих в них процессов под влиянием естественной динамики климата, неотектоники, уровня мирового океана, процессов денудации и осадконакопления, ледяных покровов, гидрогеологических, гидрологических и геоботанических условий. Сюда же можно отнести прогнозную оценку обратного влияния изменения геокриологических характеристик на компоненты геосистемы». Данное определение вошло в учебники и монографии по геокриологии [2, 3 и др.]. В такой постановке начальная точка ЕИГП сдвигается на сотни тысяч лет в прошлое для учета длиннопериодных изменений климата и крупных геологических событий (оледенений, трансгрессий моря и пр.).

Для практики ЕИГП следует разделять на ретроспективный и перспективный прогнозы. Ретроспективный прогноз обращён к прошлому, перспективный - направлен в будущее от настоящего времени. Ретроспективные прогнозы для оценки динамики геокриологических условий в прошлом и определения современной мощности многолетнемерзлых пород, исходя из палеогеографической обстановки и с применением различных расчетных методов, сделаны для различных регионов России [4-7 и др.]. В перспективном прогнозе для коротких отрезков времени (десятки лет) в настоящее время можно оценить влияние на геокриологические условия естественной динамики климата и, в меньшей степени, геоботанических условий. Выполнение ЕИГП в полном объеме – задача трудоемкая и требует большой квалификации исследователя и поэтому практически не проводится. Методика такого прогноза, включающего и ретроспективный, и перспективный этап, с применением гармонического анализа, разрабатывалась Л.Н. Максимовой [8 и др.].

В ЕИГП следует выделить переходный эпигнозный этап, охватывающий промежуток времени от начала проведения режимных термометрических наблюдений до настоящего времени. Эпигноз, т.е. прогноз по полученному фактическому материалу, позволяет проверить достоверность принятой схемы количественного прогноза. При незначительном расхождении расчетных результатов с фактическими выбранную схему можно применять для перспективного прогноза.

При выяснении закономерностей формирования температуры пород при эпигнозе и составлении перспективного прогноза особое внимание следует уделять выбору «эталонной» термометрической скважины. В отделе геокриологии ВСЕГИНГЕО [9] при анализе пространственных температурных полей установлено, что среднегодовая температура пород определяется комплексом природных условий в пределах участка, площадь которого равна площади круга радиусом не менее десятикратной величины глубины нулевых годовых амплитуд. Соответственно, скважина должна быть заложена в центре такого воображаемого круга. Чем ближе скважина расположена к границе соседнего ландшафтного района (естественного или техногенного), тем больше температура пород будет искажаться за счет влияния соседних температурных полей.

ЕИГП может быть общим и частным. Общий прогноз подразумевает прогнозирование изменения всех характеристик геокриологических условий: среднегодовой температуры пород, прерывистости распространения многолетнемерзлых пород (ММП), положения кровли ММП, льдистости верхних горизонтов ММП, мощности ММП, криогенных геологических процессов. Частный ЕИГП исследует изменение отдельных геокриологических характеристик. В настоящее время активно развивается количественный прогноз изменения среднегодовой температуры пород. С этой характеристикой связано и изменение других геокриологических характеристик.

Самым упрощенным способом прогнозирования среднегодовой температуры пород, который применяется, является метод экстрополяции линейного тренда, полученного на эпигнозном этапе по данным термометрических наблюдений. Такая прогнозная оценка будет сугубо ориентировочной.

В любых расчетных методах определения среднегодовой температуры пород в качестве входных параметров (верхних граничных условий) используются климатические характеристики, в первую очередь среднегодовая температура воздуха. Установлено по данным метеостанций, что с середины 60-х годов прошлого века происходит устойчивое повышение температуры воздуха. Потепление климата вызывает деградацию мерзлоты, т.е. повышение среднегодовой температуры пород, увеличение глубины сезонного оттаивания пород, увеличение площади таликов, а в южной геокриологической зоне - появление несливаюшейся мерзлоты.

Ход изменения температуры воздуха в будущем исследователями определяется в основном двумя способами: 1) экстрополяцией по линейному тренду, полученному по данным метеостанций [10] или сценариям ВМО и Росгидромета и 2) с учетом короткопериодных [11-13] и длиннопериодных [14] колебаний температуры воздуха.

В последние годы появляется все больше появляется публикаций о необоснованно завышенном вкладе антропогенного фактора (парниковых газов) в рост глобальной температуры воздуха. Б.Г. Шерстюковым [15] на основе анализа научных публикаций и авторских результатов сформулированы недостатки существующего обоснования антропогенной гипотезы о причине глобального потепления. Им показано, что современные изменения климата являются проявлением долгопериодных природных колебаний и связаны с циклическими воздействиями космоса на глобальную океаническую циркуляцию. Л.Н. Максимовой [8] показано на примере 6 метеостанций, что при учете колебаний климата с периодом от 60 до 300 лет в ближайшие десятилетия намечается сильное отклонение температуры воздуха от линейного тренда, который принимался на начало XXI века. Вследствие этого применение линейного тренда в долгосрочном ЕИГП может привести к значительным ошибкам.

ЕИГП с использованием в качестве входного изменяемого параметра только среднегодовой температуры воздуха будет очень ориентировочным. При анализе данных изменения температуры воздуха следует дополнительно определять ход изменения летней температуры воздуха и продолжительности летнего периода, что необходимо при использовании некоторых расчетных схем.

Повышение температуры воздуха может приводить к росту атмосферных осадков. Так, в районах западной Якутии по данным большинства метеостанций за последние 60 лет произошло увеличение продолжительности теплого периода и увеличение суммы среднесуточных температур и осадков за теплый период [16].

Изменению количества атмосферных осадков в настоящее время уделяется несправедливо мало внимания по сравнению с температурой воздуха, хотя известно какое сильное влияние на температурный режим пород оказывает снежный покров. Например, на западном Ямале на фоне повышения среднегодовой температуры воздуха и снижения средней зимней высоты снежного покрова прогнозируется медленное сокращение его отепляющего влияния на температуру пород [17].

При составлении долгосрочного ЕИГП также необходимо учитывать также и неклиматические факторы, которые влияют на формирование теплооборота в породе и которые изменяются при изменении климата. Такими факторами, в первую очередь, являются: 1) растительность (как древесно-кустарниковый ярус, так и мохово-лишайниковый напочвенный покров); 2) оторфованный горизонт или торф в верхней части разреза; 3) естественная влажность пород сезонноталого слоя.

Изменение температуры и осадков приводит к изменению неклиматических факторов Известно, что при увеличении продолжительности вегетационного периода высокие теплоизолирующие свойства напочвенного покрова препятствуют значительному повышению температуры пород и увеличению глубины сезонного оттаивания. Увеличение сомкнутости крон древесного яруса и степени проекционного покрытия кустарников приведет к уменьшению эффекта повышения температуры воздуха. С другой стороны, увеличение густоты кустарника ведет к уменьшению плотности снежного покрова.

В настоящее время некоторыми исследователями уже отмечено смещение границы тундры к северу. В ходе многолетних наблюдений на геокриологических стационарах ИКЗ и ИМ СО РАН появляются фактические данные для количественных оценок изменения растительности. На севере Западной Сибири продвижение границы предтундровых редколесий к северу составило 30–40 км с 1974 по 2008 гг. [18], а высота мохового покрова возросла с 2001 г. по 2021 г. с 2 до 4,1 см [19]. В Центральной Якутии изменение термического состояния слоя годовых теплооборотов в естественных

лесных ландшафтах выражено слабо. На открытых луговых ландшафтах тенденция повышения среднегодовой температуры пород в 2 раза больше, чем в лесных комплексах [20].

Большую сложность представляет определение изменения составляющих радиационно-теплового баланса и среднегодовой температуры на дневной поверхности.

Учитывая вышеупомянутые факторы при прогнозировании возникает коридор прогнозной неопределенности, ограниченный крайними случаями: самым «холодным» и самым «теплым» вариантам прогноза. Большинство исследователей в таком случае стараются приближать свой прогноз к медианным значениям, хотя достовернее давать диапазон изменения прогнозных характеристик.

Итогом ЕИГП для конкретных территорий являются прогнозные карты разного содержания. К сожалению, во многих работах не всегда четко сформулированы математические модели и задание начальных климатических и геокриологических условий. Примером карт могут быть две работы [10 и 21]. В них изложена методика их составления, что позволяет в дальнейшем совершенствовать подход и уточнять их содержание при появлении новых входных параметров. Содержание карт примерно одинаковое (прогнозируемые температуры пород и степень деградации мерзлоты), но методики сильно отличаются. В первой работе [10] представлены карты на прогнозируемый период 100 лет на территорию Западной Сибири и России, во второй – на 50 лет для Пур-Надымского междуречья (Западная Сибирь) [21]. При составлении карты [21] для перехода от изменений температуры воздуха к изменению температуры пород использовался коэффициент, равный отношению тренда температуры пород к тренду температуры воздуха [22].

Таким образом, для ЕИГП существуют методические основы, разрабатываемые с 70-х гг. прошлого века, и аналитические и численные методы расчета прогнозируемых геокриологических характеристик. Вместе с тем, остаются проблемы, связанные с назначением входных параметров прогноза: выбор и обоснование сценария изменения температуры воздуха, определение хода изменения неклиматических параметров во времени и др.

***Литература***

1 Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геокриологических исследованиях / под ред. В.А. Кудрявцева. — М.: Издательство Московского университета, 1974. — 432 с.

2 Ершов Э.Д. Общая геокриология: Учеб. для вузов. — М.: Недра, 1990. — 559 с.

3 Пармузин С.Ю. Виды и методы прогноза // Основы геокриологии. Ч. 6. Геокриологический прогноз и экологические проблемы в криолитозоне / под ред. Э.Д. Ершова. — М.: Изд-во МГУ, 2008. — С. 18–37.

4 Romanovskii N.N., Hubberten H.-W. Results of Permafrost Modelling of the Lowlands and Shelf of the Laptev Sea Region, Russia // Permafrost and Periglacial Processes. — 2001. — Vol. 12. — P. 191–202.

5 Ершов Э.Д., Левантовекая Н.П., Максимова Л.Н., Медведев А.В. Динамика мерзлых толщ: палеореконструкции для межгорных впадин Индигиро-Колымского среднегорья // Криосфера Земли. — 1999. — Т. III, № 3. —С. 24-31.

6 Лисицына О.М., Рагулина Е.О. Особенности формирования мерзлых толщ на низменностях Чукотки в среднем плейстоцене – голоцене // Материалы Третьей конференции геокриологов России. — МГУ им. М.В. Ломоносова, 2005. — Т. 3. — Ч. 6. Региональная и историческая геокриология. Часть 7. Геофизические исследования в криолитозоне. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — С. 167–174.

7 Gavrilov A., Pavlov V., Fridenberg A. et al. The current state and 125-kyr history of permafrost on the Kara Sea shelf: modeling constraints // The Cryosphere. — 2020. — Vol. 14. — P. 1857–1873. — DOI: 10.5194/tc-14-1857-2020.

8 Ершов Э.Д., Максимова Л.Н., Медведев А.В. Комплексная методика определения верхних граничных условий для целей геокриологического прогноза (на геологические и исторические отрезки времени // Материалы Первой конференции геокриологов России. Кн. 2. — М.: Изд-во МГУ, 1996. — С. 292–308.

9 Методы региональных инженерно-геокриологических исследований для равнинных территорий. — М.: Недра, 1986. — 207 с.

10 Ершов Э.Д., Козлов А.Н., Пармузин С.Ю. и др. Деградация криолитозоны России при глобальном потеплении климата // Материалы Первой конференции геокриологов России. Кн. 2. — М.: Изд-во МГУ, 1996. — С. 319–328.

11 Хрусталев Л.Н., Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И., Емельянова Л.В., Кауркин В.Д., Чжан Р.В. Прогноз среднегодовой температуры воздуха на территории республики Саха (Якутия) по результатам авторетроспективного анализа // Криосфера Земли. — 2002. — Т. VI. — № 3. — С. 66–

74.

12 Клименко В.В., Хрусталев Л.Н. Изменение климата и динамика толщ многолетнемерзлых пород на северо-западе России на ближайшие 300 лет // Криосфера Земли. — 2007. — Т. 11. — № 3. — С. 3–13.

13 Никитин К.А. Прогнозный сценарий изменения среднегодовой температуры воздуха на Западном Ямале к 2050 г. на основе авторского анализа // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г. — М.: Добросвет, 2022. — С. 284–288.

14 Максимова Л.Н. Особенности формирования многолетнемерзлых пород в ходе разнопериодных климатических изменений // Основы геокриологии. Ч. 4: Динамическая геокриология / под ред. Э.Д. Ершова. — М.: Изд-во МГУ, 2001а. — С. 344–350.

15 Б.Г. Шерстюков. Глобальное потепление и его возможные причины // 1Гидрометеорология и экология. - 2023. - № 70. - С. 7—37.

16 Петрова А.Н. Изменение некоторых метеорологических характеристик теплого периода в западных районах республики Саха (Якутия) // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 150-летию М. И. Сумгина, г. Якутск, Россия, 22–24 марта 2023 г. / отв. ред.-ры Р.В. Чжан; А.Н. Фёдоров; М.Н. Григорьев. – Якутск: Издательство ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2023. — С. 218 — 220

17 Никитин К.А. Прогнозная оценка термического воздействия снежного покрова на среднегодовую температуру многолетнемерзлых пород Западного Ямала к середине XXI века // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно-методическое обеспечение и практическое решение». – Минск: издательство Белорусский государственный университет , 2022. – С. 405-410

18 Дроздов Д.С., Украинцева Н.Г., Царев А.М., Чекрыгина С.Н. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // Криосфера Земли. — 2010. — Т. XIV. — № 1. — С. 22–31.

19 Малкова Г.В., Дроздов Д.С., Васильев А.А., Пономарева О.Е., Гравис А.Г. Температурный режим и чувствительность мерзлых толщ в условиях современного потепления климата // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 150-летию М. И. Сумгина, г. Якутск, Россия, 22–24 марта 2023 г. / отв. ред.-ры Р.В. Чжан; А.Н. Фёдоров; М.Н. Григорьев. – Якутск: Издательство ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2023. — С. 203 — 206

20 Варламов С.П., Ю.Б. Скачков, П.Н. Скрябин. Устойчивость мерзлотных ландшафтов центральной Якутии к потеплению климата // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 150-летию М. И. Сумгина, г. Якутск, Россия, 22–24 марта 2023 г. / отв. ред.-ры Р.В. Чжан; А.Н. Фёдоров; М.Н. Григорьев. – Якутск: Издательство ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2023. — С. 179 — 182

21 Бердников Н.М. Картографическая визуализация ожидаемого изменения южной границы области распространения многолетнемерзлых пород в Западной Сибири // Криосфера Земли. — 2024. — Т. XXVIII. — № 4. — С. 3–15.

22 Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России. // Криосфера Земли. — 2009. — Т. XIII. — № 4. — С. 32–39.

## ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В КРИОЛИТОЗОНЕ, КАК ОСНОВНОЙ ФАКТОР ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СООРУЖЕНИЙ

***А.Г. Алексеев***
*НИУ МГСУ г. Москва*

Интенсивное строительство сооружений в криолитозоне требует комплексного подхода к сохранению построек в условиях сурового климата и распространения многолетнемерзлых грунтов

(ММГ). Отмечаемые в настоящее время изменения климата, приводящие к повышению температуры многолетнемерзлого грунта усложняют эксплуатацию сооружений при использовании ММГ в мерзлом состоянии (Принцип I). Так повышение температуры воздуха в регионе приводит к повышению температуры грунтов (рис. 1), низкие значения которой обеспечивают устойчивое состояние фундаментов сооружений [1-3]. Прогнозируемая динамика повышении температуры грунтов основания [4-6] приводит к снижению несущей способности оснований фундаментов (рис. 2), причем для сооружений не имеющих охлаждающих устройств (проветриваемое подполье, вентилируемые трубы и каналы, СОУ и др.) снижение несущей способности наиболее интенсивно. Так на примере рис. 2 для Чукотского АО несущая способность грунтов основания сооружения без термической стабилизации снижается с 4100 до 2400 кН за 50 лет, при этом для здания с проветриваемым подпольем данная тенденция существенно мягче: несущая способность снижается с 4100 до 3750 кН, при некотором повышении значений в первое десятилетие эксплуатации.

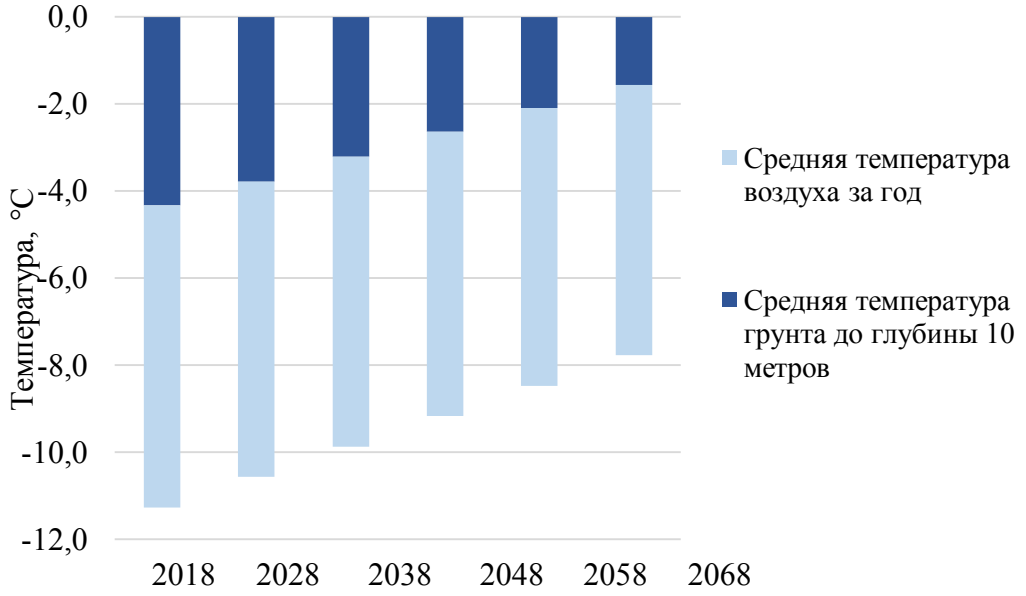



Рис. 1. Тренд изменения средней температуры грунта до 10 метров Чукотского АО в зависимости от изменения климата по модели CMIP3

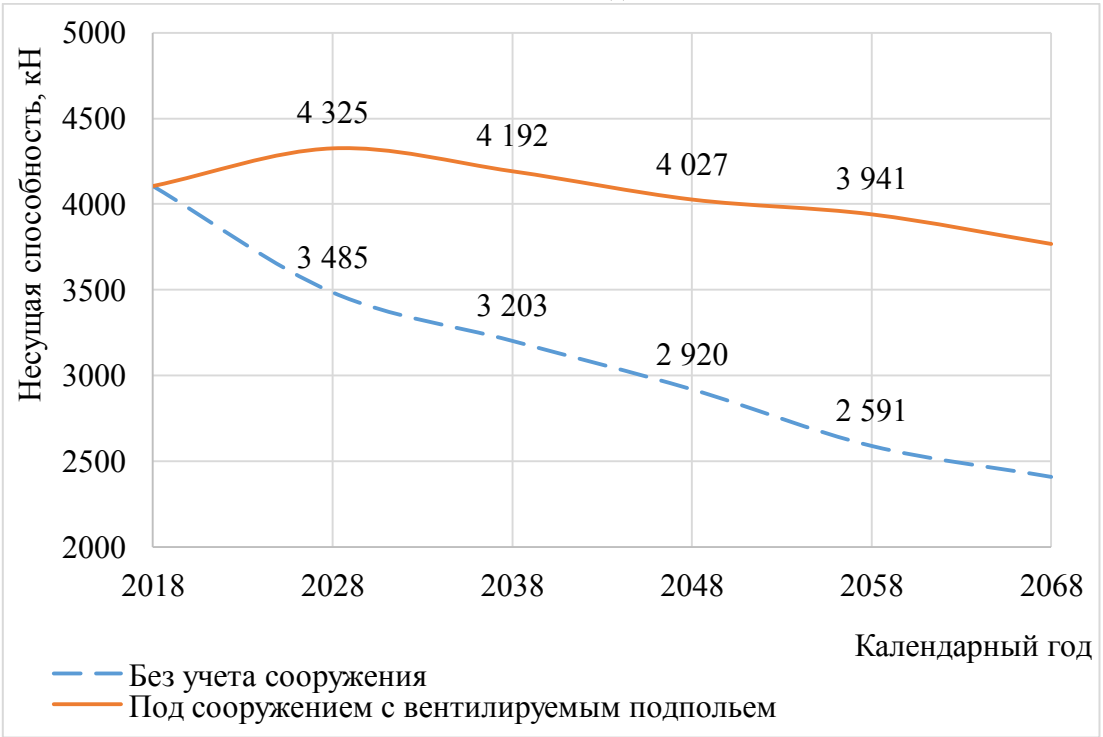



Рис. 2. Изменение несущей способности фундаментов при изменении температуры грунтов

Отмеченные негативные тенденции требуют изучения, прогноза и контроля, для этой цели проводится геотехнический мониторинг [2-4]. Мониторинг включает наблюдения за состоянием температурного режима грунтов основания, гидрогеологическим режимом и деформациями сооружений, проведение мониторинга регламентируется нормативными документами [СП 25.13330]. Проведение мониторинга криолитозоны должно осуществляться комплексно и включать фоновый и геотехнический мониторинги, согласно предложенной схемы (рис.3). Наиболее эффективной, работа системы мониторинга может быть при создании государственной системы мониторинга с единым центром и филиалами в регионах России.

Целью создания единой системы мониторинга является: оценка динамики криогенных, геологических, гидрогеологических условий криолитозоны под влиянием климатических и антропогенных воздействий как в рамках одного региона, так и в пределах всей криолитозоны Российской Федерации.

При этом задачами, решаемыми в рамках предлагаемой системы являются:

- ✓ Оценка состояния существующей сети геотехнического мониторинга ЖКХ, промышленных сооружений, транспортных трасс, аэродромов, гидротехнических и портовых сооружений;
- ✓ Разработка проекта сети геотехнического мониторинга населенных пунктов криолитозоны;
- ✓ Устройство (восстановление) сети геотехнического мониторинга населенных пунктов криолитозоны;
- ✓ Проведение регулярных наблюдений;
- ✓ Сбор и систематизация данных мониторинга;
- ✓ Обработка и анализ данных мониторинга;
- ✓ Прогноз изменения контролируемых параметров;
- ✓ Разработка алгоритма взаимодействия измерительных и охлаждающих устройств.

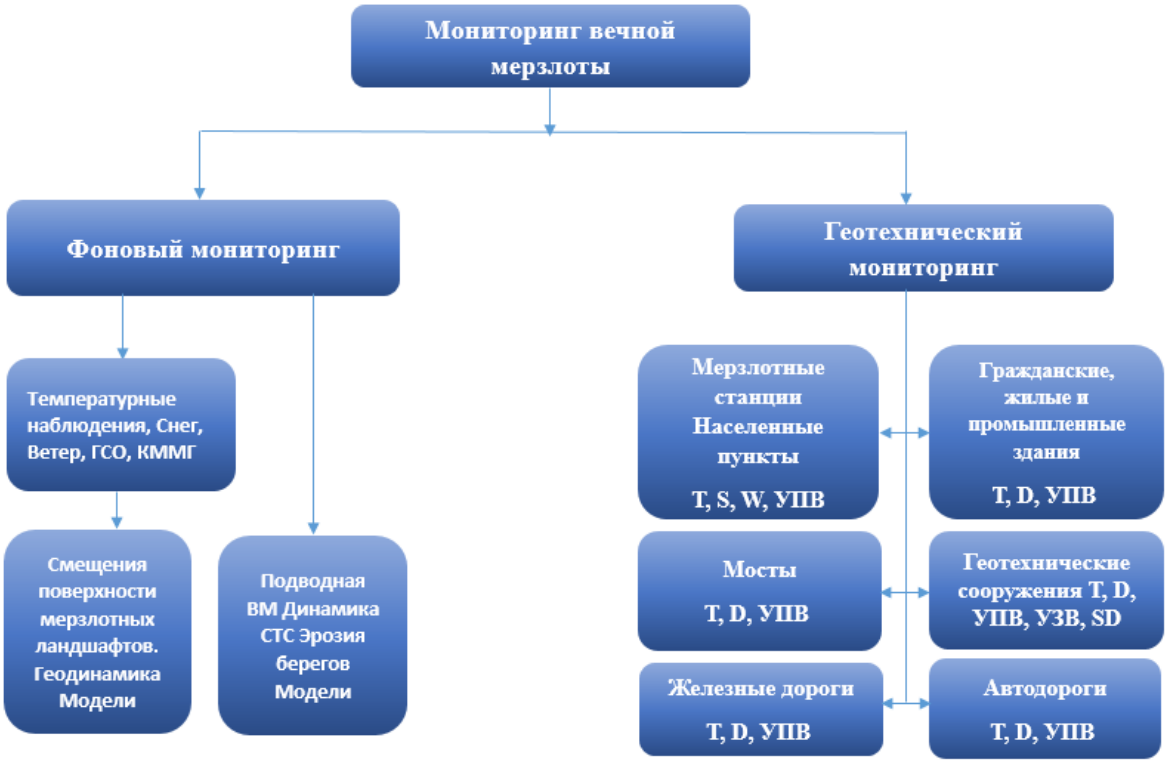



Рис. 3. Схема выполнения комплексного мониторинга криолитозоны.
Условные обозначения: T – температура; S – снег (высота, плотность); W – влажность грунта; УПВ – уровень подземных вод; УЗВ – уровень зеркала водоема; D – деформации сооружения; SD – сейсмодатчики, датчики динамики; ГСО – глубина сезонного оттаивания; КММГ – кровля ММГ

Создание единой государственной системы мониторинга позволит повысить эффективность контроля за состояние ММГ и сооружений, разработать и выполнять прогноз изменения контролируемых параметров в период эксплуатации с учетом изменения климата. Важным этапом прогноза является определение несущей способности фундаментов и деформаций сооружения, в момент наблюдения и на конец эксплуатации сооружения, для принятия своевременных мероприятий по недопущению развития деформаций сооружения, превышающих предельные значения.

Предельно-допустимые значения температуры грунта, обеспечивающие несущую способность фундамента по грунту (с понижением температуры несущая способность основания возрастает) определяются на основании трех значений, используемых в проектной документации: несущая способность фундамента $F_{u,н}$ и $F_{u,к}$ в первый и конечный год эксплуатации и расчетная нагрузка на фундамент $N$. Для анализа средней температуры грунтового основания и несущей способности принят принцип «светофора» с разбивкой на цветовые зоны.

Вначале устанавливаются предельный и допустимые интервалы значения несущей способности по зонам:

- Красная зона $F_{u,м}(t_э) \in (-\infty; N_{вд}]$;
- Оранжевая зона $F_{u,м}(t_э) \in (N_{вд}; \frac{N_{вд} \cdot \gamma_n}{\gamma_t}]$;
- Желтая зона $F_{u,м}(t_э) \in (\frac{N_{вд} \cdot \gamma_n}{\gamma_t}; (F_{u,н} + g_0 \cdot t_э))$;
- Зеленая зона $F_{u,м}(t_э) \in [(F_{u,н} + g_0 \cdot t_э); +\infty)$.

Значение допустимой несущей способности сваи для желтой и зеленой зон определяются путем установления зависимости несущей способности фундамента $F_{u,н}$ и $F_{u,к}$ от периода эксплуатации $t_э$, $g_0$ – параметры линейной регрессии, кН/лет соответственно (рис.4). По установленным значениям допустимой несущей способности фундамента определяются предельное и допустимое значения распределения температуры в грунте.

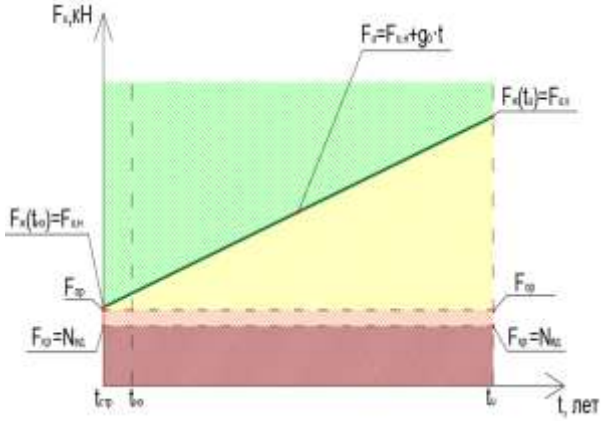



Рис. 4. Зависимость $F_u$ - t

Для конструкций сооружений опасность представляют усилия в элементах, возникающие при неравномерной деформации грунтового основания. Это связывает относительные прогибы (выгибы) и максимальную осадку (подъем) основания [7].

Для определения относительного прогиба фундамента расчет производится на однородном упругом основании с разной конфигурацией при постепенном снижении модуля деформации грунтового основания.

Расчет выполнялся двумя методами:

– моделирование грунтового основания выполнялось с помощью объемного тела, жестко защемленного по нижней стороне с ограничением горизонтальных перемещений по боковым сторонам. Расчет выполнялся итерационно с постепенным уменьшением модуля деформации объемного тела до достижения конструкциями сооружения предельного состояния. Данный метод применяется для сооружений, возводимых по принципу I;

– моделирование основания упругими связями с постепенно снижающейся жесткостью до достижения конструкциями сооружения предельного состояния. Данный метод позволяет произвести оценку системы «сооружение–фундаменты–грунт» и применялся для сооружений, возводимых по принципу II.

При расчете использовались три конфигурации: «Крен»; «Выгиб центра основания»; «Прогиб

центра основания».

«Крен» – конфигурация объемного тела, формируемая таким образом, что оси вращения и направляющая располагаются по торцам фундамента сооружения с последующим вращением на 30–45 градусов от основания сооружения (рис. 5).

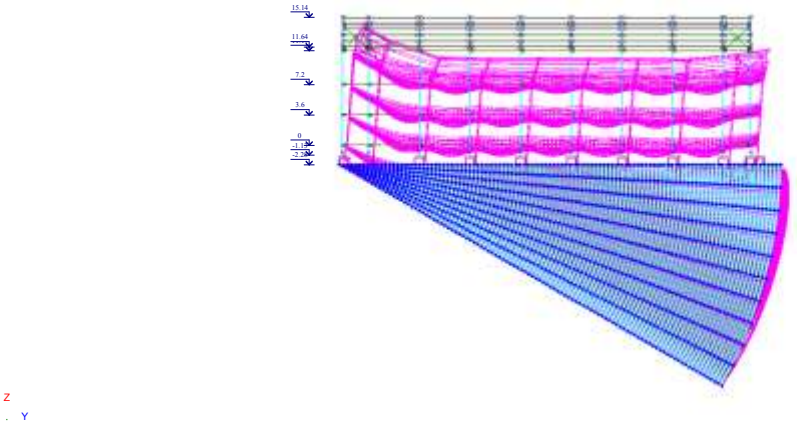


Рис. 5. Расчетная схема «Крен»

«Выгиб центра основания» – конфигурация объемного тела, формируемая таким образом, что ось вращения располагается в геометрическом центре фундамента сооружения, а направляющие располагаются по торцам фундамента сооружения с последующим вращением на 30–45 градусов от основания сооружения. Ось вращения и нижние грани созданных тел обязательно имеют жесткое закрепление для недопущения свободных деформаций конструкций здания и определения предельных значений прочности. Боковые грани закрепляются только от перемещения по горизонтали.

«Прогиб центра основания» – конфигурация объемного тела, формируемая в виде перевернутой пирамиды, основание которой связано с фундаментом сооружения, вершина направлена по вертикали вниз, а по горизонтали ее координаты совпадают с геометрическим центром фундамента. Две из четырех граней закрепляются по всем осям перемещения, а две другие только от перемещений по горизонтали.

В результате расчетов определяются значения предельно допустимых деформаций сооружений, необходимые при проведении геотехнического мониторинга и сравнения с фактическими значениями и прогнозирования.

***Литература***

1. Vasiliev A.V., Drozdov A.G. Gravis et al. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // Environ. Res. Lett., 2020;15(4).

2. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Гео, 2008.

3. Алексеев А. Г. Геотехнический мониторинг на многолетнемёрзлых грунтах. — М.: АСВ, 2019. — 111 с.

4. Брушков А. В., Алексеев А. Г., Дроздов Д. С. и др. Мониторинг вечной мерзлоты. // М.: Академический проект, 2024. — 468 с.

5. Мельников В. П., Брушков А. В., Федоров Р. Ю. К развитию холистического образа криосферы // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11. — № 4. — С. 519–528.

6. Streletskiy D. A., Suter L., Shiklomanov N. I. et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost //Environmental Research Letters, 2019, vol. 14, no. 2, p. 025003.

7. Алексеев А.Г., Панькин Р.В., Виноградова С.В., Пятикристовский К. П. Определение предельных деформаций фундамента каркасного здания, расположенного в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов расчетно-теоретическим методом // Сейсмостойкое строительство безопасность сооружений, 2025. №6. С.

# ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВРЕМЕННЫХ ВОДОТОКОВ КРИОЛИТОЗОНЫ (ЮЖНАЯ ЯКУТИЯ)

***Ю.Ю. Алентьев***
*ИГ РАН, г. Москва*

Изменения гидрологического режима временных водотоков рассмотрено на примере притока реки Токко, Южная Якутия.

Река Токко является правым притоком реки Чара и имеет длину 446 километров. Водосборная площадь реки составляет порядка 23100 км$^2$. Исследуемый водоток (рис.1), являющийся притоком второго порядка реки Токко, имеет выраженное русло. Длина водотока составляет порядка 4 километров, водосборная площадь 5 км$^2$. В среднем течении наблюдаются частично техногенно-измененные участки русла водотока.

Рис. 1. Естественное русло, средние течения водотока

Изменения расходов по длине водотока от истока до среднего течения представлено на графике, приведенном на рисунке 2. График построен на основе гидрометрических работ, выполненных в сентябре 2021 года. Как видно из графика расход воды от истока до среднего течения увеличивается более чем на 90%.

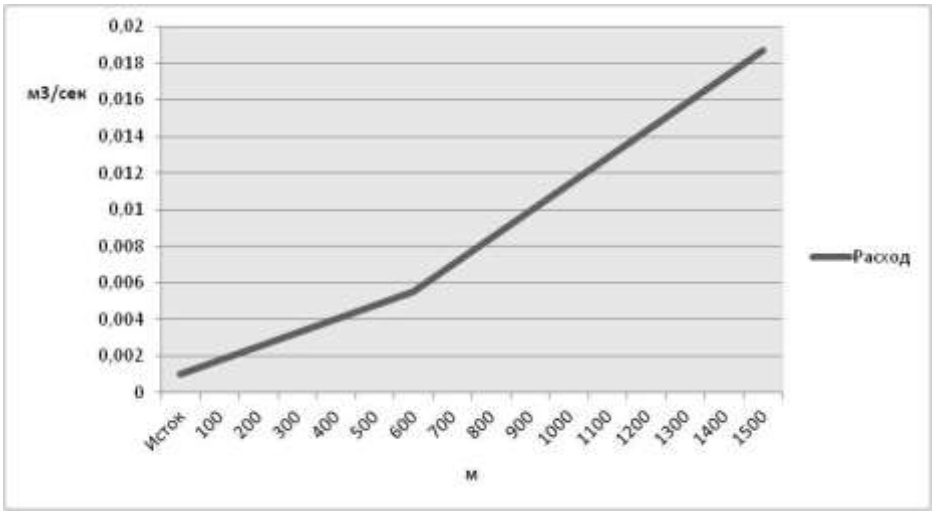



Рис. 2. Изменения расходов по длине водотока

В качестве основных источников питания поверхностных водотоков криолитозоны можно выделить:

- подземные воды;
- атмосферные осадки.

В свою очередь питание поверхностных водотоков за счет подземных вод в районе распространения многолетнемерзлых пород можно подразделить на четыре группы:

- за счет подмерзлотнных вод;
- за счет межмерзлотных вод;
- за счет вод таликовых зон;
- за счет вод сезонно-талого слоя (СТС).

Минерализация подземных вод первых трех групп в криолитозоне находится в диапазоне от умеренно пресных (0,2-0,5 г/л) до рассолов (более 50 г/л) [1]. Воды сезонно-талого слоя характеризуются минерализацией, не превышающей 0,1 г/л, а для данного района на основе непосредственных замеров в районах естественной разгрузки вод СТС (рис.3) их минерализация не превышает 0,011 г/л.

Рис. 3. Естественная разгрузка вод сезонно-талого слоя в районе исследования

Минерализация воды в приустьевой части исследуемого водотока не превышает 0,11 г/л. В устьевой части данного ручья был оборудован стационарный ведомственный гидропост, оснащенный автоматизированным гидростатическим уровнимером. Данные по изменению уровня в водотоке за 2024 год приводятся на графике, представленном на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4 в период с января по май водоток находится в полностью промерзшем состояние. С середины мая до середины июня наблюдается резкий подъем уровня (весенний паводок), питание водотока происходит за счет таяния снега и жидких осадков. В середине июня наблюдается спад уровня, объясняющийся сходом основных талых вод и отсутствиям питания из сезонно-талого слоя. С конца июня до сентября происходит оттаивание сезонно-талого слоя и его воды активно наравне с атмосферными осадками участвуют в питании исследуемого водотока. В сентябре роль вод, содержащихся в СТС, в питании временных водотоков снижается. С конца сентября наступает зимняя межень и, как правило, к середине октября данные водотоки практически полностью промерзают.

На основе выполненных исследований можно сделать вывод о том, что для большинства локальных (временных) поверхностных водотоков Южной Якутии основным источником питания являются атмосферные осадки и подземные воды, содержащиеся в сезонно-талом слое. Это в свою очередь определяет особенности гидрологического режима данных водотоков: полное промерзание в период отрицательных температур (ярко выраженная зимняя межень) и практически отсутствие летней межени.

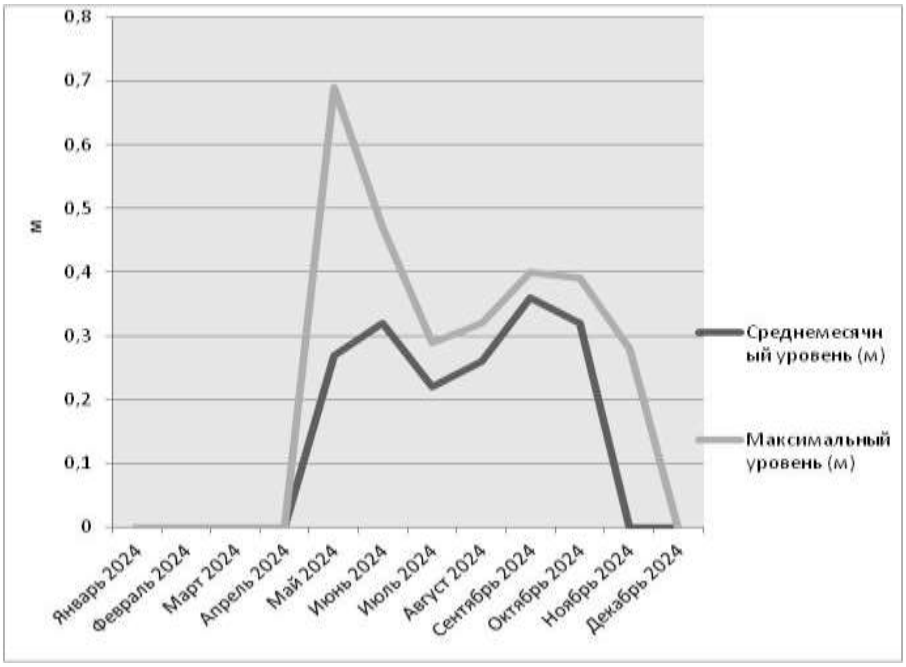



Рис. 4. Изменения уровня воды в водотоке в 2024 году

Исследование выполнено в рамках госзадания FMWS-2026-0003.

***Литература***

1 Алентьев Ю.Ю. Оценка подземной составляющей в притоках реки Оби в районе поселка Аксарка с помощью метода смешения (по минерализации) / Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии: материалы XXXV молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова, Петрозаводск, 1–4 октября 2024 г. – Петрозаводск: КарНЦ РАН., 2024.-С. 10-13.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА КАК КЛЮЧЕВОГО ФАКТОРА ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЙОНА ЕНИСЕЙСКОГО СЕВЕРА

***Д.С. Андрюшин[1], Р.О. Разумовский[1], Т.А. Сидорова[1,2]***
*[1] Игарская геокриологическая лаборатория ИМЗ СО РАН, г. Игарка*
*[2] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т, г. Москва*

**Введение.** Снежный покров Енисейского Севера является важным фактором формирования геокриологических условий. Первые наблюдения за снежным покровом в районе г. Игарка проводились еще в 1950-е [1] и 1970-е гг. [2], в них подчеркивалось значимое влияние снега, как теплоизолирующего фактора, обуславливающего мозаичность геокриологических условий региона. Последнее время изучение снежного покрова в районе Игарки проводилось исключительно на территории метеостанции, поэтому накопленные за последние десятилетия данные не отражают всей специфики условий снегонакопления, зависящей не только от суммы осадков, но и от морфологических характеристик подстилающей поверхности, преобладающих ветров и прочих компонентов ландшафта [3, 4]. Изучение условий снегонакопления, строения снежной толщи и пространственного распределения чрезвычайно важно для составления достоверных моделей условий теплообмена и прогноза состояния геокриологической системы.

Ключевой задачей развития методов пространственного моделирования высоты и запасов снега с использованием ландшафтной стратификации, предикторов дистанционного зондирования и рельефа остаются создание подхода, позволяющего обосновать возможность применимости модели к различным районам между районами, особенно при смене типов ландшафта и режимов ветрового перераспределения [2, 5-7].

Целью исследования является численная оценка пространственно-временной изменчивости свойств снежного покрова, как ключевого фактора геокриологических условий Енисейского Севера.

Основными задачами исследования являются:

- выявление основных закономерностей снегонакопления в пределах участка CALM R40;
- обобщение и критический анализ существующих оценок влияния снежного покрова на тепловое состояние деятельного слоя и температуру грунта.

**Объект исследования.** В качестве ключевого участка выбрана площадка CALM R40 размерами 100×100 м, на которой с 2008 измеряется глубина сезонного протаивания в конце теплого периода. Площадка расположена в 5 км на северо-запад от г. Игарка в пределах ангутихинской озерно-ледниковой равнины, сложенной ритмично-слоистыми суглинками и супесями. На локальном уровне территория приурочена к бассейну руч. Малая Гравийка и представляет собой плоскобугристый торфяник, расчлененный термокарстовыми и термоэрозионными понижениями, заполненными водой. Участок характеризуется активным проявлением сукцессионных процессов и окружен со всех сторон кедрово-лиственничной тайгой.

Мезорельеф ключевого участка бугристо-западинный в центральной и северной части, западины остаются переувлажненными в течение всего года. Превышение максимальной высоты бугров над окружающими урезами мочажин составляет 2 м (а.о. 29.5 м). В южной части, примыкающей к пойме руч. Малая Гравийка, рельеф представлен пологим пологонаклонной (3 - 5°) **к юго-западу поверхностью**, абсолютные отметки уменьшаются до 26.8 м.

Исследуемая территория характеризуется прерывистым и островным распространением ММП (до 80% площади территории). Глубина залегания кровли ММП варьирует от 4 до 13 м на озерно-ледниковой равнине, от 15.5 до 26.0 м под озерами и болотами. Среднегодовая температура грунтов в верхней части разреза до глубины 2 м – положительная, а на отметке 4 –5 м изменяется в пределах -0.2 ÷ -0.3 °С.

**Методы исследования.** В зимний период 2024 – 2025 и 2025 – 2026 гг. (рис.1) проводились режимные наблюдения за высотой снежного покрова по 10 снегомерным рейкам, из которых 6 были установлены 27.09.2024 перед выпадением первого снега с учетом морфологического типа поверхностей: на поверхности плоскобугристых торфяников (3 рейки), в межгрядовых понижениях (2 рейки) и на пологих поверхностях (1 рейка). Дополнительные 4 рейки были установлены в ноябре на залесенных участках, где ландшафтные условия формируют особый тип снегонакопления. Наблюдения за высотой снежного покрова выполнялись с 12.10.2024 (первый снег выпал 04.10.2024) до 10.06.2025 (полный сход снежного покрова на всех рейках). В 2025 г. наблюдения начались с 15 октября.

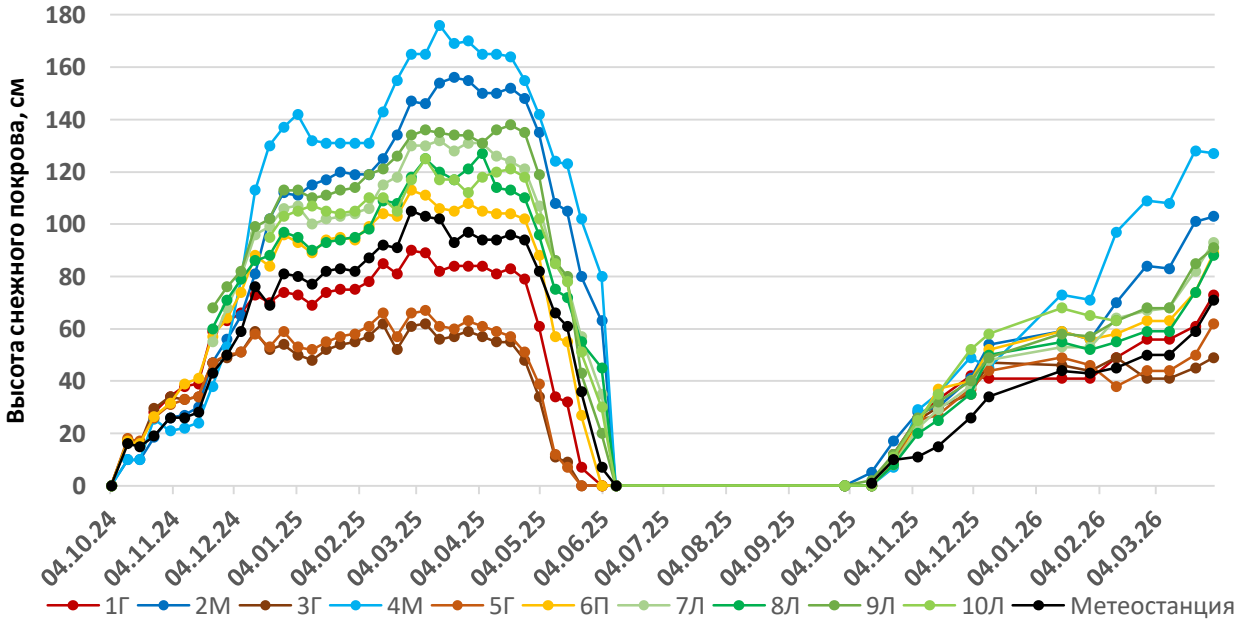



Рис. 1. Высота снежного покрова в период зим 2024 – 2025 и 2025 – 2026 гг.Типы подстилающей поверхности: Г – поверхности гряд торфяников, М – межгрядовые понижения, Л – лес, П – пологие открытые участки

В конце периода снегонакопления 2025 г. была выполнена детальная съемка высоты снежного покрова по регулярной сетке 5×5 м (441 точка) в границах ключевого участка, на основе которой составлена карта пространственного распределения снежного покрова (рис. 2). В этот же день

выполнялась режимная съемка показаний снегомерных реек для сопоставления. Каждая точка с измеренной высотой снежного покрова фиксировалась с помощью GPS-навигатора Garmin GPSmap 60CSx, отмечался тип поверхности (гряда плоскобугристого торфяника, мочажина) и наличие деревьев.

Для определения теплоизоляционных характеристик снежного покрова осенью 2025 г. были установлены логгеры HOBO U12 в толщу снежного покрова и на его подошве в условиях бугра, мочажины и открытого пологого участка с частотой записи, синхронизированной со сроками на метеостанции (1 раз в 3 часа).

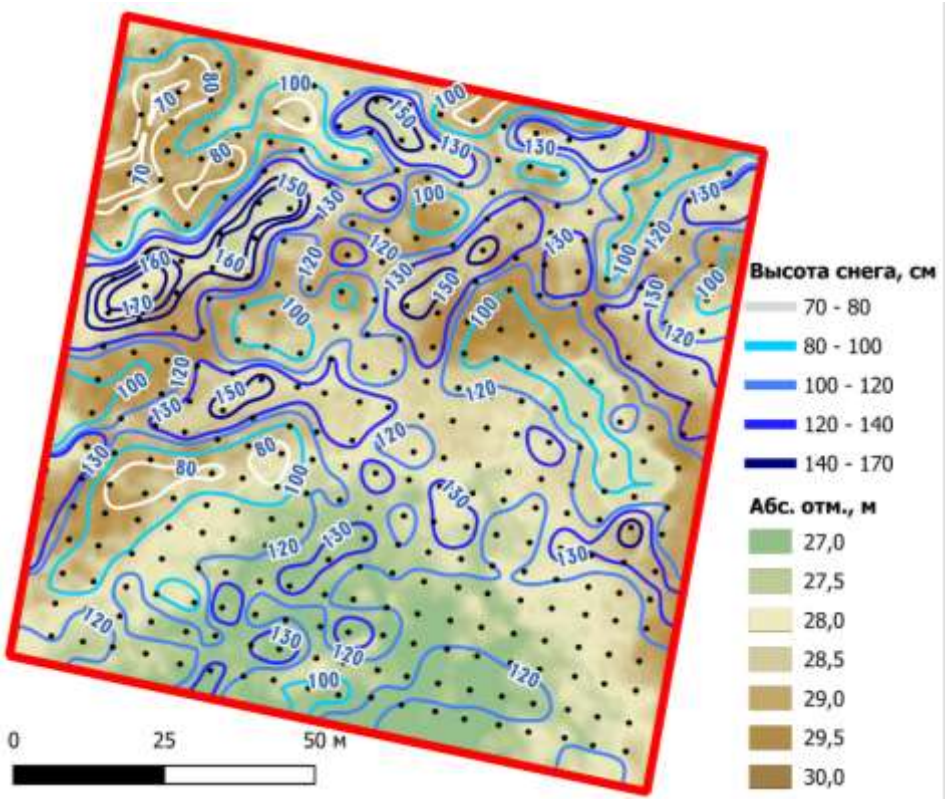



Рис. 2. Пространственное распределение высоты снежного покрова на площадке CALM R40 14.04.2025 г. и цифровая модель рельефа, полученная с БПЛА. Точками отмечены места замеров высоты снежного покрова

Полученные значения толщины снежного покрова были осреднены по всем изучаемым типам местности, на основе полученных данных построены регрессионные зависимости высоты снежного покрова на участках мониторинга от данных метеостанции. В качестве конкурирующего метода использовался повышающий или понижающий коэффициент пропорциональности в зависимости от типа ландшафта, полученный методом наименьших квадратов. Данные зависимости и коэффициенты были впоследствии применены к результатам снегомерных работ зимнего сезона 2025-2026 гг.

**Результаты.** Исследуемые два зимних сезона характеризуются высокой контрастностью гидрометеорологических условий. Сезон 2024–2025 гг. отличается повышенной снежностью: сумма твердых осадков за октябрь–март составила 332 мм, что на 24,3 % превышает климатическую норму. Важно отметить, что в период активного промерзания (октябрь – декабрь) выпало 237 мм осадков (на 44,9 % выше нормы). Сезон 2025 – 2026 гг., напротив, является одним из наиболее сухих: за октябрь – март зафиксировано 198 мм осадков (на 25,8 % ниже нормы), при этом за период октябрь – декабрь – 103 мм (на 37,0 % ниже нормы). За последние 30 лет указанные два сезона представляют собой эталонные крайние варианты выпадения количества осадков в начальный период зимы, что имеет определяющее значение формирования деятельного слоя определенной мощности.

В ходе полевых работ в январе 2025 г. устойчивый снежный покров еще не начал формироваться, тогда как в октябре 2025 г. из-за морозов при отсутствии снега началось активное промерзание грунта. Средняя температура воздуха за октябрь–март 2024–2025 гг. составила −16,0 °C, а за аналогичный период 2025–2026 гг. – −23,1 °C.

В 2025 г. максимальная высота снежного покрова сформировалась в третьей декаде марта и достигла в среднем: 125 см – в лесу, 85 см – на поверхности плоскобугристых торфяников, 162 см – в межгрядовых понижениях, 103 см – на пологих открытых участках. При этом к 1 января высота снега

составляла 80–90 % от максимальной, а к 15 ноября – лишь 25 – 60 %. В сезоне 2025 – 2026 гг. максимум снегозапасов отмечен в первой декаде апреля и составил: около 84 см – в лесу и на открытых участках, 117 см – в межгрядовых понижениях, 58 см – на грядах торфяников. К 1 января высота снега достигла 55–65 % от максимума, к 15 ноября – 40–70 %.

Первичные результаты измерений температуры на подошве снежного покрова показывают, что даже относительно маломощный слой снега (30–40 см) обеспечивает теплоизолирующий эффект порядка 20–25 °С, который постепенно ослабевает к весне по мере повышения температуры воздуха и продолжающегося промерзания снежной толщи и грунта. Основной вклад в формирование температурного режима деятельного слоя вносят ранние морозы в октябре–ноябре, когда снежный покров еще тонок и колебания температуры поверхности близки к колебаниям температуры приземного слоя воздуха. При устойчивом снежном покрове кратковременные оттепели оказывают более значительное отепляющее (снижающее теплопотери) влияние, чем сильные похолодания. Вследствие этого, в начале холодного периода температуры поверхности часто оказывались ниже, чем в январе и феврале, достигая значений от −12 до −18 °С, тогда как средние температуры воздуха в середине февраля не достигали этих величин и составляли −11,8 °С (рис. 3).

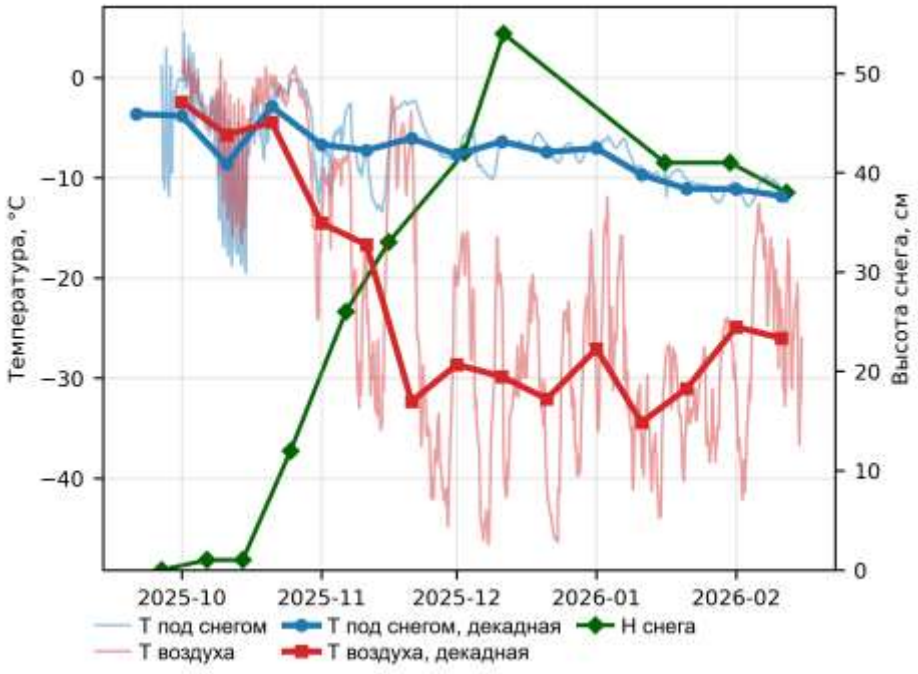



Рис. 3. Суточные и среднедекадные температуры воздуха, под снегом и высоты снежного покрова

Приближенная оценка теплоизолирующего влияния снежного покрова, выполненная по методике В.А. Кудрявцева с дополнениями [8] на основе реальных данных мониторинга, подтверждает указанные закономерности.

Результаты работы прогнозной полиномиальной модели показали приемлемую точность. Среднеквадратическое отклонение (СКО) модели составило от 4 до 8 см, что соответствует 7–13 % от фактической высоты снежного покрова. При этом следует отметить, что реальный разброс измеренных в поле значений достигает 10–20 % вследствие влияния микрорельефа и неоднородности снегонакопления. Для межгрядовых понижений полиномиальная модель продемонстрировала низкую точность. Причиной является специфика задувания понижений в годы с различной снежностью: в исходном сезоне задувание началось в начале декабря, тогда как в верифицируемом году – в начале февраля. При этом простой коэффициент пропорциональности в данных условиях показал существенно лучшие результаты по сравнению с полиномиальной моделью.

**Выводы.** Данные по снегонакоплению в целом соотносятся с данными работы Г.С. Константиновой [1] в своих абсолютных значениях и паттернами снегонакопления в различных условиях. Ключевым результатом мониторинга за период 2024 – 2026 гг. стало создание и верификация модели снегонакопления, которая показала высокую точность (СКО 7 – 13 %) на опорных постах мониторинга в значительно менее снежный год, что является важным для реальной пригодности модели. Использование данных метеостанций в качестве реперной точки для работы модели позволяет делать как ретроспективный анализ, так и на основе существующих трендов

решать прогнозные задачи по снегонакоплению. Дальнейшей задачей является пространственное масштабирование (апскейлинг) разработанных моделей на основе данных площадных снегосъемок.

Для корректной оценки геокриологических условий и прогноза требуется так же корректно учитывать свойства и пространственно-временную изменчивость снежного покрова, поскольку даже имея натурные измерения свойств снежного покрова, расчетные значения его отепляющего влияния отличаются в 1.5 – 2.0 раза, что является весьма приближенным значением и не позволяет с достаточной точностью корректно оценить вклад снега в формирование температурного режима толщи многолетнемерзлых пород.

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта 126020216324-9 «Геотемпературное поле и многолетнемерзлые толщи Азиатской части России. Реакция теплового режима многолетнемерзлых пород на изменение климата»

***Литература***

1. Константинова, Г. С. Влияние снежного покрова на динамику сезонно-многолетнемерзлых пород (на примере Игарки) // Очерки по региональной и исторической криологии: труды Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева АН СССР. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — Т. 17. — С. 46–52.

2. Скрябин, П. Н. Тепловой режим грунтов Енисейского Севера / П. Н. Скрябин, Б. П. Сергеев. — Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1989. — 176 с.

3. Grünewald, T. Are flat-field snow depth measurements representative? A comparison of selected index sites with areal snow depth measurements at the small catchment scale / T. Grünewald, M. Lehning // Hydrological Processes. — 2015. — Vol. 29. — P. 1717–1728.

4. Першин, Д. К. Оценка параметров снежного покрова по данным наблюдений на метеостанциях в небольших речных бассейнах на юге Западной Сибири / Д. К. Першин, Л. Ф. Лубенец, Д. В. Черных // Лёд и снег. — 2022. — Т. 62, № 1. — С. 81–98.

5. Шендер, Н. И. Рекомендации по прогнозу температурного режима грунтов (на примере центрального и восточного участков БАМа). — Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1986. — 58 с.

6. Ohara, N. Characterization of non-Gaussianity in the snow distributions of various landscapes / N. Ohara, A. D. Parsekian, B. M. Jones, R. C. Rangel, K. M. Hinkel, R. A. P. Perdigão // The Cryosphere. — 2024. — Vol. 18. — P. 5139–5152.

7. Mazzotti, G. Exploring the potential of forest snow modeling at the tree and snowpack layer scale / G. Mazzotti, J.-P. Nousu, V. Vionnet, T. Jonas, R. Nheili, M. Lafaysse // The Cryosphere. — 2024. — Vol. 18. — P. 4607–4632.

8. Кудрявцев, В. А. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях: учеб. пособие / В. А. Кудрявцев, Л. С. Гагаруля, С. Н. Булдович, Р. Г. Мотенко. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Геоинфо, 2016. — 512 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЛИЯНИЯ КАМЕННОЙ НАБРОСКИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ММГ

***Е.С. Ашпиз, А.О. Салмин, Н.А. Морозов***
*Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), г. Москва*

Одним из эффективных мероприятий для регулирования температурного режима основания является каменная наброска из сортированного крупнообломочного материала [1-3]. Охлаждающий эффект конструкции обусловлен уменьшением поглощения солнечной радиации поверхностью насыпи и поддержанием конвективного теплообмена в поровом пространстве слоя. Охлаждающий эффект каменной наброски сохраняется в течение всего годового цикла [4].

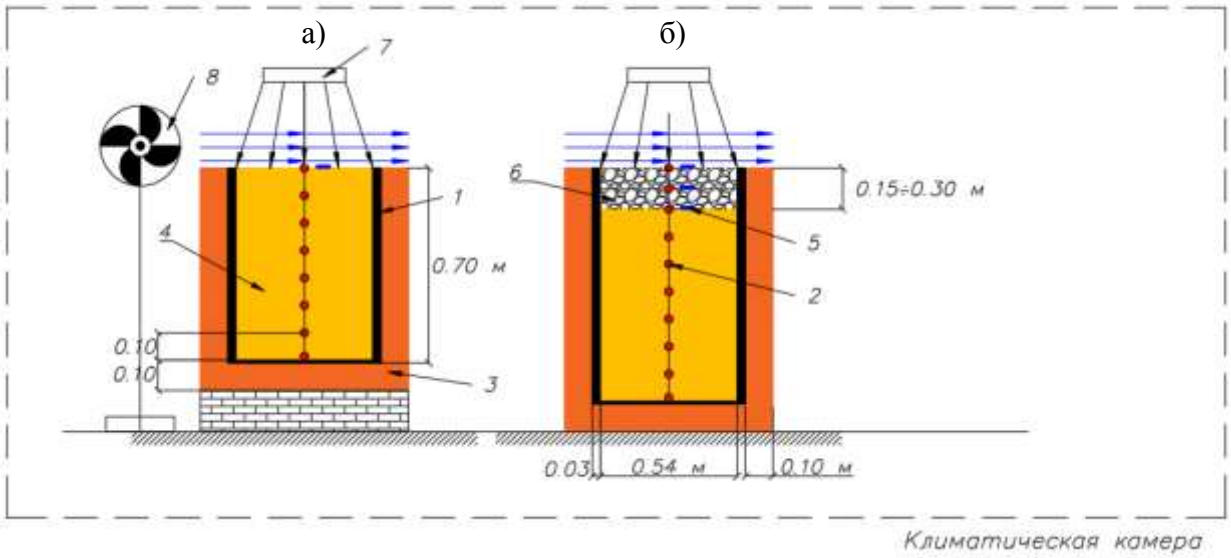
Механизм работы каменной наброски определяется совокупностью процессов теплопроводности и конвекции воздуха в поровом пространстве. Интенсивность теплообмена зависит от геометрических параметров наброски, ее мощности, пористости и внешних природных факторов (ветер, солнечная радиация и т.д.). При этом натурные наблюдения не позволяют изолировать влияние отдельных факторов и установить количественные зависимости между параметрами конструкции и формируемым температурным режимом основания.

Существующие подходы к оценке интенсивности конвективного движения воздуха в каменной наброске [5, 6] основаны на использовании температурных или скоростных характеристик, однако имеют методические ограничения. В частности, определение средних скоростей движения воздуха

требует численного моделирования и не обеспечивает возможности их инструментальной регистрации в натурных условиях. Это затрудняет количественную оценку эффективности конструкции и калибровку расчетных моделей.

Для определения параметров влияния каменной наброски на температурный режим грунтов ММГ были проведены масштабные лабораторные испытания.

Испытания проводились на трех моделях, испытываемых одновременно с одинаковыми факторами влияния. Модель № 1 (рисунок 1, а)– контрольная модель с открытой дневной поверхностью без использования охлаждающей конструкции, модели № 2 и №3 (рисунок 1, б)– модели с каменной наброской на поверхности грунта с минимальной толщиной 0,15 м и 0,3 м.




*1 – Полиэтиленовая труба; 2 – Температурные датчики; 3 – Теплоизоляционный слой; 4 – Грунтовый массив модели; 5 – Тепломер; 6 – Каменная наброска; 7 – Источник солнечного излучения; 8 – Вентилятор (источник ветрового потока).*

Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
а) Контрольный вариант; б) Применение каменной наброски 0,15 и 0,3 м;

Внешние воздействия на модели имитировались в климатической камере, в которой воспроизводились температурные условия окружающей среды, а также воздействие солнечного излучения и ветрового потока.

Испытания проведены на моделях с искусственно уплотненным песчаным грунтом. Масштабный коэффициент моделей по линейным размерам каменной наброски принят 1:4. Исходя из этого, камень в наброске, диаметр которого из практики составляет 200 мм, для обеспечения подобия размеров пор моделировался щебнем фракции 40-50 мм с соотношением сторон минимальных и максимальных размеров его частиц не более 1,3.

Экспериментальные исследования проводились в климатической камере по схеме полного факторного эксперимента (таблица 1), предусматривающего варьирование двух факторов: скорости ветрового воздействия и толщины каменной наброски. Такой подход позволил оценить влияние каждого из факторов, а также их совместное воздействие на температурный режим грунтовой модели.

Проведены три серии опытов, каждая из которых состояла из трех циклов промораживания и оттаивания. Во время испытания создавался температурный режим промораживания-оттаивания, характерный для Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) с соотношением суммы отрицательных градусосуток 1:3. Средняя температура воздуха в климатической камере в фазе промерзания составляла −12 ± 2 °С, а в фазе оттаивания — +14 ± 2 °С. Начальная температура термостатирования моделей составляла 5 ± 2 °С. Продолжительность этапа промерзания составляла 48 ± 2 ч, что обеспечивало промерзание контрольной модели на глубину не менее 0,30 м.

Для имитации солнечной радиации в период оттаивания использовался источник излучения мощностью 150 ± 20 Вт/м².

Таблица 1

Программа масштабных лабораторных испытаний

| № Опыта | Фактор А: Скорость ветра, м/с | Фактор В: Толщина каменной наброски, м | Выходные данные |
|---|---|---|---|
| 1.1 | 0,0 | Без наброски | 1. Температуры грунтов и каменной наброски по глубине по оси моделей, °С (шаг датчиков в соответствии с рисунком 1);<br>2. Величина тепловых потоков в каменной наброске. |
| 1.2 | | 0,15 | |
| 1.3 | | 0,30 | |
| 2.1 | 1,0 | Без наброски | |
| 2.2 | | 0,15 | |
| 2.3 | | 0,30 | |
| 3.1 | 2,0 | Без наброски | |
| 3.2 | | 0,15 | |
| 3.3 | | 0,30 | |

Общий вид открытой поверхности моделей представлен на рисунке 2.

а) контрольная модель

б) модель с каменной наброской

Рис. 2. Общий вид открытой поверхности моделей

На рисунке 3 приведены значения температуры по глубине на конец третьего цикла промораживания и оттаивания.

Все графики температур по глубине для модели №1, как после циклов промораживания, так и после циклов оттаивания, практически совпадают, что указывает на корректность примененного соотношения положительных и отрицательных градусосуток.

При применении каменной наброски в массиве грунта под каменной наброской формируется зона мерзлого грунта, которая увеличивается по глубине и минимальная температура которой снижается при последующих циклах промораживания и оттаивания. Так в модели №2 минимальная температура зоны мерзлого грунта опустилась с -0,56 °С на конец первого цикла промораживания до -1,63 °С на конец третьего цикла промораживания, а для модели №3 с -0,88 °С до -3,38 °С соответственно, что говорит об повышении эффективности охлаждения с увеличением толщины каменной наброски.

Изменение скорости ветра с 0 м/с до 2 м/с для модели №1 (без каменной наброски) увеличивает глубину промерзания на 8-9 см, а также уменьшает минимальную температуру с -4,56 °С при 0 м/с до -6,52 °С при 2 м/с. Также для моделей №2 и №3 существенно изменяются тепловые потоки в слое каменной наброски. В фазе промораживания ветер ускоряет «отрицательные» (охлаждение) тепловые потоки за счет усиления конвекции теплого воздуха, выходящего из пор каменной наброски. В фазе оттаивания ветер ускоряет «положительные» (нагрев) тепловые потоки за счет нагнетания теплого воздуха в поры каменной наброски. При этом существенно увеличивается амплитуда температур на поверхности грунта между последними циклами промораживания и оттаивания относительно серии опытов без воздействия ветра.

Так, на глубине 20 см модели №2 (относительно поверхности грунта) после последнего цикла промораживания температура составила -5,00 °С, после последнего цикла оттаивания -1,88 °С, при том, что без ветра эти температуры установились на -3,56 °С и -1,62 °С соответственно. Для модели №3 с каменной наброской толщиной 30 см при воздействии ветра наблюдаются те же процессы, что и для модели №2.

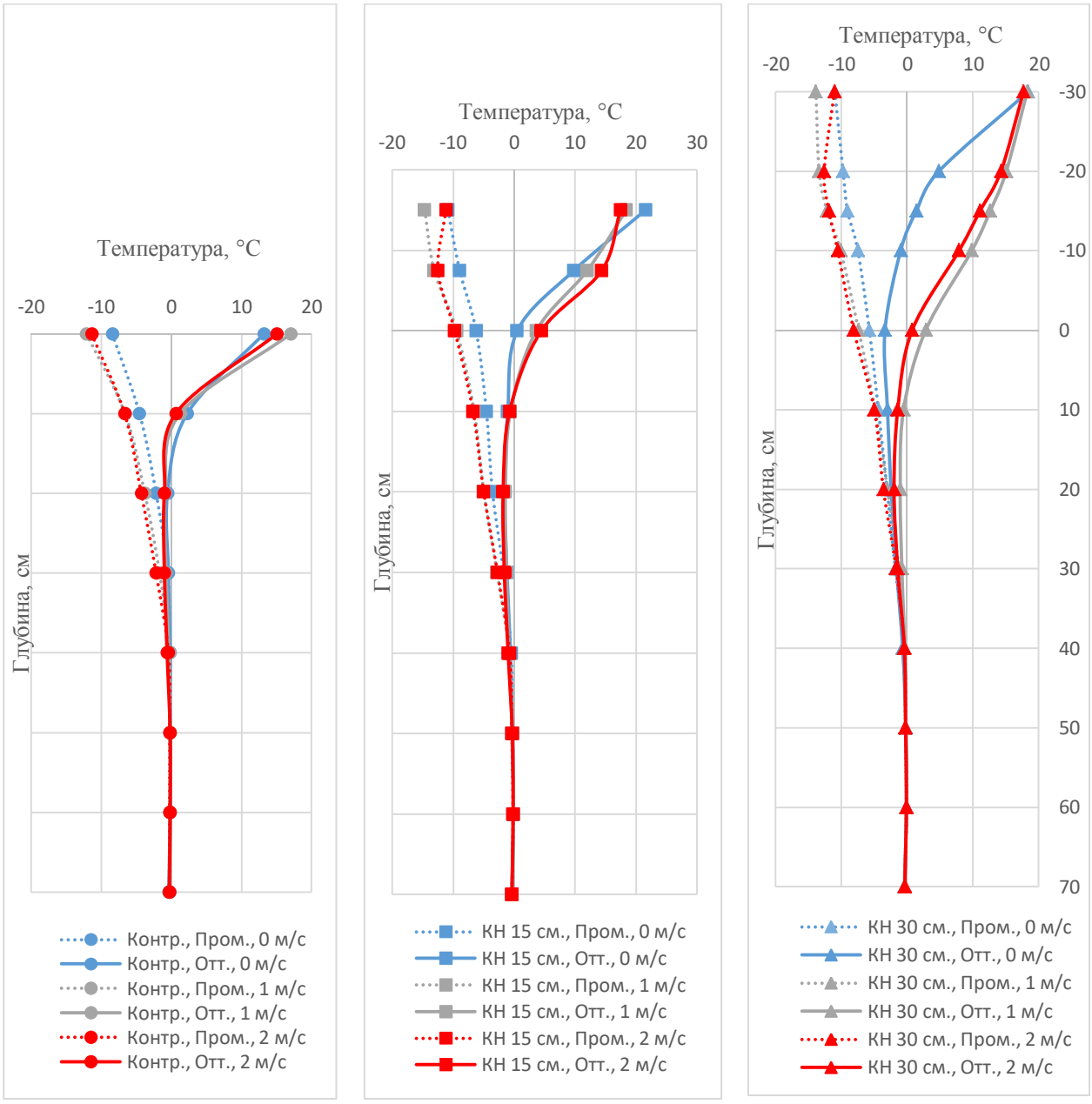
По результатам лабораторных испытаний можно сделать следующие выводы:

1) подтвержден существенный охлаждающий эффект каменной наброски, применяемой в качестве термостабилизирующей конструкции для оснований в криолитозоне;

2) в рамках эксперимента качественно и количественно установлено улучшение охлаждающего эффекта при увеличении толщины каменной наброски;

3) конвекционная составляющая в теплопроводности каменной наброски существенно повышает коэффициент эффективной теплопроводности конструкции в период воздействия отрицательных температур (холодный период года) и уменьшает в теплый период года;

4) при воздействии ветра на модели с каменной наброской существенно изменяются тепловые потоки. Воздействие ветра увеличивает тепловые потоки. При этом существенно увеличивается амплитуда температур на поверхности грунта в цикле промораживание-оттаивание относительно серии опытов 1 (без воздействия ветра). Глубина промерзания грунта в моделях с каменной наброской относительно серии опытов без ветра практически не изменяется.




а) контрольный б) каменная наброска 15 см в) каменная наброска 30 см

Рис. 3. Значения температуры по глубине на конец третьего цикла промораживания и оттаивания

***Литература***

1. Минайлов, Г. П. Способы понижения температуры вечномерзлых грунтов на желез-ных и автомобильных дорогах путем применения каменной наброски: диссертация кандида-та технических наук : 05.23.11. -М, 2003. -194 с.

2. Проблемы стабилизации земляного полотна железных и автомобильных дорог в холодных регионах Китая / Е. А. Кравченко, А. Л. Исаков, Ц. Лю, С. Ли // Известия Транссиба. – 2021. – № 2(46). – С. 94-104.

3. Jianfeng Xu, Douglas J. Goering, Experimental validation of passive permafrost cooling systems, Cold Regions Science and Technology, Volume 53, Issue 3, 2008, Pages 283-297, ISSN 0165-232X, https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.09.002.

4. Буряков, О. А. Оценка интенсивности конвекции воздуха в каменной наброске / О. А. Буряков // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2014. – Т. 271. – С. 13-22.

5. Оловин Б.А, Медведев Б.А. Динамика температурного поля плотины Вилюйской ГЭС. Новосибирск: Наука. 1980.

6. Goering D.J. Passively Cooled Railway Embankments for Use in Permafrost Areas. J. Cold Regions Engineering. ASCE, Sept. 2003. pp. 119-133.

## ЗОНАЛЬНОСТЬ И ДИНАМИКА ГЛУБИНЫ ПРОТАИВАНИЯ В ТОРФЕ ВДОЛЬ БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО ГРАДИЕНТА НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

***Е.А. Бабкина, М.О. Лейбман, А.В. Хомутов***
*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень*

Тип поверхностных отложений играет важную роль в изменении глубины сезонноталого слоя (СТС) в пространстве и времени. Торфяники характеризуются меньшей глубиной СТС и более устойчивы к изменению климата, чем минеральные породы [1]. В то же время, климатическая зональность определяет зональность СТС в пределах однотипных пород [2].

Сравним результаты мониторинга глубины протаивания в торфе в различных биоклиматических подзонах [3], представленные в таблице 1, от подзоны E (Южная тундра) на юге до подзоны C (Южно-арктическая тундра) на севере исследуемой территории, Рис. 1 (по [3]).

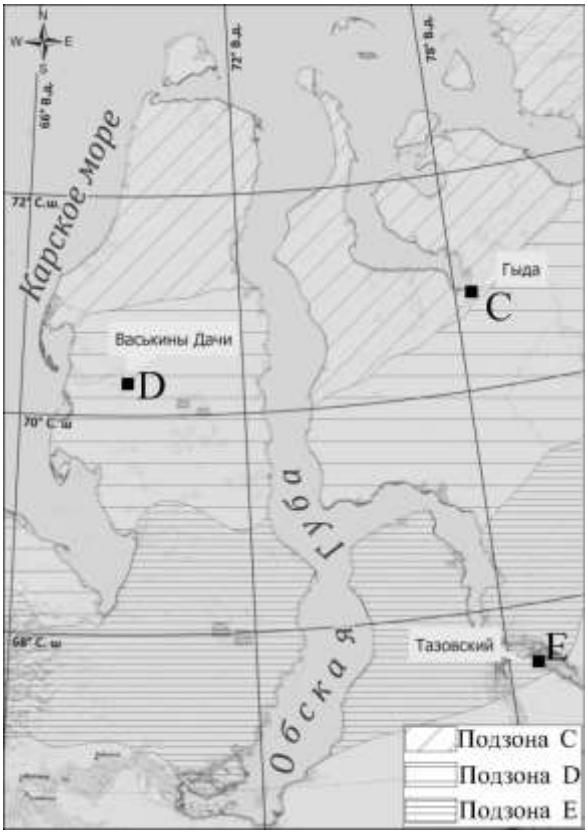



Рис. 1. Фрагмент карты биоклиматической зональности по [3]. Квадратами отмечено местоположение площадок мониторинга СТС в торфе

Площадка C (подзона C) на севере Гыданского полуострова занимает полигональный торфяник с мощностью торфа около 50 см.

Площадка D (подзона D) в центральной части полуострова Ямал также расположена на полигональном торфянике в пределах IV прибрежно-морской равнины мощностью торфа до 1,3 м.

Площадки E1 и E2 (подзона E) на севере Пур-Тазовского междуречья, представляют собой полигональные торфяники на поверхности хасыреев с мощностью торфа 4 м, торфяник E1 непосредственно прилегает к автодороге и характеризуется высоким темпом вытаивания ПЖЛ и деградации полигонального рельефа. Площадка E2 находится в естественных условиях в 1,5 км от автодороги.

Четыре метеостанции предоставляют основной климатический параметр, влияющий на динамику глубины протаивания – сумму положительных температур воздуха (Рис. 2). Приводятся данные по метеостанции Тазовский для южной тундры (E), Марре-Сале для северной тундры (D) и Гыда (2018-2021) плюс Сопочная Карга (2022-2024) для Южно-Арктической тундры (C). С севера на юг широтная зональность проявляется как в изменении сумм положительных температур, так и в глубине протаивания (Таблица 1 и Рис. 3). Так, наименьшая средняя по площадке глубина протаивания наблюдается в Гыде (зона C) на 12% меньше, чем на центральном Ямале (зона D), и на 16-23% меньше, чем в Тазовском (зона E). Более глубокий СТС наблюдается в самые теплые годы — 2016 и 2020.

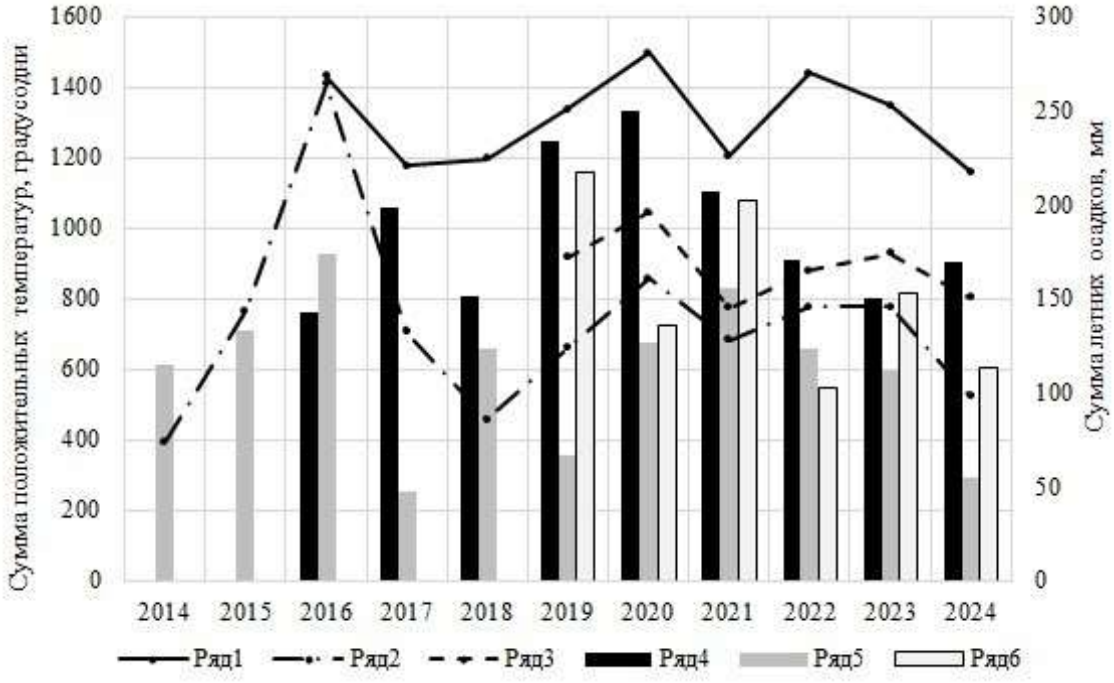



Рис. 2. Сумма положительных температур воздуха, градусодни: 1 – подзона E, 2 – подзона C, 3 – подзона D, и сумма летних атмосферных осадков: 4 – подзона E, 5 – подзона D, 6 – подзона C вдоль биоклиматического градиента севера Западной Сибири с 2014 г. по метеостанциям Тазовский (подзона E), Марре-Сале (подзона D) и Гыда+Сопочная Карга (подзона C)

Таблица 1

СТС, см вдоль биоклиматического градиента на севере Западной Сибири с 2014 года, рассчитанный как среднее арифметическое из измерений в указанном числе точек каждой площадки

| Год | Подзона E, площадка E1 под воздействием насыпи | Подзона E, ненарушенная площадка E2 | Подзона D, ненарушенная площадка | Подзона C, ненарушенная площадка |
|---|---|---|---|---|
| 2014 | | | 41 | |
| 2015 | | | 48 | |
| 2016 | 54 | | 54 | |
| 2017 | 50 | | 39 | |
| 2018 | 52 | 47 | 40 | |
| 2019 | 50 | 48 | 46 | 41 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2020 | 61 | 54 | 51 | 48 |
| 2021 | 61 | 50 | 52 | 43 |
| 2022 | 55 | 51 | 49 | 44 |
| 2023 | 56 | 51 | 51 | 42 |
| 2024 | 52 | 50 | 43 | 41 |
| Количество измерений | 70 | 60 | 49 | 36 |
| Тренд за период наблюдений | +0,27 | +0,36 | +0,26 | -0,25 |
| Тренд за период 2019-2024 гг. | -0,25 | -0,08 | -0,37 | -0,4 |

Динамика глубины протаивания в зависимости от климатических параметров в целом повторяет закономерность на иных типах поверхностей, однако отличается меньшей интенсивностью [1]. Наблюдаемый тренд средних значений глубины протаивания нарушается в 2021 году, когда в подзоне D наблюдается отклонение от тренда, средняя глубина протаивания в торфе даже выше значений, наблюдаемых в подзоне E. Это может быть связано с экстремальными летними осадками в 2021 году согласно данным метеостанции Марре-Сале. При этом на таких типах поверхностей, как песчаные вершины и склоны, а также склоны с суглинистыми породами, в 2021 году средние значения глубины протаивания характеризуются более низкими значениями относительно теплых лет (Рис. 5).

Анализ таблицы показывает, что (1) глубина протаивания на площадке под воздействием насыпи E1 в подзоне E выше значений на расположенной недалеко ненарушенной площадке E2 в той же подзоне; (2) хорошо выраженная широтная зональность СТС нарушается в наиболее теплом и умеренно влажном 2016 г. и умеренно теплом и влажном 2023 г. с одинаковым средним значением СТС в подзонах E и D, а также в 2021 г., довольно холодном и влажном, когда СТС в подзоне D глубже, чем в более южной подзоне E. Таким образом, при экстремумах летней температуры воздуха или летних осадков зональность СТС сглаживается или нарушается.

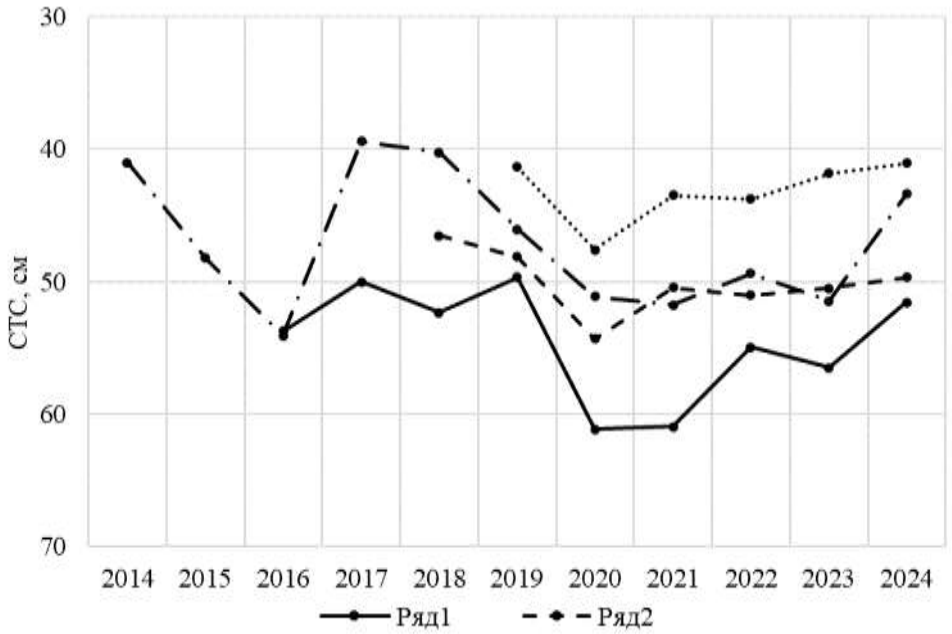



Рис. 3 Глубина протаивания торфяников в разных биоклиматических подзонах: 1 – подзона E, площадка под воздействием насыпи E1, 2 – подзона E, ненарушенная площадка E2, 3 – подзона D, ненарушенная площадка, 4 – подзона C, ненарушенная площадка

Анализ трендов (табл. 1) показал следующее. В подзоне C за период 2019-2024 гг. глубина протаивания несколько снизилась, тренд составил -0,25 см/год. В подзоне D с более длинным рядом наблюдений, охватывающем и экстремально теплый 2016 г., глубина протаивания росла в среднем на 0,26 см/год. В подзоне E на ненарушенной площадке E2 где измерения велись с 2018 г. глубина протаивания увеличилась, тренд составил +0,36 см/год. В то же время, на площадке под воздействием

насыпи автодороги глубина протаивания увеличилась на 0,27 см/год. Тренд на снижение глубины протаивания для более коротких рядов связано с влиянием холодного 2024 г. Определение тренда для последних 6 лет, приведенный в таблице 1, показал снижение глубины протаивания за этот период на всех площадках. Наиболее стабильным СТС оказался на самой южной площадке Е2 с естественными условиями (-0,08 см/год). Сильнее всего понижение температуры воздуха за указанные 6 лет повлияло на динамику СТС на самой северной площадке (-0,4 см/год).

Установлено, что разные типы поверхностей демонстрируют неодинаковую чувствительность к климатическим колебаниям [1, 4, 5, 6].

Согласно результатам, представленным на рис. 4, 5 и 6 амплитуда межгодовых колебаний глубины протаивания в торфяниках меньше, чем в минеральных породах, при этом динамика протаивания соответствует общей тенденции, характерной для разных типов поверхностей. Отклонения от широтной зональности в подзоне D в 2021 и 2023 гг., когда глубина протаивания в торфяниках увеличивалась относительно предыдущих лет, на других типах поверхностей не наблюдались.

В подзоне Е площадка под воздействием насыпи проявляет более яркую реакцию на общее потепление в 2020 и 2021 гг., затем вернувшись к общей динамике. Сопоставление СТС в этой подзоне в торфе и минеральных породах показывает более заметную реакцию СТС на минеральных породах на потепление 2020 г., однако, в последующем СТС слабо реагирует на колебания летней температуры воздуха на всех поверхностях, наименее заметно на ненарушенной площадке торфяника Е2 (Рис. 4).

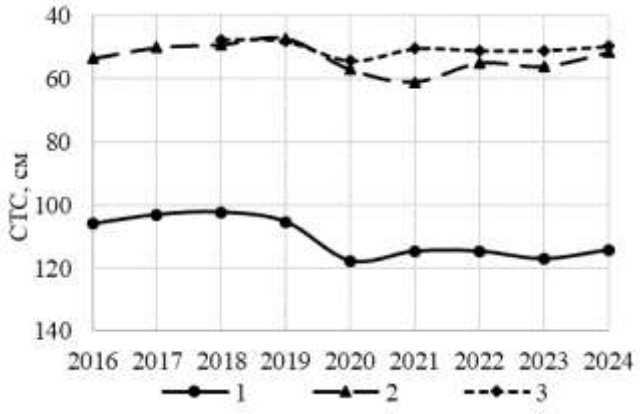



Рис. 4. Глубина протаивания в подзоне Е на различных типах поверхностей: 1 – вершина и склон с супесчано-суглинистыми породами, 2 – торфяник Е1, 3 – торфяник Е2

В подзоне D реакция СТС на ход летней температуры воздуха примерно совпадает на разных поверхностях, в том числе, и на полигональном торфянике в самом теплом 2016 г. Однако, практически не реагирует на потепление 2020 г. Возможно, это связано с меньшим количеством летних осадков в этот год (Рис. 5).

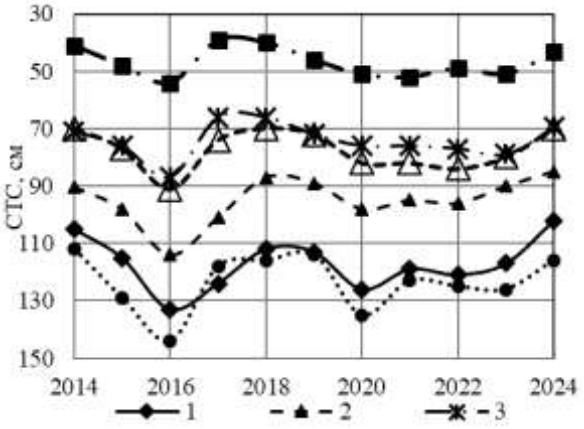



Рис. 5. Глубина протаивания в подзоне D на различных типах поверхностей: 1 – вершина с песчаными породами, 2 – склон с суглинистыми породами, 3 – вершина с суглинистыми породами, 4 – терраса с супесчано-суглинистыми породами, 5 – терраса с песчаными породами, 6 – торфяник, площадка D

В подзоне С не было наблюдений на торфянике в 2016 г., однако, потепление 2020 г. отразилось на глубине протаивания на всех поверхностях, но на торфянике, площадка С, в меньшей степени, чем на минеральных породах (Рис. 6).

Выводы

Результаты исследования показали, что значительных трендов изменения глубины протаивания в торфяниках вслед за климатическим потеплением не наблюдается. За последние годы несмотря на экстремумы сумм летних температур воздуха в 2016 и 2020 гг. наблюдается короткопериодный тренд понижения летней температуры воздуха в рассматриваемых районах, а вслед за ним и тренд снижения глубины протаивания за период 2019-2024 гг.

Межгодовая изменчивость глубины протаивания преимущественно обусловлена флуктуациями сумм положительных температур воздуха и летних осадков. Величина глубины протаивания разных биоклиматических зон закономерно возрастает в соответствии с климатической зональностью с севера на юг. Наибольшие значения глубины протаивания наблюдаются в подзоне Е, а наименьшие в подзоне С. В отдельные годы (2021, 2023) в подзоне D наблюдаются более высокие значения, чем на площадке, не находящейся под воздействием насыпи автодороги, в подзоне Е вследствие специфического сочетания летней температуры воздуха и летних атмосферных осадков.

Годовые тренды глубины протаивания на площадках торфяников с наиболее длинными рядами наблюдений как в подзоне D в естественных условиях, так и в подзоне Е вблизи насыпи автодороги примерно равны и составляют плюс 0,26-0,27 см/год.

Работа выполнена в Институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 126022618021-5).

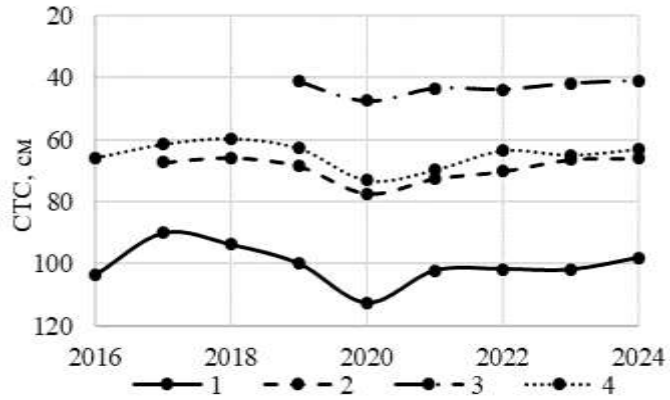



Рис. 6. Глубина протаивания в подзоне С на различных типах поверхностей: 1 – вершина с песчано-супесчаными породами, 2 – вершина с суглинисто-глинистыми породами, 3 – торфяник, площадка С, 4 – заболоченный хасырей

***Литература***

1 Мельников Е.С., Васильев А.А., Лейбман М.О., Москаленко Н.Г. Динамика сезонноталого слоя в Западной Сибири // Криосфера Земли. – 2005. – Т. IX. – №2. – С. 23-32.

2 Лейбман М.О., Хомутов А.В., Орехов П.Т., Хитун О.В., Эпштейн Х., Фрост Дж., Волкер Д. Зональность глубины сезонного протаивания вдоль ямальской трансекты / В сборнике: Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению TICOP: ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. – 2012. – С. 303-308.

3 Walker D. A., Daniëls F. J. A., Matveyeva N. V., Šibík J., Walker M. D., Breen A. L., Druckenmiller L. A., RaynoldsM. K., Bültmann H., Hennekens S., Buchhorn M., Epstein H. E., Ermokhina K., Fosaa A. M., Heiðmarsson S., Heim B., Jónsdóttir I. S., Koroleva N., Lévesque E., MacKenzie W. H., Henry G. H. R., Nilsen L., PeetR., Razzhivin V., Talbot S. S., Telyatnikov M., Thannheiser D., Webber P. J., Wirth L. M. // CircumpolarArctic Vegetation Classification. Phytocoenologia. – 2018. – 48 (2). – P. 181–201.

4 Каверин Д.А., Пастухов А.В., Новаковский А.Б., Биази К., Марущак М., Елсаков В.В. Влияние ландшафтных и климатических факторов на глубину сезонного протаивания в почвах бугристых торфяников (на примере площадки CALM R52) // Криосфера Земли. – 2019. – Т. XXIII – № 2, С. 62-71.

5 Valery I. Grebenets, Vasily A. Tolmanov, Dmitry A. Streletskiy. Active Layer Dynamics Near Norilsk, Taimyr Peninsula, Russia // Geography, Environment, Sustainability. – 2021. – Vol.14. – №4. – P. 55-66.

6 Васильев А.А., Облогов Г.Е., Широков Р.С. Долговременный мониторинг глубины сезонного протаивания пород в типичных тундрах Западного Ямала // Криосфера Земли. – 2023. – Т. XXVII. – №4. – С. 3–13.

## ОЦЕНКА РИСКА ТЕРМОЭРОЗИИ В МОНЕТАРНОМ ВЫРАЖЕНИИ (НА ПРИМЕРЕ АВТОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА)

***С.В. Бадина, Д.М. Богатова, А.В. Прядилина***
*МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва*

Проблема монетарной оценки природных рисков является актуальной темой современных научных исследований. Особое место занимают работы, связанные с прогнозированием ущербов от различных видов геокриологических опасностей в разных географических масштабах [1–2]. Глобальные изменения климата, необходимость своевременной и рациональной адаптации придают большую практическую значимость данному направлению исследований. В соответствии с рекомендациями Рамочной конвенцией Организации Объединенных Наций об изменении климата с 2011 года ряд стран, включая Россию, разработали национальные планы по адаптации. В 2023 году по методическим рекомендациям Минэкономразвития России (Методические рекомендации и показатели по вопросам адаптации к изменениям климата. Утверждены Приказом Минэкономразвития РФ от 13 мая 2021 г. № 267) регионы начали разрабатывать свои собственные «Планы адаптации», где особое внимание должно уделяться оценке экономического ущерба от опасных климатообусловленных процессов и явлений.

Автомобильная инфраструктура является частью критической инфраструктуры [3], поэтому нарушение ее функционирования, вызванное, в частности, чрезвычайными ситуациями природного характера, может негативно влиять на безопасность населения и экономической деятельности на всех территориальных уровнях. Вместе с тем в регионах криолитозоны России автомобильная инфраструктура в значительной степени подвержена разрушениям и деформациям вследствие воздействия опасных геокриологических процессов, в том числе прогнозируется обострение этой проблемы в будущем в связи с изменением климата [4].

В данном исследовании предлагается методический подход к оценке предельной величины вероятных ущербов для линейной части автодорожной инфраструктуры (автодорог с твердым покрытием) на примере процесса термоэрозии. Термоэрозия – это опасный мерзлотный процесс, который представляет собой процесс одновременного теплового и механического (эродирующего) воздействия водных потоков на мерзлые породы [5]. С точки зрения морфологии термоэрозия – это процесс врезания водного потока в мерзлый массив с образованием борозд, рытвин и промоин [6]. Развитие термоэрозии пагубно влияет на недвижимую часть основных фондов экономики, расположенных на территориях распространения многолетнемерзлых пород. В рассматриваемом процессе присутствуют сложные обратные связи: автомобильные дороги, пересекающие многолетнемерзлые грунты, изменяют мерзлотные условия, что может приводить к усилению термоэрозии и, как следствие, – влиять на устойчивость дорожных конструкций [4].

В современных российских исследованиях, связанных с оценкой вероятных ущербов для автомобильных дорог от воздействия различных природных опасностей и климатических изменений, серьезные трудности связаны с отсутствием необходимой статистической информации в открытом доступе. В связи с этим в данном исследовании предлагается использовать нормативный подход для оценки предельной восстановительной стоимости автомобильных дорог, находящихся в зонах высокой термоэрозионной опасности. На сегодняшний день для территории России фактически отсутствуют исследования, посвященные мезомасштабному (на уровне регионов) прогнозированию риска термоэрозии для хозяйственных объектов и инфраструктуры, поэтому данное исследование направлено на восполнение этого теоретико-методологического пробела.

Для выявления зон термоэрозии и прогнозирования ее развития в условиях изменения климата использовались геологические карты, литературные источники и архивные данные. С помощью пакетов ArcGIS выполнялась координатная привязка уклонов поверхности, расчлененности рельефа и геологического строения с данными по льдистости пород [7-8]. Затем на основе современных космических снимков (Google Earth) проводилось картирование областей развития повторно-жильных льдов. Участки были разделены по степени современной активности термоэрозионных процессов. Полученные данные сопоставлены с геологическими и геоморфологическими картами,

что позволило уточнить границы зон с разной интенсивностью развития термоэрозии. Для оценки климатических опасностей учитывалась температура воздуха в конце теплого периода, количество осадков зимой и летом, а также повышение уровня моря [9]. Работа с данными дистанционного зондирования позволила выделять речные долины и характер речных русел. Выделение зон по степени опасности было сделано на основании рекомендаций из вышеупомянутого Приказа Минэкономразвития России № 267, в зависимости от площадей поражения и скорости развития процесса. Результаты оценки опасности термоэрозии для территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) представлены на Рис. 1.

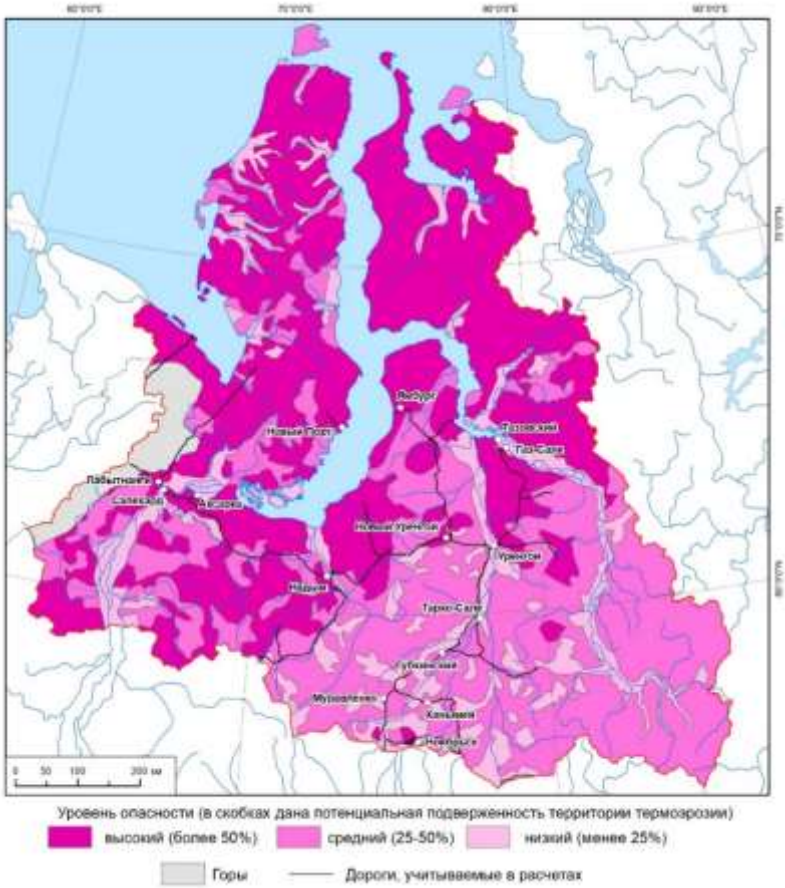



Рис. 1. Опасность развития термоэрозионных процессов в ЯНАО

Оценка экономического ущерба основана на расчете предельных величин стоимости замещения (восстановительной стоимости) автомобильных дорог в разрезе муниципальных образований. Для этой задачи в ArcGIS произведен отбор объектов векторного слоя автомобильных дорог с твердым покрытием регионального, областного, местного значения; рассчитана их протяженность в границах каждого из рассматриваемых муниципальных образований.

За основу стоимостных расчетов принимается актуальный Приказ Минстроя России об утверждении укрупненных нормативов цены строительства по автомобильным дорогам (например, по состоянию на 2025 г. – от 5 марта 2025 г. № 109/пр «Об утверждении укрупненных нормативов цены строительства» Укрупненные нормативы цены строительства. НЦС 81-02-08-2025. Сборник № 08. Автомобильные дороги»).

Алгоритм формирования базы данных:

1. Определение преобладающей высоты муниципального образования над уровнем моря, м: 1. 1300-2500 м; 2. 2500-3000 м; 3. Свыше 3000 м (в соответствии с Табл. 4 указанного Приказа Минстроя).

2. Определение принадлежности муниципального образования к географическим границам дорожно-климатических зон (в соответствии с Табл. 7 Приказа Минстроя).

3. Коэффициент K пер. для региона / зоны региона (в соответствии с Табл. 9 Приказа Минстроя).

4. Коэффициент K пер./зоны для региона (в соответствии с Табл. 10 Приказа Минстроя (если применимо).

5. Коэффициент К рег. 1 (в соответствии с Табл. 11 Приказа Минстроя: маркер температурной зоны (см. Табл. 3 Приказа Минстроя).

6. Коэффициент К рег. 2 (в соответствии с Табл. 12 Приказа Минстроя).

Стоимость полной замены автомобильных дорог в случае реализации потенциальной угрозы природного характера (Cost) для каждого рассматриваемого муниципального образования (j) региона i рассчитывается по формуле (1):

$$Cost_j = S_i * L_j * К пер._i * К\ пер./зоны_i * К рег.1_i * К рег.2_i \quad (1)$$

где $S_i$ – норматив цены строительства рассматриваемого вида дорог i-го региона для базового района в ценах 2025 г. (в соответствии с Приказом Минстроя);

$L_j$ – рассчитанная длина автомобильных дорог в границах j-го муниципального образования;

$К пер._i$ – коэффициент перехода от цен базового района к уровню цен i-го региона (/зоны);

$К\ пер./зоны_i$ – коэффициенты перехода от цен первой зоны субъекта Российской Федерации к уровню цен частей территории субъектов Российской Федерации, которые устанавливаются нормативными правовыми актами субъектов Российской Федерации, как самостоятельные ценовые зоны;

$К\ рег.\ 1,2_i$ – коэффициенты, учитывающие регионально-климатические условия осуществления строительства в субъекте РФ (его части), по отношению к базовому району.

Посредством суперпозиции (наложения) в ArcGIS полученных слоев с автодорогами (с их стоимостями, рассчитанными и добавленными в атрибутивные таблицы) и с данными об опасности термоэрозии выделены зоны максимальной опасности. Определение стоимости замещения участков дорог в ареалах наибольшей опасности позволяет получить предельную величину ущербов от термоэрозии при реализации худшего сценария угрозы.

Результаты расчетов стоимости замещения автомобильных дорог с твердым покрытием и предельных вероятных ущербов для автодорог в зонах с различным уровнем термоэрозионной опасности в разрезе муниципальных образований ЯНАО представлены на карте (Рис. 2).

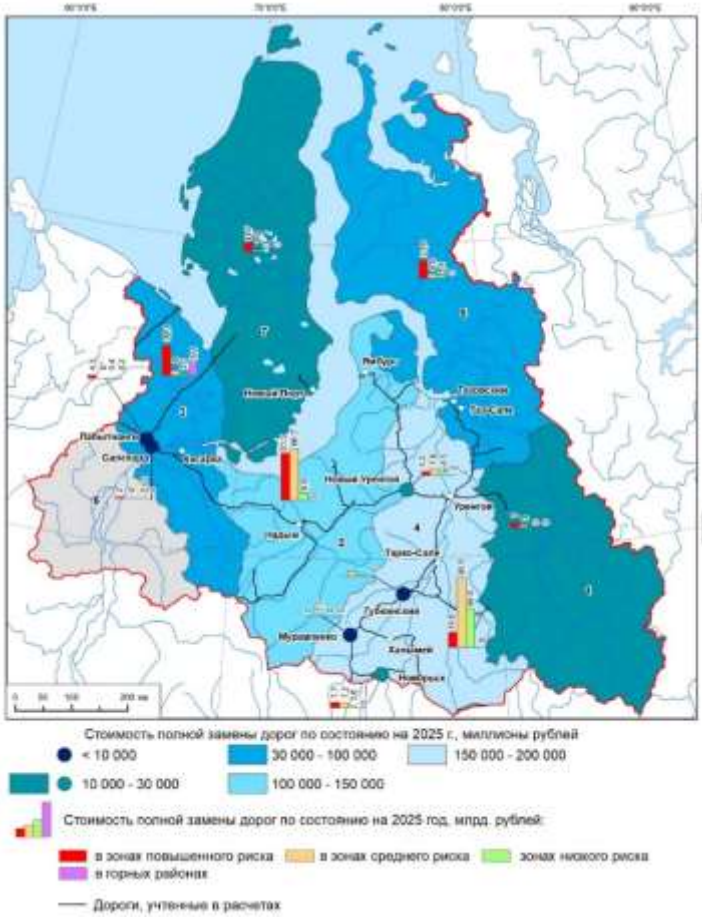



Рис. 2. Восстановительная стоимость автодорог в ареалах термоэрозионной опасности Цифрами на карте отмечены следующие муниципальные районы:

1– Красноселькупский; 2 – Надымский; 3 – Приуральский; 4 – Пуровский; 5 – Тазовский; 6 – Шурышкарский; 7 – Ямальский

Сопоставление полученных результатов расчета восстановительной стоимости автодорог с ареалами, характеризующимися разным уровнем опасности термоэрозии, показало, что 39 % автомобильных дорог с твердым покрытием ЯНАО расположено в зонах высокой опасности (или автодорог общей восстановительной стоимостью в 182 млрд рублей в ценах 2025 г.), 42 % (196 млрд рублей) – средней опасности, 16 % (75 млрд рублей) – низкой опасности, 3 % (15 млрд рублей) – в горных областях. Эти цифры в целом говорят о высоком уровне риска термоэрозии для автодорожной инфраструктуры ЯНАО и необходимости повышенного внимания к данной проблеме со стороны региональных властей.

***Благодарности***

Исследование выполнено в рамках государственной бюджетной темы научно-исследовательской работы НИЛ геоэкологии Севера географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

***Литература***

1 Streletskiy D.A., Suter L.J., Shiklomanov N.I., et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environmental Research Letters. – 2019. – №14 (2). 025003.

2 Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050 // Natural Hazards. – 2022. – №112. – P. 231-251.

3 Murray A.T., Grubesic T. (Eds.). Critical infrastructure: Reliability and vulnerability. – Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2007. – 311 p.

4 Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Кулаков А.П., Романов А.В. Особенности организации инженерно-геокриологического мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территориях распространения многолетнемерзлых пород // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 4. – С. 125-157.

5 Ершов Э.Д., Малиновский Д.В., Кучуков Э.З. и др. Термоэрозия дисперсных пород. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 193 с.

6 Гарагуля Л.С., Булдович С.Н., Ершов Э.Д. и др. Основы геокриологии. Часть 4. Динамическая геокриология. М.: МГУ, 2001. – 686 с.

7 Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск: Омская картографическая фабрика, 2004. – 304 с.

8 Трофимов В.Т. (Гл.ред.). Карта генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. Масштаб 1:1 000 000. – М.: МГУ, МИНГЕО СССР, ГОССТРОЙ СССР, 1982. – 9 л. карт.

9 Kislov A., Alyautdinov A., Baranskaya A., et al. A Spatially Detailed Projection of Environmental Conditions in the Arctic Initiated by Climate Change // Atmosphere. – 2023. – № 14(6). 1003.

## УТОЧНЕНИЕ ГРАНИЦ ТАКСОНОМИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ В ПРЕДЕЛАХ ТЕРРИТОРИИ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

***И.А. Баширова, С.В. Ефименко***

*Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск*

Арктическая зона Российской Федерации включает в себя десять регионов страны, из которых четыре полностью относятся к ней [1]. Ямало-Ненецкий автономный округ является одним из четырёх таких регионов и занимает по площади 15,6% территории Арктической зоны нашей страны. ЯНАО является лидером России по добыче природного газа (более 80% от общей добычи), что определяет его роль в экономическом отношении [2]. Существующая транспортная сеть распределена по территории округа неравномерно (в основном она сконцентрирована в южной части), из-за чего отдельные районы до сих пор имеют лишь авиационной и морской вид сообщения.

Пункт 13 Указа Президента РФ от 26.10.2020 г. №645 «О стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» [3] гласит о необходимости развития транспортной инфраструктуры Арктической зоны, для чего необходимо

обеспечить качественное проектирование и строительство автомобильных дорог. Согласно карте-схеме дорожно-климатического районирования, представленной в действующих нормативных документах на проектирование [4, 5], территория Ямало-Ненецкого автономного округа расположена в I дорожно-климатической зоне. Стоит отметить, что более 60% территории России относится к I ДКЗ, однако природно-климатические условия Восточной Сибири, севера Западной Сибири и северо-западных районов европейской части страны значительно отличаются друг от друга. Из чего можно сделать вывод о том, что представленное в нормах районирование не в полной мере учитывает особенности природно-климатических условий отдельных регионов страны, что провоцирует снижение эксплуатационной надёжности транспортных сооружений и вызывает значительные затраты на проведение восстановительных работ. Обеспечить надёжное и качественное проектирование и строительство автомобильных дорог в ЯНАО можно, уточнив дислокацию границ I-II зон и подзон, расположенных на территории округа, за счёт учёта элементов географического комплекса.

Уточнение дорожно-климатического районирования территории ЯНАО специалисты кафедры «Автомобильные дороги» ТГАСУ осуществляли по методологической схеме, предложенной в работе [6], с применением таксономической системы «зона – подзона – дорожный район» (см. рис. 1) [7-11]. Главной задачей районирования по представленной схеме является выделение однородных дорожных районов для отдельных регионов страны, в пределах которых однотипные дорожные конструкции можно охарактеризовать близкими значениями прочности и устойчивости. Если площадь территории велика, то уточнение дислокации границ зон и выделение подзон и дорожных районов осуществляют в пределах границ административных образований, после этого производят «сшивку» границ дорожных районов на территориях других административных образований, примыкающих к тем, в пределах которых уже выполнены работы по учёту элементов геокомплекса [6, 12].

Рис. 1. Схема работ, направленных на обеспечение качества проектирования транспортных сооружений за счёт учёта природно-климатических условий отдельных территорий России

В работе [13] территория Западной Сибири была разделена на четыре дорожно-климатические зоны с учётом зональных признаков геокомплекса (см. рис. 2). На основании анализа картографических материалов и работ по районированию территории Западной Сибири авторами работы [13] уточнена дислокация границы I-II дорожно-климатических зон. Выявлено, что она проходит между параллелями с юга 56° с.ш. на север до 62° с.ш. через опорные пункты: Пионерный – Ханты-Мансийск – Нефтеюганск – Стрежевой – Белый Яр – Канск. Согласно этому вся территория Ямало-Ненецкого автономного округа расположена в зоне распространения многолетнемёрзлых грунтов – I ДКЗ.

В СП 313.1325800.2017 [4] указаны признаки, оказывающие значительное влияние на устойчивость дорожной конструкций в условиях I дорожно-климатической зоне, из которых можно выделить рельеф местности и характер распространения многолетнемёрзлых грунтов (ММГ). Руководящим критерием при выделении *подзон* на территории Ямало-Ненецкого автономного округа принят рельеф местности, при выделении *дорожных районов* – мощность многолетнемёрзлых пород (ММП) и их температура на глубине 10 м. Перечисленные критерии оказывают существенное

влияние на проектирование, строительство и эксплуатацию автомобильных дорог Арктической зоны [14].

Рельеф ЯНАО в основном равнинный (см. рис. 3) с высотами до 50 метров над уровнем моря, из-за чего для округа характерно множество озёр и болот различного типа. Холмистый рельеф определяется возвышенностью Мужинский Увал (290 м), а также тем, что южная граница округа проходит по возвышенности Сибирские Увалы с высотами от 130 до 250-285 метров. Горная часть округа (западная граница) проходит по вытянутому в субмеридиональном направлении на 400 км Полярному Уралу [2, 15]. Наличие многолетней мерзлоты является важной региональной особенностью Ямало-Ненецкого автономного округа. По особенностям распространения ММП выделено 3 таксона (см. рис. 3, табл. 1) [2, 15].

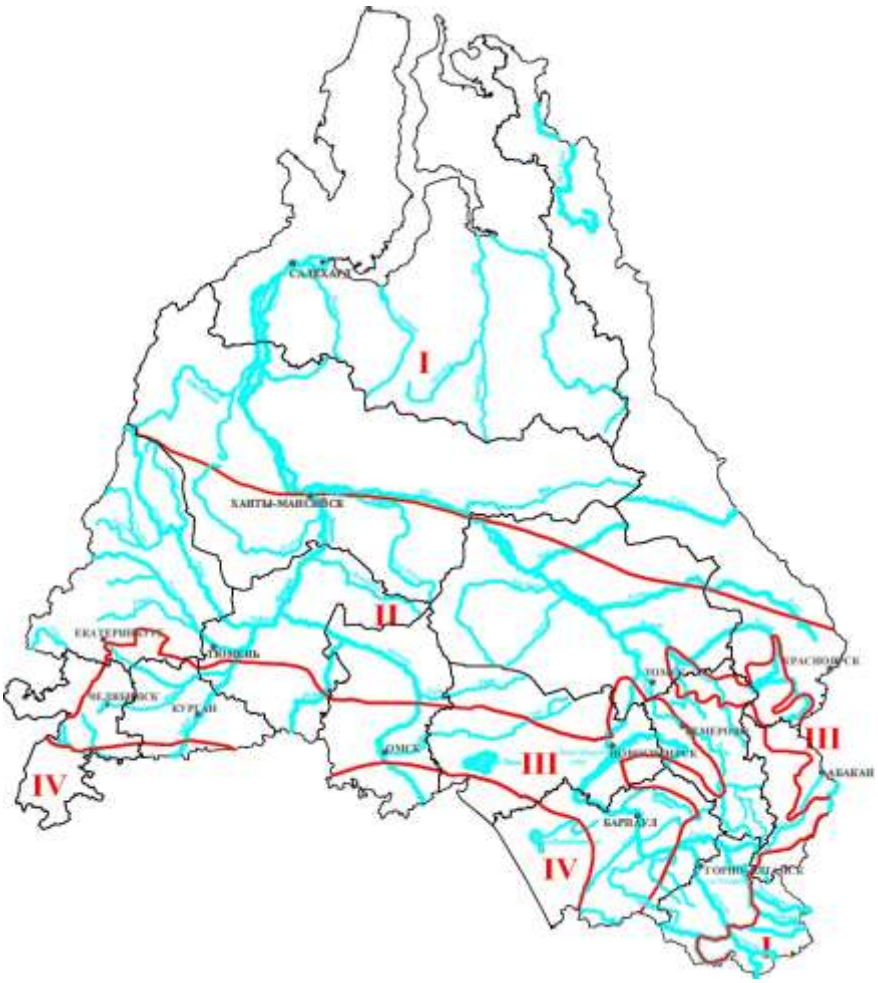



Рис. 2. Схема дорожно-климатического районирования территории Западной Сибири [12]

Таблица 1

Характеристика выделенных территорий по распространению ММГ

| Характеристика | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| Распространение ММГ | Сплошное | Прерывистое | Островное |
| Мощность ММП, м | от 300 до 500 м и более | от 10–20 до 100–150 м | до 100 м |
| Среднегодовая температура ММП на глубине 10 м, °С | < -3 | От -1 до -5 | От +2 до -5 |
| Глубина сезонного оттаивания, м | ≤ 2 | ≤ 1 | ≤ 1,5 |

С использованием метод наложения доминирующих признаков геокомплекса получена карта-схема дорожно-климатического районирования территории ЯНАО округа (см. рис. 4). Для I зоны, характерной для территории ЯНАО, рекомендованы три подзоны (равнинный, холмистый и горный рельеф) и шесть дорожных районов (от 1 до 3 в зависимости от зоны и подзоны).

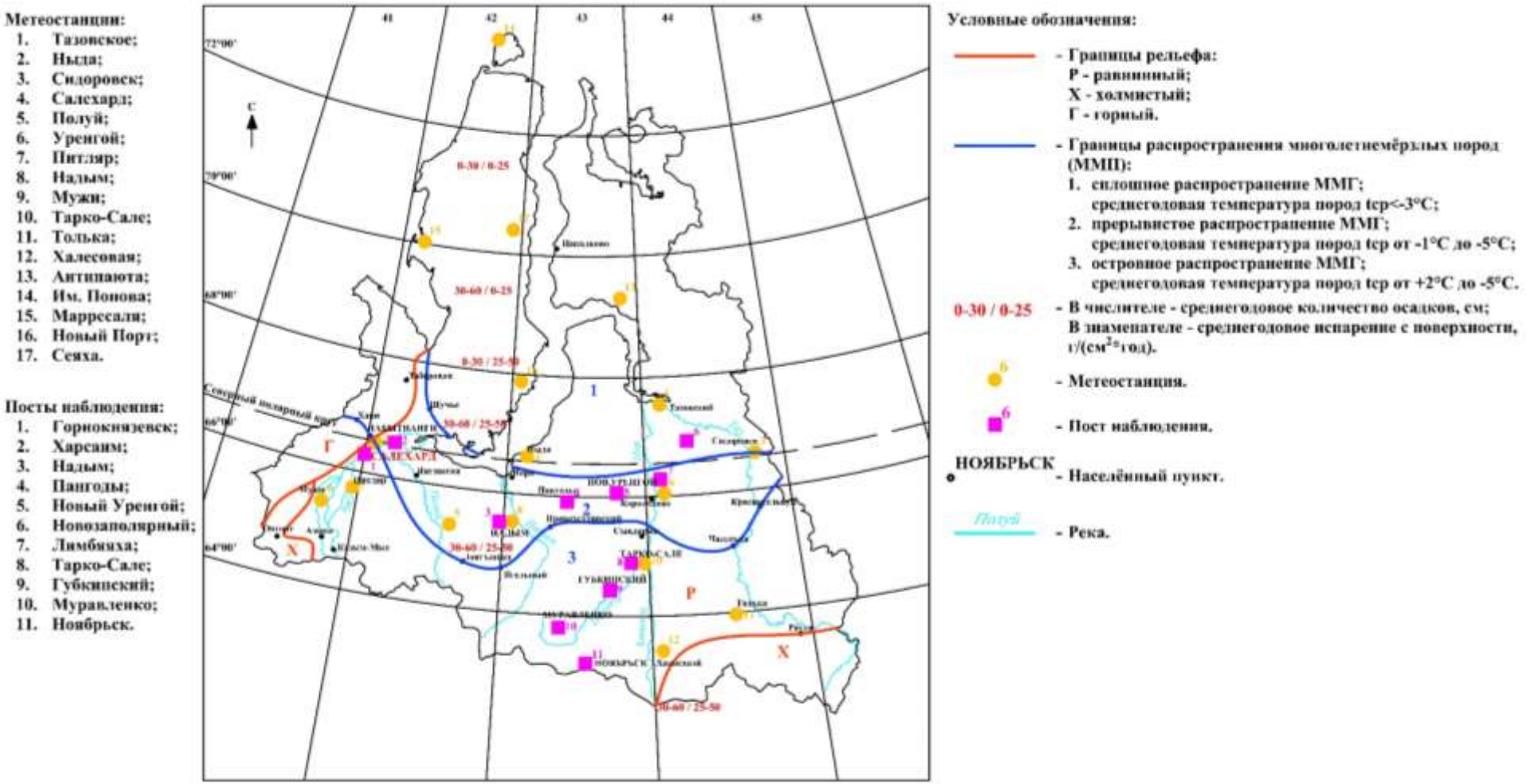



Рис. 3. Карта-схема ЯНАО с зонированием территории по рельефу и распространению ММГ

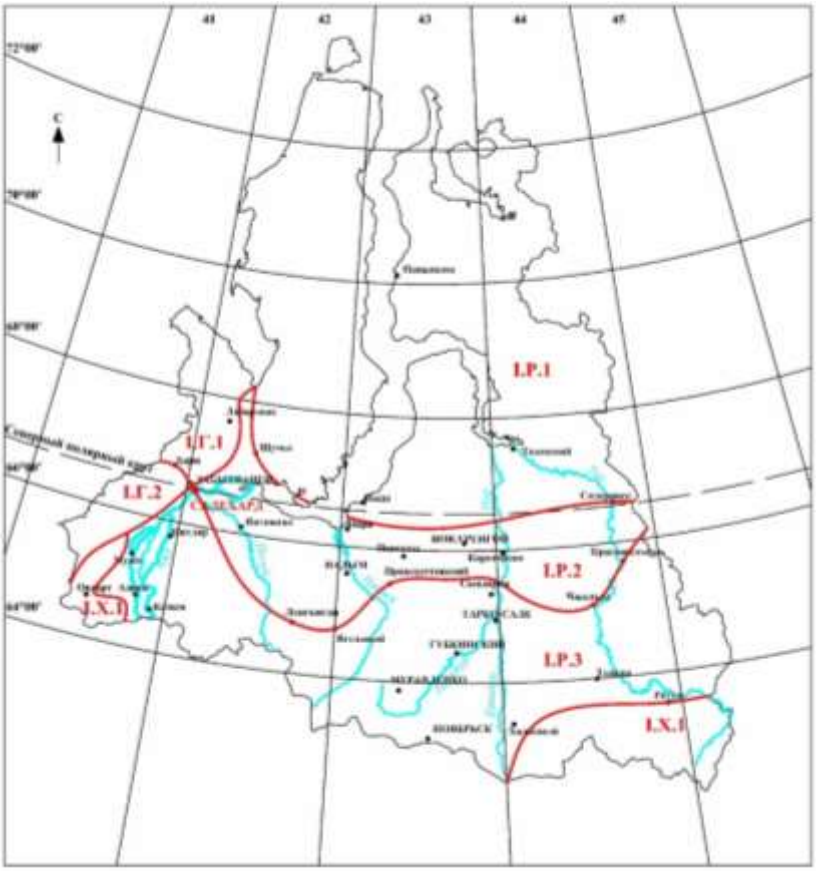



Рис. 4. Карта-схема дорожно-климатического районирования территории ЯНАО: I – дорожно-климатическая зона; Р, Х, Г – подзоны по типам рельефа (равнинный, холмистый, горный); 1-3 – номера дорожных районов

В заключении отметим, работы по уточнению дорожно-климатического районирования территории ЯНАО направлены на обеспечение качества проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог региона Представленная карта-схема является результатом работ по первой стадии (см. рис. 1), далее необходимо назначить расчетные значения характеристик преобладающего грунта земляного полотна (песка пылеватого) на территории выделенных при дорожно-климатическом районировании таксонов.

***Литература***

1 Федеральный закон от 13.07.2020 г. № 193-ФЗ «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации» (по состоянию на 03.04.2026) / Справочная система «Техэксперт».

2 Энциклопедия Сибири [Электронный ресурс]: URL: https://encyclopediaofsiberia.tilda.ws/main (дата обращения: 03.04.2026).

3 О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года: указ Президента РФ от 26.10.2022 г. № 645 // КонсультантПлюс – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_366065/ (дата обращения: 03.04.2026).

4 СП 313.1325800.2017 Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства. – М.: Стандартинформ, 2018. – 77 с.

5 СП 34.13330.2021. Автомобильные дороги. / Минстрой России. – М.: 2021. – 94 с.

6 Ефименко С.В. Методические аспекты регионального уточнения простирания линий границ дорожно-климатических зон. / С.В. Ефименко, Д.Н. Черепанов // Вестник МГСУ. – 2013. – №6. – С. 214 – 222.

7 Ефименко В. Н. Особенности формирования информационного банка данных для уточнения границ дорожно-климатических подзон на территории ЯНАО / В. Н. Ефименко, С. В. Ефименко, И. А. Баширова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – Т. 24, № 6. – С. 150-159.

8 Ефименко С. В., Елисеенко М. М. К уточнению схемы дорожно-климатического районирования территории Ямало-Ненецкого автономного округа // Вестник Волгоградского государственного

архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 1(86). С. 94–103.

9 Сиволап В. Е. Полевые и лабораторные исследования грунтов земляного полотна автомобильных дорог ЯНАО / В. Е. Сиволап // Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник научных трудов XIX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 26–29 апреля 2022 года. Том 6. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 66-68.

10 Баширова И. А. Обоснование величины расчетной глубины промерзания дорожных конструкций на территории Ямало-Ненецкого автономного округа / И. А. Баширова // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли Юга России: Материалы XIX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Волгоград, 27–29 мая 2025 года. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2025. – С. 42-48.

11 Результаты дорожно-климатического районирования территории Ямало-Ненецкого автономного округа / И. А. Баширова, С. Н. Гиллих, В. Н. Ефименко [и др.] // Сергеевские чтения. Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Псков, 27–28 марта 2025 года. – Москва: Геоинфо, 2025. – С. 233-237.

12 Ефименко С.В. Учёт особенностей распространения геокомплексов при территориальной организации дорожно-климатического районирования / С.В. Ефименко, В.Н. Ефименко, М.В. Бадина, А.О. Афиногенов // Сборник ФГУП "РОСДОРНИИ". Дороги и мосты. – М., 2014. – №31. – С. 42 – 52

13 Ефименко С.В. Дорожное районирование территории Западной Сибири [Текст]: монография / С.В. Ефименко, М.В. Бадина. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. Ун-та, 2014. – 244 с. + 10 л. вкл. + 2 л. приложение.

14 Земляное полотно автомобильных дорог в северных условиях. / Под редакцией А.А. Малышев. – М.: Транспорт, 1974. – 279 с.

15 Научное издательство. Большая Российская энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: https://old.bigenc.ru/ (дата обращения: 03.04.2026).

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ПРОВЕТРИВАЕМЫХ ПОДПОЛИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНДАМЕНТОВ НА ДЕГРАДИРУЮЩЕЙ МЕРЗЛОТЕ В АРКТИКЕ (НА ПРИМЕРЕ Г. САЛЕХАРДА)

***А.А. Башкова[1,2], А.Н. Шеин[1], Я.Б. Горелик[2], А.Н. Громадский[1], А.А. Гончаров[1], А.И. Синицкий[1]***
*[1] Научный центр изучения Арктики, г. Салехард*
*[2] Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень*

**Введение.** Стабилизация температурного режима грунтового основания объектов капитального строительства в Салехарде поддерживается использованием проветриваемого подполье с круглогодичным режимом вентилирования. Основным фактором, обеспечивающим циркуляцию воздуха в ПП, является конструктивное исполнение его ограждения: сплошное с продухами или вентиляционными отверстиями в виде окон; решетчатое, выполненное в виде жалюзи или пластин из профлиста. В отличие от ПП с сплошным ограждением периметра, где движение воздушных потоков преимущественно обусловлено конвективным переносом под воздействием градиента температуры и плотности воздуха, в ПП с решетчатым ограждением к конвективному добавляется еще и принудительная вентиляция, вызванная ветровой нагрузкой [1]. Такое конструктивное решение имеет ряд преимуществ: увеличивает интенсивность воздухообмена в ПП даже при небольшом температурном градиенте; приводит к снижению температурной дисперсии за счет более равномерного распределения воздушного потока в объеме ПП; повышает эффективность охлаждения грунтового основания устройствами СОУ в зимний период года.

Однако на ряду с преимуществами у решетчатого ограждения ПП есть и недостатки. Так, в теплый период года такое ограждение ввиду увеличенной суммарной площади вентиляционных отверстий, может способствовать повышению теплопоступления, особенно при штиле или слабом ветре, что приводит к увеличению глубины сезонно-талого слоя и более интенсивному прогреванию грунтового массива.

Особенно остро проблема растепления грунтовых оснований объектов, возведённых по I принципу использования многолетнемерзлых грунтов (ММГ) [2] встает в настоящее время, когда повсеместно отмечается климатические изменения с устойчивым трендом на потепление [3]. В работе анализируются данные натурных определений параметров работы проветриваемого подполья с решетчатым ограждением для оценки их влияния на интенсивность промораживания грунтового основания жилого дома, расположенного в г. Салехард.

**Методы и материалы.** Мониторинг температурного режима грунтового основания выполнялся по 24 скважинам, пробуренным равномерной сеткой и оснащенным датчиками температуры производства ИП Кураков (г. Томск) (18 датчиков, шаг: на глубинах 0–5,0 м – 0,5 м; на глубинах 5,0-12,0 м – 1,0 м, погрешность калибровки ±0,1 °С ) и интегрированы в единую геоинформационную систему автоматизированного контроля ГИС «ЯМАЛ-АРКТИКА» (https://monitoring.arctic.yanao.ru) [4, 5]. Интервал измерений (3 ч) согласуется с периодичности фиксации климатических параметров метеостанцией г. Салехард.

Мониторинг режима работы проветриваемого подполья (октября 2024 - октябрь 2025 гг.) выполнялся двумя методами:

1) профильный – позволяет наиболее точно рассчитать температурную дисперсию (меру изменчивости внутри периода измерений). Измерения выполнялись по трём поперечным профилям (северный, центральный и южный) с использованием термометрических кос с расстоянием между датчиками 1 м (см. рис. 1). Регистрация температурных значений происходила весь период наблюдений с интервалом 6 ч;

2) площадной – позволяет наиболее точно установить распределение параметров по площади ПП. Измерение температуры и скорости движения воздушного потока в ручном режиме с периодичностью раз в 3 месяца при помощи крыльчатого анемометра метеостанции Kestrel SPORTSMAN. В каждой контрольной точке (располагались в ПП равномерной сеткой с шагом 3 м за исключением участка лифтовой шахты) анемометр выдерживался до окончания измерения прибором максимальной, минимальной и средней скорости движения воздушного потока с погрешностью не более 3 % (0,1 м/с).

Профили измерения скорости воздушного потока, как и термометрические косы, были расположены на равном удалении от ростверков в свободном сечении ПП. Такое размещение измерительных средств позволяет минимизировать влияние турбулентности потока, возникающей при обтекании элементов ростверка, а также исключить влияние температуры железобетонных конструкций здания на результаты измерений. Высота измерения 0,8 м (0,5 высоты ПП) обусловлена высотой конденсаторной части СОУ (0,89 м), что позволяет оценить влияние параметров воздушного потока на уровне оребрения, определяющей эффективность теплообмена в системе грунт-воздух, а также снизить влияние силы трения воздушного потока о бетонные конструкции [6].

Анализ климатических параметров выполнен по данным метеостанции Салехард.

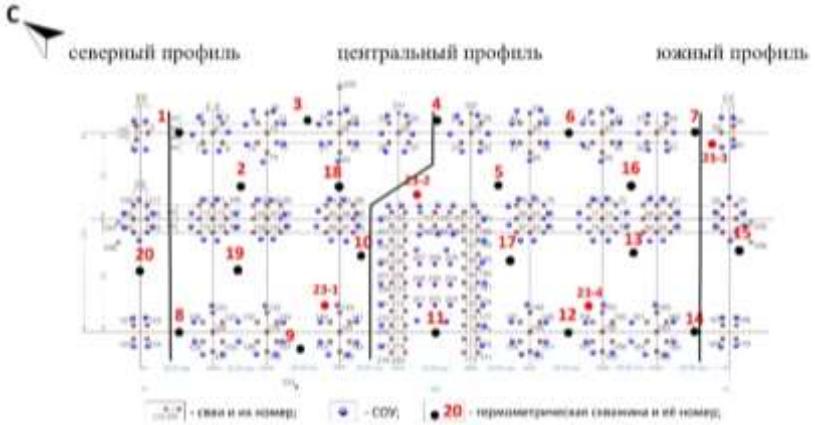



Рис. 1. План поперечного профилирования в ПП жилого дома

**Результаты и их обсуждение.** Мерзлое грунтовое основание фундаментов исследуемого здания создавалось в процессе его строительства и первых лет эксплуатации посредством замораживания изначально талых песчаных водонасыщенных грунтов устройствами СОУ, которые установлены в ПП вокруг каждой группы свай. Глубина погружения испарительной части соответствует глубине погружения железобетонных свай – 10 м. ПП (решетчатое) выполнено из металлических ламелей с невыдержанным расстоянием между ними (2-5 см) по всему периметру.

Наблюдения за режимом работы ПП производились в период с 04 октября 2024 по 05 октября 2025 гг. Результаты измерений температуры воздуха профильным методом показали, что в годовом цикле средние значения распределились следующим образом: минимальное (минус 30,2 °С) приходится на 26 января 2025 г.; максимальное (24,0 °С) на 10 августа 2025 г. Среднегодовое значение температуры воздуха в ПП составляет минус 1,5 °С, при этом среднегодовое значение температуры воздуха по данным метеостанции Салехард за указанный период составляет минус 2,7 °С, минимальное - минус 38,8 °С (22 января 2025), максимальное 25,8 °С (11 июня 2025). Отрицательное значение среднегодовой температуры воздуха в ПП (минус 1,5 °С) отвечает необходимым условиям эффективной работы, обеспечивающей стабильность теплового режима грунтового основания [7, 8].

Помимо отрицательного значения среднегодовой температуры важную роль играет скорость движения воздушных потоков и характер их движения, охарактеризовать которые позволяет температурная дисперсия. При хорошем проветривании объема ПП, обусловленного ветровой нагрузкой, дисперсия имеет около нулевые значения. В период, когда движение воздушного потока вызвано только конвективным переносом и температурной инверсией значение дисперсии теряет свою стабильность и резко возрастает.

С целью выявления условий, при которых дисперсия температурных значений в ПП теряет свою стабильность, был выполнен анализ корреляции с временными рядами климатических параметров, полученных по данным метеостанции Салехард: температура воздуха (T), относительная влажность (U), атмосферное давление (Po), скорость ветра (Ff), облачность (N) и погодные явления (WW). За период наблюдений температурная дисперсия изменяется от 0,0 до 10,9 °С², с выраженной зависимостью от резкого изменения погоды. Так установлено, что в зимний период года она редко превышает значение 2,5 °С² и чаще отмечается при ясной или частично облачной погоде (N <60 %). Это объясняется интенсивным радиационным охлаждением земной поверхности в условиях отсутствия облачного покрова, что вызывает значительные термические колебания в пространстве ПП [1].

Во многих случаях высокая дисперсия отмечается при штиле (Ff ≈ 0 м/с), когда отсутствует ветровая нагрузка и, как следствие, принудительная вентиляция внешним воздушным потоком, поступающим в объем ПП через вентиляционные отверстия. В таких условиях не реализуется стабилизирующий эффект, а вместо этого развивается естественная конвекция, усиливающая локальные температурные флуктуации в ПП.

Еще одним фактором, определяющим повышение температурной дисперсии в ПП является относительная влажность воздуха, среднегодовое значение которой составляет 74 % [4]. Среднее значение U за зимний период составляет 75,3 %, что, в значительной степени способствуя конвективному переносу, обусловленному разницей между наружным и более теплым воздухом в ПП. В сочетании низких температур и высокой влажности (U >80 %), наблюдаемой при выпадении большого количества осадков (метель, ливневый снег) дисперсия сокращается до 0 (табл. 1). При этом создается мощная тяга и скорость движения воздушного потока в ПП будет повышаться, обеспечивая более эффективную работу СОУ. И чем выше перепад температур воздуха внутри ПП и наружного в суточной амплитуде, и тем интенсивнее осуществляется теплоотвод из грунтового основания.

Таблица 1

Скорости движения воздушного потока в ПП жилого дома измеренные площадным методом

| Участок ПП | 12.02.2025 | 03.04.2025 | 30.07.2025 | 10.09.2025 |
|---|---|---|---|---|
| Северный | 0,7 / -5,8 | 1,2 / -7,6 | 0,5 / 16,6 | 0,7 / 12,8 |
| Северо-западный | 0,4 / -5,0 | 0,7 / -7,3 | 0,2 / 16,6 | 0,3 / 12,7 |
| Центральный | 0,5 / -5,2 | 0,8 / -6,7 | 0,6 / 15,3 | 0,7 / 11,6 |
| Юго-восточный | 0,5 / -5,4 | 1,2 / -6,0 | 0,6 / 16,1 | 0,8 / 11,0 |
| Южный | 0,0 / -4,7 | 0,7 / -6,4 | 0,4 / 15,9 | 0,7 / 11,1 |
| Температурная дисперсия*, °С$^2$ | 0 – 0,2 | 0 – 0 | 0,6 – 1,6 | 0,1 – 0,1 |
| Климатические параметры по данным метеостанции Салехард в период измерений (6 ч) | | | | |
| Температура воздуха*, °С | -9 – -13,8 | -9,4 – -6,6 | 15 – 19,5 | 10,2 – 11,0 |
| Скорость ветра*, м/с | 4 – 6 | 7 – 6 | 3 – 1 | 5 – 5 |
| Облачность*, % | 100 – 100 | 100 – 0 | 5 – 75 | 75 – 60 |
| Относительная влажность*, % | 78 – 72 | 71 – 71 | 51 – 31 | 55 – 49 |
| Погодные явления* | снег/ливневый | ливневый снег | без осадков | без осадков |

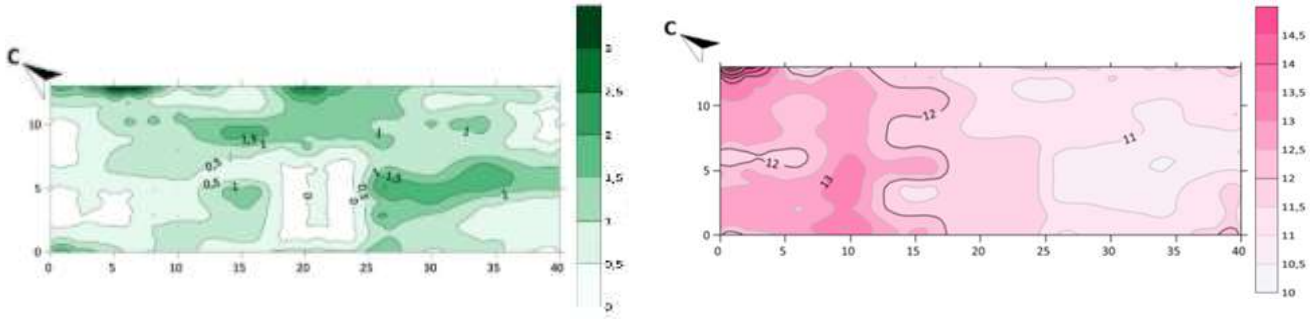
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | снег | слабый | | |

Примечание: * - изменение параметра в течение 6-часового интервала, соответствующего частоте регистрации данных термометрическими косами.

С переходом на летний период 2025 года частота и значение температурной дисперсии резко возрастают. Колебание дисперсии в той или иной степени отмечается ежесуточно, иногда амплитуда достигает значений 7,7-9,4 °C². В отличии от зимнего периода, имеющего более стабильные влажностные характеристики, летом перепад влажности внутри суток ярко выражен и часто превышает 30 %. Этот процесс сопровождается повышением температуры воздуха, при этом большее значение суточной амплитуды вызывает большую температурную дисперсию с усилением процесса при малой облачности или ясном небе.

Таким образом, наибольшая нестабильность температурного режима в ПП отмечается в летний период года и возникает при сочетании: ясной или малооблачной погоды, низкой скорости ветра (штиль), резких колебаний температуры воздуха и относительной влажности за сутки, что обуславливает движение воздушного потока преимущественно конвективным переносом [9]. В зимний период движение воздушного потока в большей степени обусловливается ветровой нагрузкой. Зависимость температурной дисперсии от атмосферного давления не была подтверждена.

Результаты натурных измерений, выполненных площадным методом, показали, что в холодный период года, характеризующемся низкой температурной дисперсией, при слабой ветровой нагрузке в ПП формируются зоны затишья, где скорость движения воздушного потока близка к 0 м/с или оно полностью прекращается (рис. 2). В таких зонах отмечается локальное повышение температуры иногда превышающее 1 °C (табл. 1). Следствием этого является снижение эффективности работы СОУ, поскольку интенсивность теплоотвода из грунтового основания напрямую зависит от скорости воздушного потока обдуваемого оребренную поверхность конденсатора. В результате в ПП формируются термически слабые зоны, где условия для поддержания грунтового основания в мерзлом состоянии оказываются недостаточными. При существующем тренде на повышение среднегодовой температуры воздуха и сокращении продолжительности холодного времени года, а также при более жарком и продолжительном теплом периоде, риск его растепения повышается.



а б

Рис. 2. Схема распределения определяемых параметров в ПП жилого дома, расположенного в г. Салехард, дата измерения 10.09.2025: а) скорость движения воздушного потока, м/с; б) температура воздуха, °C

В результате мониторинга температурного состояния грунтового основания исследуемого жилого дома за указанный период было установлено, что глубина сезонноталого слоя распределяется не равномерно. В хорошо продуваемых зонах ПП кровля ММГ находится в пределах глубин 2,2-2,8 м, в то время как в зонах затишья, где слабое вентилирование сопровождается локальным повышением температуры воздуха, она заглублена до 3,5-3,9 м, увеличивая мощность слоя на 1,1-1,7 м.

Температурный режим грунтового основания в зоне работы СОУ на глубинах 3-10 м также демонстрирует пространственную неоднородность и подтверждает снижение эффективности теплоотвода устройствами СОУ в зонах затишья. Так, среднее значение температуры грунта в период максимального промерзания за зимний период 2024-2025 г (20 марта) в зоне интенсивного проветривания составляло минус 7,3 °C, что на 4,2 °C выше, чем в слабо вентилируемых зонах (минус 3,1 °C). За летний период 2025 года грунтовое основание на глубинах 3-10 м прогрелось до значений минус 1,1 °C и минус 0,4 °C соответственно. Согласно лабораторным определениям физических и теплофизических свойств песков, слагающих грунтовое основание, температура начала замерзания составляет минус 0,18 °C. Это означает, что в зонах затишья температура грунта приблизилась к пороговому значению и при более жарком и продолжительном летнем периоде, существует реальный риск локального протаивания грунтового массива в этих зонах, что может привести к снижению несущей способности основания и деформациям фундаментов.

Согласно таблице 1 скорость движения воздушного потока в зонах интенсивного проветривания (северная, центральная, юго-восточная) изменяется в пределах 0,5-1,2 м/с, онах затишья (северо-западная и южная) от 0-0,7 м/с. Таким образом, для обеспечения эффективного отвода тепла из грунтового массива устройствами СОУ необходимо обеспечить равномерную интенсивность проветривания, при этом скорость движения воздушного потока должна быть не менее 0,7 м/с.

**Заключение.** Результаты натурных исследований позволяют сделать заключение, что недостаточная и неравномерная вентиляция ПП (Ff ≤0,7 м/с) привело к образованию северо-западной и южной зон затишья, где отмечено локальное повышение температуры воздуха. В этих зонах на протяжении всего срока наблюдения отмечается термическая нестабильность грунтового основания, при которой мощность сезонно-талого слоя увеличивается до 3,5-3,9 м, а среднее значение температуры грунта на глубине 3-10 м в период максимального прогревания поднимается до критических значений (минус 0,4 °С).

Установлено, что температурная дисперсия может рассматриваться как индикатор нестабильности теплового режима ПП. Так же для определения межгодовой вариативности температурной дисперсии в условиях меняющегося климата необходимо продолжить натурные наблюдения на срок 3-5 лет.

С целью создания равномерной вентиляции в ПП в северо-западной и южной зонах необходимо установить устройства принудительной вентиляции.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Ямало-Ненецкого автономного округа, а также госзадания (тема № FWRZ-2026-0025 ИКЗ ТюмНЦ СО РАН). Авторы благодарны специалистам участка инженерных изысканий ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики за создание мониторинговой инфраструктуры.

***Литература***

1 Богословский В. Н. Тепловой режим зданий. - М.: Стройиздат, 1978. – 248 с.

2 СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 / Минстрой России. 2020. – С. 112.

3 Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic / G. Malkova, D. Drozdov, A. Vasiliev [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 7. DOI 10.3390/en15072311.

4 Шеин А. Н., Башкова А. А. Статистические характеристики данных температурного мониторинга грунтовых оснований фундаментов зданий города Салехарда за 2018–2023 годы как основа для автоматизации процесса первичной обработки данных // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30, № 3. С. 58–69. DOI: 10.2109/2227-9245-2024-30-3-58-69.

5 ГОСТ 25358-2020 Грунты. Методы полевого определения температуры.

6 Рекомендации по расчету воздухораспределения в общественных зданиях. Стройиздат. 1988. – 96 с.

7 Хрусталев Л.Н. Температурный режим вечномерзлых грунтов на застроенных территориях // Издательство Наука. 1971. – 167 с.

8 Хакимов Х.Р. Замораживание грунтов в строительных целях. Госстройиздат. 1962. – 187 с.

9 Соболев А.А. Движение частиц в воздушном потоке // Тольяттинский государственный университет. Вектор науки ТГУ. 2011. № 3 (17). – С. 82–86.

## ЮЖНАЯ ГРАНИЦА ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА. АСПЕКТЫ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ МЕТОДОВ ГИС-АНАЛИЗА

***Н.М. Бердников***

*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень*

В эпоху современных климатических изменений происходит повышение температуры многолетнемерзлых пород (ММП). В южной части криолитозоны, где среднегодовые температуры пород близки к 0 ºС, реакция мерзлоты на потепление климата будет проявляться не столько за счет повышения температуры грунтов, сколько за счет опускания кровли ММП и сокращения площади массивов мерзлых пород. Согласно В.А. Кудрявцеву, южная граница мерзлоты может определяться как по крайнему положению мерзлых толщ, так и по среднему положению нулевой геоизотермы [1].

В условиях продолжающегося потепления климата температура на подошве слоя ее годовых колебаний на долгие годы принимает значения близкие к нулю. Учитывая местные ландшафтно-геологические особенности можно выделить области и острова ММП, которые первыми

подвергнутся оттаиванию на всю глубину слоя годовых колебаний температуры [2]. Аккумуляция тепла в определенном массиве грунта при многолетнем оттаивании толщи определяется 1) площадью, через которую проходит теплопоток; 2) теплопроводностью пород; 3) градиентом температуры в мерзлом грунте; 4) периодом времени, в течение которого протаивает толща. Характерна значительная пространственная изменчивость толщины слоя годовых колебаний температуры. Поэтому процесс многолетнего оттаивания рассматривается в рамках исследования для слоя фиксированной глубины – 10 м.

Изучалась территория вдоль южной границы криолитозоны Западной Сибири со среднегодовой температурой пород выше -1 ºС. На таких участках будет преобладать деградация мерзлоты за счет опускания кровли ММП, а деградация за счет повышения температуры пород – менее выражена.

В основу ГИС-анализа положена цифровая версия Геокриологической карты СССР [3] и Карты генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты [4]. Созданная на их основе совмещенная ГИС-модель позволила выделить участки с типовыми геокриологическими разрезами, в пределах которых аккумуляция тепла и очередность оттаивания верхней 10-метровой части толщи будут отличаться. Рассмотрены следующие типы разрезов: 1) разрез с выдержанной по простиранию сливающейся мерзлотой; 2) разрез со сливающейся мерзлотой, чередующейся на небольших участках с талыми породами; 3) разрез с глубоким залеганием кровли мерзлоты (до 8 м); 4) разрез со сливающейся мерзлотой с двуслойным строением либо с переслаиванием горизонтов различной литологии.

В первую очередь до 10-метровой глубины протает толща, где многолетнее оттаивание началось задолго до начала исследуемого периода (2000-2050 гг.). Это мерзлые толщи, перекрытые 5-8-метровым слоем талых пород. На момент 2000 г. здесь уже сформировалась несливающаяся мерзлота.

Затем оттают сливающиеся мерзлые толщи, чередующиеся на небольших площадях с талыми породами. Благодаря наличию боковых теплопотоков, скорость оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи здесь будет выше, чем у мерзлых толщ, выдержанных по простиранию.

В последнюю очередь оттают ММП в разрезах с выдержанной по простиранию сливающейся мерзлотой.

Наряду с типовыми геокриологическими разрезами были учтены также дополнительные факторы, такие как близость к 0 ºС температуры ММП, наличие торфяного покрова, литология и стратиграфия толщи.

На основе информации о среднегодовой температуре грунтов, льдистости, составе пород и строении разреза было проведено итоговое ранжирование участков поверхности по очередности многолетнего оттаивания пород верхней 10-метровой части толщи. Вероятно, что на фоне $t > -1$ ºС участки со средней и высокой интенсивностью оттаивания к 2050 г. перейдут в талое состояние на всю мощность верхней 10-метровой части разреза. В результате на карте выделена область ожидаемого распространения ММП в 2050 г. и область, где ММП существовали в 1986-2000 гг., но к середине XXI века, вероятно, протают (Рис. 1).

В рамках исследования проведено сравнение пространственного положения южной границы распространения ММП по данным работы В.Е. Романовского [5], и по данным прогнозных карт Н.М. Бердникова [6, 2]. Прогноз положения южной границы ММП дается на 2050 год по сравнению с положением в 2000 году.

В основу данных исследований положены различные сценарии будущих изменений климата. Прогнозная модель [7], положенная в основу исследования В.Е. Романовского, описывает двумерную (2D, зонально-усредненную) атмосферную модель. В данном случае при создании длительного прогноза климата не использовались модели общей циркуляции атмосферы. Прогнозная модель [8], использованная в исследовании Н.М. Бердникова [6] относится к сопряженным климатическим моделям, учитывающим циркуляцию атмосферы, океана, углеродный цикл и др.

В исследовании В.Е. Романовского переход от температур воздуха к температурам ММП произведен с помощью расчета с последующей калибровкой расчетных значений на основе фактических измерений температуры ММП в течение временного периода 1987-1994 гг.

В модели, предложенной Н.М. Бердниковым [6], переход от климатических изменений к изменению температуры мерзлоты выполнен на основе коэффициента чувствительности мерзлоты к изменению климата [9]. Коэффициент представляет собой отношение между трендом изменения температуры воздуха и трендом изменения температуры грунтов за период 1961-2005 гг. В основу коэффициента чувствительности положены натурные измерения температуры грунтов на метеостанциях и геокриологических стационарах. Коэффициент является устойчивым показателем

мерзлотно-климатических изменений. В то время как тренды изменения температуры грунтов на более коротких временных интервалах могут существенно варьировать. Достоверность прогнозируемых трендов также повышается за счет пространственного осреднения показателей, определяющих коэффициент чувствительности.

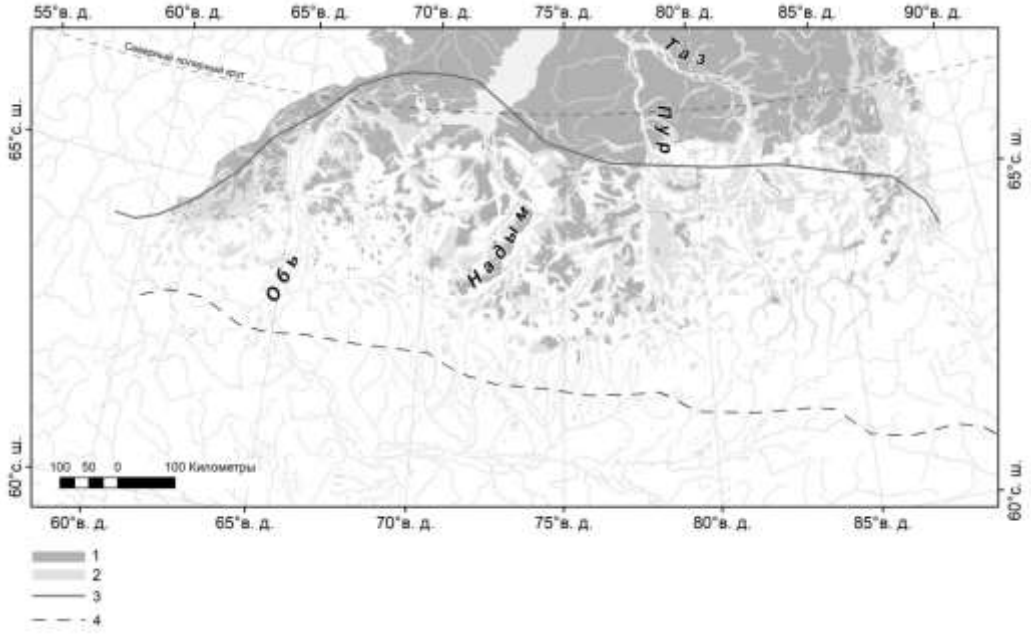



Рис. 1. Изменение южной границы области распространения многолетнемерзлых пород в Западной Сибири в период 2000-2050 гг. 1 - область распространения ММП в 2050 г.; 2 - южная часть области распространения ММП в 2000 г., где породы в слое годовых колебаний температуры, вероятно, протают к 2050 г.; 3 - южная граница мерзлоты по крайнему положению мерзлых толщ в 2050 г.; 4 - южная граница мерзлоты по крайнему положению мерзлых толщ в 2000 г.

В прогнозе В.Е. Романовского [5] южная граница области с отрицательной среднегодовой температурой у подошвы деятельного слоя соответствует положению самых южных островов ММП («географическая» граница). В исследовании Н.М. Бердникова [2] прогнозируемое положение области распространения ММП приводится в соответствие с самым южным положением участков с отрицательной среднегодовой температурой пород в пределах слоя годовых колебаний температуры («геофизическая» граница).

Сравнение прогнозируемого изменения положения южной границы мерзлоты, выполненное применительно к двум разным глубинам определения среднегодовой температуры ММП, показывает сходство тенденции и общего темпа отступания. Однако на Обь-Надымском и Пур-Надымском междуречьях хорошо прослеживается область, в пределах которой прогнозируемое положение «геофизической» южной границы области распространения ММП находится существенно южнее, чем прогнозируемое положение «географической» южной границы. Это связано с повышенным влиянием факторов, способствующих сохранению несливающейся мерзлоты. В рассматриваемых районах чаще встречаются более высокие значения льдистости. Следует учитывать, что среднегодовая температура пород в конце XX столетия здесь не так близка к 0 ºС, как в соседних районах, расположенных к востоку [3]. Существенное значение также имеет широкое распространение торфяных отложений в верховьях реки Надым. Вышеперечисленные факторы способствуют более длительному многолетнему оттаиванию мерзлых пород в слое годовых колебаний температуры в пределах Пур-Надымского междуречья и более западных районах.

На основе результатов бурения в южной криолитозоне (бассейн реки Надым) проведено уточнение разреза верхней 10-метровой части толщи [10]. Установлена большая пространственная неоднородность и изменчивость в льдистости пород на уровне различий между природно-территориальными комплексами в ранге урочищ с поперечником в десятки – первые сотни метров. Большую часть территории могут занимать слабо льдистые грунты, слагающие разрез урочищ плоских торфяников. Отступание к северу южной границы мерзлоты может надолго задерживаться в пределах некоторых урочищ с повышенной льдистостью пород (или с менее глубоким положением кровли льдистого горизонта). Например, на участках распространения бугров пучения.

Многолетнее оттаивание пород в верхней 10-метровой части разреза происходит обычно в полосе около 200 км с юга на север, образуя область с несливающейся мерзлотой. Поэтому ожидаемое прогнозируемое положение «геофизической» южной границы мерзлоты можно проследить не в виде конкретной линии, а в качестве нового положения отрезков границ южных островов ММП.

***Литература***

1 Общее мерзлотоведение (геокриология): 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В.А. Кудрявцева. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978 - 464 с.

2 Бердников Н.М. Картографическая визуализация ожидаемого изменения южной границы области распространения многолетнемерзлых пород в Западной Сибири // Криосфера Земли. – 2024. - Т. XXVIII. - № 4. - С. 3–15. DOI: 10.15372/KZ20240401. EDN: XUICXA.

3 Геокриологическая карта СССР: масштаб 1:2 500 000. - М., ГУГК, 1991 (отпечатано 1996), 16 л.

4 Карта генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. Масштаб 1:1 000 000 / авт. Г.В. Ананьева, Ю.Б. Баду, Ю.К. Васильчук и др. - М., Картфабрика Центргеологии. - 1991.

5 Romanovsky V.E., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Oberman N.G., Drozdov D.S., Malkova G.V., Moskalenko N.G., Vasiliev A.A., Sergeev D.O., Zheleznyak M.N. Thermal state and fate of permafrost in Russia: First results of IPY (plenary paper). / In Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost. Fairbanks, Alaska, 29 June–3 July. - 2008. - Vol. 2 – P. 1511–1518.

6 Бердников Н.М., Малкова Г.В., Дроздов Д.С. и др. Динамическая карта температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в период 1960–2100 годов // Сб. докл. Шестой конф. геокриологов России “Мониторинг в криолитозоне” (Москва, 14–17 июня 2022 г.) [электрон. изд. сетевого распространения]. - М., КДУ, Добросвет. – 2022. - С. 515–519. – https://bookonlime.ru/node/44945 (дата обращения: 02.05.2024).

7 Sokolov A.P. & Stone P.H. A flexible climate model for use in integrated assessments. Climate Dynamics. – 1998 – 14. P. 291-303.

8 МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправит. группы экспертов по изменению климата [основная группа авторов, Р.К. Пачаури, Л.А. Мейер (ред.)]. Женева, Швейцария. – МГЭИК. - 163 с.

9 Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли. – 2009. - Т. XIII. - № 4. - С. 32–39.

10 Бердников Н.М., Гравис А.Г., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е., Москаленко Н.Г., Бочкарев Ю.Н. Льдистость многолетнемерзлых пород, слагающих бугры пучения в бассейне реки Надым // Криосфера Земли. – 2019. - Т. XXIII. - № 2. - С. 29–37.

## О МЕСТЕ И РОЛИ ГЕОКРИОЛОГИИ В НАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

***Р.Б. Бигеева, А.В. Буравцев***
*ППК «Роскадастр», г. Москва*

Вопросы влияния многолетнемерзлых пород (ММП) затрагивают практически все сферы экономической деятельности и находятся на стыке полномочий и интересов различных ведомств, научных и производственных организаций, учитываются в сфере строительства, недропользования, транспортного обеспечения, дорожного хозяйства, при создании специальных государственных инженерно-геологических карт различных масштабов (с отражением геокриологических условий на территориях распространения многолетнемерзлых пород) и тематических карт и атласов.

На фоне высокой востребованности в актуальных и достоверных данных о закономерностях распространения ММП в условиях отсутствия федерального закона, комплексно регулирующего вопросы влияния криолитозоны на все сферы хозяйственной деятельности, единого государственного органа, уполномоченного регулировать и координировать данные вопросы, единой системы учета особенностей проявления геокриологического фактора, единого формата представления данных о криолитозоне, определяющих экологическую безопасность состояния земель Российской Федерации, а также роль и место каждого федерального органа исполнительной власти (ФОИВ) в решении данных вопросов, неоценимую роль сыграли документы стратегического планирования, утвержденные указами Президента РФ [1-3] и распоряжениями Правительства РФ [4-6],

предусматривающие обязательность учета геокриологического фактора при разработке государственных программ во всех критически важных отраслях экономики и определяющие основные векторы развития на ближайшую (2023-2025 гг.) и дальнюю (2026-2035 гг.) перспективы [7-13].

Одной из таких программ является государственная программа Российской Федерации «Национальная система пространственных данных», утвержденная постановлением Правительства Российской Федерации от 01.12.2021 № 2148 (далее – ГП НСПД) [14], и представляющая базовый документ стратегического планирования, отражающий комплексный подход при формировании и реализации мероприятий в сфере земельных и имущественных отношений, развития инфраструктуры пространственных данных, определяющий на федеральном уровне основные принципы, взаимосвязанные цели и задачи реализации государственной политики в этой сфере на среднесрочную и долгосрочную перспективы.

Национальная система пространственных данных (далее также – НСПД) включает в себя данные о пространственных объектах (пространственные данные), в том числе данные о состоянии земель и факторах, определяющих это состояние.

В соответствии с Федеральным законом от 30.12.2015 № 431-ФЗ «О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (далее – Федеральный закон № 431-ФЗ) [15] к пространственным объектам относятся – природные, природно-антропогенные, антропогенные и иные объекты (в том числе здания, сооружения), местоположение которых может быть определено, а также естественные небесные тела.

К пространственным данным (далее также - геопространственные данные (сведения), геоданные) относятся данные о пространственных объектах, включающие сведения об их форме, местоположении и свойствах, данные о процессах и явлениях, в том числе представленные с использованием координат.

Криолитозона, как сложный природный пространственный объект, распространенный на большей части территории РФ, является доминирующим фактором, определяющим состояние земель всех категорий и устойчивость развития территорий Российской Федерации, а необходимость учета его влияния, как было отмечено ранее, предусмотрена приоритетными направлениями многих стратегических документов и прежде всего Стратегией экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, утвержденной Указом Президента РФ от 19.04.2017 № 176 [1], Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года, утвержденной Указом Президента РФ от 26.10.2020 № 645 [3], Стратегией пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 28.12.2024 № 4146-р [4].

Данные и сведения о криолитозоне размещены в различных фондах (федеральный фонд пространственных данных (ФФПД), государственный фонд данных, полученных в результате проведения землеустройства (ГФДЗ), Российский федеральный геологический фонд (РФГФ) и его территориальные подразделения, фонды организаций, выполняющих инженерно-геологические и инженерно-геокриологические работы в областях распространения ММП и иные фонды) и информационных системах (ФГИС «Экомониторинг», ФГИС «ЕФГИ», ФГИС «АСЛАН» и др.).

При этом каждый из этих информационных ресурсов обладает собственным режимом достоверности входящих в него данных, установленным отраслевым законодательством, или созданным исходя из практического опыта решения конкретных задач (без установления нормативных требований). Данное обстоятельство порождает конкуренцию режимов авторитетности полученных данных, зачастую приводящую к конфликту интересов, что препятствует межведомственному информационному взаимодействию.

Тем не менее, несмотря на разрозненность и разобщенность данных о криолитозоне, обусловленные отсутствием единого подхода к требованиям по составу, качеству и форматам представления в цифровом виде, любая информация о ММП, независимо от времени ее создания, получения и размещения в фонд, является уникальной и повсеместно востребованной.

В связи с этим сведения и данные о ММП должны быть учтены, сохранены, приведены в единый формат представления в соответствии с Методикой создания классификаторов видов пространственных объектов и их характеристик [16], актуализированы и имели возможность быть доступными для использования широким кругом заинтересованных лиц независимо от организационно-правовых форм их образования при: проведении работ в областях распространения ММП в связи с освоением территорий в сферах: транспорта (автомобильные, железные дороги,

аэропорты); энергетики (прокладка линий электропередач); градостроительства (строительство зданий, сооружений); развития топливно-энергетического комплекса; при прокладке газопроводов и нефтепроводов; предоставлении государственных и муниципальных услуг в рамках реализации стратегических планов, в том числе Плана реализации Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года, утвержденного распоряжением Правительства РФ от 11.08.2025 № 2149-р [17].

Эффективное решение такой сложной и многоплановой приоритетной задачи в условиях больших вызовов, обозначенных Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента РФ от 28.02.2024 № 145 [18], возможно лишь на основе консолидации и поддержки федеральных органов государственной власти, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, научно-образовательных и предпринимательских сообществ, институтов гражданского общества для выработки единых подходов, механизмов и инструментов реализации с использованием норм действующего законодательства, создавших устойчивые и надежные правовые основы практической реализации данного вопроса и постоянно совершенствующиеся в целях исключения коллизий норм и правовых пробелов для создания гибких и справедливых для всех участников процесса инструментов и механизмов управления.

Одним из приоритетных механизмов реализации вопросов влияния криолитозоны на хозяйственную деятельность, основанным на нормах действующего законодательства об обязательности учета состояния ММП [1-13], является рассмотрение геокриологической составляющей в составе Национальной системы пространственных данных (НСПД) с использованием функциональности федеральной государственной географической информационной системы «Единая цифровая платформа «Национальная система пространственных данных» (далее также – ФГИС ЕЦП НСПД, ФГИС НСПД), включая ее картографический компонент, представляющий собой программный модуль, обеспечивающий предоставление и использование пространственных данных и сведений, содержащихся в указанной системе посредством встраивания такого модуля в государственные и иные информационные системы и информационные ресурсы.

Положение о ФГИС ЕЦП НСПД, утвержденное постановлением Правительства РФ от 07.06.2022 № 1040 [19], определяет порядок создания, эксплуатации и вывода из эксплуатации и развития этой системы, в том числе функции оператора системы; перечень информационных систем, с которыми обеспечивается информационное взаимодействие системы; состав сведений, подлежащих размещению в системе; состав категорий пользователей и поставщиков информации, которая вносится в систему; порядок ее использования в целях предоставления государственных и муниципальных услуг, включая этапы обеспечения такого использования на территориях субъектов Российской Федерации, перечень таких услуг, виды электронных сервисов системы и порядок их использования.

Нормами Федерального закона № 431-ФЗ (статьи 18.1 и 23) [15] и постановления Правительства РФ от 07.06.2022 № 1040 [19] созданы предпосылки для формирования гибких, надежных и взаимовыгодных механизмов информационного взаимодействия поставщиков пространственных данных во ФГИС ЕЦП НСПД, предусматривающие не только обязательность использования ФГИС ЕЦП НСПД, данных ФФПД и сведений ЕЭКО, но и право всех заинтересованных лиц использовать данные, поступившие в ФГИС ЕЦП НСПД из подтвержденных юридически значимых первоисточников с сохранением их правовой принадлежности и авторитетности в каждом отдельном случае.

Яркий пример возможности использования такого механизма взаимодействия продемонстрирован в мероприятиях «Дорожной карты по интеграции информационной системы государственной системы фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты с федеральной государственной географической информационной системой «Единая цифровая платформа «Национальная система пространственных данных», утвержденной Заместителем Председателя Правительства РФ Хуснуллиным М.Ш. 28.04.2025 № МХ-П16-15282 (далее также – ДК ФМ) [20].

ДК ФМ была подготовлена во исполнение пункта 2 перечня поручений Председателя Правительства РФ Мишустина М.В. от 15 ноября 2024 г. № ММ-П47-38578 по итогам стратегической сессии «О развитии Арктической зоны Российской Федерации», в соответствии с которым Росреестром, как федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере геодезии, картографии и использования геоинформационных технологий в Правительство РФ был представлен доклад по вопросу порядка информационного взаимодействия ФГИС ЕЦП НСПД с информационной

системой Росгидромета, в котором Росгидрометом была подтверждена возможность и необходимость интеграции государственной системы фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты (далее - ГСМ СММ) с ФГИС НСПД в рамках соглашения об информационном взаимодействии, заключаемого оператором ФГИС НСПД (ППК «Роскадастр») с поставщиком информации или пользователем, после ввода в эксплуатацию информационной системы ГСМ СММ.

Основной целью реализации ДК ФМ с позиций Росреестра и ППК «Роскадастр» является решение задач, обозначенных ГП НСПД, к числу которых прежде всего относятся задачи государственного управления и обеспечения национальной безопасности Российской Федерации, предусмотренные для решения проблем в сфере развития земельных и имущественных отношений, развития инфраструктуры пространственных данных с необходимостью обеспечения повышения качества государственных услуг и пространственных данных, обеспечения работоспособности цифровых сервисов и систем, проведения мониторинга состояния и использования земель, а также задач, определенных в соответствии с национальными целями развития Российской Федерации, предусматривающими реализацию мероприятий, направленных на создание единой электронной картографической основы (ЕЭКО), в том числе крупных масштабов, в целях наполнения государственной информационной системы ведения единой электронной картографической основы (ГИС ЕЭКО).

В ходе выполнения мероприятий ДК ФМ, рассчитанных до 2030 г., потребуется совершенствование норм действующего законодательства, регулирующего вопросы создания и обновления государственных топографических карт и планов различных масштабов, сведений ЕЭКО, требований к созданию специальных геокриологических карт, предусматривающих в том числе общедоступное описание, библиотеку условных знаков, систему классификации и кодирования и правила цифрового описания, а также разработка новых нормативных правовых актов в части необходимости учета влияния ММП.

Исходя из того, что исследования в рамках фонового мониторинга ММП это лишь часть работ в сфере геокриологической деятельности, хотя и очень важная, опыт их выполнения в рамках ДК ФМ должен быть использован и при проведении работ по геотехническому мониторингу ММП, а также при подготовке проекта федерального закона о многолетнемерзлых породах и иных нормативных правовых актов.

Вполне реально просматриваются следующие перспективы:

1. Результаты геокриологической деятельности в рамках НСПД с использованием функциональных возможностей ФГИС ЕЦП НСПД в контексте рассмотрения сквозных и критических технологий, имеющих межотраслевое значение, позволят обеспечить создание высокотехнологичной продукции (в том числе картографической в виде государственных топографических карт и планов с отражением областей распространения ММП, специальных карт и планов, в том числе геокриологических, инженерно-геокриологических и др.), оказывающей существенное влияние на экономическое развитие за счет изменения существующих рынков такой продукции и формирования новых, имеющих системное значение для функционирования экономики, решения социально-экономических задач, обеспечения обороны страны и безопасности государства.

2. В перспективе с 2030 до 2050 гг. (а может быть и раньше) геокриологическое направление (технология) может рассматриваться в контексте природноподобных технологий, регулируемых распоряжением Правительства РФ от 21.02.2026 № 337-р [21], утвердившим в том числе основные принципы и критерии отнесения технологий к природоподобным, а также приоритетные направления их развития в Российской Федерации.

В заключительной части кратко выделим следующие ключевые моменты.

1) Механизмы, предусмотренные Национальной системой пространственных данных, позволяют на комплексной основе с использованием современных геоинформационных технологий, относящихся к сквозным и критическим, решать сложные вопросы, связанные с обеспечением устойчивого развития территорий и их экологической безопасности с учетом влияния ММП.

2) ФГИС ЕЦП НСПД, как единое окно доступа к достоверным пространственным данным для органов государственной власти и местного самоуправления при осуществлении государственных и муниципальных функций, а также иных заинтересованных лиц обеспечивает возможность сбора, хранения и систематизации любой разрозненной информации о пространственных данных, в том числе о ММП, являясь незаменимым инструментом для решения сложных задач в сфере геокриологической деятельности.

3) Парагенетическая связь ФГИС ЕЦП НСПД, относящейся к сквозной и критической технологии, с многолетней (вечной) мерзлотой, данные о которой тоже имеют сквозной характер, стала

возможной благодаря достижению ФГИС ЕЦП НСПД определенного уровня цифровой зрелости, характеризующейся возможностью обработки большого количества данных, поступающих в систему как в систематизированном, так и в разрозненном виде из различных источников, что создает положительный синергетический эффект.

4) Предполагается, что основным результатом рассмотрения вопросов геокриологической деятельности в рамках НСПД с использованием функционала ФГИС ЕЦП НСПД будет являться обеспечение доступа ко всей информации о криолитозоне (а не только к результатам по фоновому мониторингу ММП), представленной в едином формате согласно требованиям, разработанным совместно с заинтересованными федеральными органами власти, позволяющем создавать с использованием электронных сервисов готовые продукты на основе этих пространственных данных в виде цифровых объектовых схем НСПД, специальных карт и планов и иных цифровых продуктов, использование которых позволит повысить качество данных о криолитозоне, обеспечит кросс-ведомственное взаимодействие в онлайн-режиме, снизит расходы органов власти на получение актуальной и достоверной информации и сведет до минимума вероятный ущерб от деградации мерзлоты, прогнозируемый к 2050 году в среднем до 5 триллионов рублей [13].

***Литература***


1. Указ Президента РФ от 19.04.2017 № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» (по состоянию на 19 апреля 2017 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».
2. Указ Президента РФ от 05.03.2020 № 164 «Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года» (по состоянию на 21 февраля 2023 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».
3. Указ Президента РФ от 26.10.2020 № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» (по состоянию на 27 февраля 2023 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».
4. Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2024 № 4146-р «Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года» (по состоянию на 28 декабря 2024 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».
5. Распоряжение Правительства РФ от 12.04.2025 № 908-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года» (по состоянию на 12 апреля 2025 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».
6. Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» (по состоянию на 6 ноября 2024 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».
7. Федеральный закон от 10.07.2023 № 297-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (по состоянию на 10 июля 2023 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».
8. Федеральный закон от 04.08.2023 № 450-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» (по состоянию на 8 августа 2024 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».
9. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (по состоянию на 28 декабря 2025 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».
10. Федеральный закон от 19.07.1998 N 113-ФЗ «О гидрометеорологической службе» (по состоянию на 28 декабря 2024 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».
11. Постановление Правительства РФ от 25.06.2024 № 854 «Об утверждении Положения о государственном фоновом мониторинге состояния многолетней (вечной) мерзлоты» (по состоянию на 25 июня 2024 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».
12. Постановление Правительства РФ от 08.12.2023 № 2088 «О создании подсистемы государственного фонового мониторинга состояния многолетней (вечной) мерзлоты системы государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды» (по состоянию на 8 декабря 2023 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс.
13. Приказ Минвостокразвития России от 26.11.2021 № 221 «Об утверждении Плана адаптации к изменениям климата Арктической зоны Российской Федерации» (по состоянию на 26 ноября 2021 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».

14. Постановление Правительства РФ от 01.12.2021 № 2148 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Национальная система пространственных данных» (по состоянию на 11 февраля 2025 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».

15. Федеральный закон от 30.12.2015 № 431-ФЗ «О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (по состоянию на 31 июля 2025 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».

16. «Дорожная карта по реализации пилотного проекта по созданию единой системы классификации и кодирования Национальной системы пространственных данных на примере объектов в областях энергетики, транспорта и здравоохранения в 2025 - 2026 годы», утвержденная Заместителем Председателя Правительства РФ от 20.03.2025 № МХ-П16-9617 М.Ш. Хуснуллиным.

17. Распоряжение Правительства РФ от 11.08.2025 № 2149-р «Об утверждении Плана реализации Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года» (по состоянию на 11 августа 2025 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».

18. Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» (по состоянию на 28 февраля 2025 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».

19. Постановление Правительства РФ от 07.06.2022 № 1040 «О федеральной государственной географической информационной системе «Единая цифровая платформа «Национальная система пространственных данных» (по состоянию на 1 ноября 2025 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».

20. «Дорожная карта по интеграции информационной системы государственной системы фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты с федеральной государственной географической информационной системой «Единая цифровая платформа «Национальная система пространственных данных», утвержденная Заместителем Председателя Правительства РФ от 28.04.2025 № МХ-П16-15282 М.Ш. Хуснуллиным, одобренная Председателем Правительства РФ М.В. Мишустиным от 15.05.2025 № ММ-П16-17318. Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».

21. Распоряжение Правительства РФ от 21.02.2026 № 337-р «Об основных принципах и приоритетных направлениях развития природоподобных технологий в Российской Федерации» (по состоянию на 21 февраля 2025 г.). Информационно-справочная система «Консультант-Плюс».

## ВЛИЯНИЕ ПИРОГЕННОГО ФАКТОРА НА МОЩНОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ СЕЗОННО-ТАЛОГО СЛОЯ

***Л.В. Бродт, Н.В. Приходько, А.С. Соромотин***
*ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень*

Арктический регион является наиболее уязвимым в условиях наблюдаемого потепления климата. Темпы повышения температуры в Арктике значительно опережают средние мировые показатели, приводя к глубоким трансформациям состояния криолитозоны и функционирования экосистем [1]. Увеличение летних температур, уменьшение количества осадков и активная разработка нефтегазовых месторождений в Западной Сибири способствуют росту числа пожаров [2]. Пожары уничтожают плотный кустарниково-мохово-лишайниковый покров, который играет важную роль в регуляции энергетического и водного баланса. Утрата растительного покрова ведет к снижению альбедо поверхности, увеличению поглощения солнечного излучения и усилению теплового потока в грунты [3]. Вследствие этого наблюдаются заметные изменения в динамике сезонного протаивания: мощность сезонно-талого слоя (далее - СТС) существенно возрастает, активируются микробиологические процессы, увеличивая эмиссию парниковых газов [4]. Данные процессы способствуют дальнейшему нагреванию атмосферы и дестабилизации инженерных сооружений в данном регионе.

В связи с этим, для изучения влияния пирогенного фактора на динамику СТС был выбран участок, показанный на рис. 1. Исследуемая территория расположена на расстоянии 10 км на северо-восток от п. Заполярный среди кочковатых лишайниковых тундр с единичными лиственницами.

Пожар произошел в даты с 02.08.2016 по 12.08.2016, период возгорания был установлен с помощью сервиса Google Earth Timelapse (https://earthengine.google.com/timelapse/) и данных с сайта Геологической службы США (https://earthexplorer.usgs.gov/). Определение глубины залегания

многолетнемерзлых пород (далее - ММП) проводилось путем бурения скважины с помощью ручного мотобура Stihl BT 360 (Stihl, Германия). Измерение температуры почв производились набором электрических термометров-щупов Tr 46908 (TR di Turoni&c. Snc, Италия) в пробуренной скважине в диапазонах 10-20 см, 50-60 см, 80-100 см, 120-140 см, 160-180 см. Определение наличия многолетней мерзлоты осуществлялось как на основании отрицательной и близкой к 0°C температуры, так и на основе визуального установления наличия кристаллов/линз льда.

На рис. 2 график демонстрирует зависимость толщины СТС от температуры почвы на гари и фоне. На гарях температура почвы значительно выше, достигает +10,7°C, в отличие от фона, где максимальная температура составляет около +6,8°C. Минимальная температура на гарях составляет -0,4°C, а на фоне – -0,0°C. На гарях толщина СТС составляет 160 см, на фоне залегание ММП установлено на глубине 100 см.

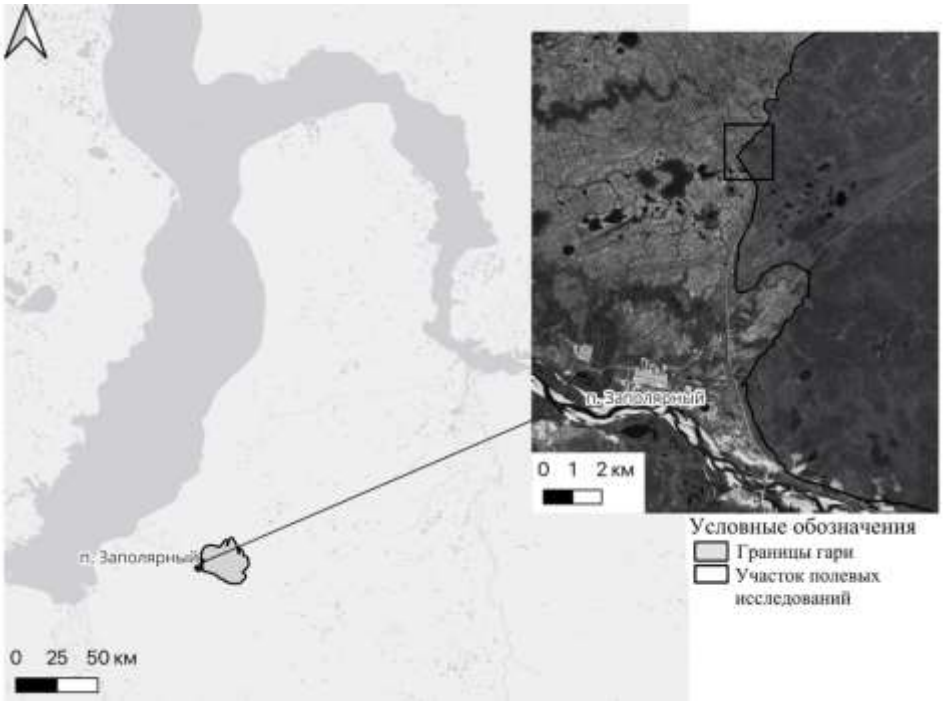



Рис. 1. Расположение участка исследования

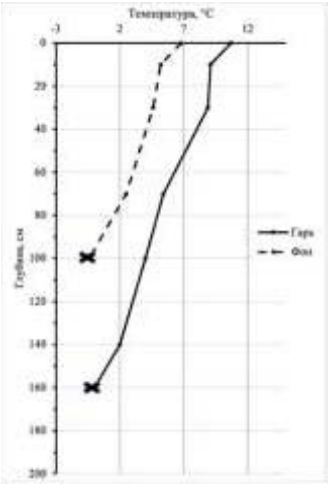



Рис. 2. Изменение температуры почв с глубиной, ✖ наличие ММП

Для выявления различий годового хода температуры почв на гари и фоне нами были использованы цифровые регистраторы температуры малого диаметра Thermochron iButtonTM (далее - логгер). Логгер был заложен в августе 2021 года под мохово-лишайниковый покров и на глубине 5 см для определения влияния наличия (на фоне) или отсутствия (на гари) растительного покрова на годовой ход температуры поверхности.

На рис. 3 отражен среднемесячный ход температуры поверхности. Кривая температуры на гари характеризуется большей амплитудой: зимой температура опускается до -6,11°С, летом поднимается до +21,73 °С. На фоновой площадке колебания менее выражены: зимой не ниже -2,01 °С, летом не выше +15,6 °С.

На рис. 4 разница в показателях температуры в зимний период на глубине 5 см на гари и на фоне не превышает 2,1°С, на гари минимальная температура в январе составила -4,7°С, на фоне – -2,6°С. При этом, в июле температура почвы на гари составила +12,8°С, а на фоне – +4,2°С. Установлено, что пожары в криолитозоне Западной Сибири приводят к значительному увеличению температуры и мощности СТС по сравнению с фоновыми территориями. Потеря теплоизолирующих свойств растительного покрова после сгорания приводит к усиленному прогреванию деятельного слоя, увеличению глубины сезонного протаивания и дестабилизации температурного режима почв. Эти факторы способствуют деградации ММП и изменению функционирования экосистем в условиях потепления климата и антропогенного воздействия.

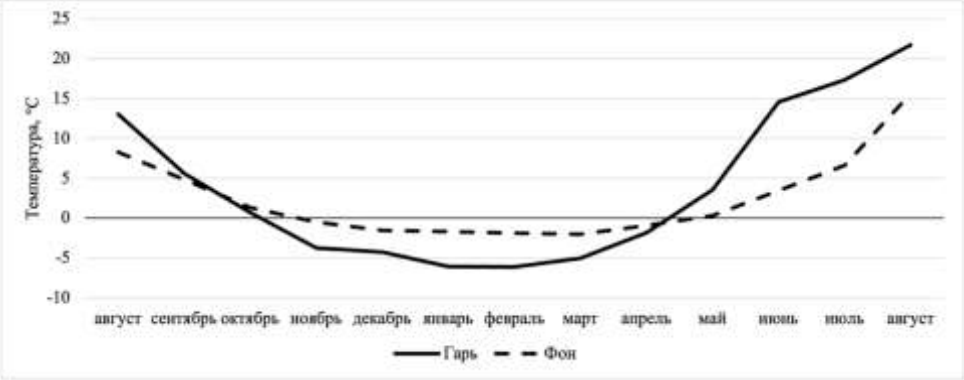



Рис. 3. Среднемесячная температура поверхности

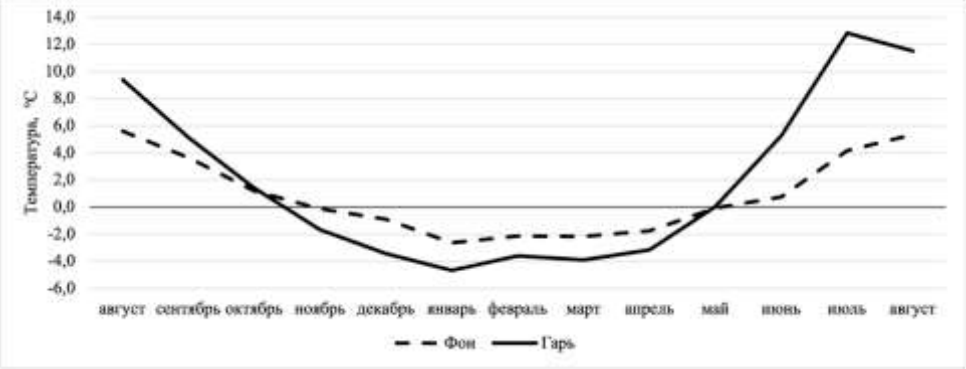



Рис. 4. Среднемесячная температура на глубине 5 см

***Литература***

1 Schuur E., Abbott B., Commane R., Ernakovich J., Euskirchen E., Hugelius G., Grosse G., Jones M., Koven C., Leshyk V., Lawrence D., Loranty M., Mauritz M., Olefeldt D., Natali S., Rodenhizer H., Salmon V., Schädel C., Strauss J., Turetsky M. Permafrost and climate change: carbon cycle feedbacks from the warming arctic // Annual Review of Environment and Resources. – 2022. – V. 47 – P. 343-371.

2 Sizov O., Ezhova E., Tsymbarovich P., Soromotin A., Prihod'ko N., Petäjä T., Zilitinkevich S., Kulmala M., Bäck J., Köster K. Fire and vegetation dynamics in northwest Siberia during the last 60 years based on high-resolution remote sensing // Biogeosciences. – 2021. – V. 18 – No. 1 – P. 207–228.

3 Rocha A., Shaver R. Postfire energy exchange in arctic tundra: The importance and climatic implications of burn severity // Global Change Biology. – 2011. – V. 17 – No. 9 – P. 2831 – 2841.

4 Schuur E., McGuire A., Schädel C., Grosse G., Harden J., Hayes D., Hugelius G., Koven C., Kuhry P., Lawrence D., Natali S., Olefeldt D., Romanovsky V., Schaefer K., Turetsky M., Treat C., Vonk J. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. – 2015. – V. 520. – P. 171-179.

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОКРИОЛОГИИ

***А.В.Брушков***
*кафедра геокриологии МГУ*

Геокриология (мерзлотоведение) является как фундаментальной наукой в числе наук о Земле, рассматриваю вечную мерзлоту как природный объект и ее эволюцию, так и прикладной, изучающей мерзлые горные породы как объекты хозяйственного использования. Криосфера связана с другими геосферами – атмосферой, гидросферой, литосферой, биосферой и социосферой - многочисленными связями, природные процессы в которых обусловлены комплексов факторов разного происхождения. В частности, изменения климата, наблюдаемые в последние десятилетия, приводят к изменениям в животном и растительном мире, преобразованиям ландшафтов, развитию физико-геологических процессов и изменению рельефа, поверхностных вод, ледников и состояния вечной мерзлоты. Вечная мерзлота имеет сложную историю. Признаки ее появления обнаруживаются около 1 млрд. лет назад, но она существовала, вероятно, 2,2-2,5 млрд лет [1] и, возможно, 3,5 млрд. лет назад. Термическая история Земли включает ряд ледниковых эпох, с которыми связаны и периоды распространения вечной мерзлоты. В настоящее время, вероятно, следствие выброса в атмосферу парниковых газов от сжигания топлива продолжается рост средней температуры Земли около градуса °С за сто лет, который ускоряется в последние десятилетия. Вечная мерзлота занимает примерно 11 млн км² из 17,1 млн км² территории России, что составляет немного менее 65%. Однако в арктических регионах мерзлота покрывает около 85% территории. В Северном полушарии площадь вечной мерзлоты составляет приблизительно 14 миллионов км² (15 % от поверхности суши [2]. Мощность мерзлых толщ достигает 600–800 метров (в Якутии до 1500 м). Значительная часть вечной мерзлоты образовалась во время ледниковой эпохи или после освобождения суши от ледников приблизительно 100 000—10 000 лет назад. Возраст самой древней вечной мерзлоты относительно достоверно (по перекрывающему слою вулканического пепла) оценивается в 700 тысяч лет (на Юконе, Канада) [3], однако, учитывая климатические условия четвертичного периода, в Северном полушарии вечная мерзлота могла сформироваться около 3 миллионов лет назад [4]. Поздний плиоцен и ранний плейстоцен, возможно, характеризовались частичным оттаиванием и повторным образованием вечной мерзлоты. Современные мерзлые толщи преимущественно имеют эпигенетическое (эпикриогенное) происхождение, а содержание льда в них в основном количеству воды до промерзания, хотя иногда создаются условия для переноса влаги к фронту промерзания. К сингенетическим (синкриогенным) относятся преимущественно верхнеплейстоценовые и голоценовые пылеватые и глинистые отложения речных долин и приморских равнин, частично делювиальных склонов и днищ озер. Льдистость их может значительно превышать полное льдонасыщение. В частности, повторно-жильные льды в Якутии слагают т.н. "ледовый комплекс" (или «едому») с объемной льдистостью 50-80% и более. В настоящее время происходят заметные процессы изменения состояния вечной мерзлоты. Потепление климата вызывает ее деградацию и активизацию связанных с ней криогенных процессов, которые приводят к заметным нарушениям ландшафтов и устойчивости зданий и инженерных сооружений из-за потери несущей способности оснований. создание условного хозяйственного объекта на Севере обходится в 3-8 раз дороже, чем аналогичного в центральных районах. Для Арктической зоны предполагаемый ущерб экономике был оценен к 2050 г. в 10-12 триллионов рублей [5]. Те данные, которыми мы располагаем, а их недостаточно, свидетельствуют, что наиболее высокие тренды изменения температуры наблюдаются в тех районах, где температуры и без того высоки, и деградация мерзлоты и так более вероятна, и которые относятся к районам интенсивного освоения. С изменением состояния мерзлоты связан ряд важных научных проблем, обусловленных изменением природной среды – от изменения свойств горных пород, поверхности Земли и ландшафтов до медико-биологических, экономических и социальных проблем.

Деградация вечной мерзлоты, криогенные процессы и устойчивость инженерных сооружений

Аномально теплыми были 2007-08 и 2012-14 годы, затем 2016 и 2023, а 2024 год стал самым теплым за всю историю наблюдений с 1850 года, при этом средняя глобальная температура превысила доиндустриальный уровень на 1,5 °С. При этом произошло заметное изменение состояния вечной мерзлоты [6]: процессы пучения стали более активны; активизировался термокарст и солифлюкция; увеличились темпы термоэрозии и термоабразии; наблюдается опускание кровли мерзлоты и надмерзлотных таликов; увеличились площади лесных и тундровых пожаров; значительно снизилась несущая способность грунтов. На естественные процессы влияет

хозяйственная деятельность человека, часто выступая в роли триггера, или дополняя природное тепловое воздействие [7].

В горных системах юга России и Сибири наблюдается формирование таликов и изменение гидрогеологических и гидрологических условий. Это касается и гигантских горных Азии в целом – Памира, Тянь-Шаня, Тибета и Гималаев. Есть риск, как и увеличения вероятности крупных наводнений на зависящих от питания с гор равнинных реках, где расположены районы сосредоточенного проживания населения и играющих важнейшую роль в сельском хозяйстве и обеспечении продовольствием, так и возможного сокращения стока. Проблема, на наш взгляд, требует немедленной организации крупных международных исследований, включая в первую очередь Китай, Индию и среднеазиатские государства.

Значительное число зданий и инженерных сооружений в криолитозоне, до 40%, уже деформировано. В качестве основания в основном служат многолетнемерзлые грунты, более 70% фундаментов – так называемые «висячие» сваи, в которых несущая способность обеспечивается в основном за счет смерзания, их запас прочности в большинстве случаев составляет 15% [8]. Цифры по застройке в криолитозоне неточные, возраст зданий разный, подсчеты проведены по разным методикам. В Воркуте 694 аварийных многоквартирных дома в аварийном состоянии из 838 общего числа, то есть 83% зданий. В Амдерме около 59% деформированных зданий. Салехард находится в сложных инженерно-геологических условиях, там 44,8% аварийных домов от общего числа (999). В Новом Уренгое из 839 домов аварийными являются 354, что составляет 42,2%. По данным на 2022 год, в Ноябрьске 36,3% от общего числа многоквартирных домов — аварийные. Аварийность в Норильске 13%. В Тикси (Якутия) 2 аварийных многоквартирных дома из 80. В Дудинке 3 аварийных многоквартирных дома из 129. В Хатанге около 15% деформированных зданий. В Магаданской области 186 аварийных домов, что составляет 11,7% от общего числа многоквартирных домов. В Анадыре около 15 % деформированных зданий. Вдоль магистральных нефте- и газопроводов из-за нарушения поверхностного стока и других причин происходит заболачивание и как следствие – всплывание и деформации, а также термоэрозия. То же происходит с насыпями железных и автомобильных дорог. На дорогах одной из распространенных проблем является пучение из-за избытка влаги в основании и недостаточного дренажа и других мероприятий по уменьшению влажности грунтов. Характерны деформации линейных объектов, пересекающих ландшафты с разными геологическими и мерзлотными условиями. На линиях электропередач из-за недостаточной глубины установки фундаментов нередко наблюдается выпучивание. Это связано таже с недостаточными изысканиями, устаревшими стандартами, нарушением режима эксплуатации, особенно утечками из коммуникаций, нерациональной планировкой и ремонтом. Очевидно, необходима адаптация инфраструктуры, природных и технических систем к современным изменениям природной среды.

Развитие геоинформационных систем

Геокриологическая карта на территорию бывшего СССР масштаба 1:2 500 000, составленная на кафедре геокриологии МГУ под редакцией проф. В.А.Кудрявцева, до сих пор является образцом составления мерзлотных карт [9]. Как известно, фактический материал для ее составления получен в результате крупно-, средне- и мелкомасштабных комплексных геокриологических, инженерно-геокриологических и мерзлотных съемок. До настоящего времени карта все еще активно используется для подготовки специалистов, в образовательных и научных целях, а также проектно-изыскательскими организациями на стадии обоснования инвестиций. Однако сегодня она требует актуализации из-за изменения состояния вечной мерзлоты, а также развития современных цифровых технологий. К настоящему времени организациями Минприроды уже составлен ряд геологических цифровых карт России. Таким образом, актуализированная цифровая версия этой карты является оной из важных перспективных задач. Необходимо отражения на карте последствий изменения климата и различных видов хозяйственной деятельности. Кроме того, очевидна и необходимость разработки более крупных цифровых карт на осваиваемые регионы, а также их интеграция с базами данных и прогнозными расчетами. Актуальными задачами на современном этапе исследований являются: создание геоинформационных геокриологических систем; разработка методики составления карт районирования криолитозоны России по пораженности территории геокриологическими процессами и другим параметрам геокриологических условий.

Геокриологический мониторинг

Средством, который позволил бы обеспечить адаптацию инфраструктуры, природных и технических систем, является система мониторинга состояния вечной мерзлоты. Она должна будет включать не только наблюдения, но и анализ данных, прогноз состояния мерзлоты и разработку

технических решений по обеспечению устойчивости знаний и инженерных сооружений и защите природной среды. Мониторинговые наблюдения несут основную информацию о динамике криолитозоны, однако в современных условиях они несовершенны: данные фонового мониторинга немногочисленны и разрознены, а материалы геотехнического мониторинга разобщены по архивам различных ведомств и коммерческих обществ. Сделать мониторинг криолитозоны эффективным можно лишь преобразовав его в единый государственный. Он должен представлять собой межведомственную систему: (1) регулярных наблюдений, сбора, накопления, обработки и анализа информации; (2) оценки динамики вечной мерзлоты как в естественных условиях (фоновый мониторинг), так и на освоенных территориях (геотехнический мониторинг); (3) составления прогнозов изменений криолитозоны под влиянием естественных факторов, земле- и недропользования, строительства и жилищно-коммунального хозяйства; (4) а также разработки методов, нормативов и технических решений регулирования состояния вечной мерзлоты для рационального использования природной среды и устойчивого развития. Наблюдения необходимо проводить не только за температурой грунтов, но за рядом других параметров, которые требуются для разработки прогноза температурного режима и развития опасных природных процессов.

Актуальность выполнения работ по мониторингу подчеркивается несколькими факторами, а именно: изменения теплового состояния вечной мерзлоты, ведущие к увеличению теплового баланса, происходят на протяжении нескольких десятилетий, но не достигли своего максимума; инженерно-геологическая, геокриологическая и гидрогеологическая изученность криолитозоны, в том числе и мониторинговыми наблюдениями и исследованиями, не соответствует по своей информативности масштабами и темпам освоения Арктики; современное потепление климата в высоких широтах значительно повысило риски в строительстве и недропользовании, возросли экологические и эпидемиологические угрозы на осваиваемых территориях в АЗРФ (вспышка сибирской язвы на Ямале в 2019 г.). Влияние криолитозоны на формирование экологической обстановки при недропользовании и промышленном освоении является определяющим.

Фактически уже сегодня на территории криолитозоны в работе находится более 10000 наблюдательных скважин на используемой территории (ГТМ), менее 100 фоновых (в условно ненарушенных условиях) скважин Росгидромета, и почти такое же количество у РАН и университетов. К сожалению, эффективность этих наблюдений пока крайне невысока по ряду причин: отсутствует единая техническая политика и координация ведомств в области мониторинга, обмен данными и их сравнение; методики требуют научного обоснования и совершенствования, что не позволяет проводить анализ данных, а особенно разработку прогнозов.

Многие проблемы фундаментальной и прикладной геокриологии также требуют проведения длительных стационарных исследований. Среди таких проблем находится, в частности, прогноз вероятного потепления климата, состояния вечной мерзлоты и активизации опасных геологических процессов, естественная и антропогенная трансформация ландшафтов, вопрос о восстановлении нарушенного почвенно-растительного покрова, проведении очистных мероприятий на загрязненных нефтепродуктами и другими вредными веществами территориях, переноса и накопления загрязнений, и другие. Очевидно, что геокриологический мониторинг целесообразно проводить в составе комплексного мониторинга природной среды.

Начиная с 2020 года по инициативе геокриологов в Совете Федерации РФ и в ряде Министерств РФ поднимался и обсуждался вопрос о создании недостающей и наиболее важной части единой системы мониторинга вечной мерзлоты - системы государственного геотехнического мониторинга. Создание системы геотехнического мониторинга для различных типов сооружений и природных условий требует унифицированной методики и привлечения специалистов, имеющих подготовку и опыт. Актуальность решения проблемы государственного вневедомственного мониторинга была подчеркнута на президентском уровне. По итогам Международного Арктического форума (Мурманск 27 марта 2025 г) Президентом РФ Правительству РФ было поручено: «… создать специальный научный центр для мониторинга многолетней мерзлоты, привлечь к этой работе ведущие федеральные и региональные институты. Их исследования станут научной базой для технологий адаптации арктической инфраструктуры к процессам таяния мерзлоты…». В перечне поручений по итогам рабочей поездки Президента Российской Федерации в г. Мурманск 27 марта 2025 г. это было сформулировано следующим образом (Пр-1079): «утвердить комплексный план мероприятий, направленных на адаптацию инфраструктуры Арктической зоны Российской Федерации к процессам таяния многолетней (вечной) мерзлоты, предусмотреть: создание единого центра многолетней (вечной) мерзлоты при участии федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, научных организаций (независимо

от их ведомственной принадлежности), а также организаций, осуществляющих операционную деятельность в Арктике, и установив, что к функциям этого центра относятся консолидация данных, координация разработки и внедрения технологий адаптации инфраструктуры к процессам таяния многолетней (вечной) мерзлоты. Срок -1 декабря 2025 г.» [10].

Институт мерзлотоведения им. П.И Мельникова СО РАН, Институт криосферы Земли, Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН и подразделения Минприроды проводили и проводят такие исследования на Европейском Севере, в Западной и Восточной Сибири, имея стационары в районе Центральной и Северной Якутии, Маресале (п-в Ямал), оз. Паринсето (п-ов Гыдан), в окрестностях Надыма и других районах как в естественных (фоновый мониторинг), так и в нарушенных условиях (геотехнический мониторинг). На этих площадках изучались или продолжают изучаться динамика промерзания-протаивания, температурный режим грунтов до глубины 10-15 м, криогенные процессы, а также велись наблюдения за восстановлением нарушенных естественных условий. Исследования были также организованы на севере Иркутской области, в Верхнеангарской и Чарской впадинах и других районах. К сожалению, фундаментального обобщения всех выполненных работ на единой основе пока не выполнено, а продолжение работ проблематично из-за сложностей финансирования.

В последние два года развивается проект фоновых (в условно ненарушенных условиях) наблюдений за температурами вечной мерзлоты вблизи метеостанций, выполняемый Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ), пробурено более 70 скважин, предполагается примерно еще столько же. Проект, декларируемый как система мониторинга вечной («многолетней», по принятой Минприроды терминологии) мерзлоты России, был подготовлен Росгидрометом (ААНИИ). Уместно упомянуть, что в основных фундаментальных трудах по геокриологии (мерзлотоведению) появившийся впервые, по-видимому, в БСЭ [11] термин «многолетняя мерзлота» не употребляется, а используется «вечная мерзлота». Основатель геокриологии (мерзлотоведения) М.И. Сумгин понимал при этом слово «вечная» в значении «не перестающий существовать, сохраняющийся на многие века» [11]. Заимствовавший его, очевидно, из народной речи П. А. Кропоткин, а еще раньше А. Д. Миддендорф ввели его в научную литературу, а затем он использовался мерзлотоведами более 100 лет, хотя позднее стали употреблять и термин «многолетнемерзлые породы, или грунты» [8, 13, 14, 15, 16]. В проекте ААНИИ было бы целесообразно: 1) расширить наблюдаемые параметры (влажность и глубина сезонно-талого слоя (СТС) и сезонно-мерзлотного слоя, мощность и плотность снежного покрова, теплофизические характеристики напочвенных покровов, поверхностные и надмерзлотные воды, криогенные процессы, необходимые для количественного прогноза состояния вечной мерзлоты); 2) обеспечить обоснованный подход к размещению наблюдательных скважин, которые должны быть расположены в характерных, представительных для данного региона геологических и ландшафтных условиях; 3) усовершенствовать методику измерения температуры грунтов до глубины 3 м (конструкция и оборудование скважины); 4) усовершенствовать методику наблюдений в части количества наблюдательных скважин. В частности, предложенная конструкция наблюдательной скважины (глубиной 25,2 м с 32 датчиками) насчитывает 18 датчиков в технической (пластиковой) колонне до глубины 5 м, и, кроме того, этот интервал глубин перекрывается металлическим кондуктором диаметром 108-146 мм (с толщиной стенок 5-7 мм), что не позволит провести измерения температур горных пород из-за существенного теплового влияния колонны и кондуктора. Измерения температуры в этом интервале, к тому же проведенные без необходимости с небольшим шагом по глубине, будут, вероятно, ошибочны. Кроме того, при, казалось бы, широком пространственном охвате сети метеостанций неоцененной окажется ландшафтная и, соответственно, мерзлотная мозаичность территорий и принципиальные для прогностических оценок элементы геокриологической этапности развития различных территорий в четвертичное время. Важно, в такой постановке за рамками государственного внимания оказывается геотехнический мониторинг, где заняты хозяйствующие субъекты. В результате геокриологический мониторинг (мониторинг вечной мерзлоты) распадается на 2 изолированные части (фоновую и геотехническую), которые эффективно (для экономики и природоохранных целей) могут функционировать только в виде единой системы. Фоновые наблюдения на ненарушенных территориях и геотехнический мониторинг должны дополнять друг друга, т.к. прогноз состояния вечной мерзлоты возможен на основе анализа изменений, вызванных как деятельностью человека, так и природными трендами. Интересно, что за рубежом фоновый мониторинг вечной мерзлоты проводится не метеослужбами, а в США и Канаде – Геологическими службами, в Швейцарии и Норвегии – университетами, в КНР – Академией наук.

В РФ проводятся наблюдения за вечной мерзлотой также РАН, университетами Минобрнауки, муниципалитетами, предприятиями Минэнерго, Газпромом, Транснефтью и другими. В результате

проведения длительных геокриологических исследований в различных регионах криолитозоны России сформировалась определенная методология организации наблюдательной сети мониторинга криолитозоны, включающая в себя 3-х уровневую иерархию наблюдательных объектов: региональные (фоновые) стационары, площадные стационары (площадки непосредственно на объектах интенсивного техногенеза) и пункты постоянного или периодического функционирования в пределах стационаров (площадки, профили, скважины и закрепленные точки-реперы, пикеты). Региональный геокриологический стационар является основой наблюдательной сети мониторинга криолитозоны. При выборе опорного района размещения стационара необходимо учесть морфологию многолетнемерзлых пород (мощность, прерывистость), типы геологического разреза, активность проявления криогенных геологических процессов, размеры и доступность изучаемой территории, размещение ближайших метеостанций. Конкретизация места стационара и его экспериментальных объектов (площадки, профили, отдельные наблюдательные скважины) может быть осуществлена на основе маршрутных и аэровизуальных работ. В последние годы, на основе многолетнего опыта наблюдений, сформировалась точка зрения, что мониторинг вечной мерзлоты должен включать в себя измерения как температуры горных пород, так и ряда параметров, определяющих их температурный режим, а именно – характеристики снежного и растительного покрова, почв (мощность, плотность, влажность и др.), их теплофизические свойства, условия увлажнения поверхности, динамику подземных вод, а также тепловой поток в качестве необходимых для понимания происходящих изменений и прогноза параметров мерзлотных условий. Кроме того, необходима оценка факторов, влияющих на тепловой режим грунтов, включая динамику климата и техногенные воздействия - утечки сточных вод, перераспределение поверхностного стока, нарушения рельефа или тепловое воздействие на грунтовое основание.

При постановке стационарных исследований следует иметь в виду главную цель этих исследований – создание необходимой эмпирической базы геокриологии, разработку прогнозов состояния вечной мерзлоты, а также решение практических задач. Вместе с тем остаются нерешенными вопросы единой методики измерений, репрезентативности данных и другие. Следует обеспечить научное обоснование периодичности и продолжительности наблюдений. Частота наблюдений, как правило, определяется частотой изменения характеристик самих процессов. Хотя продолжительность наблюдений также определяется продолжительностью процесса, однако при этом важно изменение его характера во времени. Современный технический уровень предполагает проведение наблюдений с применением дистанционных и автоматических методов измерений. Необходимо научное обоснование нормативно-технической базы, создание соответствующих серийных приборов для изучения температурного режима и промерзания-протаивания, свойств снежного и напочвенного покровов; физико-механических свойств грунтов, измерительно-вычислительных комплексов для сбора, хранения и обработки информации и ее обмена. В организации и создании сети стационаров по изучению изменений геокриологических условий имеются и другие трудности. Геологические и изыскательские организации все еще не имеют достаточного опыта их проведения - соответствующие специалисты, как правило, отсутствуют. Несмотря на опубликованные нормативные документы (СП и другие), детальные рекомендации по мониторингу отсутствуют [8], нет всей линейки необходимых серийно выпускаемых технических средств. В нашей стране имеется несколько районов, перспективных для хозяйственного использования в ближайшие годы, к числу которых принадлежат п-в Ямал, Воркута, Таймырский полуостров с Норильским промышленным узлом, Якутия, Чукотка и другие, где такие исследования проводились или проводятся. Сегодня необходимо их возобновление, поддержание и координация. Важным и своевременным шагом является обязательность наблюдений за вновь возводимыми зданиями и сооружениями на вечной мерзлоте, предполагаемая СП «Основания зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах» [8]. Таким образом, актуальными проблемами являются: создание государственной системы мониторинга на федеральном и региональном уровнях с доступом пользователей, принимающих управляющие решения в области рационального природопользования; разработка концепции баз данных и требований к унификации информации по мониторингу за изменением геокриологических условий под влиянием динамики климата и техногенных воздействий на природную среду; оценка влияния глобального изменения климата Земли на криолитозону.

Единая система мониторинга с научным центром необходима из-за отсутствия координации и регулирования работ по мониторингу и обмену данными; единой технической политики и методик измерений и обработки данных, что не позволяет проводить их сравнение и анализ; геотехнический мониторинг на предприятиях и фоновый мониторинг Росгидромета не включает составление прогнозов, без которых мониторинг не эффективен; разработка прогнозов состояния вечной

мерзлоты и решение других проблем, связанных с изменением ее состояния, требуют специалистов высокой квалификации, которых в стране мало.

В рамках системы мониторинга должна происходить оценка, разрабатываться прогноз, управление состоянием природной среды и объектов инфраструктуры в зависимости от воздействия природных и техногенных факторов. Прогноз состояния вечной мерзлоты осуществляется на базе данных геотехнического и фонового мониторинга при условии наблюдения необходимых параметров. Разработка прогнозов возможна на основе организации центра мониторинга. Система наблюдений без прогнозов почти бесполезна. Прогноз состояния вечной требует наблюдения необходимых параметров, которые сегодня практически не наблюдаются ни в одной из существующих систем, а также организации научного центра мониторинга. Недостаток наблюдаемых параметров закрывает путь к научному использованию мониторинга для обеспечения расчёта и прогноза мерзлотных условий в различных природных ландшафтах. Методика геокриологического прогноза, разработанная российскими геокриологами, является общепризнанной на мировом уровне, хотя также представляет серьезную научную проблему и требует своего развития в связи с необходимостью ее интеграции с климатическими, гидрологическими, ландшафтными, биосферными и др. прогнозами. Монография кафедры геокриологии МГУ по прогнозу, в частности, в свое время была переведена и используется в госучреждениях и компаниях в США.

Концепция межведомственной государственной системы мониторинга, которую предлагаем мы, включает создание Межведомственного аналитического центра для сбора, анализа, разработки прогнозов и технических решений по обеспечению устойчивости северной инфраструктуры. Такой центр может быть создан на базе действующего профильного учреждения, имеющего соответствующие кадры и опыт. Необходимо наделение его полномочиями, обеспечивающими создание в Арктике системы мониторинга с интеграцией в нее существующих и будущих сетей, и законодательными правами. Его можно создать на базе МГУ им. М.В. Ломоносова, где сосредоточено наибольшее в Москве число профессиональных мерзлотоведов (около 50) на двух кафедрах - на геологическом и географическом факультетах. Это позволит объединить специалистов-мерзлотоведов и использовать их научный потенциал в создании оперативных карт, прогнозных моделей, и разработки превентивных мероприятий и технологий по смягчению последствий, развитию фундаментальных исследований состояния природной среды северных регионов.

Освоение арктического шельфа.

Изучение арктического шельфа является актуальной задачей в связи с открытием и разработкой на его территории крупнейших углеводородных месторождений и возрождением транспортного значения Северного морского пути. Установлено, что на шельфе арктических морей происходит постепенная деградация вечной мерзлоты. С ней связано увеличение эмиссии метана, вероятно, происходящей из разлагающихся газогидратов, залегающих в основном под подошвой мерзлоты. Необходимо продолжение изучения объемов метана, выделяющихся на арктической акватории. В связи со слабой изученностью криолитозоны арктического шельфа основными проблемами являются следующие: разработка методики комплексного изучения распространения, строения и эволюции криолитозоны арктического шельфа, включающей проведение геофизических и буровых исследований и проведение моделирования динамики криолитозоны на арктическом шельфе с учетом палеоклиматических изменений; создание федеральной программы изучения арктического шельфа, учитывающей необходимость проведения специализированных инженерно-геокриологических изысканий на территории арктического шельфа и прилегающего побережья.

Экспериментальные исследования мерзлых грунтов

Обеспечение надежной устойчивости сооружений в криолитозоне обусловлено достоверностью характеристик прочности и деформации грунтов. Накопленными до настоящего времени данными установлено четкое проявление реологических свойств мерзлых грунтов: снижение прочности и развитие деформации во времени, разработаны параметрические уравнения, позволяющие прогнозировать несущую способность оснований сооружений на период их эксплуатации. Однако уровень состояния исследований и их внедрения в практику строительства по многим проблемам не отвечает современным требованиям высоких технологий и темпов освоения природных ресурсов в регионах криолитозоны. Современные исследования образцов в основном развиваются в плане совершенствования автоматизации измерений, позволяющих проводить одновременно большое количество испытаний. В этом плане достигнуты некоторые успехи, позволяющие лабораториям проводить испытания десятков и в некоторых случаях сотен образцов в относительно короткие сроки, обычно требуемые при проведении инженерно-геологических изысканий. При этом не наблюдается значительных усовершенствований самого оборудования для испытаний, более того,

наблюдается естественная тенденция применения экспресс-методов, т.е. упрощение методик. Вместе с тем развитие методов прогноза устойчивости инженерных сооружений, а также прогноза развития криогенных процессов и проектирование сложных и ответственных сооружений в Арктике требуют применения универсальных и информативных методов испытаний – таких, как трехосные испытания. За рубежом они достаточно давно получили развитие. В практике изысканий до сих пор преобладают определения физических характеристик мерзлых грунтов, а для расчетов устойчивости инженерных сооружений используются рекомендуемые приложения к нормативным документам, что в некоторых случаях приводит к серьезным деформациям инженерных сооружений в криолитозоне. Редко проводятся, например, свайные испытания, позволяющие определить несущую способность фундаментов с большей достоверностью.

Газы и гидраты газов, органическое вещество и биота

Вечная мерзлота, по весьма приблизительным оценкам, содержит большое количество парниковых газов – метана и углекислого газа. Исследования, которые ведутся этом направлении, крайне ограничены. При этом, в связи с изменениями климата и возможной деградацией мерзлоты, вероятно выделение значительного их количества в атмосферу и соответственное усиление парникового эффекта. Кроме того, возможно заболачивание территорий, занятых в настоящее время вечной мерзлотой, и резкая интенсификация метаногенеза. Оценки увеличения эмиссии парниковых газов требуют дополнительных исследований.

Данные свидетельствуют, что наличие свободного CO2 или водного раствора $CO_2$ на глубине 100 м вызовет плавление подземного льда и деградацию мерзлых пород, если их температура не ниже –1,5°C. Следовательно, актуален вопрос о возможности захоронения $CO_2$ в вечной мерзлоте. Большой интерес вызывают взрывные кратеры, воронки до 30-40 м в диаметре и 50 м по глубине на п-ове Ямал и в других метах. Ранее подобные явления были обнаружены на шельфе Печорского и Баренцева морей. Они могут иметь большое значение для безопасности северной инфраструктуры. Актуальными проблемами изучения газов являются: исследование содержания и динамики органического вещества, газов в мерзлых породах; изучение закономерностей формирования и распространения газогидратных образований в криолитозоне; изучение влияния эволюции криолитозоны на динамику зон стабильности газогидратов; оценка роли органического вещества, газов и газогидратов в криолитозоне в эмиссии парниковых газов.

Исследования показали, что мерзлые породы содержат большое количество органического вещества и живых микроорганизмов – бактерий и вирусов, часть которых, несомненно, попали в вечной мерзлоту в далеком прошлом – тысячи и, вероятно, даже миллионы лет назад. Попадая при деградации мерзлоты в современную биосферу, они взаимодействуют с современной микробиотой и высшими организмами с последствиями, которые невозможно предсказать. Нельзя, в частности, исключать возможность возникновения новых патогенных и одновременно резистентных форм микроорганизмов и риска эпидемий среди животных и людей. На территории распространения вечной мерзлоты находится большое число могильников животных и людей, погибших в результате эпидемий прошлого, в том числе неизвестных. Важна организация комплексных исследований в этом направлении.

Моделирование тепловых процессов

Основной проблемой традиционного мерзлотоведения является тепловое состояние и эволюция вечной мерзлоты. Однако сбор данных по ее температурам не всегда сопровождается моделированием, недостаточно проводит их анализ и обобщение, особенно на региональном и, что сегодня особенно актуально, на глобальном уровне. Математическое моделирование тепловых процессов в стране развивается недостаточно. Численными методами прогноза температурного режима грунтов многие организации, имея в виду очевидные потребности северного строительства и индустрии, занимаются достаточно много, в том числе проектировщики. Настораживает, однако, тенденция интегрировать алгоритмы расчетов вместе с базами данных по характеристикам грунтов и напочвенным покровам, которые неполны, неточны и не могут быть использованы в новых осваиваемых районах, где должны проводиться лабораторные и полевые измерения теплофизических параметров. К сожалению, пока отсутствуют и программные продукты, где совместно с задачей о теплопереносе было бы возможно прогнозировать массоперенос, в частности, решать задачу пучения с миграцией влаги. Исследование криогенных процессов носит преимущественно описательный характер, а их количественный прогноз основывается на разработках тридцатилетней давности. Практически не совершенствуются методы предупреждения опасных процессов. Актуальными задачами на современном этапе исследований являются: создание программ численного решения задач для прогноза динамики природных и природно-техногенных геокриологических процессов, в

том числе сопряженных задач тепло- и массопереноса; разработка методики оценки риска развития опасных геокриологических процессов для сооружений при освоении месторождений полезных ископаемых и создания инфраструктуры.

Оснащение, подготовка кадров и другие проблемы

В геокриологии в целом недостаточно используются новые методы и подходы к решению научных задач. Уровень технической оснащенности значительно отстает от мирового уровня, что определяет не очень высокие качество и объемы полученных данных. Большая часть геокриологов, а их число и так сокращается, не участвует в разработках непосредственно для народного хозяйства, за исключением решения частных проблем инженерных объектов. Наша организационная работа в целом стала лучше, но ее следует развивать для координации деятельности институтов, кафедр, лабораторий. Связи с общественностью улучшились, но остаются слабыми. Нашей деятельности требуется более широкое освещение на телевидении, в журналах и газетах, в интернете. Связи со школами нуждаются в значительном улучшении. Поиск талантливой молодежи должен быть поставлен нами как первостепенная задача. Необходимо провести работу по обновлению и созданию новых учебников и учебных пособий, обеспечить издание научно-популярных работ по геокриологии. Следует применять лучшие отечественные и зарубежные методики преподавания, в том числе и развитие дистанционных методов. Важно развивать связи с производственными компаниями и предприятиями, работающими в криолитозоне. Требуется обеспечить участие студентов в совместных работах, добиваться развития практик и стипендий от научных и производственных организаций. Кроме того, важно поддерживать новые, развивающиеся научные исследования, в числе которых экологическая геокриология, биогеохимия и микробиология мерзлых пород, криогенные ресурсы Земли, применение искусственного интеллекта.

Работающих специалистов-геокриологов в России менее тысячи, однако потребность, очевидно, значительно больше. При этом подготовка геокриологов сокращается. Сегодня она проводится всего в трех центрах. Кафедра геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (существует с 1953 г.) включает около 30 сотрудников, среди них – 5 докторов наук. Выпускает не более 10-12 магистров в год, а всего студентов на кафедре около 60 чел. В год осуществляется подготовка 1-2 кандидата наук. Близкая ей кафедра – на географическом факультете МГУ – кафедра криолитологии и гляциологии. Общий состав коллектива кафедры около 20 человек, из них 3 доктора наук. Кафедра криосферы Земли в Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе (МГРИ) закрыта в связи с реорганизацией и малочисленностью (преподавание мерзлотоведения ведётся на кафедре инженерной геологии). Кафедра криологии Земли в Тюменском индустриальном университете, сотрудников 16 человек (из них 2 ассистента), студенты: бакалавры — 20 чел. (всего 97 студентов), магистратура — 7 чел. Кафедра мерзлотоведения в Северо-Восточном федеральном университете имени М. К. Аммосова (СВФУ) закрыта. Но специалисты в области геокриологии сейчас продолжают готовиться на кафедре «Прикладная геология» геологоразведочного факультета СВФУ. По окончанию выпускники получают статус специалистов. В среднем выпускают 9 выпускников в год, бакалавров и магистрантов не готовят. Кафедрой мерзлотоведения в СВГУ за всю историю было выпущено около 500 специалистов.

Проблемы геокриологического образования в России, требуют безотлагательного решения. Первоочередные практические шаги следующие. Необходимо внедрение «дуальной системы образования», которая позволяет воспитывать у студентов инициативность, любознательность, способность к принятию самостоятельных решений, выработку практических навыков. Совместная работа ученых, преподавателей, студентов и школьников должна быть направлена на повышение образовательного уровня молодежи, выработку у них навыков исследовательской и аналитической работы. Требуется реализация практико-модульного обучения, прохождение практических занятий на базе производственных площадках предприятий-партнеров. Необходимо более тесное взаимодействие с научными организациями РАН, отраслевыми и корпоративными исследовательскими институтами и лабораториями.

Проблемы образования обусловлены и характером специальности. Вечная мерзлота находится далеко от центра, а миграционный поток направлен в обратном направлении. Северные специальности не пользуются спросом у абитуриентов из центральных районов России. Несмотря на субсидии выпускникам, подготовка в региональной школе недостаточна для поступления в ведущие вузы. Считаю, что необходима государственная программа обучения в области геокриологии и других естественных наук для северян и коренных северных народов.

Особое место в образовательном процессе должны занимать курсы повышения квалификации, важно расширение послевузовского образования.

Заключение

Современный этап развития криолитозоны характеризуется активными климатическими и техногенными воздействиями и развитием опасных природных процессов. Толщи многолетнемерзлых пород отличает большая чувствительность к изменениям условий теплообмена. Комплексное изучение природных изменений может осуществляться на стационарах, осуществляющих длительные наблюдения за динамикой криолитозоны. Высокая эффективность стационарных многолетних исследований была продемонстрирована на примере работы ряда таких стационаров, получивших развитие в 1960-1980 годах, а затем в основном прекративших свою деятельность. В настоящее время накоплен значительный опыт строительства в криолитозоне, однако в целом испытывают деформации до 40% зданий и инженерных сооружений. В связи со значительными инженерно-геологическими и экологическими проблемами территорий Сибири и Крайнего Севера, обусловленными изменением климата и деградацией вечной мерзлоты, необходима организация государственной вневедомственной системы геокриологического мониторинга В рамках этой системы мониторинга должны проводится наблюдения, сбор, хранение, обработка и анализ данных наблюдений, разрабатываться прогноз, управление состоянием природной среды и объектов инфраструктуры в зависимости от воздействия природных и техногенных факторов. Прогноз состояния вечной мерзлоты осуществляется на базе данных геотехнического и фонового мониторинга при условии наблюдения необходимых для прогнозных расчетов параметров. Система мониторинга должна включать создание федерального и региональных центров мониторинга.

***Литература***

1 Мельников В.П., Брушков А.В., Хименков А.Н. О развитии теоретических основ геокриологии // Криосфера Земли 2015, №2, с.6-14.

2 Strauss J., Schirrmeister L. Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability (англ.) // Earth-Science Reviews. — 2017.

3 Froese, D.G., Westgate, J.A., Reyes, A.V., Enkin, R.J., Preece, S.J., 2008. Ancient permafrost and a future, warmer Arctic. Science 321

4 Opel T., Bertran P., Grosse G. et al.. Ancient permafrost and past permafrost in the Northern Hemisphere. Scott A. Elias. Encyclopedia of Quaternary Science, 3rd Edition, Elsevier, 2024

5 Брушков А.В., Васина А.И., Кияшко Н.В., Мельников М.И., Осокин А.А., Черняк Ю.В., Фалалеева А.А. Глобальное потепление и состояние вечной мерзлоты в России. Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2024;(6):4-11

6 Губарьков А.А., Лейбман М.О., Хомутов А.В. Криогенные процессы в естественных и техногенных условиях на Харасавэйском месторождении // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2012. № 4, с. 21-27.

7 Пономарева О.Е., Гравис А.Г., Бердников Н.М. Динамика криогенных процессов в северной тайге Западной Сибири в условиях меняющегося климата // Десятая Межд. Конф. по мерзлотоведению (TICOP). Том 3. – Тюмень: Печатник, 2012, с. 431-436.

8 СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Опубликовано: 30 декабря 2020.

9 Объяснительная записка к геокриологической карте. СССР масштаба 1:2 500 000, 1991. – 126 с.

10 Поручение Президента РФ Пр-1079 от 16 мая 2025 г.

11 Большая советская энциклопедия. в 30-ти т.. – 3-е изд.. – М.: Совет. энцикл., 1969 - 1986.

12 Словарь русского языка: в 4 т. Ожегов С. И.- 3-е изд. - Москва: Рус. яз., 1985-1988.

13 Сумгин М.И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. Москва, 1937.

14 Сумгин М.И., Качурин С.П., Толстихин Н.И., Тумель В.М. Общее мерзлотоведение / Москва, Ленинград: Акад. наук СССР, 1940

15 Цытович Н.А. Строительство в условиях вечной мерзлоты. Изд-во АН СССР, 1941.

16 Достовалов Б.Н., Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение: учеб. пособие для студ. геол. спец. вузов / М.: МГУ, 1967. - 403 с.

# АНОМАЛИИ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ДАТИРОВАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ AMS ГОЛОЦЕНОВЫХ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ НА ЗАПАДНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ

***Н.А.Буданцева, Ю.К.Васильчук***
*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

В европейском секторе Российской криолитозоны детально изучены только несколько голоценовых ледяных жил и данные об их изотопном составе очень ограничены [1-4]. В связи с этим полученные новые изотопные данные по AMS $^{14}$C датированным повторно-жильным льдам, изученным на лайде Байдарацкой губы, имеют большое значение для реконструкции зимних климатических условий голоцена. Основная цель работы – оценить приблизительную среднеянварскую палеотемпературу наиболее холодного зимнего месяца (февраля) на западном побережье Байдарацкой губы Карского моря в ключевые периоды голоцена.

Изученный разрез располагается вдоль участка Уральского берега Байдарацкой губы между о-вами Левдиев и Торасовэй, в 500 м к юго-востоку от устья р. Нгарки-Тамбъяхи, в 5 км от вахтового поселка Ярынская (68°51’20.27” с.ш., 66°52’6.51” в.д., рис. 1, а). Во время полевых исследований в конце лета 2022 г. в обнажении лайды была обнаружена серия ледяных жил высотой не более 1,5 м, шириной от 0,3 до 1,5 м. Детально исследованы 7 ледяных жил (ПЖЛ 1 – ПЖЛ 7), из которых отобраны образцы льда для анализа стабильных изотопов. Изо льда трех ледяных жил (ПЖЛ 3, 4 и 7) экстрагирован органический материал для радиоуглеродного AMS датирования.

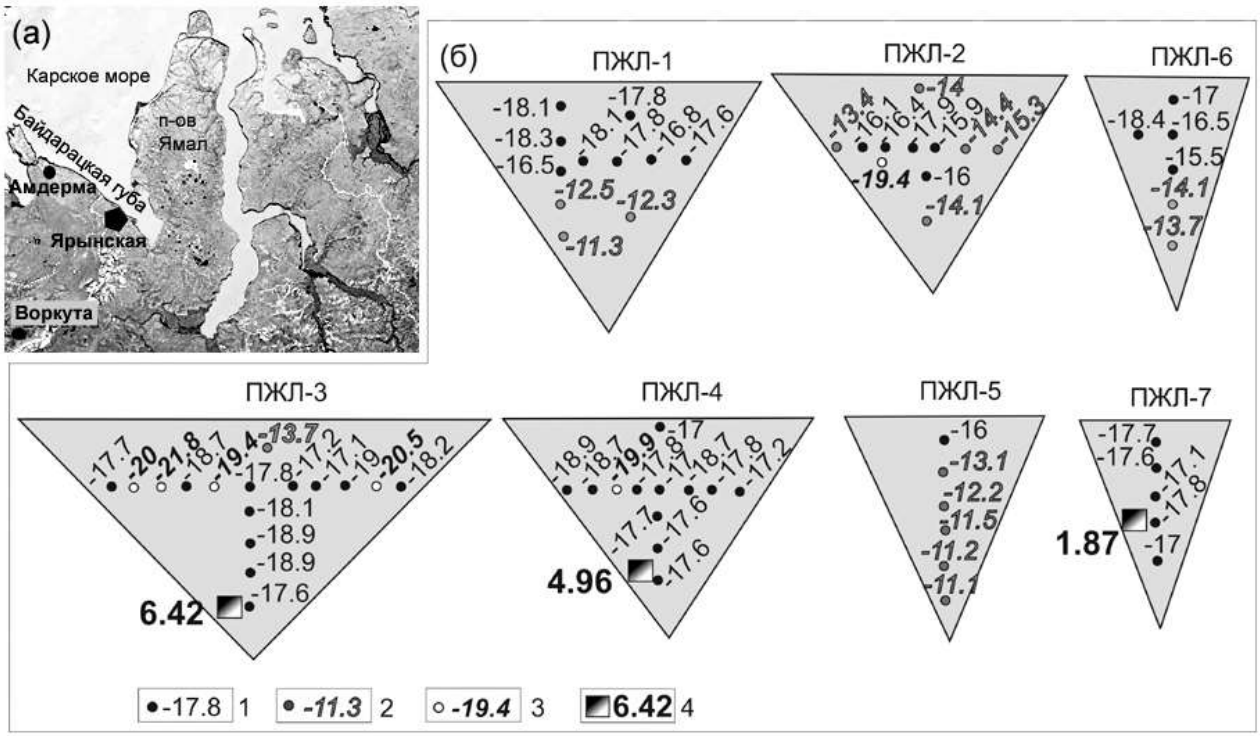



Рис. 1. Расположение участка исследований вблизи пос.Ярынская на побережье Байдарацкой губы (а) и исследованные повторно-жильные льды со значениями $\delta^{18}$O (1 – средние (модальные), 2 – экстремально высокие, 3 – экстремально низкие) и $^{14}$C AMS датировками льда (4)

***Радиоуглеродный возраст повторно-жильных льдов и вмещающих отложений***

По ПЖЛ-3 получена [2] датировка 6420 кал. лет назад, по жиле ПЖЛ-4 – датировка 4960 кал. лет назад и по ПЖЛ-7 – датировка 1870 кал. лет назад (см. рис. 1, б). Полученные датировки показывают, что жилы формировались в основном в среднем и позднем голоцене, между 6,4 и 1,9 кал. лет назад (северогриппианский и мегхалайский периоды). Датировка 6,4 кал. лет назад получена для самой широкой из изученных жил и, скорее всего, фиксирует раннюю стадию субаэрального развития лайды. В 2024 г. в рамках экспедиции НИЛ геоэкологии Севера в районе пос. Ярынская (68.855024

с.ш., 66.877447 в.д.) было исследовано обнажение лайды, в котором вскрыты повторно-жильные льды. По торфу, вмещающему жилы, получены датировки от 3,09 до 0,73 кал. лет назад, что показывает позднеголоценовый возраст массива на данном участке [4]. Ранее в верхней части разреза лайды Ф.А.Романенко с соавторами [1] была получена датировка 0,88 кал. лет назад, что указывает на приблизительное время завершения аккумуляции лайды.

***Изотопный состав повторно-жильных льдов***

Голоценовые ПЖЛ, изученные на лайде Байдарацкой губы, характеризуются довольно широким диапазоном значений изотопного состава [2]: значения $\delta^{18}O$ варьируют в диапазоне более 10‰ от –11,1 до –21,8‰, а значения $\delta^{2}H$ – в диапазоне более 80‰ от –80,4 до –161,4‰ (таблица). Это существенно отличает их от голоценовых ПЖЛ, ранее изученных на Европейском Севере России и на севере Западной Сибири: для большинства жил значения $\delta^{18}O$ варьируют не более чем на 4‰, вариации значений $\delta^{2}H$ находятся в диапазоне не более 30-35‰ [1, 5-8]. Даже в пределах одной жилы диапазон значений $\delta^{18}O$ может достигать 5-7‰ (например, в ПЖЛ-1, 2, 3, 6) (см. рис. 1, б, таблица). Близкие значения и диапазон были получены для ледяных жил, исследованных в 2024 г. на лайде Байдарацкой губы: значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ варьировали в диапазоне от −10.6 до −21‰ и от −82.7 до −155‰, соответственно [4].

Анализ полученных изотопно-кислородных данных показал, что около 67% значений $\delta^{18}O$ находятся в диапазоне от –15,5 до –19‰. В этом диапазоне находятся все значения $\delta^{18}O$ для голоценовых повторно-жильных льдов, исследованных на побережье Байдарацкой губы, а также в районе г. Воркута [1-4].

Таблица

Значения $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ и $d_{exc}$ (минимальные, средние, максимальные) в повторно-жильных льдах (ПЖЛ) в отложениях лайды Байдарацкой губы в районе пос. Ярынская. По [2]

| Номер ПЖЛ | Кол-во образ-цов | $\delta^{18}O$, ‰ | | | $\delta^{2}H$, ‰ | | | $d_{exc}$, ‰ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Мин. | Сред. | Макс. | Мин. | Сред. | Макс. | Мин. | Сред. | Макс. |
| ПЖЛ-1 | 11 | –18,3 | –16,1 | –11,3 | –134,7 | –118,8 | –81,2 | 7,7 | 10,1 | 11,8 |
| ПЖЛ-2 | 11 | –19,4 | –15,7 | –13,4 | –143,8 | –114,6 | –97,1 | 9,6 | 11,2 | 13,4 |
| ПЖЛ-3 | 16 | –21,8 | –18,4 | –13,7 | –161,4 | –136 | –103,4 | 6,4 | 11,3 | 13,2 |
| ПЖЛ-4 | 12 | –19,9 | –18,0 | –17 | –145,5 | –132,5 | –124,7 | 10,2 | 11,2 | 13,5 |
| ПЖЛ-5 | 6 | –16,0 | –12,5 | –11,1 | –118,8 | –92,4 | –80,4 | 7,0 | 7,7 | 9,3 |
| ПЖЛ-6 | 6 | –18,4 | –16,0 | –13,7 | –135,0 | –117,0 | –100,6 | 9,1 | 9,9 | 12,0 |
| ПЖЛ-7 | 5 | –17,8 | –17,4 | –17,0 | –133,0 | –129,5 | –125,9 | 9,6 | 10,1 | 10,7 |

Около 24% значений $\delta^{18}O$ заметно выше и варьируют от –11,1 до –15,4‰. Аномально высокие значения изотопного состава в верхних частях жил ПЖЛ-2 и ПЖЛ-3 могут быть результатом проникновения современных ледяных жилок, характеризующихся более тяжелым изотопным составом. Высокие значения изотопов в более глубоких частях жил ПЖЛ-1, ПЖЛ-2, ПЖЛ-5 и ПЖЛ-6 могут быть признаком участия поверхностных вод в формировании льда жил. Как правило, более высокие значения изотопного состава ($\delta^{18}O$ от –11,3 до –13,7 ‰) характерны для образцов льда, содержащих заметную примесь глинистого грунта и имеющих более высокую минерализацию (не менее 30 мг/л), в то время как для большей части образцов жильного льда значения минерализации оказалась довольно низкими – от 16,5 до 27,8 мг/л. Более того, изотопный состав воды некоторых озер на низкой террасе на побережье Байдарацкой губы близок к наиболее высоким значениям изотопного состава во льду исследуемых жил. Возможно, что неглубокие озера на лайде промерзали до дна, морозобойное растрескивание иногда происходило в донных отложениях подо льдом. Весной талые снеговые воды, смешанные с озерной водой, содержащей примесь грунтовых частиц, заполняли открытые трещины, формируя ледяные жилы.

Следует отметить, что значительный диапазон изотопных значений в жилах (до 10‰ по величине $\delta^{18}O$), вскрытых в одном обнажении, ранее был отмечен при исследовании позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов на низкой заболоченной морской террасе на побережье Восточно-Сибирского моря [9]. По мнению авторов исследования, причиной такого контрастного изотопного состава во льду жил является возможное участие поверхностных болотных вод в формировании жил.

Около 9% значений $\delta^{18}O$ льда жил на лайде Байдарацкой губы заметно ниже средних значений варьируют от –19,1 до –21,8‰ (см. таблицу). Аномально низкие значения изотопного состава могут свидетельствовать о более суровых зимних условиях, когда выпадал существенно более изотопно

легкий снег. Вполне возможно, что в экстремально холодные зимы снег может непосредственно участвовать в формировании жил, заполняя широкие морозные трещины [2].

Температурные ряды по метеостанциям в районе исследований показывают, что средняя зимняя температура воздуха (рассчитанная за период с ноября по март, когда среднесуточная температура воздуха стабильно ниже 0°С) колеблется в широком диапазоне от –11 до –22°С (г.Воркута) и от –9,6 до –20,2°С (г. Амдерма). Изменчивость зимней температуры в европейской части Евразии в основном объясняется Североатлантическим колебанием (NAO). За период 1979-2021 гг. в Евроатлантическом секторе были выделены режимы зимней атмосферной циркуляции, соответствующие Североатлантическому колебанию (NAO) в положительной (NAO+) и отрицательной (NAO−) фазах. Режим NAO+ характеризуется повышенной частотой аномально теплых суток на Европейском континенте, в то время как режим NAO– характеризуется повышенной частотой аномально холодных суток [10, 11]. Возможно, что подобные температурные циклы отмечались и в течение голоцена. Дополнительным источником изотопно легкого снега могли быть воздушные массы, движущиеся на север из отдаленных континентальных регионов. Исследование, проведенное на северо-востоке европейской части России, показало, что зимой, когда воздушная масса перемещалась из континентальной области на север (на участке протяженностью около 1400 км), значения $\delta^{18}O$ в выпадающем снеге снижались на 1,4‰ на 1° широты [12].

Соотношение $\delta^2H$-$\delta^{18}O$ для льда жил ПЖЛ-1 – ПЖЛ-7 описывается уравнением $\delta^2H = 7{,}5\ \delta^{18}O + 2{,}1$ (рис. 2), наклон линии немного ниже, чем для глобальных осадков – глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ). Значения $d_{exc}$ во льду варьируют в диапазоне от 6,2 до 13,7‰ (см. таблицу), что близко для значений в атмосферных осадках. Наиболее вероятно, что основным источником для образования льда являлась талая снеговая вода. Возможное участие озерных вод в формировании жил не привело к изменению соотношения $\delta^2H$-$\delta^{18}O$ в жильном льду, поскольку точки значений $\delta^{18}O$ и $\delta^2H$ для озер, исследованных на низких морских террасах Байдарацкой губы, расположены вблизи ГЛМВ (см. рис. 2), что предполагает атмосферное происхождение озерной воды и незначительное влияние испарения на ее изотопный состав.

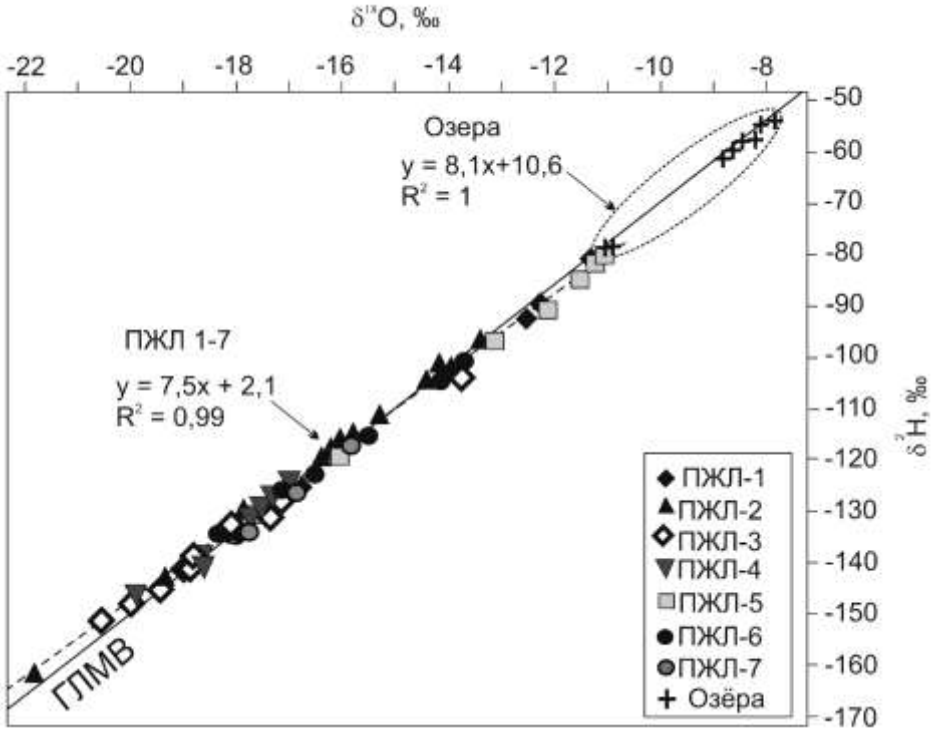



Рис. 2. Соотношение $\delta^{18}O$-$\delta^2H$ во льду ПЖЛ-1 – ПЖЛ-7, исследованных на лайде Байдарацкой губы и озерах на лайде и первой террасе Байдарацкой губы (по данным из [1]). ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод

Для льда жилы, исследованной Ю.Н.Чижовой и др. [4] на лайде Байдарацкой губы, значения $\delta^{18}O$ и $\delta^2H$ льда расположены на линии, описываемой уравнением $\delta^2H=6{,}97\delta^{18}O–8{,}77$ ($R^2=0{,}99$). Низкий наклон линии соотношения $\delta^2H$-$\delta^{18}O$, низкие значения $d_{exc}$ (от 2,5 до 9,4‰), а также высокие значения изотопного состава в верхней и боковой частях жилы, близкие к значениям для шлирового льда из

вмещающих отложений, указывают, по мнению авторов [4], на процессы протаивания, смешивания талого льда и поверхностных вод и повторного замерзания. На диаграмме $\delta^2H$-$\delta^{18}O$ все образцы льда расположены на чёткой линии смешения двух компонент: "легких" талых повторно-жильных льдов и "тяжелых" поверхностных вод. Процессы вторичного образования льда на контактах жил, скорее, носят локальный характер и зависят от условий обводненности, из-за которых в каких-то частях полигонального торфяника может протаивать жильный лед на фоне стабильного состояния остальных жил. На возможное частичное протаивание жилы, по мнению Ю.Н.Чижовой и др. [4] могут указывать $^{14}C$-датировки по вмещающему торфу: слева от жилы на глубине 0,8 м возраст торфа составил 3085 кал. лет, а справа от жилы на этой глубине возраст торфа составил 726 кал. лет, что близко к возрасту поверхностного торфа (795 кал. лет), т.е. возможно, что в результате обводнения и протаивания произошло смещение вниз поверхностного торфа [4].

Полученные изотопные значения по жильному льду были использованы для расчета палеотемпературы воздуха февраля в период роста жил. Расчет основан на уравнении $T_{ср.янв}= 1,5\ \delta^{18}O_{с.ж.}$ (± 3°C) (1), где $\delta^{18}O_{с.ж.}$ – изотопный состав современных ледяных жилок, $T_{ср.янв.}$ – среднеянварская температура воздуха на ближайшей метеостанции [13]. Значения $\delta^{18}O$ в современных ледяных жилках, отобранных вблизи Амдермы и Воркуты, составляют –15,2‰ и –16‰, соответственно [14, 3]. Анализ температурных рядов по этим метеостанциям [15, 16] показывает, что $T_{ср.фев.}$ варьирует в широком диапазоне от –10 до –31°C. Применение зависимости (1) дает среднее значение $T_{ср.фев.}$ –23, –24°C с поправкой ±3°C на более холодные и теплые периоды. Рассчитанные температуры близки к зафиксированным на метеостанциях Амдермы и Воркуты, поэтому уравнение (1) можно считать вполне корректным для палеотемпературных реконструкций для данного региона, с учетом того, что морозобойное растрескивание и рост повторно-жильных льдов обычно происходит в более холодные зимы.

Для палеотемпературных реконструкций использовались модальные (наиболее часто встречающиеся) значения $\delta^{18}O$ по жильному льду в диапазоне от –15,5 до –19‰. Для характеристики экстремально низких температур воздуха были использованы значения $\delta^{18}O$ в диапазоне от –19,1 до –21,8‰. Согласно расчетам по уравнению (1) в период образования ледяных жил среднефевральская температура воздуха ($T_{ср.ф.}$) в период формирования ПЖЛ на лайде Байдарацкой губы варьировала от –23 до –29°C; в самые суровые зимы $T_{ср.ф.}$ могла снижаться примерно до –33°C [2]. Если рассматривать изотопные значения в датированных фрагментах жил, можно сделать более конкретный вывод о том, что в интервале 4,9–6,42 тыс. кал. лет назад (северогриппианский этап голоцена) $T_{ср.ф.}$ приблизительно варьировала от –26 до –29°C. Для более позднего периода голоцена (мегахалайского этапа) палеотемпературная реконструкция выполнена по фрагменту жилы, датированному около 1,87 тыс. кал. лет назад. Исходя из значений $\delta^{18}O$ в этом фрагменте жилы, $T_{ср.ф.}$ в период около 1,9 тыс. кал. лет составляла –26, –27°C.

***Выводы***

1. Ранняя стадия формирования лайды Байдарацкой губы Карского моря, сопровождавшаяся ростом повторно-жильных льдов, датируется серединой северогриппианского периода голоцена (около 6-7 тыс. кал. лет назад). Активный рост ледяных жил также происходил и в позднем голоцене, в течение мегхалайского период (около 2 тыс. кал. лет назад).

2. Голоценовые ледяные жилы в разрезе лайды характеризуются широким диапазоном значений изотопного состава, что ранее не было отмечено в голоценовых жилах в этом регионе: значения $\delta^{18}O$ варьируют более чем на 10‰, значения $\delta^2H$ варьируют более чем на 80‰. Были получены как аномально высокие значения изотопного состава ($\delta^{18}O$ от –11,1 до –15,4‰, $\delta^2H$ от –80 до –109‰), так и аномально низкие значения изотопного состава ($\delta^{18}O$ от –19,1 до –21,8‰, $\delta^2H$ от –141 до –161,4‰). Значения $\delta^{18}O$ в диапазоне от –15,5 до –19‰ и $\delta^2H$ в диапазоне от –110 до –140‰ рассматриваются как средние (модальные).

3. Основным источником для образования льда являлась талая снеговая вода, однако аномально высокие значения изотопного состава в ледяных жилах позволяют предполагать участие озерной воды в формировании льда. Аномально низкие значения изотопного состава, скорее всего, отражают периоды более суровых зимних температурных условий во время формирования жил, а также могут быть результатом непосредственного заполнения более широких морозобойных трещин изотопно легким снегом.

4. Приблизительная среднеянварская (среднефевральская) температура воздуха в середине северогриппианского периода голоцена в основном варьировала от –26 до –29°C, в середине мегхалайского периода голоцена она составляла около –26, –27°C.

***Благодарности***

Авторы благодарят асп. А.П.Гинзбурга, д.г.-м.н. И.В.Токарева, к.г.н. Э.П. Зазовскую, д.г.н. А.К.Васильчук, к.г.-м.н. В.С. Исаева, И.А. Агапкина, Р.М. Аманжурова, Е.И. Горшкова, Р.В. Собина. за помощь в полевых и лабораторных исследованиях.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

***Литература***

1 Романенко Ф.А., Воскресенский К.С., Тарасов П.Е., Андрееев А.А., Николаев В.И., Сулержицкий Л.Д. Особенности формирования рельефа и рыхлых отложений Западного Ямала и побережья Байдарацкой губы (Карское море) // Проблемы общей и прикладной геоэкологии севера. Под ред. В.И.Соломатина. М.: Изд- во Моск. ун-та. – 2001. – С. 41-68.

2 Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Токарев И.В., Гинзбург А.П., Васильчук А.К., Васильчук Дж.Ю. Радиоуглеродный возраст и стабильные изотопы кислорода в голоценовых повторно-жильных льдах на побережье Байдарацкой губы: реконструкция январской палеотемпературы // Доклады Российской академии наук. – 2023. – Т. 513. – №2. – С. 278-282. – doi: 10.31857/S2686739723601564.

3 Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Chizhova J.N. Winter air temperature during the Holocene optimum in the north-eastern part of the east European plain based on ice wedge stable isotope records // Permafrost and Periglacial Processes. – 2020. – N 31(2). – P. 281-295. – doi:10.1002/ ppp.2043.

4 Chizhova Ju.N., Vasil'chuk Yu.K., Kuzyakin L.P. Holocene Ice Wedges on the Western Coast of Baydaratskaya Bay: Isotopic ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$) Indication of Local Thermokarst Processes // Doklady Earth Sciences. – 2026. –Vol. 527. – doi: 10.1134/S1028334X25609976.

5 Облогов Г.Е. Эволюция криолитозоны побережья и шельфа Карского моря в позднем неоплейстоцене – голоцене. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. – 2016. – 144 с.

6 Baranskaya A.V., Romanenko F.A., Arslanov H.A., Maksimov F.E., Starikova A.A., Pushina Z.V. Perennially frozen deposits of Bely Island: stratigraphy, age, depositional environments // Earth's Cryosphere. 2018. – N 22(2). – P. 3-13. – doi:10.21782/KZ1560-7496- 2018-2(3-13).

7 Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Изоскейпы и палеоизотермы среднеянварской температуры воздуха в голоцене на севере Западной Сибири (по данным изотопно-кислородного состава повторно-жильных льдов) // Вестник МГУ, серия география. – 2024. – Том 79. – №3. – С. 78–88. doi: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.7.

8 Tikhonravova Y., Slagoda E., Butakov V., Koroleva E., Simonova G., Sysolyatin R. Isotopic composition of heterogeneous ice wedges in peatlands of the Pur-Taz interfluve (northern West Siberia) // Permafrost and Periglacial Processes. – 2022. – N 33(2). – P. 1-15. – doi:10.1002/ppp.2138.

9 Романенко Ф.А., Николаев В.И., Архипов В.В. Изменения изотопного состава природных льдов побережья Восточно-Сибирского моря: географический аспект // Лед и Снег. – 2011. – №1 (113). – С. 93-104.

10 Hurrell J.W., Van Loon H. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation // Climatic Change. – 1997. – N 36. – P.301-326. – doi.org/10.1023/A:1005314315270.

11 Babanov B.A., Semenov V.A., Akperov M.G., Mokhov I.I., Keenlyside N.S. Occurrence of winter atmospheric circulation regimes in Euro-Atlantic region and associated extreme weather anomalies in the Northern Hemisphere // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2023. – N 36(5). – P. 522-53110. – doi: 1134/S1024856023050056.

*12 Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Папеш В.* Тренд изотопного состава отдельного зимнего снегопада на северо-востоке Европы // *Криосфера Земли*. – 2005. – Т. 9. – № 3. – С. 81-87.

13 Vasil'chuk Y.K. Reconstruction of the palaeoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone // Water Resources. – 1991. – N 17(60). P. 640-647.

14 Leibman M.O., Lein A.Y., Hubberten H-W., Vanshtein B.G., Goncharov G.N. Isotope-geochemical characteristics of TGI at Yugorsky peninsula and reconstruction of conditions for its formation // Data of Glaciological Studies. – 2001. – N 90. P. 30-39.

15 https://www.gismeteo.ru/weather-vorkuta-3960/ (last accessed: 07 February 2026).

16 http://www.pogodaiklimat.ru/history/

# ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ ПОРОД В ПОДМОСКОВЬЕ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

***С.Н. Булдович***
*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия*

На протяжении многих лет кафедра геокриологии геологического факультета МГУ проводит на учебном полигоне в районе г. Звенигород в рамках учебных студенческих задач изучение свойств снежного покрова и характеристик сезонного промерзания пород. Эти исследования проводятся в самый разгар зимы - в конце января, они охватывают площади всех ландшафтных элементов, развитых в районе. В последние годы в ходе этих исследований зафиксировано появление интересного природного явления - отсутствия сезонного промерзания пород в течение всего зимнего периода. Отсутствие мерзлых пород под снегом установлено на обширных территориях, как в пределах залесенных, так и луговых участков, на различных элементах рельефа. При этом снежный покров залегает непосредственно на поверхности талых пород или почвенно-растительного слоя (лесной подстилки).

Отсутствие сезонного промерзания фиксировалось на исследуемой территории и ранее, но оно наблюдалось лишь на отдельных участках, обычно в подтопленных депрессиях с повышенным снегонакоплением, и в целом являлось довольно редкой аномалией. В современных же условиях отсутствие сезонномерзлого слоя (СМС) в породах стало нормой для подавляющей части территории.

Для ответа на вопрос, с чем связано прекращение формирования СМС и почему оно реализуется именно в современных условиях (примерно последние 5 лет), выполнены некоторые количественные оценки, рассмотренные ниже.

Механизм блокирования промерзания пород понятен: в условиях высоких среднегодовых температур пород в зимнее время формируется мощный восходящий тепловой поток из пород, который далее отводится во внешнюю среду через снежный и растительный напочвенный покровы. При этом способность снежного покрова пропускать тепловой поток ограничена, она определяется разницей температур на кровле и подошве снежного покрова и его термическим сопротивлением.

Максимальная температура на подошве слоя снега не может превышать 0°С, в этом случае разница температур с заданной на поверхности снега отрицательной температурой также максимальна. Если эта разница температур при определенном термическом сопротивлении снега обеспечивает плотность теплового потока меньшую, чем плотность восходящего теплового потока из пород, то промерзание пород невозможно, а избыточное тепло расходуется на таяние снега на его подошве. Именно соотношение плотности теплового потока из пород и пропускной способности снежного покрова при определенном ходе зимних температур воздуха управляет процессом сезонного промерзания пород или определяет его отсутствие.

Для оценки величины теплового потока из пород в течение зимнего периода выполнено численное моделирование для современных и прошлых климатических условий. Был использован длинный ряд метеонаблюдений (с 1932г) по м/с Можайск, где климатические условия очень близки к таковым на Звенигородском полигоне. Анализ рядов наблюдений показал, что заметный рост температур воздуха отмечается с 1975 года, причем тренд этого повышения практически одинаков для летних и зимних температур (для последних чуть выше).

На рис.1 показан ход сумм градусочасов зимнего и летнего периодов за время роста температур, построенный по осредненным данным за каждые 5 лет. Важно, однако, отметить, что наблюдаемый одинаковый прирост сезонных сумм градусочасов порядка 10000-12000 °С·ч составляет для зимнего периода около половины ее исходного значения, а для летнего сезона – всего 20%. Отметим также, что за время потепления длительность зимнего периода сократилась с 5-и до 4-х (фактически до 3,5) месяцев.

Учитывая приближенный характер выполняемых оценок, остальные характеристики природной среды, входящие в модель, выбраны самыми «средними». Так, в качестве породы задана супесь с плотностью скелета $\rho_d$ =1,4г/см³, средней степенью увлажнения $\omega$=0,2 и соответствующими теплофизическими характеристиками: теплопроводность в талом и мерзлом состояниях $\lambda_т$ =1,3 и $\lambda_м$ =1,5 Вт/(м·°С), объемная теплоемкость $C_т$ =2360 и $C_м$ =1780 кДж/(м³·°С), теплота фазовых переходов

воды $Q_ф$=93,9 МДж/м³. На поверхности пород имеется органогенный слой с термическим сопротивлением $R_п$=0,2 /(м²·°С)/Вт, что соответствует свойствам лесной подстилки или дернины мощностью 3-5см. Снежный покров задавался исходя из среднемноголетнего значения его максимальной мощности порядка 0,3-0,35 м. Сезонные суммы градусочасов воздуха для времени начала повышения температур приняты равными $\Omega_л$=58250 и $\Omega_з$ = -23400 °С·ч, а за период 2020-25 гг $\Omega_л$=68000 и $\Omega_з$ = -11500 °С·ч; распределение температур по месяцам внутри сезонов проводилось по синусоидальному закону.

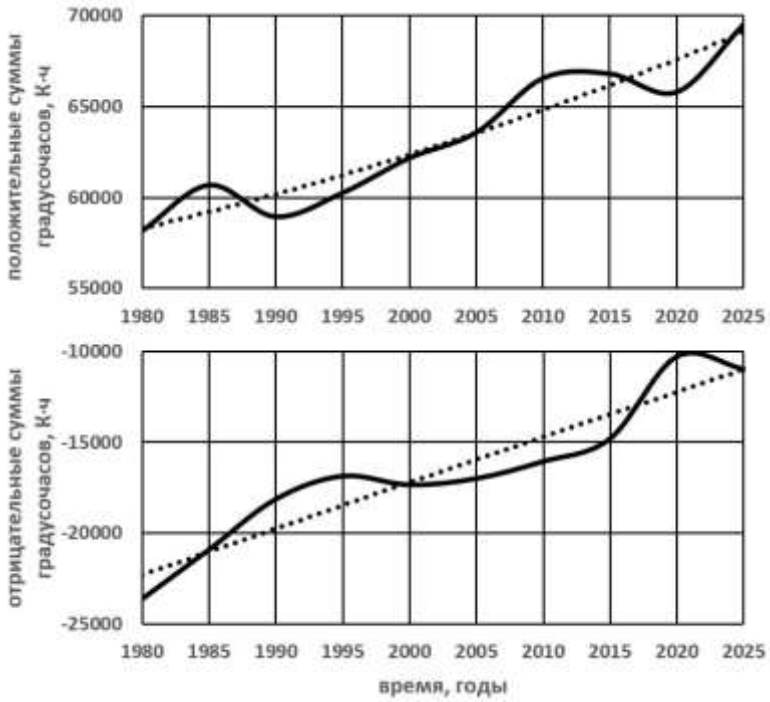



Рис.1. Ход изменения сезонных сумм градусочасов воздуха на м/с Можайск с 1975 по 2025гг (построено по значениям, осредненным за пять предшествовавших лет), https://www.pogodaiklimat.ru/history/27509.htm

В результате численного моделирования (использовалась программа QFrost (Песоцкий, 2016)) получены среднегодовые температуры пород для прошлых и современных условий соответственно равные 6,8 и 7,9°С, последнее значение полностью соответствует данным термометрии в скважинах на полигоне в текущее время. Модель также показала отсутствие в настоящее время сезонного промерзания пород при заданных характеристиках снежного покрова.

Одной из целей моделирования являлось определение величины теплового потока из пород на протяжении зимнего периода. Полученные значения среднемесячной плотности потока приведены в табл.1.

Таблица1

Среднемесячные значения теплового потока из пород зимой, Вт/м²

| | XI | XII | I | II | III | Средний за зиму поток | Суммарный теплоперенос за зиму, кДж/м² |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1975-1980 г | 5,4 | 4,4 | 3,3 | 2,8 | 2,5 | 3,68 | 48350 |
| 2020-2025 г | - | 5,5 | 4,3 | 3,3 | 2,8 | 4,0 | 41760 |

Как видно, тепловыделение из пород в холодный период оказывается весьма значительным. Если принять гипотетическую ситуацию, когда зимой на поверхности снега постоянно поддерживается температура, близкая к 0°С, то этот восходящий тепловой поток может оттаять за зиму слой воды толщиной 0,15м (условия до 1975 г) и 0,13 м (в современных условиях более короткой зимы). При характерной плотности снега $\rho_{сн}$=0,2 г/см³ эти величины соответствуют мощности снежного покрова 0,75 и 0,65 м – т.е. теплые подстилающие породы потенциально способны растопить за зиму снежный покров практически любой мощности, которая может формироваться в данном регионе.

Имея данные о плотности восходящего теплового потока из пород и температурах на поверхности снега (воздуха), можно построить кривую предельного термического сопротивления снежного покрова, превышение которого исключает промерзание подстилающих пород в данный момент времени. При этом температура на поверхности пород под снегом принимается равной 0°С, а величина предельного термического сопротивления снега составит:

$$R_{\text{сн}}^{\text{пр}}(\tau) = -\frac{t_{\text{в}}(\tau)}{q(\tau)} - R_{\text{п}},$$

где $t_{\text{в}}$ - температура воздуха; $q$ - тепловой поток из пород; $R_{\text{п}}$ - термическое сопротивление биогенного напочвенного покрова; $\tau$ - время от начала зимнего периода.

Более наглядной будет выглядеть кривая предельной высоты снежного покрова, последняя связана с его термическим сопротивлением простым соотношением:

$$h_{\text{сн}}^{\text{пр}} = R_{\text{сн}}^{\text{пр}} \cdot \lambda_{\text{сн}},$$

где $\lambda_{\text{сн}}$ - теплопроводность снега.

В этом случае можно сравнить кривую снегонакопления за конкретный год с кривой предельной мощности снега, построенной для климатических условий этого же года, чтобы судить о возможности сезонного промерзания в течение определенных интервалов времени в течение зимы или о его полном отсутствии. Промерзание возможно только тогда, когда реальная кривая снегонакопления проходит ниже кривой предельной мощности снега.

Как правило эта ситуация наблюдается в начале зимнего периода, когда тепловой поток из пород велик, мощность снега нарастает быстро, а отрицательные температуры воздуха еще относительно высоки. Похожая ситуация характерна и для конца зимнего периода, при этом может происходить полное оттаивание снизу маломощного слоя сезонного оттаивания задолго до полного схода снега. Однако, как показывают и полевые исследования, и результаты моделирования, в современных условиях промерзание пород может отсутствовать и в течение всей зимы.

Имеются некоторые особенности формирования предельной мощности снега при наличии напочвенных биогенных покровов и при их отсутствии. Так, в том случае, когда снег залегает непосредственно на поверхности пород, превышение его критической мощности приводит к прекращению промерзания породы и, одновременно, к началу оттаивания снега снизу. Если же на поверхности пород расположен теплоизолирующий слой сухого покрова (лесная подстилка и пр.), то для оттаивания снега снизу требуется дополнительное увеличение его мощности. В этом случае нулевая изотерма может находиться в напочвенном покрове, тогда температура на поверхности пород положительна, но температура на поверхности покрова еще остается отрицательной и таяния снега снизу не происходит.

Таким образом, при наличии на поверхности пород и снежного и напочвенного покровов возникают две критические высоты снежного покрова: одна – меньшая - отвечает ситуации отсутствия промерзания пород, вторая – большая - соответствует началу таяния снега снизу. На оголенной поверхности пород существует только одна критическая высота снега, при которой одновременно прекращается промерзание пород и начинается таяние снега и наоборот.

Кроме того, наличие теплоизолирующего биогенного слоя даже при полном отсутствии снега приводит к задержке начала промерзания пород относительно начала периода отрицательных температур, эта задержка тем больше, чем выше термическое сопротивление напочвенного покрова. Также и оттаивание сезонно-мерзлого слоя пород в конце зимы даже при отсутствии снега начнется под изолирующим напочвенным покровом раньше перехода температур воздуха в положительную область.

На основе полученных при моделировании данных о динамике изменения восходящего потока тепла из пород построены кривые критической мощности снега для момента начала потепления климата (1975-80г) и современности (2020-2025г) (рис.2), теплопроводность снега при этом принималась равной $\lambda_{\text{сн}}$=0,2 Вт/(м·°С), что, согласно полевым определениям, является характерным значением.

На рисунке 2 показаны обе предельные мощности снега, различие между ними невелики в связи с небольшим заданным термическим сопротивлением напочвенного покрова. Полученные кривые имеют гладкий вид потому, что для их построения использовались среднемесячные значения характеристик, реальные кривые должны иметь более сложную форму в зависимости от хода

температур в зимний период конкретного года. Однако, принципиальная картина останется прежней. Основная выявленная закономерность - это очень большое изменение значений предельных мощностей снега за период потепления климата.

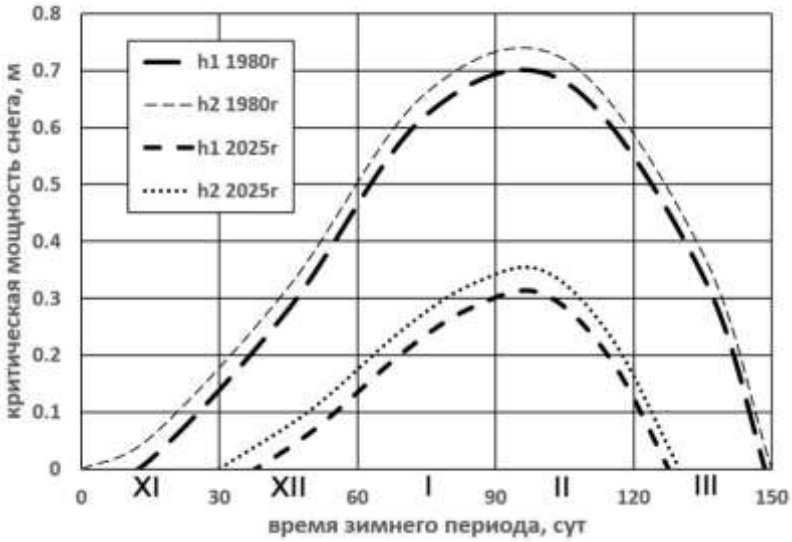



Рис.2. Кривые предельной мощности снежного покрова для климатических условий разных лет; h1 - кривая отсутствия промерзания пород; h2 - кривая начала таяния снега снизу. Пояснения в тексте.

И главное здесь то, что именно в последнее пятилетие эти предельные значения сравнялись со среднемноголетними значениями максимальной мощности снега в Подмосковье, которая по разным данным составляет порядка 0,35 м (что согласуется и с нашими многолетними наблюдениями). Поэтому установленная полевыми исследованиями ситуации отсутствия сезонного промерзания пород именно в настоящее время является совершенно естественной – реальная кривая снегонакопления при этом на протяжении всей зимы проходит выше кривой предельной мощности снега. Напротив, из рис.2 видно, что для отсутствия промерзания в 1980г требовалась мощность снежного покрова более 0,7 м, что в природе практически не наблюдается. Еще 10 лет назад отсутствие зимнего промерзания фиксировалось лишь на отдельных участках с повышенным снегонакоплением, в современных условиях этот феномен наблюдается в ненарушенной природной обстановке практически повсеместно.

Пока выявлены только самые общие закономерности данного явления, дальнейшее их изучение требует постановки более детальных полевых исследований и разработки новых подходов количественной оценки степени и характера участия снежного покрова в системе тепло-влагообмена пород с внешней средой. В частности, в рассматриваемой ситуации проявляется необычная обратная связь – влияние условий теплообмена на мощность снежного покрова в результате его частичного оттаивания снизу. Другими словами, теплообмен влияет непосредственно на теплоизолирующую способность снега, который сам является значимым участником этого теплообмена. Понижение мощности снега относительно его «метеорологического» значения в целом должно приводить к охлаждающему влиянию при формировании среднегодовых температур пород. Так, даже сокращение мощности снега в начале зимы, когда таяние снега на теплом субстрате происходит наиболее интенсивно, будет сказываться далее на протяжении всего холодного периода. В целом, охлаждающее влияние этого необычного процесса может трактоваться, как реакция системы на нагревание извне в соответствии с принципом компенсации Ле-Шателье.

Известно, что не все снеговые осадки аккумулируются в слое снега, часть его испаряется, часть может в периоды длительных оттепелей таять с поглощением талой воды снегом и формированием подснежного стока. Новые данные показывают, что часть снежного покрова (возможно – значительная) в результате его таяния снизу может идти на зимнюю инфильтрацию воды в подстилающие талые породы, причем этот процесс может реализовываться при довольно низких отрицательных температурах воздуха. Это уже может представлять интерес и с точки зрения гидрогеологии и агрономии.

Еще одним аспектом рассматриваемой проблемы являются несоответствия, возникающие при моделировании геокриологических задач в сходной природной обстановке. В условиях возможного оттаивания снежного покрова снизу становится не вполне корректным распространенный в

существующих программах учет слоя снега в виде термического сопротивления на поверхности пород (точнее – соответствующего ему коэффициента теплообмена). Однако, если при моделировании в рассматриваемых природных условиях обратить внимание на ход температур на модели непосредственно на поверхности пород под снегом в зимний период, можно убедиться, что во многих случаях эта температура еще долго сохраняет положительный знак после перехода температур воздуха в отрицательную область. Это было бы вполне естественно, если бы вместо снега на поверхности пород находился иной теплоизолятор, но на подошве снежного покрова температура не может превышать $0^{\circ}$C. При отсутствии корректировки этого обстоятельства программы дают несколько завышенное значение среднегодовой температуры пород.

Основные выводы из выполненных оценок заключаются в следующем.

В ходе заметных климатических изменений за последние полвека в Подмосковье к настоящему времени сформировались условия, в которых сезонное промерзание пород на преобладающей части площади отсутствует в течение всего зимнего периода или его значительной части. Причем эти изменения произошли довольно резко – еще 10 лет назад случаи отсутствия зимнего промерзания пород были редкостью и наблюдались только на участках с повышенным снегонакоплением.

Одновременно с прекращением сезонного промерзания пород создаются условия для частичного таяния снега снизу, что делает возможной зимнюю инфильтрацию талых снеговых вод. Эта тенденция будет только возрастать в случае продолжения потепления климата.

Таяние снега снизу сопровождается сокращением мощности снега относительно ее нормального («метеорологического») значения и, следовательно, уменьшением отепляющего влияния снежного покрова – т.е. этот процесс направлен против потепления климата и в какой-то мере может его компенсировать в плане формирования среднегодовых температур пород.

Используемые в настоящее время программы численного моделирования геокриологических условий в случае применения их для районов развития высокотемпературных талых пород не учитывают возможности процесса «обнуления» температур поверхности пород под тающим снизу снегом, тем самым завышая искомую величину среднегодовой температуры пород.

***Литература***

1 Архив погоды. URL: https://www.pogodaiklimat.ru/history/27509.htm

2 Песоцкий Д.Г. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2016614404 QFrost от 22.04.2016

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

***Васильев А.Н.***

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

Одним из последствий оттаивания многолетнемерзлых пород, вследствии изменения климата и техногенного влияния, являются просадки земной поверхности. Подобные обширные деформации земной поверхности могут приводить к формированию существенных градиентов смещений в процессе изменения термического состояния многолетнемерзлых грунтов. Которые приводят к потере несущей способности грунтов и вызывают деформацию и разрушение зданий, трубопроводов и дорог в Арктике. Относительные деформации и наклоны возникающие в результате изменения состояния многолетнемерзлых грунтов могут достигать пороговых значений – $10^{-3}$, которые обозначены как опасные в целом ряде нормативных документов. В работе продемонстрирована методика, позволяющая оценить уровень деформаций земной поверхности. Аналитическая модель упругого включения была применена для построения объемных распределений смещений земной поверхности. Анализ оседаний земной поверхности позволяет определить области потенциально опасных деформаций на исследуемых объектах.

**Введение**

В условиях интенсивного роста хозяйственной деятельности и изменяющегося климата в Арктическом регионе особенно остро стоит задача обеспечения устойчивости инфраструктуры, поскольку её функционирование находится под постоянным влиянием сложных геокриологических процессов. Многие исследователи [1] отмечают увеличение аварийности объектов в криолитозоне и значительные экономические потери, с этим связанные. Одной из ключевых причин является

отсутствие моделей, способных достоверно описывать реальные деформации земной поверхности, обусловленные оттаиванием или промерзанием многолетнемёрзлых грунтов.

Существующие методы расчёта деформаций, закреплённые в нормативных документах и учебных материалах (например, СП 25.13330.2020), хотя и основаны на физически обоснованных принципах, имеют существенные ограничения. Они, как правило, реализуют одномерный подход, в котором учитываются только вертикальные деформации и результаты зависят исключительно от глубины промерзания или оттаивания. Однако для практической оценки предельно допустимых состояний сооружений необходимо учитывать более широкий спектр параметров: относительные горизонтальные деформации, наклоны и неравномерность осадок. Эти характеристики определяются градиентами полей смещений, что делает необходимым учёт не только вертикальных, но и горизонтальных компонент перемещений в 3-х мерной постановке.

Понимание механизмов формирования механических деформаций в вечномерзлых грунтах при изменении их состояния - ключевое условие для прогнозирования последствий климатических изменений на инфраструктуру в Арктике. В связи с этим автором разработана трёхмерная аналитическая модель, описывающая механическое поведение грунтов в процессах оттаивания и промерзания. Модель учитывает влияние физико-механических свойств грунта на формирование деформационных полей.

Полученные результаты предоставляют важную основу для оценки рисков, обоснованного выбора инженерных решений при проектировании и строительстве, а также для разработки мер по снижению ущерба на территориях, подверженных деградации многолетней мерзлоты.

**Методика**

При создании модели использовался формализм теории упругих включений. В этой геомеханической модели упругое полупространство содержит трехмерную конечную область, испытывающую объемную деформацию $\varepsilon_*$. Поверхность такого полупространства, соответствующая земной поверхности, считается свободной от напряжений.

Эту объемную деформацию называют по-разному: «трансформационная деформация», «включение» («inclusion») [2], «собственная деформация» («eigenstrain») [3], «ядро деформации» («nuclei of strain») [4], «дисторсия» («distortion») [5]. Главное общее для всех этих понятий — это аномальная деформация, отличающаяся от деформации окружающей среды и не удовлетворяющая условию совместности деформаций. В дальнейшем используется термин «дисторсия», применяемый в ряде работ В. Новацкого[5], посвящённых неоднородным задачам термоупругости.

Задача определения напряженно-деформированного состояния, вызванного этой аномальной деформацией, решается с помощью теоремы Бетти о взаимности работ [6] или теории Эшелби [2]. В общем виде смещения, деформации и напряжения для включений выражаются [4] как:

$$u_i(x) = -C_{kjmn}\int \epsilon^*(x')G^i_{j,k}(x-x')dx'$$
$$\epsilon_{ij}(x) = -\frac{1}{2}\int C_{klmn}\epsilon^*_{mn}(x')(G_{ik,lj}(x-x') + G_{jk,li}(x-x'))dx'$$
$$\sigma_{ij}(x) = -C_{ijkl}\int C_{pqmn}\epsilon^*_{mn}(x')G_{kp,ql}(x-x')dx' + \epsilon^*_{kl}(x')dx'$$

Где $C_{ijkl}$ — тензор упругих модулей; $\epsilon^*(x')$-дисторсия (объемная деформация); $G_{ij}$ — функция Грина; $x$ — точка наблюдения; а $x'$ — положение точечного источника.

Функция Грина для смещений от точечной силы, приложенной в полупространстве имеет вид[3]:

$$G_{ij}(x,x') = \frac{1}{16\pi\mu(1-\nu)}\left[\frac{3-4\nu}{R_1}\delta_{ij} + \frac{1}{R_2}\delta_{ij} + \frac{(x_i-x'_i)(x_j-x'_j)}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(x_i-x'_i)(x_j-x'_j)}{R_2^3} + \right.$$
$$\left. \frac{2x_3x_3'}{R_2^3}\left(\delta_{ij} - \frac{3(x_i-x'_i)(x_j-x'_j)}{R_2^2}\right) + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2+x_3+x'_3}\left(\delta_{ij} - \frac{(x_i-x'_i)(x_j-x'_j)}{R_2(R_2+x_3+x'_3)}\right)\right]$$

Соответственно для смещений от объемного источника необходимо произвести дифференцирование функции Грина:

$$G^i_{k,k}(x-x') = G^i_{1,1}(x-x') + G^i_{2,2}(x-x') + G^i_{3,3}(x-x')$$

Приминительно к задачам геокриологии дисторсия отождествляется с объемными деформациями вызванными фазовым переходом вода-лёд, миграцией влаги, соленостью и другими физическими процессами взаимоотношение между которыми довольно детально изучено.

Таким образом зная упругие модули и физико-химические параметры многолетне мерзлых грунтов, а так же конфигурацию области промерзания или оттаивания, можно определить

возмущение деформационного поля грунтового массива, вызванного изменением состояния многолетне мерзлых грунтов.

**Результаты и обсуждение**

Для апробации метода применим его к часто встречающейся проблеме, а именно к растеплению грунта под основанием сооружения.

Растепление грунта приводит к образованию чаши оттаивания под зданием, вследствии происходит неравномерная осадка земной поверхности рис.1 , она в свою очередь приводит к деформациям фундамента сооружения. Для решения данной проблемы применяют теплотехнические расчеты, однако они показывают только зону формирования талых пород, но не дают прогноза уровня возможных деформаций. Для определения уровня и зон повышенной аварийности необходимо с теплотехническими расчетами применять геомеханическую модель в трехмерной постановке.

Рис. 1. Схематическое изображение области оттаивания

Проведем геомеханическое моделирование процесса формирования области талых пород под сооружнием. Для построения модели брались следующие параметры – размер области протаивания 10 м., объемный модуль К- 2000 МПа, модуль сдвига μ-8000 МПа, пористость ϕ-25%, относительная объемная деформация -0.09, в данном случае считается, что деформация однородна по всей области.

Проведем анализ полученных результатов. На рис. 2 представлены модельные распределения вертикальных смещений проявившихся в ходе формирования области талых пород от отепляющего воздействия здания. Причем максимальные смещения на поверхности формируются над центром талой области и составляют 10,5 см.

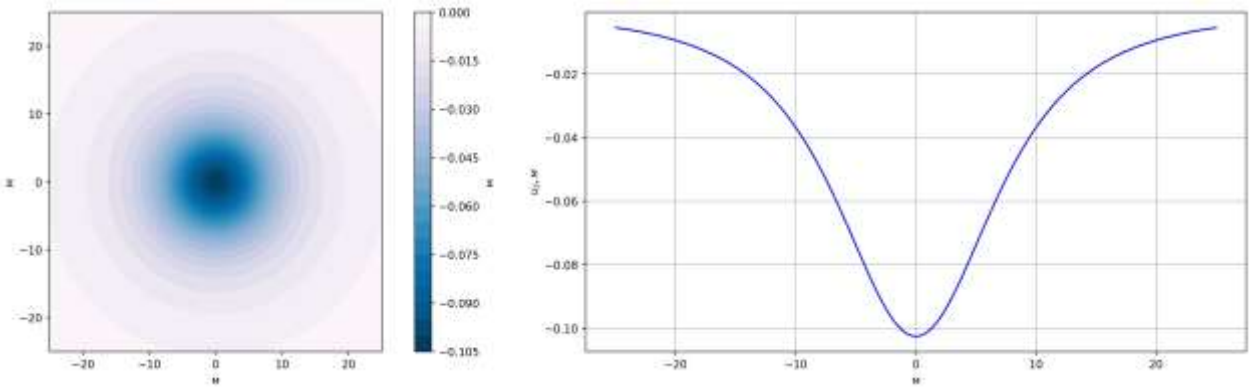


Рис. 2. Распределение вертикальных смещений (осадка) земной поверхности при протаивании

Впервые получены значения для горизонтальных смещений при протаивании многолетне мерзлых грунтов, и определен характер их распределения – рис.3. Можно заметить, что горизонтальные смещения на поврехности земли соответствующей проекции центра талой бласти равны нулю, и амплитуда горизонтального смещения достигает максимального значения возле границы талых и мерзлых пород и далее спадает. Также амплитуда горизонтальных смещений в 3 раза меньше, чем у

вертикальных и составляет около 3,8 см., но ширина зоны смещений больше для горизонтальной компоненты.

Стоит заметить, что не сами смещения являются параметрами определяющими аварийность инфраструктуры, а согласно СП и ГОСТ, и соответственно в рабочей документации любого объекта основными параметрами являются предельно допустимые деформации, т.е. градиенты смещений. Разработанная геомеханческая модель позволяет определять деформации, возникающие вследствии изменения состояния многолетнемерзлых грунтов, и напрямую сопоставлять с предельно допустимыми параметрами.

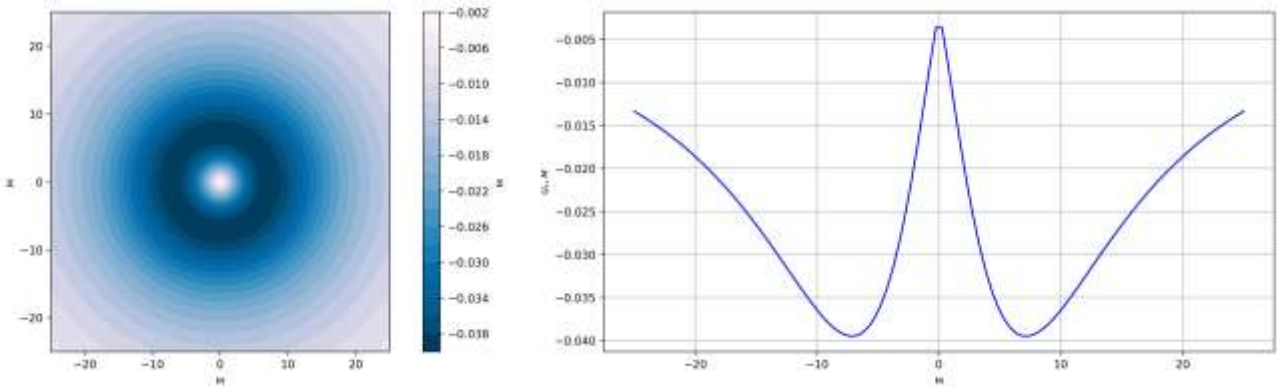


Рис. 3. Распределение горизонтальных смещений на земной поверхности при протаивании

Результаты моделирования показывают рис.4, что максимальные деформации (наклоны) на поверхности возникают над границей талых и мерзлых пород, а над центром включения равны нулю, что объясняется их физическим смыслом, а именно градиенты показывают скорость изменения физической величины, в данном случае смещений и соответственно наибольше изменение приходится над областью между талой и мерзлой частью.

Из полученных результатов становится очевидно, что образование деформационных трещин сооружений в результате протаивания их основания, начинается с областей соответствующим максимальным величинам градиента вертикальных смещений на земной поверхности.

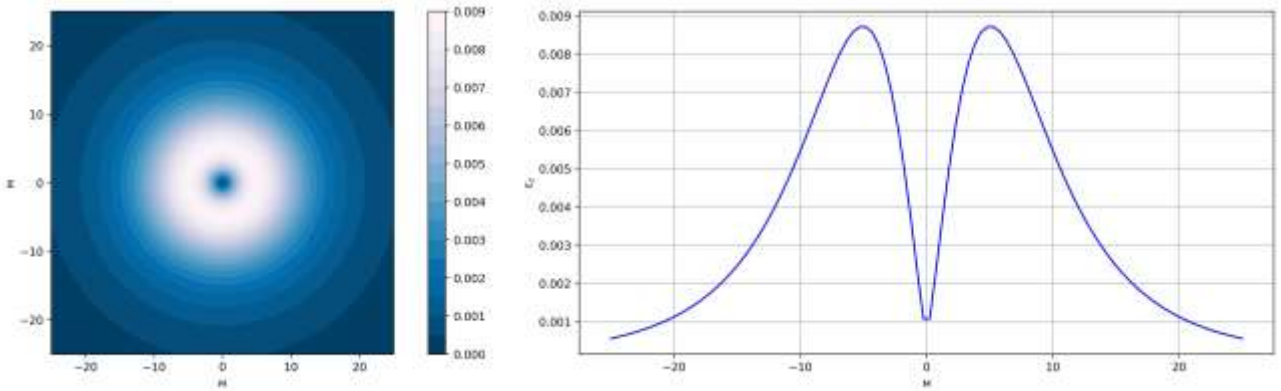


Рис. 4. Распределение горизонтального градиента вертикальных смещений (наклонов) на земной поверхности

**Заключение**

В условиях нарастающей хозяйственной активности и изменения климата в Арктическом регионе остро встает задача обеспечения устойчивости инфраструктуры из-за интенсивных геокриологических процессов. Как отмечают исследователи, в криолитозоне наблюдается рост аварийности объектов и связанные с этим экономические издержки.

Для решения данной проблемы и прогнозирования воздействия изменения климата на инфраструктуру автором разработана объемная аналитическая модель. Она описывает механическое поведение вечно мерзлых грунтов в результате изменения его состояния в трехмерной постановке.

Результаты геомеханического рассчета на основе данной модели позволили получить распределение вертикальных смещений на земной поверхности в результате образования талой зоны под зданием. Впервые получены значения и характер распределения не только горизонтальных смещений на земной поверхности при протаивании ММГ, но и градиента смещений. На основе результатов, предполагается, что образование деформационных трещин сооружений в результате

протаивания их основания, начинается с областей соответствующим максимальным величинам градиента вертикальных смещений.

***Литература***

1.Брушков А. В., Алексеев А. Г., Бадина С. В. и др. К вопросу о необходимости выработки целостной системы мер по предупреждению деформаций зданий и сооружений в криолитозоне в условиях меняющегося климата // Арк-тика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 605—616. — DOI:10.25283/2223-4594-2024-4-605-616.

2.Eshelby, J. D., "Elastic Inclusions and Inhomogeneities," Proceedings in Solid Mechanics, Vol. 2,1961, pp. 89-140.

3.Mindlin, R. D., "Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid,"Proceedings, 1st Midwestern Conference on Solid Mechanics, 1953, pp. 56-59.

4.Mura T., Micromechanics of Defects in Solids, 2nd revised edition. Norwell: Kluwer Academic Publishers. 1987.

5.Nowacki W. Thermoelasticity, 2nd edition. Warsaw: PWN-Polish Scientific Publishers. Oxford: Pergamon Press. 1986.

6.Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании // М.: Агентство Экономических Новостей. 1999. 220 с.

## О ВОЗРАСТЕ И ПАРАМЕТРАХ МАВРИНСКОГО ЛЕДНИКОВО-ПОДПРУДНОГО ОЗЕРА В НИЗОВЬЯХ Р. ЛЕНЫ

***А.Н. Васильева[1,2], В.М. Лыткин[2], М.С. Лукьянычева[1], Р.Н. Курбанов[1,3]***
*[1] Институт географии РАН, г. Москва*
*[2] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*
*[3] МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

Четвертичные отложения долины р. Лены представляют собой наиболее полный архив, отражающий значимые палеогеографические события Северо-Восточной Сибири, и всего Арктико-Субарктического пояса. Именно хронологическая последовательность этих событий и их взаимное влияние определили современные черты региона.

Одним из важных, но дискуссионных событий, считается возникновение ледниково-подпрудного озера, образовавшегося при блокировке долины нижней Лены ледником Верхоянского хребта в одну из плейстоценовых эпох. Г.Ф. Лунгерсгаузен [1] впервые предложил гипотезу о перекрытии долины ледником. В.В. Колпаков [2,3] развил это представление, соединив подпруду с накоплением мавринской свиты, которую он выделил по разрезу на мысе Мавра. Согласно его описаниям [3], мавринская свита имеет ширтинско-казанцевский возраст и образовалась за счет смыва обломочного материала с Верхоянских гор. Ее мощность варьирует от 25-40 до 60 м, достигая максимум 100 м. Свита сложена однородными мелко- и среднезернистыми параллельно-слоистыми песками с многочисленными тонкими прослоями глинистых песков и супесей, с редкой галькой и линзами гравия, с раковинами пресноводных моллюсков.

Более полувека ведется дискуссия о событии подпруды в нижнем течении р. Лены и его роли в формировании рельефа долины и прилегающих территорий. Имеющиеся представления базируются в основном на данных общей геологической съемки и геоморфологических наблюдениях, что не позволяет делать окончательные выводы. До сих пор не установлены точные участки перекрытия долины, не определены возраст и длительность существования подпрудного озера, его глубина, а также скорость заполнения водоема в условиях крайне засушливого и холодного палеоклимата. Ключевым нерешенным вопросом остается хронология, масштабы и динамика оледенения Верхоянского хребта, без понимания которых невозможна достоверная оценка вероятности и параметров подобной подпруды.

В 2021 г. для определения вероятности возникновения ледниково-подпрудного озера и времени его существования, мы провели комплексное стратиграфическое и геохронологическое изучение отложений в пределах обнажения мыса Мавра. Данное обнажение (66.6139 °с.ш., 123.5063°в.д.) расположено на левобережье р. Лены, в 10 км к югу от с. Жиганск, и приурочено к поверхности третьей надпойменной террасы. Крутой обрывистый склон террасы в исследуемом районе обнажает

коренные меловые породы, перекрытые маломощными рыхлыми суглинками. В этом месте общая высота террасы достигает 70-75 м, из которых на цоколь приходится 60-65 м. Выше по течению, в 25 км от с. Жиганск, она понижается до 40-45 м при величине цоколя 25-30 м. Здесь терраса расширяется до 25-30 км, а ее тыловой шов смыкается с аккумулятивными ледниковыми формами зырянского возраста. Еще через 2-2.5 км высота террасы составляет 20-25 м, она становится полностью цокольной, а мощность четвертичных отложений минимальной. Далее терраса отходит от р. Лены в сторону р. Линде. В пределах обнажения выполнена серия разрезов. Зачистка проводилась стандартным методом – пробивалась ступенчатая траншея от дневной поверхности; выполнено подробное описание, изучение текстурных особенностей и опробирование на люминесцентное датирование. Абсолютное датирование выполнялось в Лаборатории люминесцентного датирования МГУ/ИГРАН на ТЛ/ОСЛ ридере Risø TLDA-20, снабженном калибровочным бета-источником. Измерения проводились параллельно по кварцу методом оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ) и по калиевым полевым шпатам (КПШ) методом инфракрасно стимулированной люминесценции (ИКСЛ$_{50, 290}$) [4].

В ходе исследований установлено, что в естественном строении обнажения мыса Мавра, приуроченного к третьей надпойменной террасе р. Лены, сверху вниз вскрываются:

Слой 1 (49.8-50 м): почвенно-растительный слой;

Слой 2 (48.4-49.8 м): алеврит палевый, горизонтально-слоистый, плотный, сцементированный;

Слой 3 (48.3-48.4 м): горизонт с ветрогранниками и гальками, сложенными песчаниками, алевритами и диабазами, принесенными из Верхоянских гор, размером от 3 до 10 см;

Слой 4 (38.0-48.3 м): песок желтовато-серый среднезернистый, с невыраженной слоистостью. Наблюдаются вертикальные секущие трещины, которые раздуваются до 3-5 мм. Трещины состоят из пылеватого заполнителя темно-серого цвета;

Слой 5 (28.0 (35.0)-38.0 м): алеврит темно-серый, плотный, с неясной слоистостью. Кровля и подошва неровные, не выдержаны по мощности;

Слой 6 (18.3-28.0 (35.0) м): толща, сложенная песками невыдержанной мощности. Нижняя часть состоит из тонкозернистого материала, во многих местах представленная горизонтально-слоистыми алевритами, а средняя и верхняя – песчаным материалом, без всяких признаков отложений старичных, пойменных или эоловых фаций;

Слой 7 (18.0-18.3 м): горизонт с рассеянными кварцевыми и кремневыми ветрогранниками, с галькой, заполненный маломощным песком, мощностью до 0.3 м. Ветрогранники, размером от 0.5 до 20 см, прослежены на более чем 40 км и имеют возраст МИС 8 [5].

В 2021 г. для четвертичных отложений обнажения мыса Мавра было получено 5 люминесцентных дат, которые соответствуют стратиграфическому порядку. Проведенный анализ соотношений дат по кварцу и по КПШ [6] подтверждает надежность построенной хронологии. Так, для отложений слоя 2 на глубинах 70 и 140 см от поверхности было получено 2 люминесцентные даты: 19.7±1.2 (218645) и 13.6±1.5 (218648) тыс. лет, отмечающие накопление отложений в МИС 2. Для слоя 4 на глубине 170 см от поверхности было отобрано 2 образца: 112.2±6.9 (218646) и 105.3±5.1 (218649) тыс. лет. На глубине 400 см – 1 дата: 126.8±9.4 (218647) тыс. лет. Полученный возраст указывает на то, что аккумуляция происходила в МИС 5e-d.

М.С. Лукьянычева с соавт. [7] в долине р. Ундюлюнг, правого притока р. Лены, на основе геоморфологических исследований, а также космогенного датирования ледниковых валунов и люминесцентного анализа перекрывающих эоловых отложений выделили свидетельства двух последних оледенений. Они представлены пятью фазами наступания ледников, зафиксированными в рельефе в виде конечно-моренных гряд. По мнению авторов, максимальная фаза соответствовала МИС 6, когда оледенение носило полупокровный характер: ледники выходили на предгорную равнину до 70 км, достигая берегов Лены.

Сопоставление полученных нами данных люминесцентного датирования с выводами М.С. Лукьянычевой с соавт. [7] свидетельствует о том, что блокировка долины ледником приходится на МИС 6 (191-126 тыс. л.н.).

Исследования выполнены в рамках госзадания ИГ РАН FMWS-2026-0004.

***Литература***

Статьи

1. Лунгерсгаузен Г.Ф. Геологическая история Средней Лены и некоторые вопросы стратиграфии четвертичных отложений Восточной Сибири // Материалы Всесоюзного совещания по изучению четвертичного периода, т. III. М.: Изд-во АН СССР, 1961.

2. Колпаков В.В. Палеогеография четвертичного периода в нижнем течении р. Лены// Изв. ВУЗ-ов. Серия «Геология и разведка», 1966. № 5. – С. 41-88.
3. Колпаков В.В. Влияние оледенений на реки Якутии // Четвертичное оледенение Средней Сибири. – М.: Наука, 1986. – С. 101-108.
4. Murray, A.S., Helsted, L.M., Autzen, M., Jain, M., Buylaert, J-P., 2018. Measurement of natural radioactivity: calibration and performance of a high-resolution gamma spectrometry facility. Radiat. Meas. 120, 215-220. doi: 10.1016/j.radmeas.2018.04.006
5. Колпаков В.В. Об ископаемых пустынях нижнего течения р. Лены // Бюл. Комис. по изучению четвертичного периода, 1970. № 37. С. 75-82.
6. Murray, A., Arnold, L.J., Buylaert, J.-P., Gurerin, G., Qin, J., Singhvi, A.K., Smedley, R., Thomsen, K.J., 2021. Optically stimulated luminescence dating using quartz. Nature Reviews Methods Primers 1 (72). https://doi.org/10.1038/s43586-021-00068-5.
7. Lukyanycheva M.S., Kurbanov R.N., Jansen J.D., Margold M, Panin A.V., Lytkin V.M., Vasilieva A.N., Nørgaard J., Szuman-Kalita I., Olsen J., Corbett L.B, Bierman P., Andersen J.L., Knudsen M.F. Extensive glaciation of the Verkhoyansk Range, northeastern Siberia, during the Last Glacial Maximum, Quaternary Science Reviews, Volume 381, 2026, 109954, ISSN 0277-3791, https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2026.109954.

## РАЗВИТИЕ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ТОРФЯНИКОВ НА ВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ЧУКОТСКОГО ПОЛУОСТРОВА

***А.К. Васильчук, Ю.К. Васильчук***
*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, Москва*

***Введение*** Изучение полигонального торфяника в окрестностях с. Лорино на востоке полуострова Чукотка ведется в течение ряда лет [1–6]. Основной задачей данного исследования является изучение развития полигонального торфяника, определение временных рамок формирования торфа, выделение циклов его накопления. Показатели содержания углерода (C) и азота (N), и их изотопов $^{13}C$ и $^{15}N$ рассматриваются как индикаторы степени разложения торфа в криолитозоне, показатели режима увлажнения. Для решения задачи использован метод радиоуглеродного датирования и определения изотопного состава углерода и азота, а также содержания углерода и азота в торфе.

Изученный полигональный торфяник расположен вблизи с. Лорино (65°30′ с.ш., 171°43′ з.д.) на берегу Мечигменской губы Берингова моря. Согласно данным ближайшей метеостанции (пос. Уэлен), за период наблюдений 1929-2026 гг. среднегодовая температура воздуха изменялась в диапазоне от –8,4 до –3,2 °C. Среднеянварские температуры варьировали в широких пределах от –6,5 до –29,2°C, среднемноголетнее значение температуры воздуха января составляет –19,3 °C, абсолютный минимум зафиксирован в 1989 г. - –44.1°C Среднее значение температуры июля - +7,1°C [7]. Мощность многолетнемерзлых пород – около 200 м. Температура пород –4…–6 °C. Сезонное оттаивание пород относится к длительно-устойчивому и устойчивому типу по температуре, и к умеренно-континентальному типу по амплитуде температур на поверхности (A0). На площадке CALM R41 «Лорино», расположенной в непосредственной близости от изученного торфяника, средняя глубина протаивания за 2010 – 2019 гг. составила 53,9 см [8]. Территория исследования относится к зоне типичных тундр. Локальная растительность по описаниям А.Г. Григорян [9] представлена осоково-лишайниковыми кустарничковыми тундрами с характерным криогенным микрорельефом, представленным микроповышениями и микропонижениями. Для микроповышений доминирующими кустарниками и кустарничками являются *Salix pulchra*, *Betuia exilis, Ledum decumhens, Vactinium vitis-ideae* и *V., uiiginosum.* В понижениях травянистые растения представлены *Eriophorum vaginatum, Carex lugens, C. rariflora, Poa arctica* и рядом других. Определен изотопный состав растений на торфянике и в непосредственной близости от него. Наиболее изотопически легкими оказались листья и ветки березы тощей *Betula glandulosa* Michx ($\delta^{15}N$- –6,06‰; $\delta^{13}C$, - – 30,41‰), а самыми изотопически тяжелыми отдельные виды осок и пушиц ($\delta^{15}N$ – 5,41‰; $\delta^{13}C$ – – 25,99‰).

Изученный в 2022 г. разрез торфяника имеет мощность 4,5 м. До глубины 0,55 м торф талый темно-бурый, в интервале 0,55-4,50 торф мерзлый темно-коричневый, льдистый, степень разложения варьирует от высокой до слабой, горизонтально слоистый, горизонтальные прослои торфа в нижней

части разреза подчеркиваются тонкими прослоями (толщиной 2–4 мм) суглинка серого, криотекстура слоистая горизонтальная тонкошлировая, горизонтальная сетчато-слоистая. На глубине 1,6 м залегает ледяная жила, мощностью 3,3 м, характер ее залегания (наличие плечиков и изогнутые вверх шлиры льда и слои торфа на контакте с жилой) свидетельствует о ее сингенетическом формировании. Характер распределения криотекстур также предполагает синкриогенное накопление торфа.

***Радиоуглеродный возраст торфа.*** Радиоуглеродный возраст получен для 15 образцов торфа [6]. Наиболее древняя $^{14}C$ датировка получена в основании Лоринского полигонального торфяника на глубине 4,50 м 12900 ± 120 калиброванных (кал.) лет по очень чистому торфу, наиболее молодая дата получена под слоем сезонного таяния на глубине 0,9 м – 4860 кал. лет, торф также без видимых примесей. Ряд наиболее молодых датировок: 11150, 10680, 10040, 9400, 5410 и 4860 кал. лет получен по образцам чистого торфа или торфа с минимальным участием пылеватого суглинка, в то время как датировки, полученные по торфу со значительной примесью пылеватого суглинка, подтвердили инверсионное распределение по разрезу. Торфяная толща накапливалась около 8 тыс. лет, основная часть торфа накопилась в гренландский период голоцена (11,7–8,236 кал. тыс. лет назад), возрастные инверсии отмечаются нижней части торфяника 4,5-2,0 м, которая накопилась 12,9-11 кал. тыс. лет назад (рис. 1А). Поскольку ранее в основании изученного торфяника в других его обнажениях были получены даты 14,2-13,1 кал. тыс. лет назад [5], можно предположить, что благоприятные условия для накопления торфа на Чукотке были уже в аллереде и в какой-то мере в позднем дриасе.

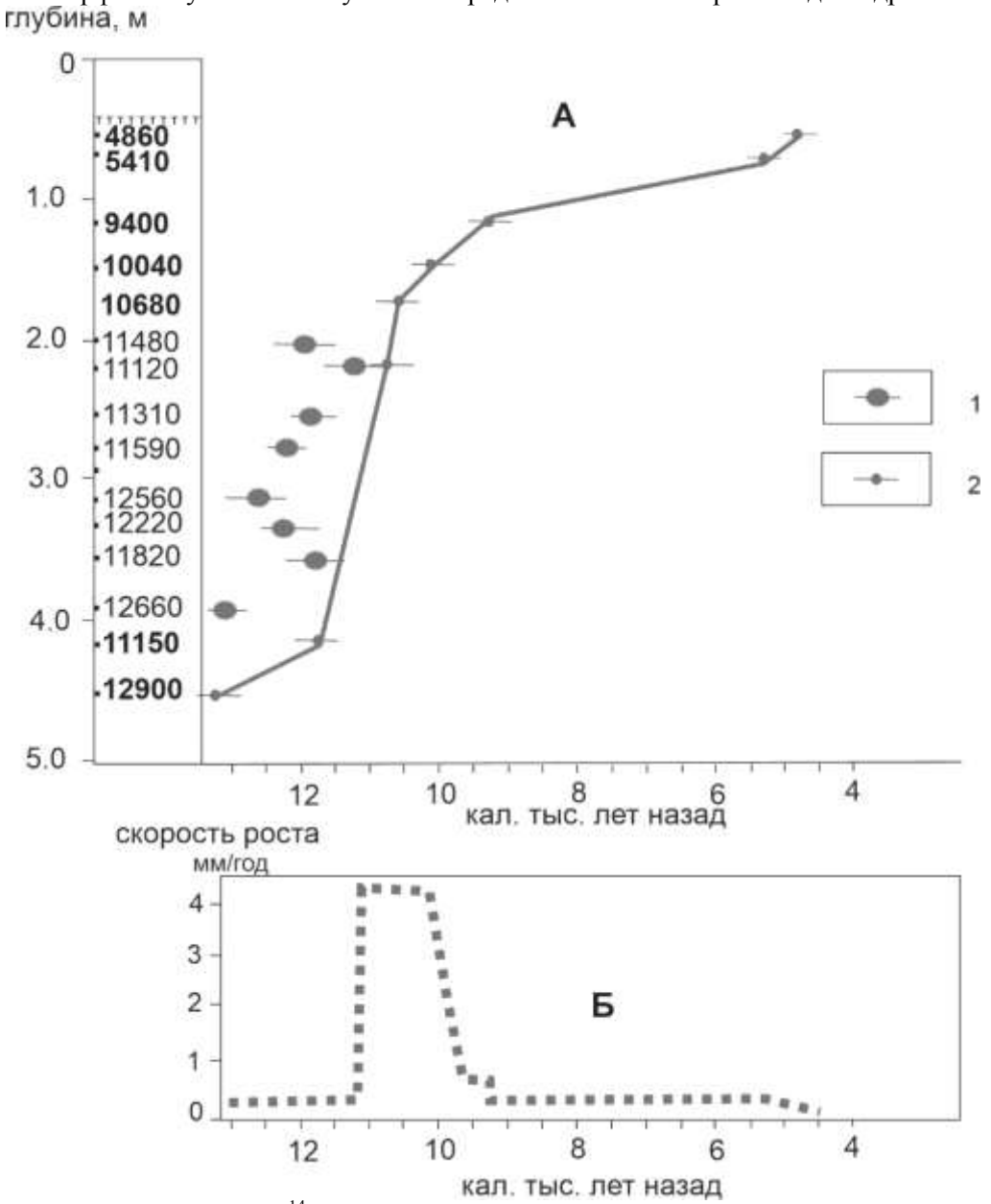



Рис. 1. Распределение калиброванных $^{14}C$ датировок в разрезе Лоринского полигонального торфяника, кал. лет назад: 1 – датировки с инверсией; 2 – наиболее молодые $^{14}C$ даты (А); скорость роста торфа (Б)

В основании разреза торф накапливался со скоростью приблизительно 0,2 мм/год при низких температурах вегетационного периода, которые были характерны для позднего дриаса и пребореальной осцилляции. Затем скорость накопления существенно возросла до 4,8 мм/год (рис. 1). Этот период датирован 11150–10680 кал. лет назад, торф с такой скоростью накапливался до глубины 1,90 м. Скорость накопления торфа в интервале 10 040–9400 кал. лет назад на глубине 1,2–1,5 м снизилась до 0,5 мм/год, а в интервале 9400–5410 кал. лет назад на глубине 0,60–1,20 м – до 0,15 мм/год. В интервале от 5410 до 4860 кал. лет назад на глубине 0,55–0,60 м скорость накопления торфа снизилась до минимума – 0,09 мм/год (см. рис. 1Б).

***Содержание углерода и азота и их изотопный состав.*** Исследовано содержание азота и углерода, а также изотопный состав этих элементов в торфе. Среднее содержание углерода в целом по торфянику составляет 19,8%, среднее содержание азота 0,9%, среднее значение C/N 24,7, среднее значение $\delta^{13}C$ = –27,86‰, среднее значение $\delta^{15}N$ 1,68‰ (табл.1).

Вариации содержания C и N и значений их отношения в торфе характеризуются выраженной синхронностью. Синхронность изменения значений $\delta^{13}C$ и $\delta^{15}N$ отмечается только для интервала 0-2.9 м, ниже 2.9 м эти показатели варьируют в обратной зависимости, что указывает на радикальную смену ландшафтных условий. Распределение изотопов углерода и азота имеет признаки синхронности в интервале 0.0-2.0 м, в интервале 4.50-2.0 м эти распределения асинхронны. Среднее значение $\delta^{13}C$ по всем полученным данным составляет –27.5‰, минимальное значение $\delta^{13}C$ –28.42‰ отмечено на глубине 3.6 м, максимальное –26.64‰ – на глубине 3.2 м.

Таблица 1.

Содержание углерода, азота, их отношения и значений $\delta^{13}C$, и $\delta^{15}N$ в разрезе Лоринского полигонального торфяника (по А.Васильчук и др. [6])

| Параметр | Среднее | Станд. отклонение | Минимум | Q1 | Медиана | Q3 | Максимум |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\delta^{13}C$, ‰ | –27,5 | 0,5 | –28,42 | –28,0 | –27,36 | –27,18 | –26,64 |
| C,% | 20,1 | 7,0 | 8,16 | 14,4 | 18,51 | 26,76 | 30,99 |
| $\delta^{15}N$,‰ | 1,6 | 0,5 | 0,02 | 1,40 | 1,70 | 2,06 | 2,57 |
| N,% | 0,9 | 0,2 | 0,48 | 0,73 | 0,93 | 1,09 | 1,51 |
| C/N | 24,7 | 3,4 | 19,2 | 21,6 | 23,90 | 26,95 | 31,10 |

*Примечание:* Q1и Q3 –средние значения для первого и третьего квартилей, ($n$ = 31).

Среднее значение $\delta^{15}N$ по разрезу в целом составляет 1.6‰, минимальное значение $\delta^{15}N$ 0.02‰ отмечено на глубине 2.8 м, максимальное 2.57‰ – на глубине 4.1 м (см. табл. 1). Согласно статистическим оценкам содержание углерода показало обратную линейную зависимость от изотопного состава азота и прямую с содержанием азота, с обоими параметрами наблюдаются высокие коэффициенты корреляции. Изотопный состав азота и содержание азота характеризуются высокой степенью корреляции и зависимостью, близкой к обратной линейной. Распределения микро- и макроэлементов элементов (Al, Si, S, Ca, Ni, Fe) позволяют выделить ритмы, отличающиеся от распределения биогенных элементов и их изотопов (табл. 2).

Таблица 2

Содержание элементов (%)в разрезе Лоринского полигонального торфяника (по А.Васильчук и др. [6])

| Параметр | Среднее | Станд. отклонение | Минимум | $Q_1$ | Меди-ана | $Q_3$ | Максимум |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Al | 1,4 | 0,5 | 0,84 | 1,04 | 1,20 | 1,45 | 3,02 |
| Si | 5,2 | 2,5 | 2,72 | 3,69 | 4,23 | 5,54 | 13,36 |
| S | 0,15 | 0,07 | 0,07 | 0,10 | 0,13 | 0,16 | 0,36 |
| Ca | 0,6 | 0,09 | 0,42 | 0,55 | 0,59 | 0,66 | 0,87 |
| Ti | 0,2 | 0,05 | 0,12 | 0,20 | 0,23 | 0,26 | 0,36 |
| Fe | 2,3 | 0,3 | 1,42 | 2,13 | 2,35 | 2,48 | 2,94 |

*Примечание*: $Q_1$ и $Q_3$ –средние значения для первого и третьего квартилей, ($n$ = 31)

Набольший разброс значений отмечается для кремния (2,72–13,76%) максимумы содержания кремния фиксируются на глубинах 4,2, 3,3, 2,4, 1,5 и 1,3 м. Распределение содержания алюминия (0,84–3,02%) совпадает с распределением кремния, максимумы содержания алюминия находятся на

тех же глубинах, что и у кремния. Выразительно выглядит распределение по разрезу трехвалентного железа (1,42–2,94%). Выделяется интервал 4,5–2,5 м, в котором среднее содержание Fe составляет 2,45%, а также верхняя часть разреза 2,5–0 м, где эта величина равна 1,99%. Распределение титана, серы и кальция по разрезу равномерное, об этом свидетельствует близость медианных и средних значений, а также значений первого и третьего квартилей (см. табл. 2).

В изученном разрезе прослеживается интервал низких значений $\delta^{13}C$ на глубине от 4,4 до 3,0 м, соответствующий началу гренландского периода голоцена (11,7 тыс. лет назад). Нижняя часть торфяника (3,0–4,4 м) характеризуется значениями содержания C ниже 20%, а N чуть ниже 1%, значения $\delta^{15}N$ в основном выше 2‰, т. е. наблюдается обогащение торфа этим тяжелым изотопом азота при низком содержании углерода. Как показали исследования торфяников в криолитозоне [10; 11] потеря более легкого изотопа $^{14}N$ происходит, если повышается температура летнего сезона, разложение торфа ускоряется, интенсивное разложение фиксируется обогащением торфа изотопом $^{15}N$ с одновременным уменьшением значения C/N. Выраженный минимум значений $\delta^{15}N$ (0,77–0,02‰) на глубине 2,7–2,9 м, сопровождающийся ростом содержания N и C, а также повышением значения $\delta^{13}C$ может быть связан с ухудшением условий вегетации. Но условия весеннего и осеннего сезонов были благоприятны для нитрификации (т. е. для превращения аммонийного азота сначала в нитриты, а затем в нитраты в аэробных условиях). Осенний и весенний периоды длились дольше, возможно, увеличились температура зимнего сезона и толщина снежного покрова. Установлено, что при снижении зимней температуры и одновременном уменьшении толщины снежного покрова наблюдается снижение минерализации азота [12]. На фоне быстрого роста торфа выше этого рубежа несколько снижается содержание железа, минеральных частиц, увеличивается содержание азота (выше 1%) и углерода (в основном выше 25%), значения C/N увеличиваются (выше 25).

Мы предположили, что присутствие прослоев суглинка в разрезе связано с подтоплением торфяника. Для того чтобы установить присутствие водорослей в торфе сопоставлены значения C/N и $\delta^{13}C$, и, согласно тесту Меерса [13], установлено, что все точки попадают в интервал значений C/N больше 20 (рис. 2).

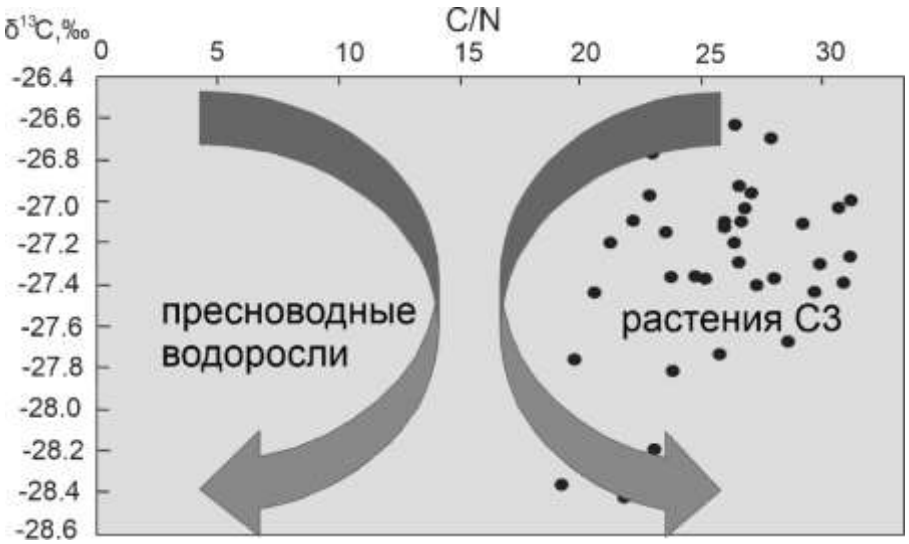



Рис. 2. Тест Мейерса [13] на присутствие водорослей: отношение величин $\delta^{13}C$ и C/N в разрезе Лоринского полигонального торфяника

Из этого следует, что присутствие водорослей в торфянике не прослеживается. Однако, вполне возможен эоловый занос минеральных частиц, поскольку до 11 кал. тыс. лет назад береговая линия в районе с. Лорино, как и по всему побережью Северной Евразии, находилась на значительном расстоянии от ее современного положения [14]. Эоловый материал мог поступать на поверхность террасы с пляжей и речных осушек. Наиболее низкие значения $\delta^{13}C$ (среднее значение –28,08‰) в интервале 3,3–4,4 м подтверждают это предположение. Если бы происходило подтопление, то наблюдалось бы обогащение более тяжелым изотопом углерода, поскольку при подтоплении тонкий слой воды, покрывающий растения, служит барьером для диффузии $CO_2$, что в свою очередь ведет к снижению коэффициента фракционирования при поглощении $CO_2$ и, следовательно, к относительному обогащению растений тяжелым изотопом углерода при высокой водонасыщенности.

Датирование изменений содержания азота и углерода и их изотопов позволило установить возрастной рубеж 10 680 кал. лет назад как фиксирующий повышение уровня моря до близкого к современному уровню. Повышение уровня моря в регионе в это время [15] обусловило повышение влажности в период вегетации и быстрый рост торфяника.

Значения $\delta^{13}C$ начинают расти с глубины 3,2 м (10 680 кал. лет назад), ниже этой отметки среднее значение равно –28,1‰, выше – –27,2‰. Поскольку отмеченная тенденция сохранилась в верхней части разреза, можно предположить, что именно в это время режим влажности наземных местообитаний растений в изученном районе стал близок к современному, что очевидно связано с положением береговой линии и соответствующей этому положению циркуляцией воздушных масс [16].

Моделируя накопление углерода на Аляске для последних 15 тыс. лет С. Ван с соавторами [17] отнесли начало формирования торфяников на северо-восточном побережье Чукотки к периоду 5 тыс. лет назад, что очевидно не соответствует полученным данным.

Как показали широкомасштабные исследования экологических связей в масштабах тундрового биома за три десятилетия глобального потепления, увеличение глубины сезонно-талого слоя и увеличение влажности почвы оказали наиболее сильное влияние на сдвиги признаков в растительных сообществах тундры [18]. Экосистемам высоких широт, а также многолетнемерзлым полигональным торфяникам, требуется несколько столетий, чтобы приспособиться к изменившимся атмосферным условиям, следовательно, заметные изменения будут происходить по нарастающей. Аналогичная ситуация сложилась при переходе о т позднего дриаса к голоцену. Изучение полного цикла формирования полигонального торфяника приближает понимание изменений, происходящих в настоящее время в тундровом биоме.

### *Выводы*

- Лоринский полигональный торфяник накапливался от 12 900 до 4860 кал. лет назад.
- Рост торфяника был неравномерным: в основании разреза, скорость накопления торфа была около 0,2 мм/год, затем в интервале 11 150–10 040 кал. лет назад скорость накопления торфа увеличилась до 1,9 мм/год, от 9400 до 5410 кал. лет назад этот показатель снизился до 0,15 мм/год, от 5410 до 4860 кал. лет назад скорость накопления торфа снизилась до минимума – 0,09 мм/год.
- Смещение береговой линии к ее современному положению после 10 680 кал. тыс. лет назад отразилось на росте значений $\delta^{13}C$, что связано с изменением режима увлажнения торфяника.
- Сопоставление значений C/N и $\delta^{13}C$ показало, что растительные остатки принадлежат растениям С3, присутствие водорослей в торфянике не прослеживается.
- Обогащение торфа в нижней части разреза в интервале 3,3–4,4 м изотопом $^{15}N$ с одновременным уменьшением величины C/N соответствует повышенной температуре сезона вегетации, при которой разложение торфа ускорилось.
- Выраженный минимум значений $\delta^{15}N$ (0,77–0,02‰) на глубине 2,7–2,9 м, сопровождающийся ростом содержания N, связан со снижением степени континентальности, что привело к повышению длительности весеннего и осеннего сезонов, благоприятных для нитрификации.

### *Благодарности*

Авторы благодарны к.г.н Н.А. Буданцевой, к.б.н. В.А. Литвинскому, к.г.н. А.А. Маслакову, к.г.н. Э.П. Зазовской, к.г.н. Дж.Ю. Васильчук, к.г.-м.н. Д.М. Богатовой, магистрантке А.Г. Григорян, асп. Л.П. Кузякину, Р.В. Собину, Н.А. Мушниковой и Е.Й. Катеман за помощь в полевых и лабораторных исследованиях.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова

### *Литература*

1 Буданцева Н.А., Маслаков А.А., Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Кузякин Л.П. Реконструкция среднеянварской температуры воздуха в раннем голоцене на восточном побережье Чукотки // Лед и снег. – 2023. – Т. 63. № 1. – С. 93-103. – doi: 10.31857/S2076673423010039

2 Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Farquharson L., Maslakov A.A., Vasil'chuk A.C., Chizhova Ju.N. Isotopic evidence for Holocene January air temperature variability on the East Chukotka Peninsula // Permafrost and Periglacial Processes. – 2018. – V. 29. – Iss. 4. – P. 283-297. – doi: 10.1002/ppp.1991.

3 Vasil’chuk Yu K., Maslakov A.A., Budantseva N.A., Vasil’chuk A.C., Komova N.N. Isotope Signature of the Massive Ice Bodies on the Northeast Coast of Chukotka Peninsula // Geography, Environment, Sustainability. – 2021. – V. 14. – N4. – P. 9-19.

4 Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Maslakov A.A., Tokarev I.V., Vasil'chuk J.Yu., Kuzyakin L.P. Chronologies of active growth of ice wedges and Middle Holocene palaeoclimate at Lorino site, Chukchi Peninsula, easternmost Siberia. Radiocarbon. – 2025. – V. 67. – Iss. 1. – P. 192–199. – doi: 10.1017/RDC.2024.108.

5 Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К., Васильчук Дж Ю., Блудушкина Л.Б. Соотношение содержания углерода, азота и значения $\delta^{13}C$ в полигональных ландшафтах на побережье залива Онемен // Арктика и Антарктика. – 2021. – № 1. – С. 47-64. – doi: 10.7256/2453-8922.0.0.33291.

6 Васильчук А.К., Васильчук Ю.К., Маслаков А.А., Буданцева Н.А., Литвинский В.А., Васильчук Дж.Ю. Вариации содержания углерода, азота и их стабильных изотопов в торфе плоскобугристых полигональных торфяников на восточном побережье Чукотки // Вестник МГУ, серия география. – 2026. – Т. 81. – №1. – С. 153-165. – doi: 10.55959/MSU0579-9414.5.81.1.13.

7 www.meteo.ru/data/156-temperature

8 Maslakov A., Grishchenko M., Grigoryan A. Zamolodchikov D. Long-term effect of warming-induced permafrost thawing on tundra vegetation – the evidence from the Chukchi Peninsula (Russian Northeast) // Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijić" SASA. –2024. – V. 74(3) – P. 291-309.

9 Грищенко М.Ю., Маслаков А.А., Григорян А.Г., Алдошин И.А. Вегетационный индекс NDVI как показатель динамики мерзлотных процессов и техногенеза на Чукотском полуострове // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5 Геогр. – 2025 – Т. 80 – № 6 – С. 103-117. – doi: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.8.

10 Andersson R.A., Meyers P., Hornibrook E. et al. Elemental and isotopic carbon and nitrogen records of organic matter accumulation in a Holocene permafrost peat sequence in the East European Russian Arctic//J. Quat. Sci. – 2012. – V. 27(6). – P. 545-552. doi: 10.1002/jqs.2541.

11 Krüger J.P., Leifeld J., Alewell C. Degradation changes stable carbon isotope depth profiles in palsa peatlands // Biogeosciences. – 2014. – V. 11. – P. 3369-3380.doi: 10.5194/bg-11-3369-2014.

12 Schimel J.P., Bilbrough C., Welker J.M. Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities// Soil Biology and Biochemistry. –2004. –V. 36. – N 2. –P. 217–227.

13 Meyers P.A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter // Chemical Geology. – 1994. –V. 114. – P. 289-302.

14 Jakobsson M., Pearce C., Cronin T.M. et al. Post-glacial flooding of the Bering Land Bridge dated to 11 cal ka BP based on new geophysical and sediment records // Clim. Past. – 2017. – V. 13. – P. 991–1005. doi: 10.5194/cp-13-991-2017.

15 Keigwin L.D., Donnelly J.P., Cook M.S. et al. Rapid sea-level rise and Holocene climate in the Chukchi Sea // Geology. – 2006. – V. 34(10). P. 861-864. doi: 10.1130/G22712.1.

16 Kaufman D.S., Ager T.A., Anderson N.J. et al. Holocene thermal maximum in the western Arctic (0–180°W) // Quaternary Science Reviews. – 2004. – V. 23(5-6). – P. 529-560. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.09.007.

17 Wang S., Zhuang Q., Yu Z. Quantifying soil carbon accumulation in Alaskan terrestrial ecosystems during the last 15 000 years // Biogeosciences. – 2016. – V. 13. – P. 6305–6319.

18 Bjorkman A. D., Myers-Smith I.H., Elmendorf S.C. et al. Plant functional trait change across a warming tundra biome // Nature. – 2018. – V. 562. – №. 7725. – C. 57-62. doi.org/10.1038/s41586-018-0563-7.

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА ОБХОДНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВИЛЮЙСКОЙ ГЭС В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

***С.А. Великин[1], Д.С. Андрюшин[2], Ю.Г. Иванов[1]***

*[1]Вилюйская научно-исследовательская мерзлотная станция ИМЗ СО РАН, пос. Чернышевский*

*[2] Игарская геокриологическая лаборатория ИМЗ СО РАН, г. Игарка*

**Введение**

Гидроэнергетические сооружения являются важнейшими объектами для эксплуатации и жизнеобеспечения территорий криолитозоны северных регионов, обеспечивая электроэнергией ключевые горнопромышленные районы. Наряду с этим, гидроэлектростанции (ГЭС) и их водохранилища относятся к объектам с повышенным уровнем риска для жизнедеятельности населения и обеспечения устойчивого экономического развития. В контексте антропогенного

воздействия на криолитозону данные гидротехнические сооружения выступают в качестве наиболее уязвимых инфраструктурных звеньев [1,2].

Ключевой проблемой многих ГЭС остаётся фильтрация воды через тело плотины, под неё или через береговые примыкания. Особую опасность вызывает обходная фильтрация [3], которая не только снижает надёжность сооружений, но и может привести к катастрофическим последствиям вплоть до их разрушения. В связи с этим выявление, контроль и прогноз развития фильтрационных процессов в условиях резкого изменения климата, наблюдаемого в последние годы, остаются крайне актуальными и представляют собой важную задачу для обеспечения безопасной эксплуатации сооружений.

В данном исследовании рассматривается проблема обходной фильтрации, фиксируемой на правобережном примыкании Вилюйской ГЭС с 1996 г. Своевременное получение информации по обеспечению безопасности объекта обеспечивается геофизическим, в том числе и, термометрическим мониторингом. Однако, для обоснования инженерно-управленческих решений и проектирования противофильтрационных мероприятий необходима общая характеристика термического поля береговых примыканий, где развиваются фильтрационные процессы, что требует моделирования температурного состояния данного участка.

**Объект и цели исследования**

Исследования проводились на участке правобережного примыкания Вилюйской ГЭС, где много лет наблюдается обходная фильтрация (рис. 1).

а б

Рисунок 1. Правобережное примыкание Вилюйской ГЭС. а) Вид на участок водосброса; б) Расположение мониторинговых скважин и линии температурных разрезов

Цель исследования — пространственная оценка теплового поля правобережного примыкания ГЭС на начало 2026 г. В связи с тем, что ситуация находится под постоянным контролем, и в настоящее время планируются противофильтрационные мероприятия для обеспечения устойчивости сооружений, в задачи исследователей входило построение трёхмерной температурной модели и её верификация с использованием данных многолетнего мониторинга.

**Обоснование методов обработки данных**

В условиях криолитозоны основным источником информации о начале развития фильтрационных процессов служит комплекс контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), обеспечивающий мониторинг температуры и пьезометрического уровня в скважинах. Однако сеть скважин не охватывает всю зону фильтрации ни по площади, ни по глубине. Кроме того, для оценки температурного состояния участка необходима информация о температуре породного массива за пределами зоны фильтрации. Получить её только экстраполяцией данных затруднительно из-за сложности инженерно-геокриологического строения и разнородных теплофизических свойств пород.

В связи с этим авторами был применён подход, основанный на введении виртуальных (расчётных) скважин (рис. 1б) вдоль правобережного примыкания устоя головных сооружений. Такие скважины задавались не путём дополнительного бурения, а с использованием закономерностей, полученных по результатам долговременных наблюдений на существующих профилях наблюдательных скважин (как поперечных, так и продольных относительно талой зоны).

Для оценки температурного состояния подстилающих талую область мёрзлых пород, не вскрытых скважинами, использовались данные по многолетней динамике температуры в наблюдательных скважинах с анализом скорости роста мощности талого слоя.

Примеры использованных материалов для задания виртуальных скважин представлены на рисунках 2-3.

Это позволило:

- существенно повысить достоверность оценки температурного состояния участка без проведения дорогостоящих полевых работ;
- построить более надёжную расчётную модель для анализа фильтрационной ситуации;
- учесть пространственную изменчивость теплового поля в зоне, не охваченной непосредственными измерениями.

- **Результаты**
- Тепловая модель правобережного примыкания построена на основе данных 35 скважин по состоянию на 28.01.2026. Интерполяция трёхмерного температурного массива выполнялась методом горизонтально-смещённого кригинга (Horizontally Biased Kriging) для модели Гаусса с самородком, позволяющим оценивать влияние априорных данных по латерали.
- После создания модели были выделены разрезы по наиболее представительным и динамичным участкам (рис. 1б): три поперечных (A'-A, B'-B, F'-F) и три продольных (C-C', D-D', E-E').

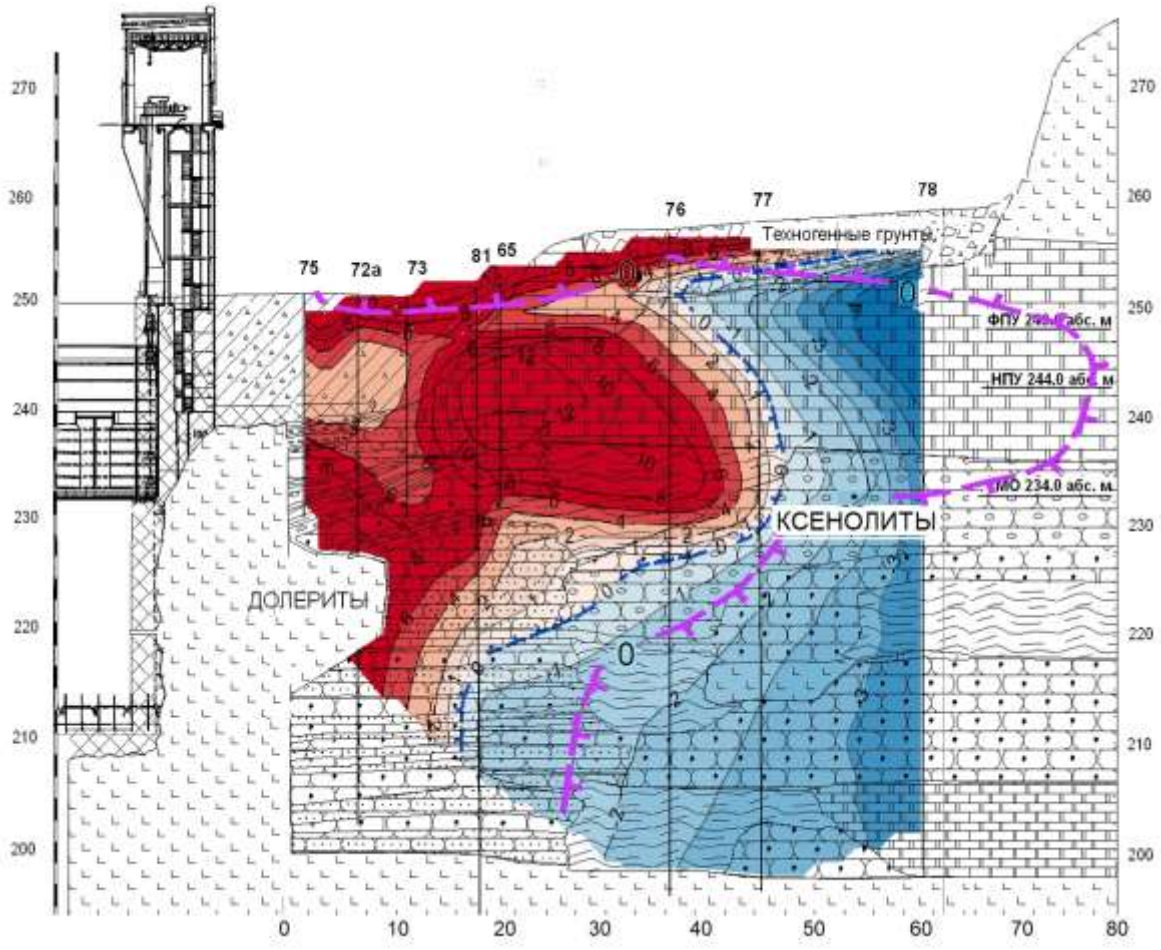



Рис. 2. Правобережное примыкание Вилюйской ГЭС.Температурный разрез по линии скв.75-78 по состоянию на август 2004 г. и граница ММП на январь 2026 г.

- Наиболее растеплённым является участок примыкания, непосредственно контактирующий с водохранилищем и предполагаемой зоной фильтрации (начало разрезов A, C, F). Здесь температуры повышены до 5–6 °C в холодный период и до 15–17 °C в тёплый период при активной фильтрации. По разрезу F'-F с августа 2004 г. по январь 2026 г., согласно выполненному моделированию, талая зона расширилась в глубь ксенолита под долеритовым

массивом на юго-запад на 30 м. Ранее в скв. 77 температуры составляли 0–1 °С на абс. отм. 235 м, в настоящий момент на тех же отметках — 4–5 °С; в ранее мёрзлой скв. 78 на абс. отм. 236 м — 5 °С. Восточная часть протаяла в меньшей степени, на что указывают более низкие температуры до 2,5 °С (рис. 2).

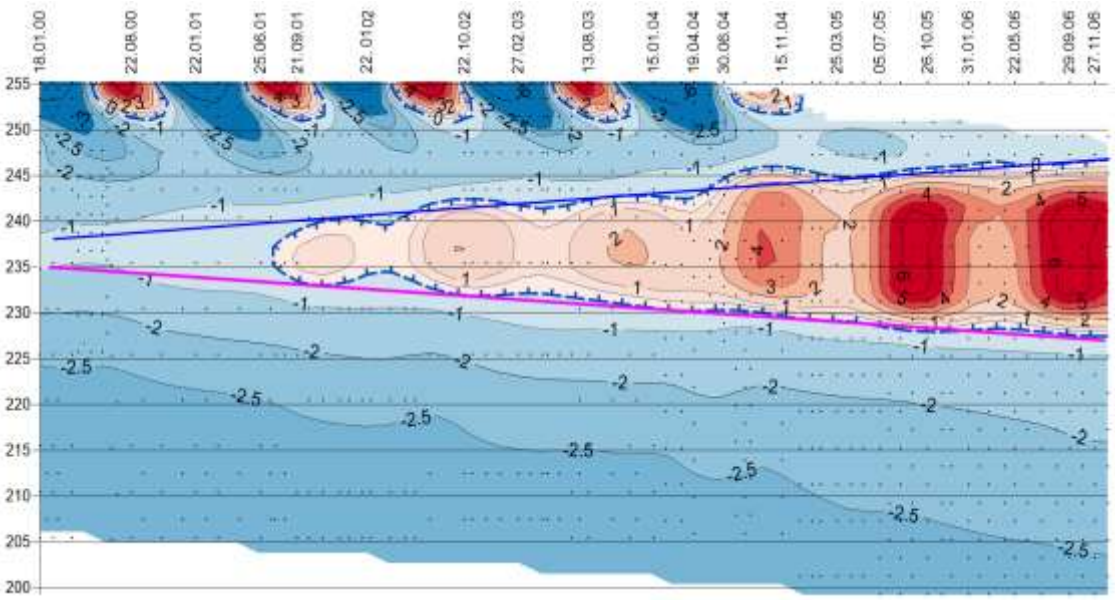



Рис. 3. Правобережное примыкание Вилюйской ГЭС. Временной температурный разрез по скважине за период 18.01.2000 по 27.11.2006 г.

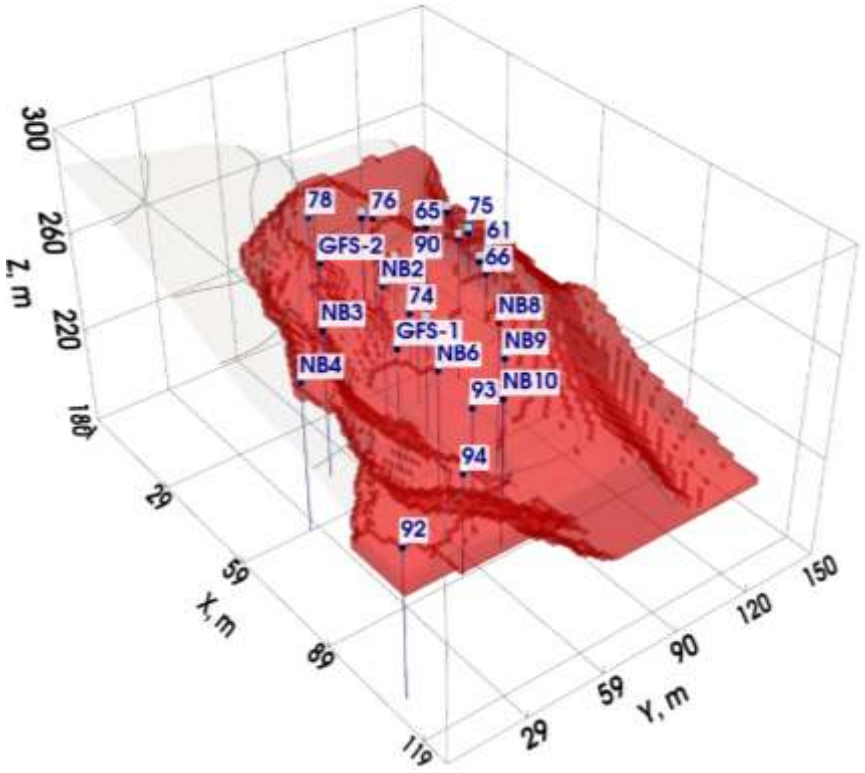



Рис. 4. Правобережное примыкание Вилюйской ГЭС. Объемная тепловая модель правобережного примыкания.

Разрезы С-С', Е-Е' и D-D' последовательно отражают изменение теплового поля массива с севера на юг (рис. 5). На разрезах С-С' и Е-Е' в пределах исследованной площадки на абс. отм. 235–240 м породы полностью протаяли.

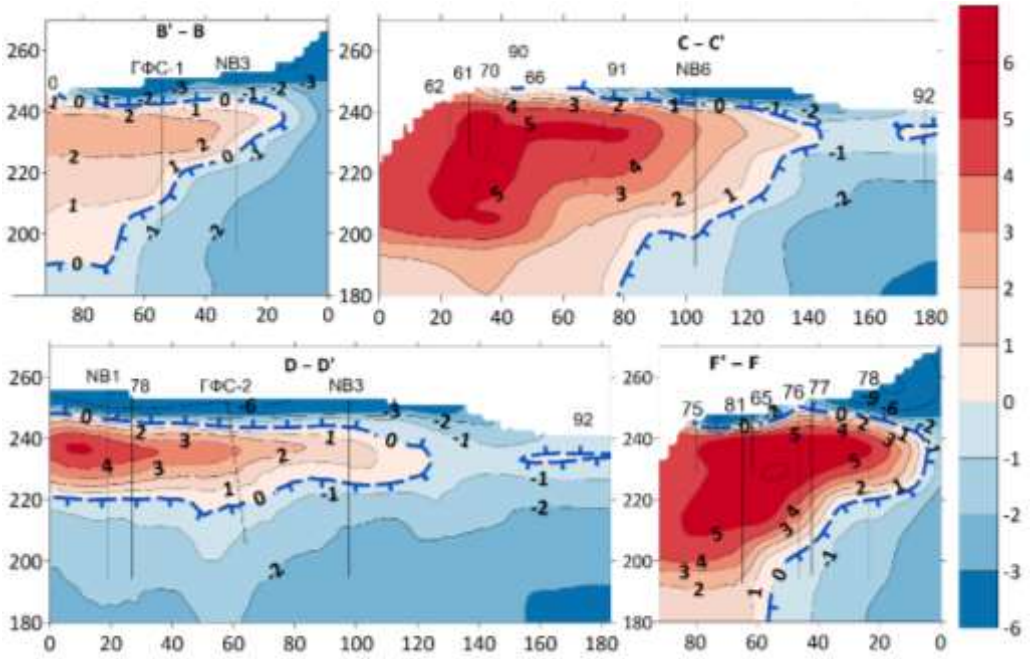



Рис. 5. Правобережное примыкание Вилюйской ГЭС.Температурные разрезы по линиям B'-B, C'-C, D'-D, E'-E

**Обсуждение результатов**

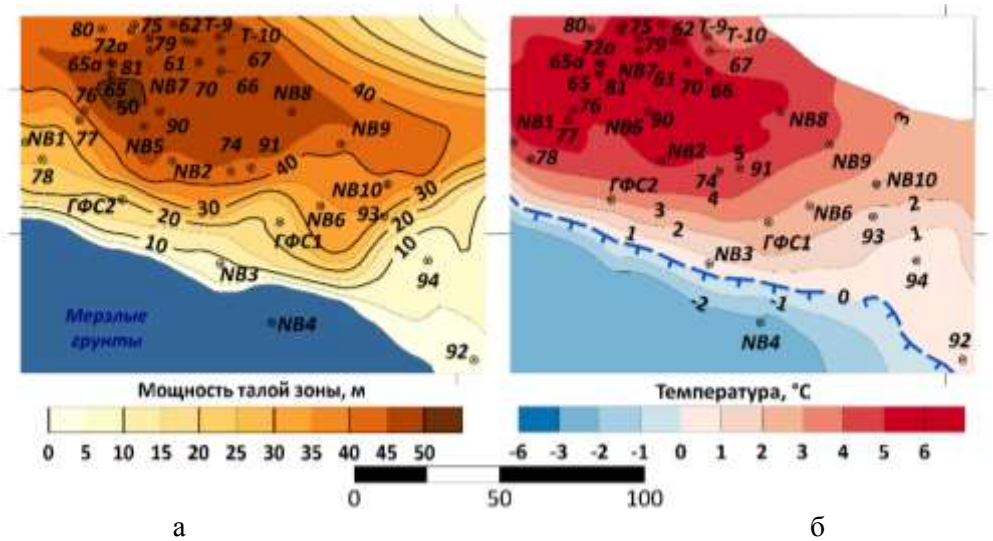
В результате создана карта мощности таликовой зоны правобережного примыкания и построен план по глубине с наиболее высокими температурами — 235 м (рис. 6).

В центральной и северо-западной частях, непосредственно контактирующих с водохранилищем, глубина талой зоны составляет от 30 до ~ 50 м.

На участке от дороги до долеритового массива на юге глубина протаивания — от 0 до 20 м, на юго-востоке с пониженным рельефом в районе скв. 94 и 92 — от 2 до 10 м. Таким образом, на ¾ исследованной территории сформировался талик, охватывающий практически всю верхнюю часть разреза, что демонстрируется на трёхмерной цифровой модели массива правобережного примыкания ГЭС (рис. 4).

***Выводы***

Применение виртуальных скважин, рассчитанных на основе многолетних термометрических закономерностей, позволило восполнить недостаток полевых данных в межскважинном пространстве и получить пространственно-непрерывную трёхмерную модель температурного поля без дополнительных буровых работ.




а б

Рис.6. Правобережное примыкание Вилюйской ГЭС. а) карта мощности таликовой зоны; б) карта - срез по наиболее высокотемпературной абс.отм. 235 м

В этой связи полученная информация и разработанная модель температурного состояния правобережного примыкания позволяют более обоснованно подойти к реализации планируемых работ по ликвидации фильтрационных процессов и обеспечению устойчивости участка правобережного примыкания головных сооружений гидроэлектростанции.

Сложившаяся ситуация не исключает потенциального риска деформаций пород берегового примыкания и выхода грунтовых вод на поверхность на склоне за правобережным уступом, что может привести к предаварийной ситуации. По мнению авторов в настоящий период требуется переход на качественно более высокий уровень ведения комплексных исследований. В первую очередь это подразумевает собой внедрение автоматизированных систем регистрации геофизических измерений в режиме реального времени для целей оперативного прогноза аварийных ситуаций.

***Литература***

1. Грунтовые плотины в криолитозоне России Монография Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2019. – 427 с. Р.В. Чжан, С.А. Великин и др.

2. Температурно-криогенный режим гидроузла Вилюйской ГЭС-1, 2 Гидротехническое строительство, №6, 2017. – с. 10-23. Чжан Р.В, Великин С.А., Шестернёв Д. М

3. Выявление характера и природы обходной фильтрации на гидроузлах в западной Якутии с помощью геофизических методов. С. А. Великин, Р.В. Чжан. // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, №6.

## ПРИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИЙ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ «ЦЕРКОВЬ УСПЕНИЯ ПРЕСВЯТОЙ БОГОРОДИЦЫ» В С. КАЛИНИНО

***А.Г. Верхотуров, Д.Д. Шестернев, Г.Д. Шестернев***
*Забайкальский государственный университет, г. Чита*

Церковь Успения Пресвятой Богородицы (рис.1) в с. Калинино, Забайкальского края расположенная в 8 км от г. Нерчинска на правом берегу р. Шилка, является памятником культурного наследия федерального значения как первый каменный храм на востоке от Байкала.

Рис. 1. Общий вид площадки (вид на СВ

Рис. 2. Проходка скважины № 5, северная часть здания) часть здания

Построенная в 1712 году церковь работала более 200 лет, но в 1930 году, по известным причинам, она была закрыта. Через 50 лет к началу 80-х годов прошлого столетия началось быстрое разрушение храма (рис. 2).

Конструктивно здание церкви можно разделить на четыре строительных объема: колокольня, трапезная, четверик (основной объем храма), апсида. Во всех крупных элементах комплекса церкви зафиксированы деформации. На колокольне ширина раскрытия вертикальных трещин от 0,3 до 10 см. В трапезной ширина раскрытия трещин до 7- 15 см, при толщине наружных стен в 1,5 м. В четверике (основном объеме церкви) отмечается просадка стен на 6-7 см, отмечаются наклонные и вертикальные трещины шириной раскрытия 5-7 см. В апсиде кирпичные стены в зоне опирания находятся в аварийном состоянии, частично разрушены (до 50 %), перемычки над оконными проемами обрушены. Таким образом, здание церкви находится в аварийном состоянии, имеет многочисленные деформационные трещины шириной раскрытия до 15 см, а также обрушения кирпичной кладки. Возникновение трещин, вероятно, было обусловлено формированием многолетнемерзлых пород (ММП в период простоя сооружения и последующей постепенной их деградации при изменении климатических характеристик, что привело к неравномерным осадкам

здания. Для установления реальных причин столь значительных деформаций храма, и подготовки инженерно-геологической информации для реставраторов, авторами и сотрудниками ОАО «ЗабайкалТИСИЗ» был выполнен комплекс геокриологических исследований в августе 2022 года, результаты которых легли в основу данной работы.

На площадке храмового комплекса установкой УРБ2,5А были пробурены скважины (рис.3) для отбора проб, проведения полевых испытаний грунтов. Часть скважин впоследствии была оборудована для термометрических наблюдений. Общий объем бурения составил 66 п.м.

При вскрытии подземных вод: отбирались пробы воды для лабораторных исследований; фиксировались глубины появления и их статические уровни. Всего на объекте пробурено 6 скважин, глубиной по 11,0 м. Для обследования фундаментов существующего здания была выполнена проходка 7 шурфов глубиной 2,0–2,5 м с внешней и внутренней стороны здания. Проходка шурфов осуществлялась вручную на всю глубину заложения фундамента.

Для определения модуля деформации на исследуемом участке выполнено испытание грунтов в скважинах штампом типа III круглой формы с плоской подошвой площадью 600 см$^2$ в соответствии с требованиями ГОСТ 20276.1-2020. «Грунты. Метод испытания штампом». Испытаниям подвергались: суглинки мягкопластичные, пески средней крупности, гравийные грунты. Штамповые испытания грунтов производились в районе скважин №№ 1-3. Всего было произведено 9 испытаний По данным испытаний построены графики зависимости осадки штампа от давления *S=f (p)*.

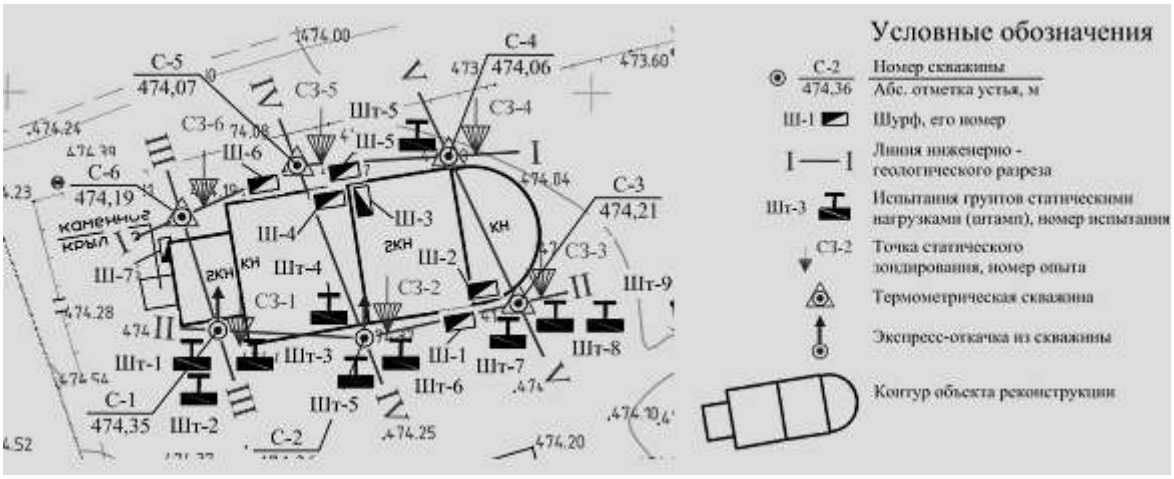



Рис. 3. Схема расположения горных выработок на площадке

Для уточнения плотности сложения, деформационных и прочностных свойств грунтов, на площадке было выполнено испытание грунтов методом статического зондирования, согласно ГОСТ 19912-2012 «Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием». Статическое зондирование выполнялось комплектом регистрирующей аппаратуры ТЕСТ-К4М, с использованием стандартного тензометрического зонда II типа А-350

Термометрические замеры в скважинах были выполнены термометрической косой в соответствии с требованиями ГОСТ 25358-2020 «Грунты. Метод полевого определения температуры». Результаты выполненных работ оформлены в виде графиков измерения температуры по глубине.

Исследуемая площадка расположена в пределах одного геоморфологического элемента – первой правобережной надпойменной террасы реки Шилка с абсолютными высотами 474-475 м. Площадка ровная, с незначительным уклоном (1-2$^0$) в северо-западном направлении. Площадка покрыта травяной растительностью. В некоторых местах имеются вывалы кирпичей, строительного мусора. В геологическом строении исследуемого участка принимают участие отложения четвертичного возраста аллювиального (aQ) и элювиального (eQ) генезиса, а также скальные грунты среднепалеозойского возраста ($sPZ_2ab$). Аллювиальные отложения представлены суглинками и супесями с неравномерным содержанием крупнообломочного материала, песком средней крупности, гравийным грунтом с песчаным заполнителем. Вскрытая мощность аллювиальных отложений составляет 6,0–7,1 м. Элювиальные отложения представлены продуктами глубокого физического выветривания метаморфических образований среднего палеозоя и представлены дресвяным грунтом с суглинистым заполнителем (элювий метаморфических сланцев). Вскрытая мощность элювиальных отложений составляет 1,2 – 2,3 м. Скальные грунты представлены метаморфическими сланцами.

Кровля скальных грунтов вскрыта с глубины 8,9-9,8 м. Вскрытая мощность скальных грунтов составляет 1,2-2,1 м.

Из отрицательных инженерно-геологических процессов на исследуемой территории выделяется морозное пучение, сейсмическая активность, подтопление. По совокупности выделенных факторов, исследуемая площадка относится к III (сложной) категории сложности инженерно-геологических условий.

В результате анализа пространственной изменчивости частных характеристик грунтов, определенных лабораторными и полевыми методами, с учетом данных о геологическом строении и литологических особенностях грунтов в сфере воздействия существующего сооружения реконструкции, выделяется 9 инженерно-геологических элементов (ИГЭ):

- Инженерно-геологический элемент 1 (ИГЭ-1). Насыпной грунт: суглинок, песок, гравий, строительный мусор. Грунт талый, слежавшийся. Вскрытая мощность элемента изменяется от 0,4 до 2,1 м, составляя в среднем 1,4 м. Физические показатели минеральной части выделенного элемента изменяются в зависимости от типа грунта. Грунты ИГЭ-1 с пылевато-глинистой составляющей характеризуются быстрой размокаемостью, ненабухающие, по степени морозной пучинистости насыпной грунт в зоне сезонного промерзания относится к группе слабопучинистых грунтов, относительная деформация пучения $\acute{\varepsilon}_{fn}$ составляет 0,015÷0,023 д.е. При дополнительном замачивании грунты ИГЭ-1 могут приобрести пучинистые свойства.

- Инженерно-геологический элемент 2 (ИГЭ-2). Суглинок с примесью органического вещества, талый, мягкопластичный. В шурфах ИГЭ-2 вскрыт в основании фундамента, с глубины 1,8-2,1 м. Вскрытая мощность элемента (по скважинам) изменяется от 0,3 до 1,8 м, составляя в среднем 0,8 м. По степени морозоопасности суглинок мягкопластичный в зоне сезонного промерзания относится к группе сильнопучинистых грунтов, относительная деформация пучения $\acute{\varepsilon}_{fn}$ составляет 0,047÷0,106 д.е.

- Инженерно-геологический элемент 3 (ИГЭ-3). Песок средней крупности, талый, малой степени водонасыщения, средней плотности. По степени морозоопасности песок средней крупности в зоне сезонного промерзания относится к группе слабопучинистых грунтов, относительная деформация пучения $\acute{\varepsilon}_{fn}$ составляет 0,013-0,015 д.е.

- Инженерно-геологический элемент 4 (ИГЭ-4). Гравийный грунт с песчаным заполнителем до 40 %, талый, малой степени водонасыщения и водонасыщенный. По степени морозоопасности гравийный грунт с песчаным заполнителем в зоне сезонного промерзания относится к группе непучинистых грунтов при любом положении уровня подземных вод.

- Инженерно-геологический элемент 3м (ИГЭ-3м). Песок средней крупности, мерзлый, массивной криотекстуры, при оттаивании средней степени водонасыщения и водонасыщенный, средней плотности. Грунт слабольдистый, твердомерзлый, незасоленный.

- Инженерно-геологический элемент 4м (ИГЭ-4м). Гравийный грунт с песчаным заполнителем более 40 %, мерзлый, корковой криотекстуры, при оттаивании малой степени водонасыщения и водонасыщенный

- Инженерно-геологический элемент 5м (ИГЭ-5м). Супесь с гравием, мерзлая, корковой криотекстуры, при оттаивании пластичная, с $I_L$ > 0,75 д.е. и текучая. Грунт слабольдистый, пластичномерзлый, незасоленный.

- Инженерно-геологический элемент 6м (ИГЭ-6м). Дресвяный грунт с суглинистым заполнителем более 30 %, мерзлый, корковой криотекстуры, при оттаивании заполнитель твердый, полутвердый (элювий метаморфических сланцев). Обломки метаморфических пород, слабовыветрелые, малопрочные.

- Инженерно-геологический элемент 7 (ИГЭ-7). Скальный грунт: метаморфические сланцы морозные, слабовыветрелые, сильнотрещиноватые, прочные, размягчаемые, слабопористые.

Гидрогеологические условия на площадке характеризуются наличием подземных вод аллювиальных отложений порово-пластового типа. Водоносный горизонт, сложенный гравийным грунтом с песчаным заполнителем, безнапорный. Питание подземных вод осуществляется за счет атмосферных осадков и подтока вод р. Шилка. Подземные порово-пластовые воды аллювиальных отложений встречены в скважинах №№ 1, 2 с глубины 4,6-4,7 м (табл.1). По химическому составу подземные воды хлоридно-гидрокарбонатные магниево-кальциевые Изменение уровня подземных вод, с учетом сезонных колебаний, возможно на 0,5-1,5 м относительно зафиксированного на период изысканий. В скважинах №№ 3, 4, 5, 6 вода находится в твердой фазе. В период интенсивного выпадения атмосферных осадков по кровле пылевато-глинистых и многолетнемерзлых грунтов возможно образование временных грунтовых вод типа «верховодка».

Таблица 1

Залегание и распространение подземных вод

| № скв | Абс. Отм. Устья скважины, м | Уровень появления, м | Абс. Отм. Уровня появления, м | Уровень установления, м | Абс. Отм. Уровня установления, м | Напор, м |
|---|---|---|---|---|---|---|
| С-1 | 474,35 | 4,6 | 469,75 | 4,6 | 469,75 | – |
| С-2 | 474,36 | 4,7 | 469,66 | 4,7 | 469,66 | – |

Геокриологические условия территории характеризуются островным распространением многолетнемерзлых пород (ММП), которые преимущественное развиты в понижениях рельефа, речных долинах, склонах северной экспозиции. На водоразделах и склонах южной экспозиции ММП практически везде отсутствуют. Криогенное строение мерзлых пород изменяется в зависимости от литологического состава и фациальных разностей. На площадке вскрыты ММП сливающегося и несливающегося типа с глубины 2,1-6,5 м. Нижняя граница ММП до исследуемой глубины 11,0 м не вскрыта (рис.4).

В многолетнемерзлом состоянии находятся с северной и северо-западной стороны храма: гравийный грунт с песчаным заполнителем, песок средней крупности, супесь с гравием, дресвяный грунт с суглинистым заполнителем (элювий метаморфических сланцев), скальный грунт (скв.4,5,6). Гравийный грунт имеет корковую криотекстуру, слабольдистый, твердомерзлый. Песок средней крупности характеризуется массивной криотекстурой, слабольдистый, твердомерзлый. Супесь с гравием также корковой криотекстуры, слабольдистая, пластичномерзлая. Дресвяный грунт с суглинистым заполнителем имеет корковую криотекстуру, слабольдистый, твердомерзлый. Скальный грунт морозный.

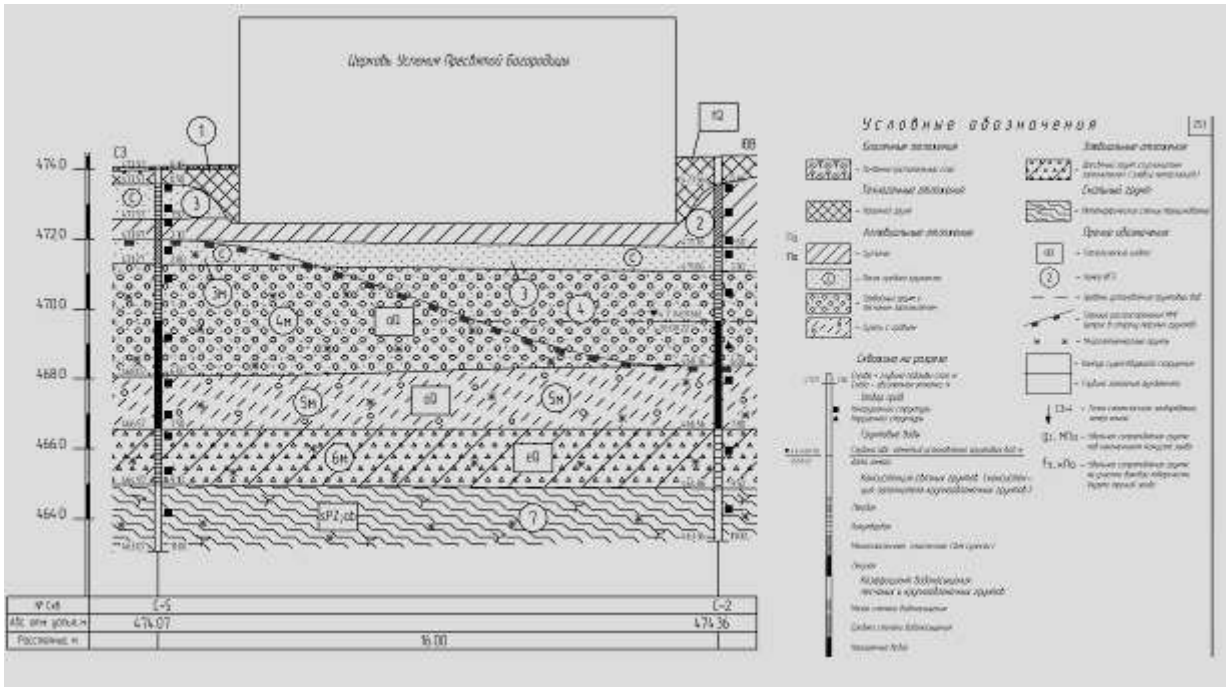



Рис.1. Разрез по линии скважин 5-2

При оттаивании гравийный грунт – малой степени водонасыщения и водонасыщенный; песок средней крупности средней степени водонасыщения и водонасыщенный; супесь с гравием – пластичная с показателем текучести $I_L > 0,75$ д.е. и текучая; заполнитель дресвяного грунта твердый, полутвердый. Температура начала замерзания (*Tbf*) гравийного грунта и песка средней крупности составляет 0,0 $^0$C; супеси с гравием – минус 0,15 $^0$C; дресвяного грунта с суглинистым заполнителем – минус 0,2 $^0$C. Температура многолетнемерзлого грунта на глубине годовых нулевых амплитуд по данным термометрических наблюдений в скважинах составляет минус 0,1 – минус 0,3 $^0$C. Нормативная глубина сезонного промерзания ($d_f$,*n*), по данным расчета, составляет – 3,54 м. Нормативная глубина сезонного оттаивания, по данным расчета, составляет – 2,59 м.

С южной и юго-восточной сторон храма многолетнемерзлые породы до глубины 6,5 м отсутствуют (скв. 1,2,3).

Результаты исследований на территории храмового комплекса показывают, что на момент начала строительства и в период эксплуатации сооружения на площадке, где был возведен храм, ММП скорее всего располагались ниже, лежащего в основании суглинистого грунта. Уровни залегании грунтовых вод были близки к современному и располагались на 4,6-4,7 м ниже поверхности земли. Инженерно-геологические и археологические работы, выполненные на территории храма, показали, что существующее одно- и двухэтажное кирпичное здание церкви имеет ленточный фундамент из бутового камня на цементном растворе, который уложен в траншеи на суглинистый грунт. Глубина заложения фундамента от поверхности земли и пола здания составляет 1,9-2,0 м соответственно. Очевидно, что консистенция глинистых грунтов основания на момент строительства была твердой, за исключением участка фундамента в районе шурфа № 1, где были уложены лаги из лиственничных бревен толщиной 0,3 м. Такая конструкция фундамента ранее использовалась для усиления фундаментов [2] на участках со слабыми грунтами. Наличие талых глинистых грунтов в твердой консистенции обеспечивало надежную гидроизоляцию фундамента храма в период эксплуатации сооружения.

В настоящее время в основании фундаментов по всему периметру здания – суглинок талый, мягкопластичный, сильнопучинистый (ИГЭ-2), имеющий, слабые механические характеристики. Изменение механических характеристик глинистого грунта связано с его замачиванием и последующим пучением при промерзании в зимние периоды после прекращения эксплуатации храма. Это одна из причин возникновения деформаций на данном сооружении.

Процессы аградации ММП на территории Забайкальского края отмечается на многочисленных объектах, где в зимний период на длительное время (более 5 лет) прекращалось отопление, а кровля здания сохранялась [1,2]. Такие здания начинают работать как солнцеосадкозащиный навес, который препятствует поступлению тепла летом и не препятствует накоплению холода зимой. В нашем случае, в результате прекращения эксплуатации храма, под ним, по данным электротомографии, сформировались крупная линза многолетнемерзлых пород с глубины 1,5 до 4–6 м, которая выделяется областью пород очень высокого (до 104 Ом·м) электросопротивления [2]. Наибольшее промерзание произошло под северной и северо-западной частями храма, позднее оно распространилось и на остальную часть основания.

В последние десятилетия средние годовые температуры воздуха в Забайкальском крае существенно повысились в среднем на 1,3-1.5$^{o}$C (градиент 0,02 $^{o}$C/год), что привело к постепенному оттаиванию многолетнемерзлых пород с южных и юго-восточных сторон церкви и неравномерным деформациям фундаментов.

Таким образом, результаты, выполненных инженерно-геологических изысканий на объекте культурного наследия федерального значения «Церковь Успения Пресвятой Богородицы» показали, что основной причиной деформирования фундаментов и стен храма является неравномерное морозное пучение суглинков в основании фундаментов. Поступление воды к основанию происходило за счет разрушения кровли церкви в отдельных местах. Замачивание водоупорных суглинков в контуре здания обусловило изменение их консистенции, а последующее промерзание-оттаивание приводило к развитию деформаций. Поэтому, в связи с залеганием в основании фундаментов грунтов со слабыми несущими характеристиками, которые при дополнительном замачивании становятся еще более слабыми, рекомендуется предусмотреть мероприятия по защите фундаментов от замачивания во время реставрации и последующей эксплуатации здания церкви. Также рекомендуется выполнить мероприятия, связанные с улучшением (повышением) несущих характеристик грунтов основания, а также провести усиление фундаментов здания.

В связи с распространением на площади, прилегающей к храму многолетнемерзлых грунтов с неравномерным залеганием кровли, рекомендуется предусмотреть мероприятия по их сохранению и не допустить расширение сформировавшейся чаши оттаивания, особенно с северной части здания.

Для геотехнического контроля в период реставрации и дальнейшей эксплуатации храма рекомендуется организовать мониторинг за динамикой деформаций на участках, где были трещины и за температурами многолетнемерзлых грунтов (скв. 4, 5, 6). В настоящее время комплекс активно реставрируют при поддержке компании «Норникель», представленной в регионе Быстринским ГОКом. На эти цели компанией выделено 350 миллионов рублей, а 12 августа 2025 г. появился первый новый купол.

***Литература***

1. Мосенкис Ю.М. Строительство на вечномерзлых грунтах Забайкалья. Ошибки проектирования, строительства и эксплуатации зданий. – Омск, 2024. – 256 с.

2. Оленченко В.В., Шеин А.Н., Константинов А.В. Геофизические исследования на территории Успенской церкви в селе Калинино (Забайкальский край) / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 17-21 апреля 2017): Сборник материалов в 4 т., Т. 3, СГУГиТ , Новосибирск, 2017. – С.227-232.

3. Сальников П.И. Устойчивость фундаментов зданий на мерзлых грунтах в южном Забайкалье. – Якутск: Институт мерзлотоведения СР РАН, 1996. – 208 с.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТИПА ТОРФА НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЗАТОРФОВАННЫХ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

***Д.В. Власенко, Р.Г. Мотенко***

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

**Введение.** Северные регионы России, богатые нефтегазовыми месторождениями, характеризуются сложными геокриологическими условиями и высоким риском загрязнения грунтов нефтью и её продуктами. Частые аварии на магистральных трубопроводах, с ежегодными утечками нефти, создают серьёзные экологические проблемы, особенно в районах с широко распространёнными торфяными грунтами. Более 80% торфяного фонда страны сосредоточено именно в таких зонах, где преобладают верховые и низинные торфы, а также переходные типы, отличающиеся по структуре и составу органического вещества [2].

В условиях криолитозоны нефтезагрязнение оказывает значительное влияние на теплофизические характеристики мерзлых грунтов, в частности на их теплопроводность. Изменения этих свойств приводят к нарушению температурного режима, что влияет на глубину сезонного промерзания и оттаивания грунта, активируя опасные геодинамические процессы и снижая устойчивость инженерных сооружений [1]. Особенно важным является понимание того, как различные типы торфа взаимодействуют с нефтью и как это отражается на теплопроводности заторфованных мерзлых грунтов.

Данное исследование направлено на изучение влияния типа торфа на теплопроводность нефтезагрязненных мерзлых глин, что позволит получить новые данные о процессах в криолитозоне под воздействием антропогенных факторов и повысить эффективность методов прогнозирования и управления геокриологическими рисками при освоении северных территорий.

**Объект исследования.** Объектом исследования являются: каолиновая глина легкая пылеватая, торф верховой слаборазложившийся ($D_{dp}$=20%) и низинный среднеразложившийся ($D_{dp}$=26%) и нефть. Гранулометрический состав и характеристики исследуемых грунтов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав и характеристики исследованных грунтов

| Грунт | Содержание частиц, % | | | | | | | | | | | Число пластичности | Гигроскопическая влажность, % | Плотность частиц грунта, г/см$^3$ | Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | свыше 10 мм | 10 - 5 мм | 5 - 2 мм | 2 - 1 мм | 1 - 0,5 мм | 0,5 - 0,25 мм | 0,25 - 0,10 мм | 0,10 - 0,05 мм | 0,05 - 0,01 мм | 0,01 - 0,002 мм | меньше 0,002 мм | | | | |
| Каолиновая глина | | | | | | | 0,4 | 1,1 | 32,0 | 38,2 | 28,3 | 18,8 | 1,2 | 2,62 | Глина легкая пылеватая |

**Методика приготовления образцов.** Исследования проводились на грунтах нарушенного сложения - грунтовых пастах с заданной степенью заполнения пор грунта (Sr=0,9), что соответствует полному заполнению пор по ГОСТ 25100-2020. В качестве основы применялась каолиновая глина в

воздушно-сухом состоянии. Для создания образцов с разным уровнем заторфованности к сухому грунту добавлялась навеска с одним из используемых типов торфа, количество которого рассчитывалось в зависимости от заданной степени заторфованности Ir= 0, 10 и 40% по отношению к массе сухого грунта. Компоненты тщательно растирались и перемешивались, после чего в смесь вводилось определённое количество дистиллированной воды для достижения заданной степени заполнения пор и равномерного распределения влаги. После увлажнения к грунтовой пасте добавлялась нефть для моделирования нефтяного загрязнения Zn= 0, 2,5 и 10%. Формообразующей емкостью служили пластиковые полые цилиндры объёмом 250 см³, в которые грунтовая паста укладывалась слоями и уплотнялась. Образцы герметизировались парафинизированной пленкой Parafilm M для предотвращения испарения влаги и нефти с поверхности. Полученные образцы выдерживались при комнатной температуре в течение суток и исследовались в положительном температурном диапазоне. Для исследований в отрицательном температурном диапазоне образцы подвергались промораживанию при –25 °С, что обеспечивало формирование массивной криогенной текстуры и исключало миграцию влаги и нефти. Перед началом экспериментов поверхность промороженных образцов очищалась от ледяной корки, образовавшейся на пластиковых формах.

**Методы экспериментальных исследований.** Экспериментальные исследования теплофизических свойств грунтов выполнялись с использованием зондового метода, основанного на нестационарном режиме, при котором измерения проводятся в условиях временного изменения температурного поля. Для этого применялся прибор KD2 Pro вместе с сенсорами KS-1, TR-1, RK-1 и SH-1. Измерительные сенсоры устанавливались в образцы с обеспечением рекомендуемого запаса грунта во всех направлениях для повышения точности и корректности результатов. В случае использования двухщупового зонда SH-1 особое внимание уделялось сохранению параллельного расположения щупов внутри образца. Мерзлые образцы подготавливали путем сверления отверстий на стационарном сверлильном станке PROXXON TBM 220. Для улучшения теплового контакта между сенсором и образцом применялась теплопроводящая смазка. После установки датчиков образцы выдерживались до достижения теплового равновесия, что обеспечивало достоверность измерений.

**Результаты экспериментальных исследований.** В ходе выполнения экспериментальной части данной работы было проведено около 850 измерений теплофизических свойств заторфованных и нефтезагрязнённых грунтов разного гранулометрического состава на более чем 40 образцах как в талом, так и в мёрзлом состоянии.

Для построения зависимостей изменения теплофизических характеристик грунта в зависимости от разных факторов производилось осреднение 10-12 экспериментальных значений, полученных зондовым методом с помощью всех используемых зондов.

На рис. 1, 2 представлены зависимости коэффициента теплопроводности заторофованных разными типами торфа каолиновых глин от нефтяного загрязнения Zn в талом и мёрзлом состоянии.

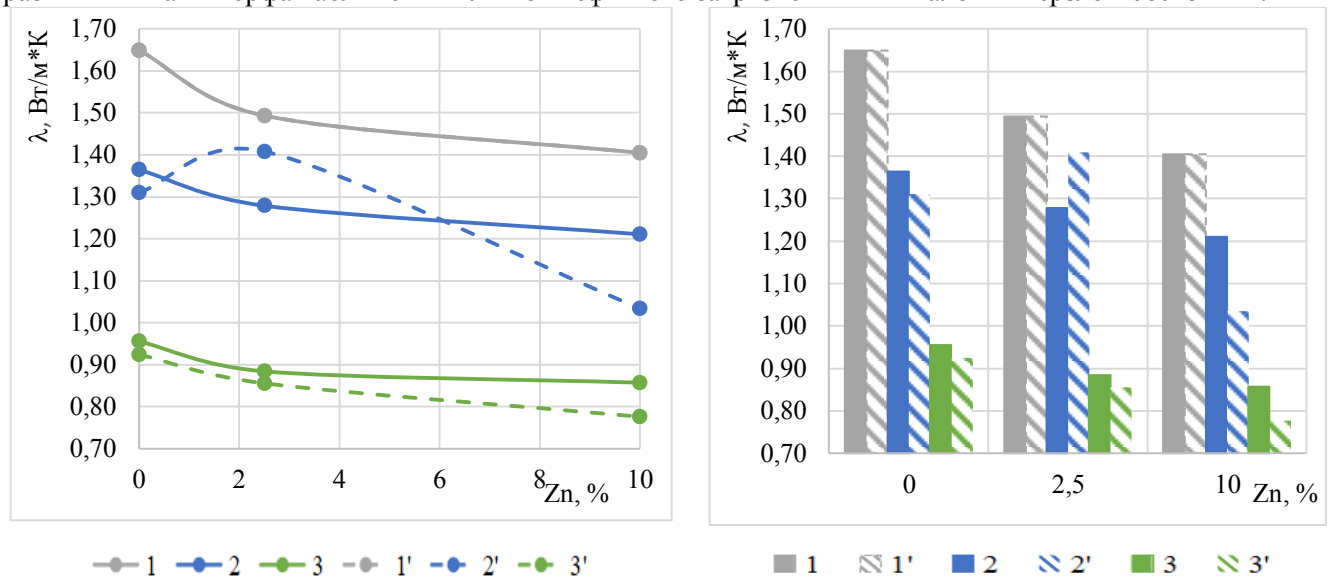



Рис. 1. Зависимости коэффициента теплопроводности заторфованной разными типами торфа (1, 2, 3 - низинный тип; 1', 2', 3' - верховой тип) каолиновой глины от нефтного загрязнения Zn в талом состоянии. Относительное содержание органического вещества: 1, 1' - 0%; 2, 2' - 10%; 3, 3' - 40%

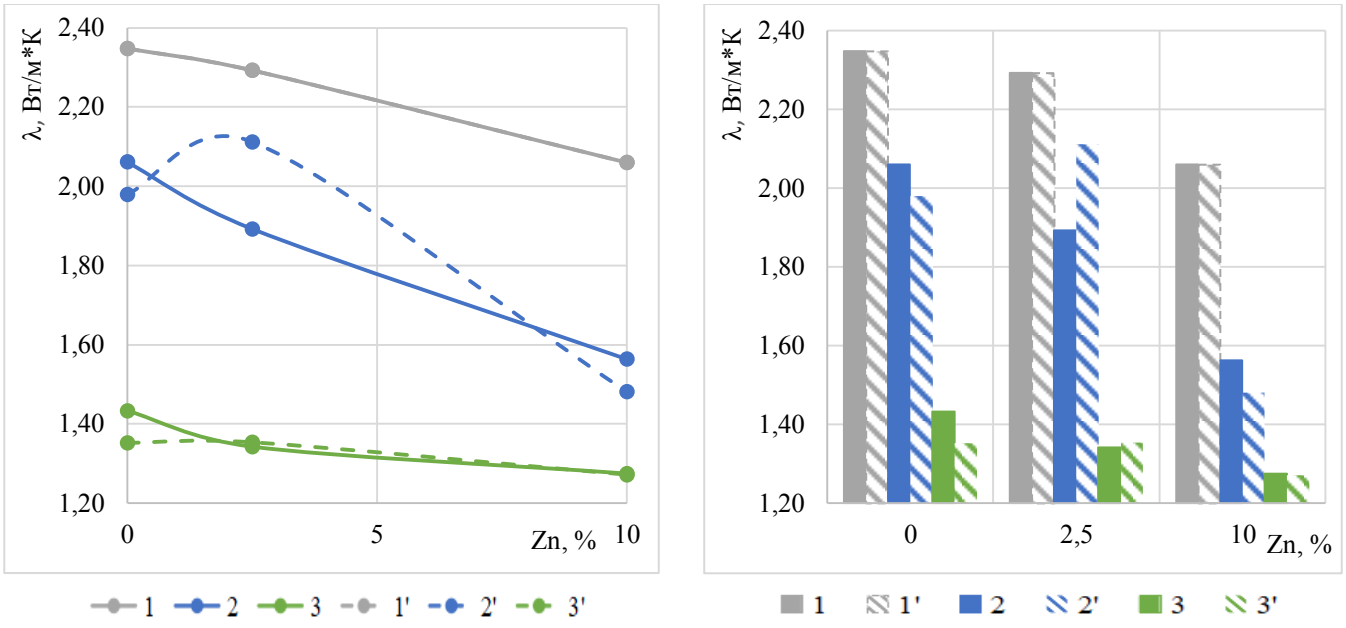



Рис. 2. Зависимости коэффициента теплопроводности заторфованной разными типами торфа (1, 2, 3 - низинный тип; 1', 2', 3' - верховой тип) каолиновой глины от нефтного загрязнения Zn в мерзлом состоянии. Относительное содержание органического вещества: 1, 1' - 0%; 2, 2' - 10%; 3, 3' - 40%

**Выводы.** Получены зависимости и установлены закономерности изменения коэффициента теплопроводности от содержания в грунте торфа и нефти. Выявлено, что: влияние типа торфа на теплопроводность сильнозаторфованных нефтезагрязненных глин наблюдается в снижении теплопроводности в мерзлом состоянии на 10% независимо от типа торфа. Основным фактором, определяющим величину теплопроводности, остается фазовый состав грунта: глины с низинным торфом характеризуются более высокой теплопроводностью по сравнению с глинами, содержащими верховой торф. Особенности структуры порового пространства разных типов торфа проявляются в талом состоянии: низинный торф обеспечивает более равномерное распределение нефти, способствуя лучшему тепловому контакту между частицами. В мерзлом состоянии, при высоких концентрациях нефти, влияние структуры торфа на теплопроводность снижается, поскольку доминирующим становится эффект самой нефти.

Влияние типа торфа на теплопроводность слабозаторфованных нефтезагрязненных глин аналогично сильнозаторфованным глинам, за исключением аномального пика теплопроводности при концентрации нефти 2.5% в грунтах с верховым торфом. При Zn=2.5% наблюдается резкий рост теплопроводности и превышение значений для грунта с верховым торфом над грунтом с низинным торфом, что является уникальным отклонением от общей тенденции. Предполагается, что при данной концентрации нефти в верховом торфе происходят структурные изменения, приводящие к оптимальному распределению нефти, которая формирует "мостики" теплопроводности между частицами. Альтернативные объяснения включают стабилизацию структуры верхового торфа нефтью, предотвращение слипания частиц и оптимальное распределение воды и нефти в порах грунта. Наиболее вероятно, что аномалия является результатом комбинации структурных, химических и поверхностных эффектов, специфичных для верхового торфа. Для выявления точных причин необходимы дополнительные исследования.

***Литература***

1 Мотенко Р.Г., Власенко Д.В., Калошина Ю.С., 2023. Определение теплофизических свойств мерзлых, промерзающих и оттаивающих нефтезагрязненных заторфованных грунтов с помощью различных методов. Инженерная геология, Том XVIII, №4.

2 Роман Л.Т., 1987. Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений. Наука, Новосибирск.

3 Чураков А.А., 2003. Запасы торфа в России. Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник, No 3, с. 22–25.

# ТОЧНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ТУНКИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ В МОДЕЛИ TERM

***В.К. Власов[1], Е.А. Дюкарев[1,2], Богомолов В.Ю.[1,3], Н.Н. Воропай[1,4]***

*[1] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск*

*[2] Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск*

*[3] Геолого-географический факультет Томского государственного университета, Томс*

*[4] Институт географии им. В.Б Сочавы СО РАН, г.Иркутск*

Современные изменения климата, выражающиеся в устойчивом повышении средней годовой температуры воздуха, оказывают прямое воздействие на многолетнемёрзлые грунты. Наиболее уязвимыми при этом оказываются южные периферийные области криолитозоны, в частности зоны прерывистого и островного распространения мерзлоты. Здесь даже незначительные климатические вариации (раннее снеготаяние, рост летних температур, уменьшение высоты снежного покрова) способны вызвать необратимое протаивание мерзлотных линз и бугров пучения, активизацию термокарстовых процессов, заболачивание и трансформацию растительного покрова.

В Тункинской котловине (республика Бурятия) с 2012 г. проводятся инструментальные исследования температурного режима почвогрунтов. В настоящей работе использованы данные измерений температуры почвогрунтов с 1 июня 2017 г. по 31 мая 2018 г. в скважине на заторфованном лугу (51°45'9" с.ш. и 102°26'40" в.д. площадка АИПТ_34). Температурные датчики расположены на глубинах от 2 до 500 см, шаг измерений – 1 час (Kiselev et al., IOP). Растительность представлена короткоостисто ячменно-осоковым торфянистым лугом, граничащим с ерниковыми злаково-разнотравными зарослями. На глубине около 1 м находится верхняя граница мерзлоты. Почва верхнего слоя торфяная эутрофная глеевая пирогенная с эоловым материалом на поверхности. Ниже 130 см - мелкопесчано-среднепесчаная супесь. Для описания температурного и влажностного режима почвогрунтов использована модель TerM (Stepanento et al., 2024) - современная и активно развивающаяся модель деятельного слоя суши, предназначенная для детального воспроизведения тепловых, гидрологических и биогеохимических процессов. Модель позволяет рассчитывать потоки тепла, влаги, радиации и парниковых газов между поверхностью суши и атмосферой с использованием многослойных моделей почвы, снежного покрова, растительности и озер. Модель использовалась в автономном режиме для проведения одноколоночных расчетов, используя данные метеорологических наблюдений или реанализа в качестве внешнего воздействия. Результаты расчетов сравнивались с данными наблюдений температуры почвы за период 1 год, которому предшествовал 10-летний период раскрутки модели. Были найдены статистические характеристики: средние отклонения, среднеквадратические отклонения, коэффициенты корреляции и детерминации.

Температурный режим почвогрунтов по данным наблюдений характеризуется четко выраженной сезонной и суточной изменчивостью в верхних слоях и затуханием колебаний с глубиной. В летний период на поверхности почвы температура варьирует в широком диапазоне от +5 до +31°C. С глубиной амплитуда суточного хода быстро уменьшается: на глубине 10 см летние колебания уже составляют от +7 до +24°C. Зимняя картина принципиально иная: благодаря сглаживающему воздействию снежного покрова суточные колебания во всех слоях отсутствуют. Минимальные зимние температуры на поверхности достигают -16,8°C, на глубине 10 см – -14,5°C, а на 20 см – -11,8°C. Начиная с глубины 30 см суточные колебания не фиксируются в течение всего года, и остается лишь годовой ход температуры в диапазоне от +16,2 до -10,6°C. Далее с глубиной амплитуда годового хода продолжает закономерно уменьшаться. На глубине 50 см годовой максимум составляет +9,5°C, минимум -8,1°C, причем наблюдается очень длительный период промерзания и оттаивания почвы, что указывает на значительную тепловую инерцию и затраты скрытой теплоты фазовых переходов. Ниже одного метра температура становится устойчиво отрицательной, что свидетельствует о наличии многолетнемерзлых грунтов. Однако эти отрицательные температуры очень близки к нулю – типичная черта южной границы распространения мерзлоты (островной криолитозоны). На глубине 120 см температура почти в течение всего года составляет около -0,4°C, лишь кратковременно понижаясь до -2,5°C. Это означает, что мерзлота здесь находится в термически неустойчивом состоянии – любое незначительное потепление или увеличение снежного покрова может привести к ее протаиванию. На глубине 240 см колебания температуры лежат в узком диапазоне от -0,4 до -1,0°C, на 4 м – от -0,4 до -0,8°C, а на 5 м – всего от -0,2 до -0,5°C. Такое крайне слабое отрицательное температурное поле при практически изотермическом профиле на больших

глубинах говорит о том, что геотермальный поток или восходящие грунтовые воды могут создавать локальный талик глубже 5-6 метров.

На поверхности почвы температура почвы по модели и наблюдениям меняются синхронно. По результатам моделирования средняя температура поверхности совпадает измеренной, однако разовые выбросы отклонений достигают 14°C. На глубине 5 см, максимальные отклонения модели от наблюдений уменьшаются до 6°C, а на глубинах 20-40 см – до 4°C. В многолетнемерзлых слоях (глубже 80 см) отклонения модели не превышают 1.2°C.

За весь исследуемый период модель демонстрирует хорошую точность воспроизведения температур почвы, обеспечивая корреляцию R>0.9 на большинстве горизонтов до глубины 160 см. Особо стоит отметить минимизацию средней ошибки (CO) на горизонтах 5, 50, 120 и 240 см. Основная погрешность сохраняется в слое 80 см (при начальных условиях – это была граница мерзлоты), а вариабельность температур на глубине 500 см описывается моделью лишь частично (рис. 1, табл.1).

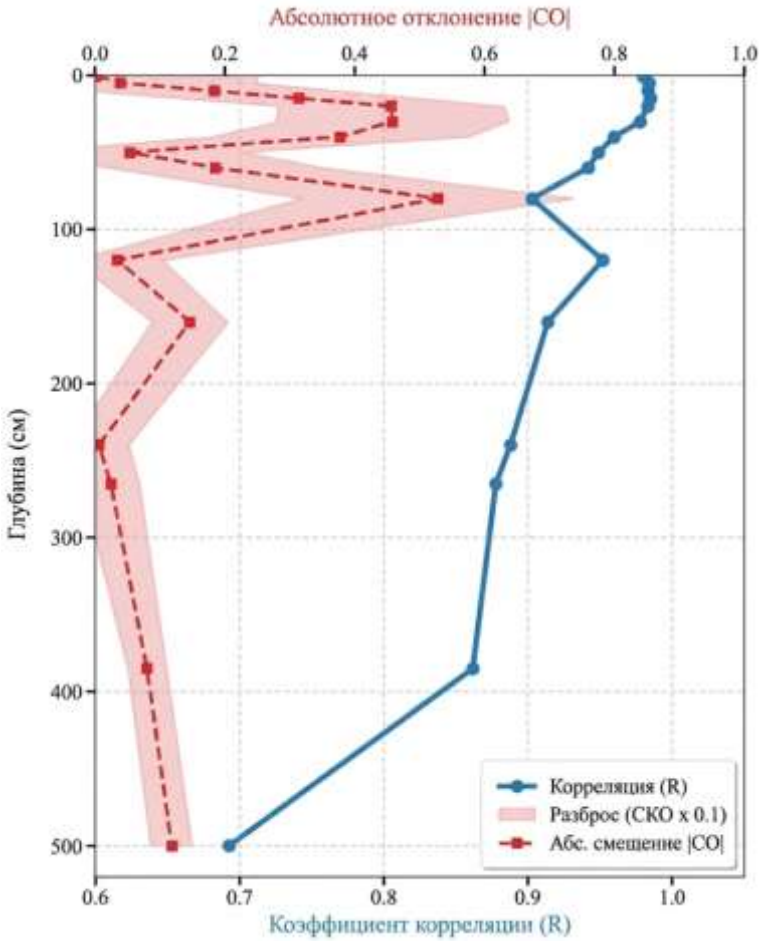



Рис. 1. Статистические характеристики сравнений температуры по модельным данным с температурой по данным наблюдений за год

Анализ помесячных данных выявил избыточную термическую чувствительность верхнего 80-см слоя, то есть температура в модели реагирует на внешние атмосферные воздействия (потепление осенью и похолодание в ноябре) быстрее и с большей амплитудой, чем в реальности. Это проявляется в значительном перегреве почвы осенью (CO до +3.7°C на глубине 60 см) и резком переохлаждении в ноябре (CO до -2.6°C). Физическая причина перегрева осенью – заниженная в модели тепловая инерция верхних горизонтов. Тепловая инерция определяется теплоёмкостью и теплопроводностью грунта, которые сильно зависят от влажности. В реальном торфянистом лугу высокое содержание органики и воды обеспечивает большую удельную теплоёмкость и скрытую теплоту фазовых переходов: при остывании осенью выделяющаяся теплота замерзания замедляет снижение температуры. Перегрев осенью, вероятно, возникает из-за того, что модель завышает теплопроводность талого грунта (или занижает теплоёмкость), что приводит к более быстрому проникновению тепла с поверхности вглубь в сентябре-октябре, когда дневные температуры ещё

высоки. А переохлаждение в ноябре – следствие того, что после формирования снежного покрова модель недостаточно изолирует грунт от морозов: либо снег в модели задан с заниженной высотой или плотностью, либо его теплоизолирующие свойства ослаблены. В реальности даже тонкий снежный покров резко снижает выхолаживание.

Таблица 1

Средние ошибки между результатами расчетов TerM и данными наблюдений по месяцам

| Месяцы | Глубины, см | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 80 | 120 | 160 | 240 | 265 | 385 | 500 |
| Июнь | 1.7 | 0.4 | -0.6 | -1.9 | -2.2 | -2.0 | -0.1 | 0.7 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | -0.2 |
| Июль | 0.2 | -0.1 | -0.2 | -0.9 | -1.4 | -2.3 | -1.5 | -0.2 | 2.1 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | -0.1 |
| Август | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.3 | 0.4 | 0.1 | 0.0 | 0.5 | 2.8 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.0 |
| Сентябрь | 0.8 | 1.3 | 1.6 | 1.8 | 2.0 | 2.0 | 2.2 | 2.2 | 3.2 | 0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.0 |
| Октябрь | 0.9 | 1.5 | 1.8 | 2.3 | 2.8 | 3.3 | 3.6 | 3.7 | 3.5 | 0.9 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.1 |
| Ноябрь | -2.6 | -2.4 | -2.3 | -1.4 | -0.4 | 0.8 | 1.4 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.1 |
| Декабрь | -1.4 | -1.8 | -2.2 | -2.0 | -1.5 | -0.7 | -0.7 | -0.5 | 0.1 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.1 |
| Январь | 0.2 | -0.2 | -0.6 | -0.7 | -0.7 | -0.3 | -0.9 | -1.8 | -2.8 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.2 |
| Февраль | 0.0 | -0.5 | -0.7 | -0.8 | -0.8 | -0.4 | -0.6 | -0.8 | -1.4 | -0.9 | -0.6 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.1 |
| Март | -1.1 | -1.4 | -1.4 | -1.5 | -1.7 | -1.8 | -1.8 | -1.8 | -1.9 | -1.1 | -1.2 | -0.9 | -0.8 | -0.2 | -0.3 |
| Апрель | 0.1 | -0.1 | -0.2 | -0.3 | -0.6 | -0.6 | -0.7 | -0.9 | -1.0 | -1.2 | -1.1 | -0.8 | -0.8 | -0.5 | -0.7 |
| Май | 1.6 | 0.9 | 0.6 | -0.3 | -1.4 | -2.5 | -1.3 | -0.3 | -0.1 | -0.5 | -0.6 | -0.5 | -0.6 | -0.4 | -0.7 |
| Год | 0.0 | -0.2 | -0.3 | -0.5 | -0.5 | -0.4 | -0.1 | 0.2 | 0.5 | 0.0 | -0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | -0.1 |

На границе сред (80 см) фиксируется рассинхронизация фаз (низкая корреляция, вплоть до отрицательных значений в отдельные месяцы), что требует уточнения параметров влагопереноса (табл. 2). Глубина 80 см соответствует положению границы многолетнемёрзлых пород в начальный момент времени. Скорость движения фронта промерзания/оттаивания определяется не только температуропроводностью, но и потоком влаги – при промерзании вода мигрирует к фронту холода, увеличивая количество льда и выделяя дополнительную теплоту. Вероятно, в модели интенсивность влагопереноса занижена или не учитывается гистерезис (разница между кривыми увлажнения при оттаивании и промерзании), и фронт промерзания движется либо быстрее, либо медленнее реального, что приводит к сдвигу фазы температурных колебаний.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между результатами расчетов TerM и данными наблюдений по месяцам

| Месяцы | Глубины, см | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 80 | 120 | 160 | 240 | 265 | 385 | 500 |
| Июнь | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 1.0 | 0.9 | 1.0 | 0.9 | 0.6 | 0.4 | -0.1 | -0.1 | -0.3 | -0.2 | -0.1 |
| Июль | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.5 | 0.9 | 1.0 | 0.9 | 0.2 | 0.0 | -0.2 | -0.1 | -0.1 | -0.4 |
| Август | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | -0.1 | -0.3 | 1.0 | 0.4 | 0.1 | 0.0 | -0.1 | -0.1 | -0.2 |
| Сентябрь | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | -0.9 | 0.5 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.3 |
| Октябрь | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 0.9 | -0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | -0.1 |
| Ноябрь | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.5 | -0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 |
| Декабрь | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.5 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | -0.1 | 0.1 | 0.0 |
| Январь | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Февраль | 0.6 | 0.7 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | -0.1 | 0.6 | 0.9 | 0.9 | 0.3 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.1 |
| Март | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.3 | 1.0 | 0.9 | 0.9 | 0.6 | 0.1 |
| Апрель | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.1 | -0.3 | 1.0 | 0.9 |
| Май | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | -0.2 | -0.3 |
| Год | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 0.96 | 0.95 | 0.94 | 0.90 | 0.95 | 0.91 | 0.89 | 0.88 | 0.86 | 0.69 |

В результате в одни месяцы модель «опережает» наблюдения (температура выше или ниже), в другие – отстаёт, и корреляция падает вплоть до отрицательной (противофаза). На глубинах до 5 м отклонения температур незначительны, однако устойчивая корреляционная связь заметна только весной. Это объясняется тем, что глубокие горизонты находятся в зоне многолетней мерзлоты с почти постоянной отрицательной температурой, и сезонная волна здесь слабо выражена. Весной же, после длительного зимнего периода, небольшие изменения температуры на этих глубинах могут случайно совпасть по фазе с моделью, но в целом модель не способна воспроизвести внутригодовую изменчивость на глубине 500 см (годовая корреляция 0.69).

Таким образом, по данным наблюдений исследуемый участок представляет собой типичную для Тункинской котловины зону редкоостровной мерзлоты с температурой грунтов, близкой к 0°C, где даже незначительные изменения климатических факторов способны вызвать деградацию мерзлоты и активизацию термокарстовых процессов. Результаты расчетов модели TerM показывают качественное согласие с наблюдаемыми закономерностями годового хода температуры и влажности почвы. Дальнейшее развитие работы предполагает детальную верификацию модели и уточнение теплофизических свойств почвогрунтов для корректного воспроизведения динамики фазовых переходов в деятельном слое, снижения избыточной термической чувствительности верхней толщи, устранения рассинхронизации фронта промерзания/оттаивания на границе многолетнемёрзлых пород, а также для улучшения качества моделирования глубоких горизонтов.

***Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-27-00395, https://rscf.ru/project/25-27-00395/.***

***Литература***

1 Володин Е.М., Лыкосов В.Н. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность — почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 2. Численные эксперименты по воспроизведению климата // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1998. 34, № 5. 622–633.

2 Лыкосов В.Н., Палагин Э.Г. Динамика взаимосвязного переноса тепла и влаги в системе атмосфера–почва // Метеорология и гидрология. 1978. № 8. 48–56.

3 Kiselev M V, Voropay N N, Dyukarev E A, Kurakov S A, Kurakova P S, Makeev E A Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 190 (2018) 012031 doi:10.1088/1755-1315/190/1/012031 http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/190/1/012031/pdf

4 Stepanenko V. M., Medvedev A. I., Bogomolov V. Yu., Shangareeva S. K., Ryazanova A. A., Faykin G. M., Ryzhova I. M., Suiazova V. I., Debolskiy A. V., Chernenkov A. Yu. Land surface scheme TerM: the model formulation, code architecture and applicationsстатья // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. VSP-2024. V. 39. № 6. 363-377. DOI: 10.1515/rnam-2024-0031

## МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОЧВОГРУНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ

***Н.Н. Воропай[1,2], Д.В. Кобылкин[1], А.А. Черкашина[1]***

*[1] Институт географии им. В.Б Сочавы СО РАН, г.Иркутск*

*[2] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск*

В условиях современных климатических изменений исследования температурного режима сезонноотаивающих и сезоннопромерзающих почв становятся более актуальны, чем в предыдущие десятилетия. Особый интерес вызывают территории находящиеся на границе распространения многолетней мерзлоты. К таким территориям относятся некоторые районы Иркутской области и Республики Бурятия. К сожалению, непрерывный мониторинг температуры почв в этих районах проводится менее 20 лет лишь научными группами некоторых институтов РАН (ИГ СО РАН, ИЗК СО РАН, БИП СО РАН). На сети метеостанций Росгидромета имеются более длинные ряды наблюдений, но здесь почвы являются сезоннопромерзающими, что не позволяет судить о скоростях деградации мерзлоты. В 2011-2013 гг. в рамках комплексных географических исследований Института географии им.В.Б.Сочавы СО РАН были установлены 25 Атмосферно-почвенных измерительных комплексов (АПИК), фиксирующих профиль температуры почвы в основных ландшафтах Тункинской котловины (Республика Бурятия, юго-западное Прибайкалье), включающих

районы островного распространения многолетней мерзлоты [1]. Используемый для мониторинга атмосферно-почвенный измерительный комплекс (АПИК) разработан и изготавливается в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. АПИК, предназначен для мобильных и стационарных долговременных автоматических измерений параметров атмосферы, почвы и водоемов [2]. Распространение многолетнемерзлых пород, в основном приурочено к заболоченной низинной территории котловин, сезоннопромерзающие грунты встречаются на более высоких формах рельефа (песчаные массивы, разноуровневые террасы, склоны горного обрамления. Площадки исследования характеризуются весьма разнообразной мозаикой таежных, степных, лугово-степных ландшафтов. В зависимости от структуры ландшафтных фаций температурный режим имеет свои особенности. Так, на фоновых площадках, находящихся в пределах Койморского озерно-болотного комплекса летнее протаивание захватывает 80-130 см от поверхности. При этом средняя годовая температура, отрицательная. На глубине 1-5 м она составляет -0.4 ... -1.2 °С. На антропогенно нарушенных участках верхняя граница мерзлоты опустилась ниже 3 м.

В многолетнем режиме температур почв на площадках, характеризующихся разной степенью нарушенности, тенденции изменения статистически не значимы. При этом, в слое сезонного оттаивания они отрицательные, а в многолетнемерзлом слое – положительные.

Особого внимания заслуживает мониторинг температуры почв, организованный на естественных и антропогенно нарушенных участках, на которые в разное время оказывалось антропогенное воздействие: нарушение естественного почвенного покрова, сведения лесных массивов, частичное или полное уничтожение лесных массивов пожарами, создание осушительных каналов.

С целью оценки влияния данных нарушений на внутригодовую динамику температуры, режим промерзания и протаивания почв в центральной части Тункинской котловины (Юго-западное Прибайкалье) было заложено две пары площадок. В каждой из них есть контрольная площадка с почвой и растительностью в условно ненарушенном (или восстановившемся до природного) состоянии, а также площадка, на которой почвы и растительность подверглись существенным преобразованиям (пожар, рубка и распашка, прокладка осушительных каналов).

Первая пара площадок расположена на песчаных останцах древних террас в пределах зоны новейшего погружения. Повышенный уровень грунтовых вод и наличие островной многолетней мерзлоты создают благоприятные условия для формирования криоземов глееватых грубогумусовых под еловыми мертвопокровными лесами. В этих условиях заложена контрольная площадка А 38. В качестве антропогенно-нарушенной приняли территорию, находящуюся в настоящий момент под 20-летней залежью под сообществом пырея ползучего (А 37). Судя по топографическим картам в начале XX в. эта территория была занята сосново-еловыми и еловыми лесами, которые 50-х годах были вырублены, а почвы распаханы. В настоящее время почвы здесь представлены агроземами светлыми окислено-глеевыми реградированными.

Вторая пара площадок расположена в пределах заболоченной части котловины. Контрольная площадка (А 34) представлена торфяной эвтрофной почвой под короткоостисто ячменно-осоковым торфянистым лугом. На второй площадке (А 36) почва представлена торфяно-глееземом под осоковым переходным болотом. В 50 м от площадки располагается водоотводной канал, который приводит к осушению прилегающих территорий и увеличению обводненности исследуемого участка. Глубина летнего протаивания на обеих площадках не превышает 1-1,2 м.

На всех модельных площадках заложены почвенные разрезы и буровые скважины на различных подстилающих породах для оценки влияния физико-химических свойств почв и грунтов на особенности гидротермического режима. Отобрано более 200 почвенных проб. До глубины 1,5 м отбор проб производился из почвенных разрезов, а с глубины 1,5-10 м – при помощи буровой установки. В пробах проанализированы влажность, гранулометрический состав, объемный вес (плотность), содержание органического вещества и др.

В течение года колебания средних суточных температур воздуха на площадках синхронны. Но за счет различий в растительном покрове микроклиматические разности суточных температур воздуха достигают 4-5°С. На поверхности почвы различия между средними суточными температурами чуть выше (7-9°С). Распространение тепла в почве на площадках также различно. Поглощение теплового излучения почвой зависит от ряда факторов. К факторам, определяющим температурный режим почв, относятся: цвет поверхностных горизонтов, влажность и аэрация, которая зависит от гранулометрического состава и структуры почвы, экспозиция, тип растительного покрова или его отсутствие. Почва на антропогенно нарушенных минеральных участках лучше прогревается и быстрее остывает, чем на естественных участках. Глубина проникновения изотермы +10°С в среднем

больше на 50 см на антропогенно нарушенных участках. Однако высокая густая трава иногда оказывает сильный теплоизолирующий эффект и может воздействовать аналогично лесному массиву. В холодный период отсутствует четкая взаимосвязь между глубиной промерзания и лесным покровом. Наибольшие отрицательные температуры наблюдаются в основном на антропогенно нарушенных участках.

Результаты мониторинга могут быть полезны при планировании природоохранных мероприятий, анализе, моделировании и прогнозе экстремальных природных процессов и природно-климатических изменений в регионе; оценке региональных проявлений глобальных климатических изменений в мерзлотных ландшафтах и формировании способов адаптации к последствиям этих изменений.

***Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-27-00395, https://rscf.ru/project/25-27-00395/.***

***Литература***

1 Мельников Е. С., Кондратьева К. А., 1998. Циркумарктическая карта многолетнемерзлых пород и грунтовых льдов (масштаб 1:10 000 000), Криосфера Земли, т. II, № 4, с. 58—61.

2 Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kurakov S.A., Kurakova P.S., Makeev E.A. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 190 (2018) 012031 doi:10.1088/1755-1315/190/1/012031.

## О СУБМАРИННОЙ МЕРЗЛОТЕ СЕВЕРО-ЗАПАДА ШЕЛЬФА ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

***А.В. Гаврилов[1], В.В. Малахова[2], Е.И. Пижанкова[1]***
*[1] МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, г. Москва*
*[2] ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск*

**Введение.** Актуальность изучения геокриологии арктического шельфа обусловлена необходимостью оценки деградации субмаринной мерзлоты при прогнозных сценариях изменений глобального климата, модернизации инфраструктуры Северного морского пути и использования ресурсов углеводородного сырья. Стимулируют изучение шельфовой мерзлоты в настоящее время два события. Первое: скважинную термометрию включили в состав исследований в соответствии с проектом стратиграфического бурения ПАО НК “Роснефть”, направленного на ликвидацию белых пятен в геологическом строении нефтегазоносной части российского арктического шельфа. Второе: интерпретация профилей сейсморазведки МОГТ (метод общей глубинной точки) привело к поступлению данных об отсутствии мерзлоты на шельфе морей Восточно-Сибирского и северо-востока Карского [1; 2], которая до сих пор пользуется сплошным или почти сплошным распространением как по модельным [3; 4], так и другим геофизическим методам [5; 6]. Настоящая работа посвящена изучению распространения мерзлых и охлажденных пород в районе, где прежде картируемые мерзлые породы по-преимуществу протаяли в результате приуроченности к нему неоген-современной активизации магматизма [7; 8].

**Район исследований**. Континентальная окраина шельфа Восточно-Сибирского моря в тектоническом отношении включает в себя Новосибирскую систему грабенов и горстов и поднятие Де Лонга. Новосибирская система грабенов и горстов сформирована на основании поздних мезозоид Верхояно-Колымской складчатой области. Поднятие Де-Лонга не было охвачено мезозойской складчатостью, имеет фундамент докембрийского и каледонского возраста, осложнено грабенами и горстами. Мощность осадочного чехла в его сводовой части не превышает 1–2 км и только в грабенах увеличивается до 4–5 км. В строении чехла основополагающую роль играют покровы разновозрастных базальтов. Неоднократные проявления магматизма (вулканизма) зафиксированы на северо-востоке Азии, включая острова Де-Лонга, начиная с конца неопротерозоя. В настоящее время выясняется, что поднятие Де Лонга является районом неоген-четвертичной активизации магматической провинции HALIP (High Arctic Large Igneous Province) [7; 8].

Острова Де Лонга расположены в высоких широтах: от 75,7°с.ш. (о. Вилькицкого) до 77,1°с.ш. (о. Генриетты). Их площади составляют от 150 км$^2$ (о. Беннетта) до 0,6 км$^2$ (о. Вилькицкого). Поднятие Де Лонга расположено в интервале глубин моря от 20-30 до 50 м. Мелководья занимают незначительную площадь. Климат морской, арктический, с суровой и малоснежной зимой, которая длится более 9 месяцев. Средняя температура воздуха по ГМС «остров Жохова» по результатам

наблюдений 1955-1995 гг. в январе составляет -28,8, в июле +0,7, среднегодовая -15,4°С [9]. Лето короткое (июль–август), с туманами и моросящими дождями. В течение года преобладают ветры восточных и северных направлений, достигающие 40 м/с. Среднегодовое количество атмосферных осадков (1976-1991 гг.) составляет 122,5 мм [9]. Акватория покрыта дрейфующими льдами в среднем с конца сентября по конец июля. На островах Беннетта, Генриетты и Жаннетты развиты ледники общей площадью 60 км$^2$.

С современной активизацией магматизма связаны высокие значения теплового потока из недр, замеренные в регионе: максимальные - 110, 123 мВт/м$^2$; средние по шести и пяти пунктам в каждом из двух кластеров измерений - 87 и 92 мВт/м$^2$ соответственно [10]. Вместе с этим кластер из восьми измерений со средним значением теплопотока 30 мВт/м$^2$ в 400 км на восток-северо-восток от о. Беннетта, показывает, что влияние активизации магматизма, скорее всего, затухает в 400-500 км от центра поднятия Де Лонга.

**Геокриологическая изученность**. В геокриологическом отношении район почти не изучен. К югу от плато Де Лонга в 1970-е гг. в ходе геологической съемки масштаба 1:200 000 в проливах островов Анжу и Ляховских пройдено со льда 36 скважин глубиной до 190-215 м с производством термометрии [11]. В 2022 г. в рамках проекта стратиграфического бурения ПАО НК “Роснефть” было выполнено бурение скважины, сопровождаемое также термометрией до глубины 268 м. В отличие от термометрии 1970-х гг. в скв. DL-1 температура начала замерзания порового раствора и водно-физические свойства пород не определялись, естественный температурный режим не восстановлен. Необходимость выстаивания скважин для восстановления температурного режима мерзлых пород показывают данные [11]: температура пород в 100-150 метровых скважинах восстанавливается по окончании бурения не менее чем за 15-20 суток, а в более глубоких скважинах период восстановления еще продолжительнее.

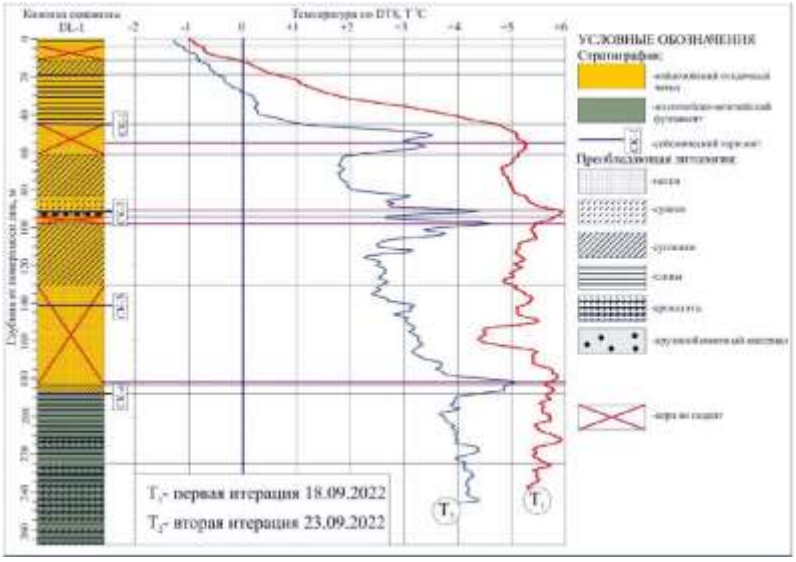



Рис. 1. Результаты DTS-термометрии в скважине DL-1: сразу после бурения ($T_1$) и спустя 5 дней по его окончании ($T_2$) [12].

По результатам теплового численного моделирования для поднятия Де Лонга получены разные результаты: сплошное распространение многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью 300-400 м [4], возможность отсутствия ММП [13]; отсутствие мерзлоты [1].

**Методика исследований**. В основе исследований лежало численное моделирование формирования и эволюции ММП. Оно осуществлялось для последних 200 тыс. лет. Исходными данными для него явились: 1) высокая плотность теплового потока из недр Земли, связанная с магматической активизацией в районе поднятия Де Лонга; 2) палеогеографический (палеотемпературный) сценарий развития региона, построенный с помощью палеотемпературной кривой Восточно-Сибирской Арктики, которая получена путем преобразования палеотемпературной кривой ст. Восток (Восточная Антарктида) с помощью палеотемпературных данных Новосибирских островов и приморских низменностей севера Якутии, полученных в ходе изучения их четвертичной геологии; 3) данные по геологическому строению поднятия Де Лонга и его окружения.

Сценарий геологического развития региона создавался по аналогии с методикой построения сценариев для моделирования современной мощности ММП прогибов плато Де Лонга [13] или о. Новая Сибирь [14]. На начальном этапе исследований создавалась модель колебаний уровня моря за последние 200 тыс. лет. Она использовалась как основа для построения палеотемпературного сценария [15] раздельно для плато и для прогибов поднятия Де Лонга.

Для расчета теплового состояния пород и формирования ММП использовалась одномерная модель теплофизических процессов в геологическом разрезе мощностью 1500 м с учетом фазовых переходов между слоями мерзлых и талых пород [16; 17]. Выбор глубины расчетной области определяется отсутствием формирования мерзлого слоя вблизи нижней границы на протяжении всего периода моделирования.

Физические и теплофизические свойства пород (теплоемкость, теплопроводность, пористость, температура замерзания), используемые при численном моделировании, зависят от глубины залегания и состава пород и задаются в соответствии с принятой геологической моделью.

**Результаты исследований**. Моделирование проводилось для прогибов и плато поднятия Де Лонга при глубинах моря 5, 20 и 40 м. В прогибах ключевую роль в противодействии промерзанию играет значительная мощность слаботеплопроводных влагоемких нелитифицированных мезокайнозойских пород в верхней части разреза. Неглубокое промерзание в холодные регрессивные этапы определяет, как показывает моделирование, быструю деградацию мерзлоты в ходе позднеплейстоцен-голоценовой трансгрессии. При теплопотоке 75 мВт/м$^2$ по результатам моделирования многолетнемерзлые породы (ММП) деградируют при глубинах моря 40 м – ко времени 5 тыс.л.н., на участках изобат 20 м – ко времени 3 т.л.н. на изобатах 5 м – могут деградировать ко времени 2 тыс.л.н. Таким образом, расчеты показывают, что на 76-78°с.ш. Восточно-Сибирского сектора Арктики на изобатах 20-40 м может отсутствовать мерзлота на значительных площадях [14].

В пределах плато – это основная поверхность поднятия де Лонга, – наоборот, высокая теплопроводность маловлажного скального разреза, обусловливая быстрое и глубокое его промерзание в криохроны, обеспечивает существенное запаздывание оттаивания в трансгрессивный этап (рис. 2). Для мелководий (глубины 5 м) задавался в виде вулканогенно-осадочной толщи пород, перекрываемой сверху толщей рыхлых отложений преимущественно алевритового состава мощностью 70 м. Моделирование (численный эксперимент) показывает, что кондуктивное протаивание возможно только при теплопотоке 120 мВт/м$^2$. Для глубин моря 20 и 40 м мощность рыхлых отложений того же состава задавалась, равной 185 м, в соответствии с мощностью разреза нелитифицированных мезокайнозойских отложений в скв. DL-1 [18] при теплопотоках 80, 85, 90 и 75, 80, 85 мВт/м$^2$ соответственно.

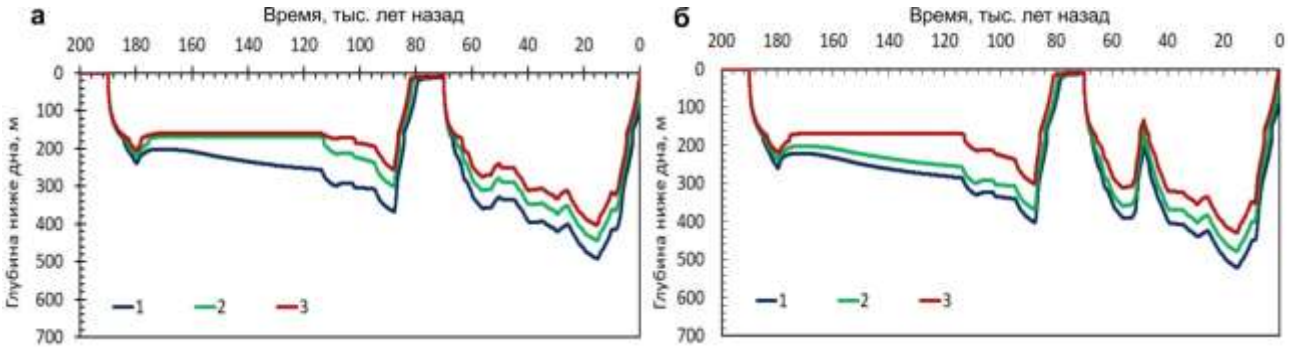



Рис. 2. Эволюция мощности мерзлоты на плато Де Лонга по результатам численного моделирования в последние 200 т.л.: **а** – для участков изобаты 20 м с тепловым потоком 80 (1), 85 (2) и 90 (3) мВт/м$^2$; **б** - для участков изобаты 40 м при тепловом потоке 75 (1), 80 (2) и 85 (3) мВт/м$^2$.

Изучение теплового воздействия на фациальную обстановку осуществлялось с помощью космических снимков. Авторами использовались многозональные космоснимки Landsat, включающие ближнюю инфракрасную зону. Они дали возможность зафиксировать местоположение истечений газов из пор и трещин вулканогенно-осадочных пород по системе дешифровочных признаков: во-первых, - по наветренным потокам («хвостам») над поверхностью (рис. 3, обозначение 1), во-вторых, - по образованию полыней в зимне-весеннее время. Полыньи вокруг островов Де

Лонга в марте – апреле (рис. 3, обозначение 2) до взлома льда, показывают, что конвективный теплоперенос флюидами имеет высокий энергетический уровень.

**Валидация результатов моделирования**. В этих целях использовались: 1) результаты термометрии DL-1; 2) сейсмические данные, приведенные в статье [1]; 3) данные космических снимков; 4) данные о развитии в акватории криогенных процессов, являющихся показателями мерзлого состояния пород. К числу последних относятся полигональный микрорельеф на пересыпях, отгораживающих лагуны у островов Жохова и Беннетта от моря, пингообразные структуры на морском дне в регионе.

Данные моделирования показывают, что полученная геокриологическая модель для плато в районе изобаты 40 м близка к мерзлотной обстановке района скважины DL-1, пройденной при глубине моря 47 м. Эта обстановка может характеризоваться только приближенно. Данные термометрии с учетом сейсмометрии и величин теплопотока показывают, что на изобатах 40 и тем более 20 м могут существовать не только охлажденные, но и мерзлые породы. Разуплотненный горизонт в интервале 130-185 м с напорными термальными водами похож на зону криогенной дезинтеграции пород, вмещавших подмерзлотные воды в течение длительного предшествующего периода в голоцене. Соответственно на плато может существовать, по меньшей мере, островное распространение ММП.

Анализ космоснимков показывает, что существование на участках зимне-весенних полыней в течение большей части года, обеспечивает формирование сквозных эндогенных таликов на плато Де Лонга, если донные отложения на мелководьях являются мерзлыми. Они действительно мерзлые, так как по снимкам с субметровым пространственным разрешением к лагунным берегам приурочены полигонально-жильные льды - показатели мерзлого состояния пород.

На глубинах моря около 20 м развиты пингообразные структуры. Согласно современным данным, они формировались в процессе затопления шельфа и формируются сегодня в результате деятельности придонных течений, склоновых процессов и динамики верхних горизонтов разреза. К таким глубинам, согласно данным по Печорскому и Карскому морям, приурочены молодые образования, которые являются показателями мерзлого состояния пород.

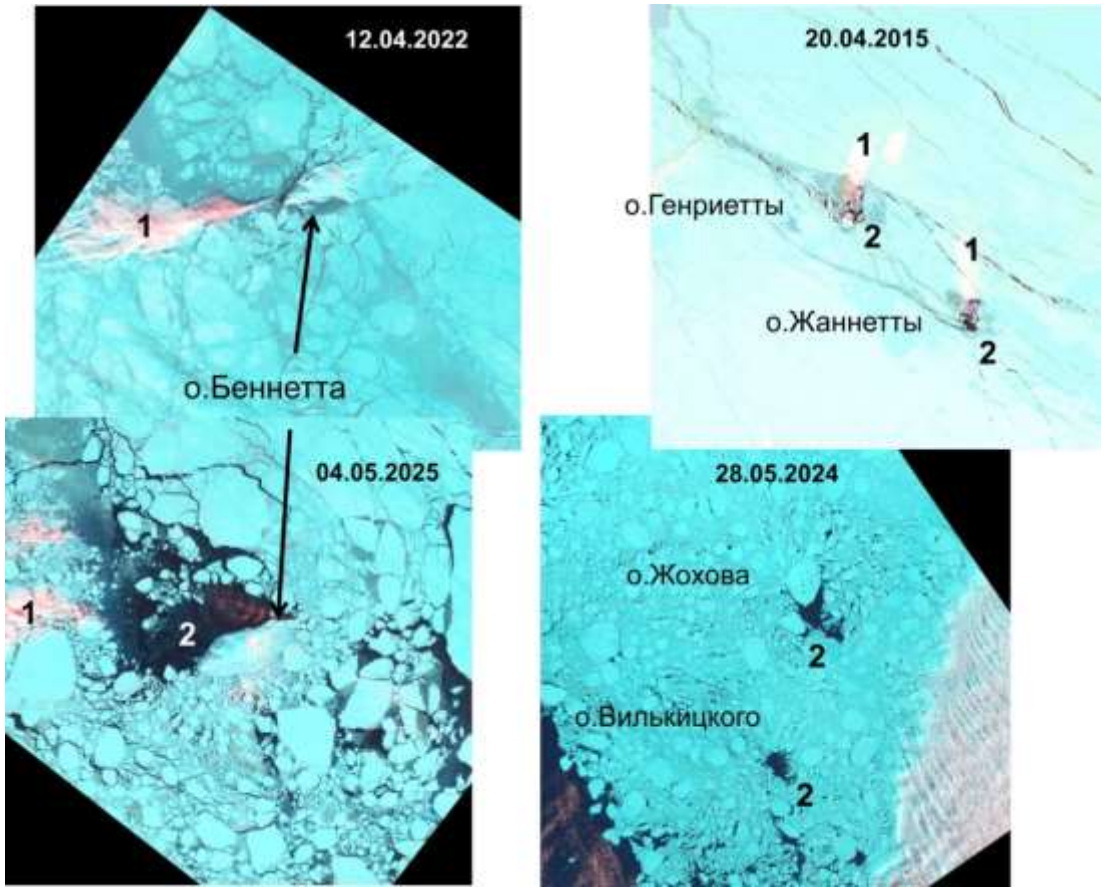



Рис. 3. Местоположение выхода из недр потоков газов (1) и образованных ими полыней (2) на космоснимках Landsat - 8, 9 (апрель-май 2015-2025) в районе островов Де Лонга [19]

Модельные данные и криогенные явления показывают, что наряду с охлажденными, разрез поднятия Де Лонга и прилегающих прогибов, слагают мерзлые породы. Последние приурочены в основном к мелководьям в пределах плато. Охлажденные породы свойственны преимущественно доминирующим глубинам моря - 30-50 м, в большей степени - прогибам, нежели плато. На глубинах 0-5 м развиты сквозные эндогенные талики, формирующиеся за счет истечений-извержений газов из пор и трещин вулканогенно-осадочных пород.

Необходимо отметить, что результаты моделирования и их валидация согласуются с данными сейсморазведки МОГТ [1].

**Выводы:** 1. Поднятию Де Лонга, несмотря на расположение в высоких широтах (76-78°с.ш.) и на небольших глубинах моря (0-50 м), как району неоген-четвертичной активизации магматической провинции HALIP, свойственны в основном охлажденные породы.

2. Мерзлые толщи приурочены к мелководьям в пределах плато, сложенного теплопроводными скальными породами. Показателями мерзлого состояния пород являются молодые пингообразные структуры на дне и полигонально-жильные льды на лагунных берегах островов Жохова и Беннетта.

3. Прогибам, сложенным малотеплопроводными влагоемкими мезокайнозойскими отложениями, свойственно в основном отсутствие мерзлоты.

4. В пределах мелководий у островов Беннетта, Жохова, Вилькицкого, Генриэтты и Жаннетты распространены сквозные талики, обусловленные истечением - извержением горячих газов из пор и трещин вулканогенно-осадочных пород.

**Благодарности:** анализ фактических данных, построение сценария палеогеографических событий выполнены в рамках госзадания МГУ (номер соглашения 5-7, номер ЦИТИС: АААА-А16-116033010108-8); численное моделирование эволюции мерзлых толщ выполнено в рамках госзадания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0003.

***Литература***

1 Богоявленский В.И., Кишанков В.И., Казанин А.Г. Новая информация о субаквальной мерзлоте в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском по данным сейсморазведки // ДАН. Науки о Земле, 2025, т. 521, № 2, с. 196-206.

2 Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г., Рокос С.И. Новая информация о субаквальной мерзлоте в Карском море по данным сейсморазведки методом преломленных волн // Арктика: экология и экономика. 2025. Т. 15, № 4. С. 480-494.

3 Gavrilov, A., Malakhova, V., Pizhankova, E., Popova A. Permafrost and Gas Hydrate Stability Zone of the Glacial Part of the East-Siberian Shelf // Geosciences. MDPI. 2020. V.10 (12).

4 Смирнов Ю.Ю., Матвеева Т.В., Щур Н.А. и др. Численное моделирование субаквальных многолетнемерзлых пород на евразийском шельфе Арктики с учетом зональности современного климата // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 5, с.

5 Кошурников А.В. Многолетнемерзлые толщи шельфа морей Российской Арктики (по данным геофизических исследований). Автореф. дисс. д.г.-м.н., М., 2023, 45 с.

6 Васильев А.А., Облогов Г.Е., Широков Р.С. Цифровая карта субаквальной мерзлоты Баренцева и Карского морей // Проблемы криосферы Земли: сборник тезисов Всероссийской научной конференции (Пущино, Россия, 12-16 мая, 2025 г. Пущино: ИФХиБПП РАН, 2025. с. 235-236.

7 Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л., Петрова В.В. и др. Современная активность эндогенных процессов у острова Беннетта (архипелаг Де Лонга, Арктика), М., ИФЗ РАН, 2012, 160 с.

8 Силантьев С.А. Неогеновая активизация большой магматической провинции HALIP: пример архипелага Де Лонга, Восточная Арктика // Материалы Школы морской геологии, 2025, т. 1, с. 216-221.

9 pogodaiklimat.ru. Погода и климат России. Якутия (остров Жохова). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.pogodaiklimat.ru/forecast/21357.htm (дата посещения 08.03.2026).

10 International Heat Flow Commission (IHFC). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ihfc-iugg.org (дата посещения 08.11.2025).

11 Соловьев, В.А., Гинсбург, Г.Д., Телепнев, Е.В., Михалюк, Ю.Н. Криогеотермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого океана. Л.: ПГО «Севморгеология». 1987.

12 Тулапин А.В., Длугач А.Г., Рокос С.И., Куликов С.Н., Хомбак В.В., Емашкин И.А. DTS-термометрия в морских скважинах: принцип и DTS-термометрия в морских скважинах: принцип и особенности калибровки данных // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Выпуск 10. 2023, с. 415-421

]

13 Гаврилов А.В., Малахова В.В., Пижанкова Е.И., Попова А.А. Криолитозона внешнего шельфа Восточно-Сибирского шельфа и ее связь с вулканогенными явлениями // XII Межд. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование» MARESEDU-2021. Труды конф., Т. IV. 23-27 10.2021. г. М., 2021, с. 21-24.

14 Гаврилов А.В., Малахова В.В., Пижанкова Е.И., Попова А.А. Выбор палеогеографического сценария для оценки мощности мерзлых толщ о. Новая Сибирь (Новосибирские острова) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. Т. 68, вып. 4, 2023.

15 Гаврилов А.В. Криолитозона арктического шельфа Восточной Сибири (современное состояние и история развития в среднем плейстоцене – голоцене). Автореф…. д.г.-м.н. М., 2008, 48 с.

16 Malakhova V.V. Estimation of the subsea permafrost thickness in the Arctic Shelf // Proceedings SPIE: 24nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2018, V.10833. P. 108337T.

17 Malakhova V.V., Eliseev A.V. Subsea permafrost and associated methane hydrate stability zone: how long can they survive in the future? // Theor. Appl. Climatol. 2024. V. 155. P. 3329–3346.

18 Петров О.В,, Никишин А.М., Петров Е.И. и др. Результаты стратиграфического бурения в Восточно-Сибирском море с целью геологического изучения зоны сочленения структур континентального шельфа и глубоководных акваторий Северного Ледовитого океана // Доклады РАН, Науки о Земле, т. 512, № 2, 2023.

19 USGS, science for a changing world, EarthExplorer [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://earthexplorer.usgs.gov (дата посещения 16.01.2026).

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРОЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

***В.Е. Гагарин [1], А.Н. Хименков[2] ,Д.М.Фролов [3], А.В.Кошурников [1], А.А. Дежникова[1]***

*[1] МГУ имени М.В.Ломоносова, геологический факультет*

*[2]Институт геоэкологии РАН, г. Москва,*

*[3]МГУ имени М.В.Ломоносова, географический факультет*

В криолитозоне, практически во всех генетических типах мерзлых пород, встречаются локальные зоны дислоцированных льдогрунтовых тел различных размеров и морфологии. Первичная слоистость и криогенное строение вмещающих отложений подвергается значительным деформациям. Некоторые из данных образований связаны с хорошо изученными криогенными образованиями, буграми пучения и повторно-жильными и пластовыми льдами. Другие представляют самостоятельные ледогрунтовые тела, залегающие в осадочных толщах.

Целью наших исследований был анализ условий движения локальных объёмов льда и ледогрунта в массивах многолетнемёрзлых пород и анализ механизмов его проявлений в естественных условиях. Объектом исследования являются локальные криогенные ледогрунтовые образования с признаками значительных пластических и разрывных деформаций, широко распространённые в криолитозоне (бугры пучения, повторно-жильные льды, воронки газового выброса, ледогрунтовые тела с признаками значительных пластических и разрывных деформаций). Предметом исследования являются деформации (разрывные, пластические, признаки течения льда и др.) ледогрунтовых образований, свидетельствующие об динамических процессах в локальных зонах многолетнемёрзлых пород.

Общим для всех рассматриваемых криогенных форм является то, что их формирование не вытекает из общеизвестных криогенных процессов, что не позволяет перенести процессы формирования какого-либо генетического типа льда, на механизмы динамических процессов в локальных дислоцированных зонах. При их формировании наблюдается объёмное воздействие, разрушающее сплошность мёрзлой толщи. В этом случае происходит движение локального объёма породы в твердом состоянии и формирование соответствующих деформаций.

Данная тема наиболее разработана в рамках инженерной геокриологии, где достаточно полно изучены деформации мёрзлых пород при техногенных воздействиях. Оценивая рассматриваемую проблему в целом можно констатировать, что в настоящее время общие подходы в построении моделей движения локальных объёмов грунта и льда в массиве мерзлых пород разработаны недостаточно. Деформации в массивах мерзлых пород являются не только наложенными структурами, изменяющими их первичное строение. В некоторых случаях они являются основным элементом, формирующим целостные локальные криогенные геосистемы

Помимо теоретического интереса, рассматриваемая тема имеет и практическое значение. Подземные горные работы в Арктике, извлечение нефти и газа, строительство шахт, карьеров оказывают значительное влияние на изменение напряженного состояния в массивах мёрзлых пород, в них получают развитие внутригрунтовые объёмные деформации, угрожающие инженерным сооружениям.

Динамические процессы затрагивают практически весь разрез мерзлых толщ, включая поверхностные горизонты. При формировании мёрзлых пород наиболее значимым является миграция связанной воды к фронту промерзания. В ходе данного перераспределения поровой влаги, на границе мёрзлого и талого грунтов формируются сегрегационные льды. Неравномерное промерзание грунтов приводит к криогенной концентрации, содержащейся в них свободной воды, и резкому повышению давления в водоносном горизонте. Это может приводить к гидроразрыву грунтового массива и образованию трещин заполненных водой. Их промерзание формирует инъекционные льды. Все эти процессы обусловлены тепломассообменом между литосферой и атмосферой. Формирующиеся при этом изменения ландшафтов трансформируют тепловые потоки, что отражается в интенсивности мерзлотных процессов.

В генетической классификации П. А. Шумского ледяные горные породы были разделены на три группы: 1. конжеляционные льды (конституционные льды, включающие лёд цемент, сегрегационный лёд, инъекционный лёд, жильный лёд); 2. осадочные льды; 3. метаморфические льды Автором было заявлено, что конжеляционные и осадочные льды после своего образования всегда в той или иной степени подвержены изменению (метаморфизму). При этом в группу метаморфических льдов рассмотренные им деформированные мёрзлые породы не вошли (туда вошли только ледниковые льды) [12].

Предложенная В. И. Соломатиным петрогенетическая классификация подземных ледяных пород практически повторяет классификацию П.А. Шумского. В ней все подземные льды разделены на три группы. Первая группа - конжеляционные льды, их строение определяется условиями внутригрунтовой кристаллизации свободной и связанной воды. Вторая группа, это седиментогенные (погребённые) льды, формирование которых происходит в субаэральных условиях с последующим перекрытием и консервацией осадочными породами. Третья группа метаморфизованные льды (жильный и режеляционно-сегрегационный льды, подвергшиеся воздействию динамометаморфизма). Это ледяные образования со следами пластических деформаций, течения льда, в формировании строения которых существенную роль играют процессы перекристаллизации под влиянием внешних воздействий. Автор справедливо отделяет ледогрунтовые образования со следами динамометаторфизма от инъекционных льдов (что делает большинство геокриологов). При этом, сам динамометаморфизм подземных льдов связывается только с повторно-жильными льдами, в которых основную роль играют преобразование структуры элементарных жилок под воздействием систематически возникающих напряжений [8].

Е.А Втюрина и Б.И. Втюрин в фундаментальной работе, посвящённой льдообразованию в горных породах, отмечали, что подземным льдам свойственны разнообразные процессы метаморфического льдообразования. В классификации процессов метаморфизма мёрзлых пород, динамометаморфизм выделен в отдельную группу, но в генетической классификации типов льдообразования в горных породах он отражения не нашёл [1].

Ш.Ш. Гасанов, изучая метаморфизм газовых включений повторно жильных льдов (ПЖЛ), пришёл к важному выводу, что подземные льды, находясь при отрицательных температурах, подвергаются существенной текстурно-структурной перестройке и деформациям. Особенно интенсивно эти процессы развиваются при повышении температуры мёрзлых пород в условиях воздействия нагрузки. В этих условиях формируется группа внутригрунтовых льдов со следами пластических деформаций и течения льда. Для них характерны полигонизация кристаллов, милонитизация, пластические деформации, течение льда, происходящих под влиянием внешних воздействий. Он предположил, что деформированные льдогрунты могут иметь широкое распространение в зоне вечной мерзлоты и это должно учитываться в ходе криолитологических исследований. Для этого необходимо разработать адекватную модель процессов деформирования мёрзлых грунтов, используя в решении подобных задач опыт и достижения гляциологии [3]. При этом каких-либо классификационных признаков для выделения группы деформированных льдов автором не было предложено.

Приходится констатировать: несмотря на то, что представления о динамических процессах в многолетнемёрзлых породах сформированы, они в практике мерзлотных исследований не реализуются. При описании ледогрунтовых образований (размеры десятки а иногда и сотни метров

по латерали и десятки метров по вертикали), деформирующих вмещающие грунты традиционно используются определения, базирующиеся на типах льдообразования (сегрегационный, инъекционный).

Примером, в котором можно увидеть влияние динамических процессов на структурный облик мерзлых пород, является булгуннях, находящийся в долине ручья Тэнкичээн на территории Яно-Индигирской низменности, вскрытый в результате эрозионной деятельности ручья (рис.1). Исследованием данного булгунняха занимался М.А. Великоцкий в 1969 году. На рисунке1.Б в увеличенном масштабе представлена часть разреза в зоне сдвига мерзлого грунта в ходе последнего цикла пучения, видимая часть которого составила около 40 см (рис.1.А). Вертикальная протяженности плоскости сдвига составила 1,2 м, ширина примерно 15 см. Справа от плоскости сдвига деформации прилегающего участка грунта подчеркнуты изгибом слоистости, а ниже плоскости сдвига разилась морозобойная трещина.

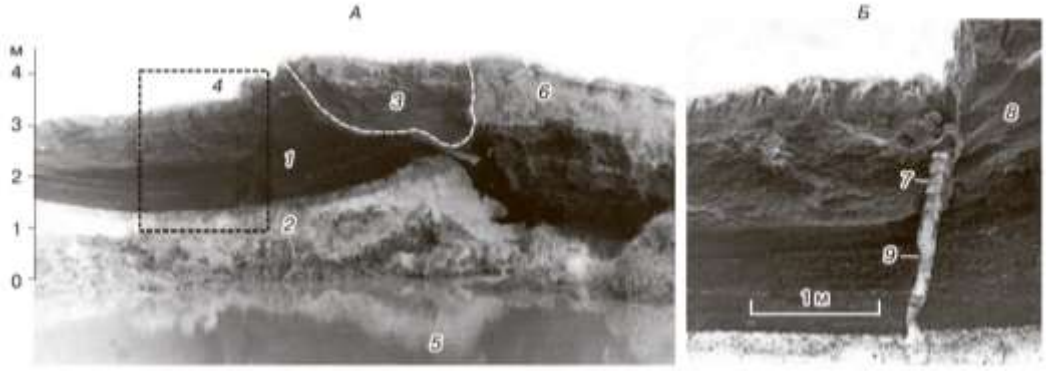



Рисунок1. Вскрытый булгуннях в долине ручья Тэнкичээн. А – общий вид; Б – увеличенный фрагмент. 1 – мерзлый алеврит; 2 – лед; 3 – термоцирк, образовавшийся вследствие оттаивания и сноса центральной части бугра; 4 – мерзлый уступ блока последнего цикла пучения; 5 – поверхность озерка из воды, примыкающего к подножию обнажения; 6 – покров из злаково-осоковой дернины, свисающий с бровки обнажения; 7 – плоскость сдвига блока последнего цикла, заполненная мерзлым дробленным алевритом и льдом; 8 – деформация слоев грунта; 9 – лед в морозобойной трещине (Фото М.А. Великоцкого, с дополнениями В.П. Марахтанова) (Марахтанов, 2020)

Рассматривая в каких условиях, происходит рост инъекционных и сегрегационных бугров пучения, необходимо сказать о раздвижении и уплотнении мерзлой породы при воздействии «ядра жесткости». Когда нагрузка достигает предельного значения и наибольшие касательные напряжения в окрестности плотного ядра превысят предельно длительное сопротивление мёрзлого грунта сдвигу, возникают деформации пластично-вязкого течения. На этой стадии уплотненное ядро начинает раздвигать окружающий менее плотный грунт и внедряться в него (Вялов, 1959).

В естественных условиях данные процессы распространены достаточно широко. В качестве уплотнённого ядра может выступать ранее сформировавшееся ледяное тело или блок грунтового массива. На рисунке 2 изображена антиклинальная складка, сформированная блоком льда и дислоцированной льдогрунтовой массой, внедрившейся в слоистые прибрежно-морские пески и алевриты. В центральной части складки залегает вытянутый монолитный ледяной блок (Данилов, 1983).

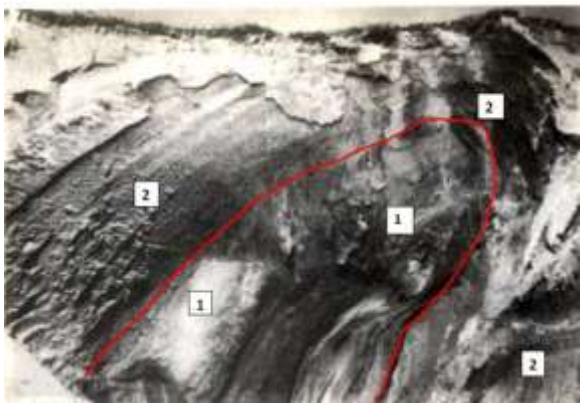


Рисунок 2. Внедрение монолитного блока чистого льда (1) и дислоцированной льдогрунтовой массы (1) в слоистые прибрежно-морские пески и алевриты (2), изогнутые в антиклинальную складку (п-ов Ямал) (Данилов, 1983)

Таким образом, рассматривая работы различных ученых, можно сделать вывод о том, что прийти к единому мнению относительно механизма формирования строения бугров пучения практически невозможно. Так как развитие бугров сопровождается многочисленными деформациями, которые в совокупности создают многообразные структурно-текстурные особенности разреза.

В рамках данной работы нами были проведены лабораторные испытания образцов на изгиб. Испытывались образцы чистого льда и каолинитовой глины.

Представим результаты испытания слоистого образца, представляющего собой чередование слоев каолинитовой глины и льда (рисунок 3).

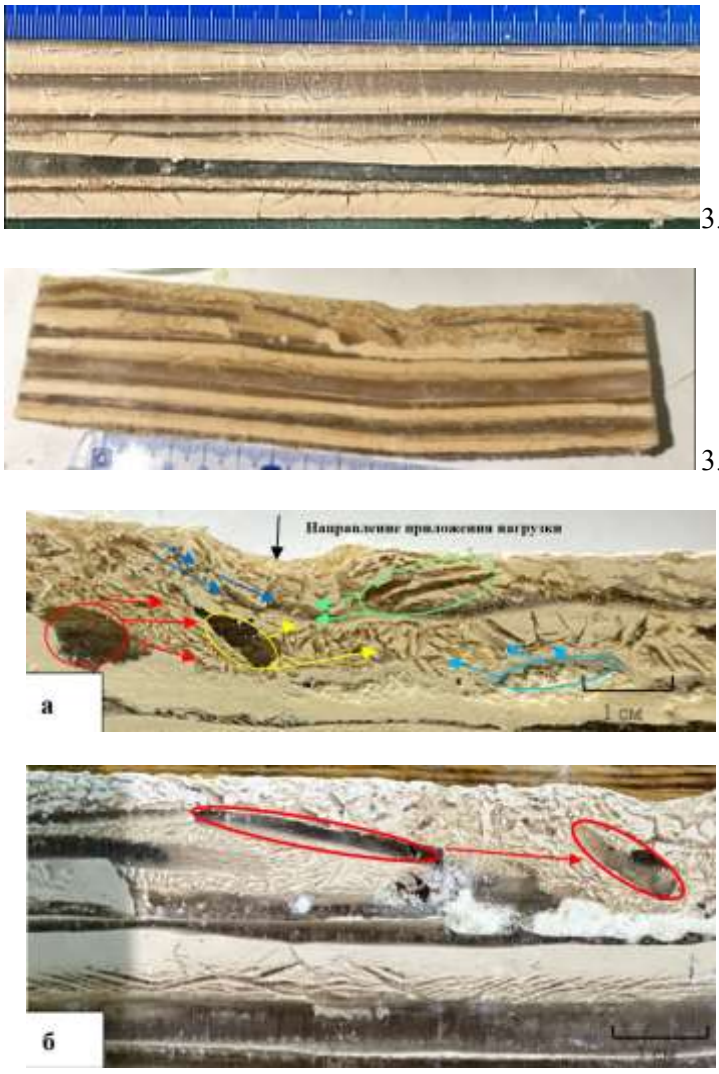



Рисунок 3. Образец со слоистой криогенной текстурой до испытания (3.1) и после испытания (3.2)

Криогенная текстура зоны структурных изменений представляет собой сильнольдистую толщу с большим количеством структурных нарушений. Предположительно, происходило подплавление приповерхностной ледогрунтовой зоны образца, с последующей перекристализацией льда и внедрением в него значительных грунтовых включений. В приповерхностной зоне присутствуют значительные сдвиговые деформации. Также стоит отметить формирование отдельных ядер жесткости, которые представлены блоками льда, отделенными под воздействием нагрузки из основного прослоя льда в образце, видны отдельно сформированные ядра жесткости, показанные различными цветами. Под воздействием давления происходят подвижки жестких ледяных фрагментов, которые создают дополнительные воздействия. В результате формируются разрывы сплошности и деформируются первичные криогенные текстуры грунта.

Криогенные образования, связанные с движением локальных ледогрунтовых объёмов в массивах мерзлых пород (объемные движения), предложенные ранее [10], могут выделяться как самостоятельные криогенные системы, имеющие ряд общих свойств:

— они локальны, каждая из них «вложена» в массив вмещающих многолетнемерзлых породи и имеет с ним четко выраженную границу;

— особенностью их строения являются следы динамических процессов (пластические деформации, следы течения, разрывы, надвиги и др.);

— каждой соответствует своя, история развития, выражающаяся в смена преобладающих процессов и соответствующих им криогенных образований; изучение их строения и пространственного расположения позволяет восстановить последовательность событий в формировании рассматриваемых криогенных геосистем.

***Литература***

1 Втюрина Е. А., Втюрин Б. И. Льдообразование в горных породах.-Наука-1970-, Москва.

2 Вялов С. С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР-1959-, Москва.

3 Гасанов Ш. Ш. Криолитологический анализ. Наука-1981-, Москва.

4 Данилов И. Д. Методика криолитологических исследований. Недра-1983-, Москва.

5 Дубиков Г. И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. ГЕОС-2002-

6 Корейша М. М., Хименков А. Н., Брыксина Г. С. О происхождении пластовых залежей подземного льда на севере Западной Сибири // Материалы гляциол. исслед. Хроника, обсуждения, вып. 41. М.: Изд – во МГК АН СССР.-1981-. С. 62–67.

7 Марахтанов В. П.. Сдвиговой механизм роста многолетних иньекционных бугров пучения. Криосфера Земли-2020-, т. XXIV, № 1, с. 34–42.

8 Соломатин В. И. 1986. Петрогенез подземных льдов. Наука-1986-, Новосибирск.

9. Хименков А. Н., Станиловская Ю. В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера. Арктика и Антарктика-2018- № 3, с. 1-25.

10. Хименков А.Н. Парагенезы в криолитозоне. Арктика и Антарктика-2019- № 1, с.15-22.

11. Хименков А.Н., Гагарин В.Е. Подходы к изучению деформаций в многолетнемёрзлых грунтах. Арктика и Антарктика-2022- № 2, с. 36-65.

12. Шумский П. А. 1955. Основы структурного ледоведения. Изд-во АН СССР-1955- Москва.

13. Mackay J.R. . Pingos of the Tuktoyaktuk Peninsula Area, Northwest Territories. Geogr. Phis. Quart. - 1979-Vol., 33, № 1, pp. 3–61

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

***А.А. Горбунова***

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, г. Москва*

**Актуальность.** Наблюдаемое глобальное потепление климата приводит к повышению температуры многолетнемерзлых грунтов и снижению их несущей способности. По данным исследований, в ряде регионов (Западная Сибирь, Европейский Север) несущая способность оснований уже снизилась на 15–25% [1], а аварийность зданий в криолитозоне достигает 60% [2]. Традиционные пассивные системы охлаждения (вентилируемые подполья, термосифоны) зависят от климатических условий и теряют эффективность при глобальном потеплении климата. В связи с этим актуальным является разработка и внедрение активных, климатически независимых способов термостабилизации грунтов оснований.

**Конструкция фундамента.** Фундамент представляет собой двухслойную железобетонную плиту, в верхней части которой размещен змеевик греющего контура (отопление здания), в нижней – змеевик охлаждающего контура [3, 5]. Контуры разделены теплоизоляционным слоем, термическое сопротивление которого подбирается расчетным путем. Тепловой насос отбирает низкопотенциальное тепло у грунта и частично у греющего контура, преобразует его и передает в систему отопления, одновременно охлаждая грунты основания.

Для оценки эффективности были выполнены выполнены:

– термодинамический расчет COP фреонового контура (R600a, R410a);

– теплотехническое моделирование в программах QFrost, Frost 3D Universal, Борей 3D;

– гидравлический и механический расчеты элементов фундамента;

– параметрические расчеты для трех типов грунтов (песок, супесь, суглинок), пяти температур грунта (от -5°C до -15°C) и трех режимов отопления ($T_1$ = 37, 42, 44°C);

– экономический анализ.

Математическое моделирование для трехэтажного жилого дома в г. Салехард (суглинок, $T_{грунта}$ = -0,5°C) показало, что при строительстве на свайном фундаменте с вентилируемым подпольем через 80 лет эксплуатации прогнозируется деградация ММГ и потеря несущей способности. Плитный фундамент с тепловым насосом ($T_1$ = 35°C, $T_2$ = -20°C, COP = 2,1) обеспечивает стабильно мерзлое состояние основания на весь срок службы.

Для здания лабораторного корпуса на КС-6 «Сковородинская» (высокотемпературные ММГ несливающегося типа, $T_{грунта}$ = -0,3°C) разработан комплекс подготовительных мероприятий: предварительное замораживание грунта термосифонами (радиус замораживания 1,4 м, 153 шт. на площади 19×40 м) и устройство планировочной насыпи из крупнозернистого песка мощностью 5 м. Расчетный режим ТН: $T_1$ = 35°C, $T_2$ = -20°C, COP = 2,8, тепловая мощность 67,3 кВт. Моделирование на 50 лет подтвердило сохранение мерзлого грунта под зданием при опускании кровли ММГ за его пределами до 20 м.

**Влияние литологического состава и температуры грунтов на эффективность работы предлагаемой конструкции.** Расчеты показали, что песчаные грунты обеспечивают тепловой поток от грунта на 30–40% выше, чем суглинки, за счет более высокой теплопроводности. Наиболее эффективные условия работы системы: песок с $T_{грунта} \geq$ -10°C, супесь и суглинок с $T_{грунта} \geq$ -5°C, низкотемпературный режим отопления ($T_1$ ~ 37°C). Снижение температуры грунта до -15°C увеличивает требуемую мощность теплового насоса на 37–47% и снижает COP на 20–30%.

**Экономическая эффективность**. Для оценки экономической целесообразности применения тепловых насосов проведены расчёты годовых затрат на отопление для типового одноэтажного здания площадью 540 м².

Сравнивались два варианта:

1. Отопление с помощью теплового насоса (круглогодичная работа).
2. Централизованное отопление от традиционных источников (в течение отопительного периода).

Расчёт включал:

– Определение теплопотерь здания для каждого населённого пункта;

– Расчёт коэффициента преобразования энергии ТН в зависимости от температуры конденсации хладагента;

– Учёт действующих тарифов на электроэнергию и тепловую энергию (для централизованного отопления). Результаты представлены на рисунках 1 - 3.

Наибольшая экономия достигается в населённых пунктах с высокой стоимостью тепловой энергии и относительно доступной электроэнергией:

Нюрба (Республика Саха):

– Традиционное отопление: 2 911 тыс. руб./год
– Тепловой насос: 974 тыс. руб./год
– Экономия: 1 937 тыс. руб./год (66%)

Оленек (Республика Саха):

– Традиционное отопление: 1 834 тыс. руб./год
– Тепловой насос: 998 тыс. руб./год
– Экономия: 836 тыс. руб./год (46%)

Омсукчан (Магаданская область):

– Традиционное отопление: 1 728 тыс. руб./год
– Тепловой насос: 709 тыс. руб./год
– Экономия: 1 019 тыс. руб./год (59%)

Тура (Красноярский край):

– Традиционное отопление: 1 472 тыс. руб./год
– Тепловой насос: 491 тыс. руб./год
– Экономия: 981 тыс. руб./год (67%)

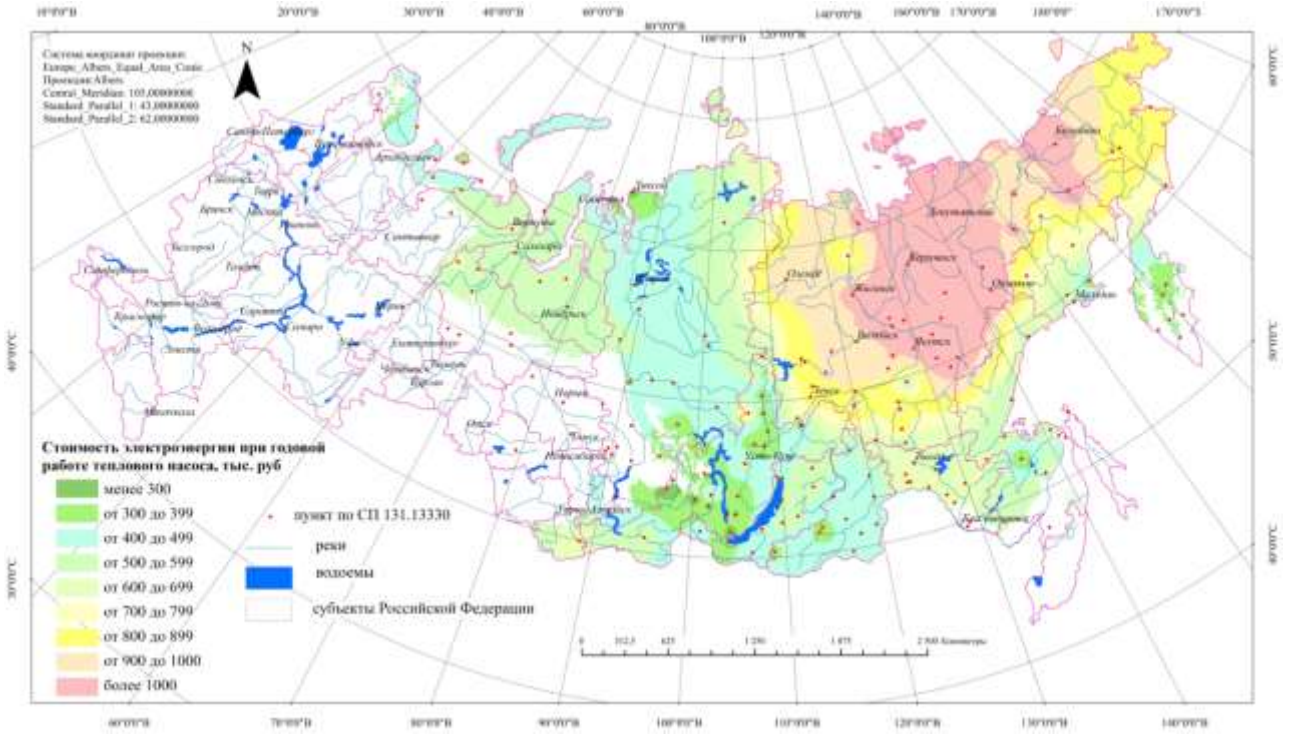



Рисунок 1. Схема стоимости электроэнергии при годовой работе теплового насоса

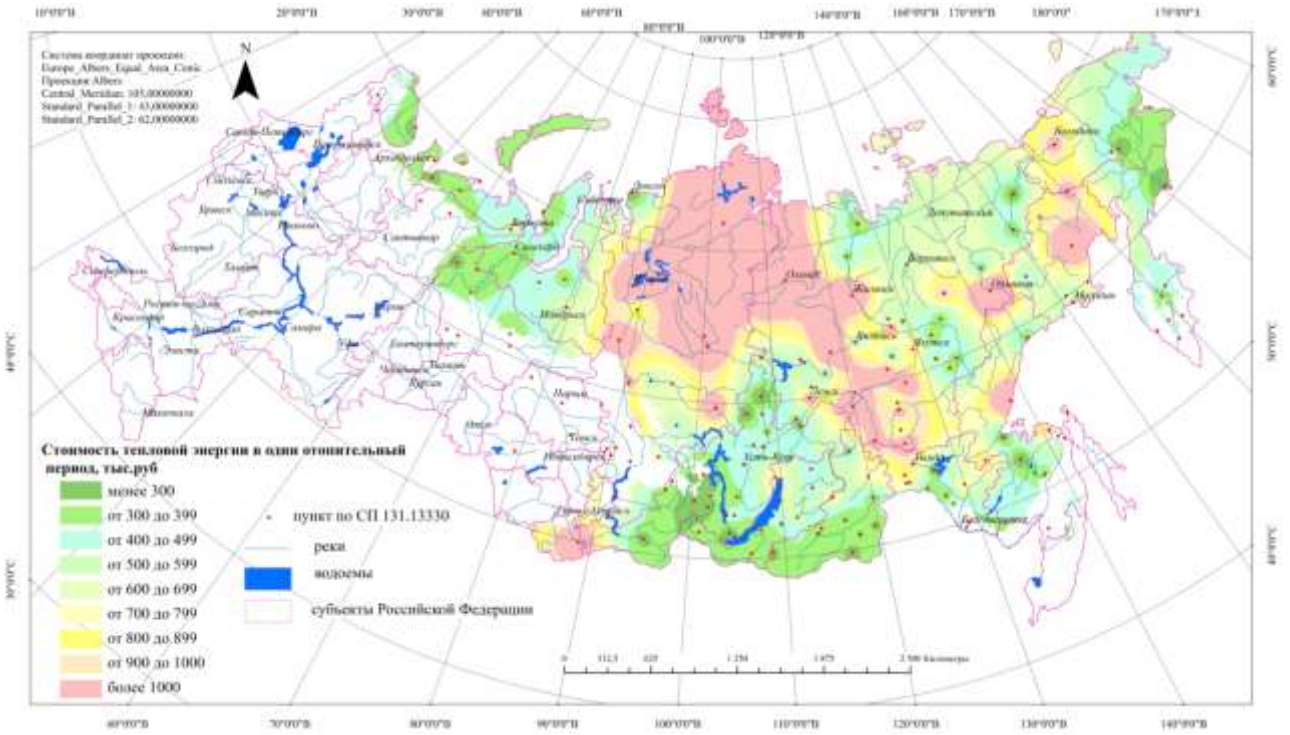



Рисунок 2. Схема стоимости тепловой энергии в один отопительный период

Игарка (Красноярский край):

– Традиционное отопление: 1 329 тыс. руб./год
– Тепловой насос: 447 тыс. руб./год
– Экономия: 882 тыс. руб./год (66%)

В некоторых районах, особенно с низкими тарифами на тепловую энергию и высокой стоимостью электроэнергии, применение ТН менее выгодно:

Марково (Чукотский АО):

– Традиционное отопление: 147 тыс. руб./год
– Тепловой насос: 878 тыс. руб./год

– Переплата: 731 тыс. руб./год

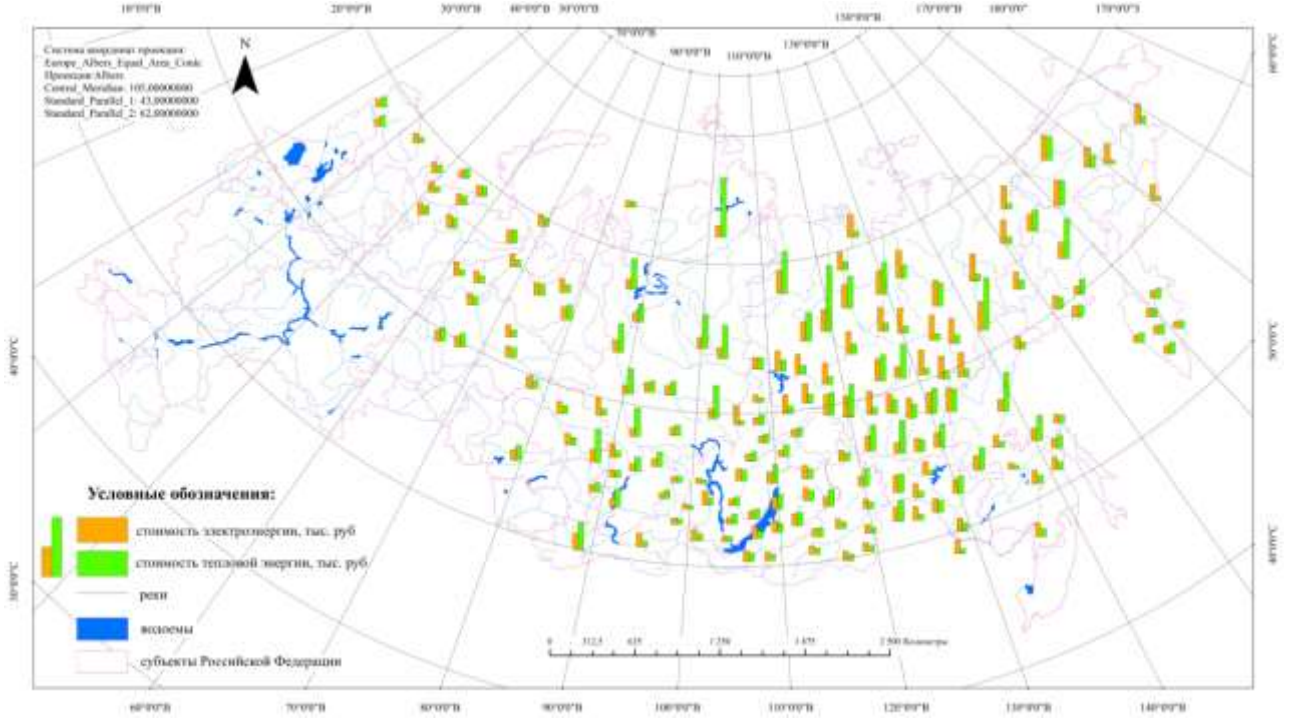



Рисунок 3. Схема с диаграммами сравнения стоимостей электроэнергии и тепловой энергии

Островное (Чукотский АО):
– Традиционное отопление: 1 043 тыс. руб./год
– Тепловой насос: 1 096 тыс. руб./год
– Переплата: 53 тыс. руб./год

Сургут (Ханты-Мансийский АО):
– Традиционное отопление: 307 тыс. руб./год
– Тепловой насос: 566 тыс. руб./год
– Переплата: 259 тыс. руб./год

Применение тепловых насосов для отопления экономически оправдано в большинстве арктических и северных регионов РФ, где тарифы на тепловую энергию превышают 4 000 руб./Гкал, а электроэнергия относительно доступна (до 8 руб./кВт·ч).

**Заключение.** Предложенная геотехническая система «плитный фундамент со встроенными контурами теплового насоса и грунтовое основание» является климатически независимым, энергоэффективным и экономически целесообразным способом обеспечения долговременной устойчивости зданий на многолетнемерзлых грунтах в условиях глобального потепления.

***Литература***

1 Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 1. С. 22–32.

2 Кроник Я.А. Анализ аварийности и безопасности геотехнических систем в криолитозоне / Материалы V конференции геокриологов России. М.: Университетская книга, 2016. Т. 1. С. 104–111.

3 Патент № 2583025. Плитный фундамент сооружения, обеспечивающий сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии с одновременным обогревом сооружения / Хрусталев Л.Н., Хилимонюк В.З., Перльштейн Г.З., Каманин Д.В. Опубл. 2016. Бюл. № 12.

4 Горбунова А.А. Термодинамический расчет теплового насоса, совмещенного с поверхностным фундаментом на многолетнемерзлых грунтах // Криосфера Земли. 2024. Т. 28. № 3. С. 6.

5 Хрусталев Л.Н., Хилимонюк В.З. Новый фундамент для зданий в Арктике // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 4. С. 25–30.

# РАДИАЦИОННО-ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС И ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ

***А.Н. Гордиенко***
*Полярный геофизический институт, г. Мурманск*

Данное краткое исследование посвящено учету солнечной радиации и режима радиационно-теплового баланса в целом при прогнозировании последствий воздействия природных факторов на инфраструктуру, расположенную в зоне вечной мерзлоты, когда такое прогнозирование осуществляется в целях защиты населения и территории при неблагоприятных природных явлениях (НЯ) и чрезвычайных ситуациях (ЧС).

Изучение радиационно-теплового баланса ведется на протяжении всей истории геокриологии [1], [2]. В этом контексте большую ценность представляет изданное в 2026 г. учебное пособие, разработанное на геологическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова, в котором дано описание механизма формирования радиационно-теплового баланса земной поверхности, а также показана зависимость от него температурного режима горных пород [3, стр. 30].

Отдельная роль в цепи факторов, определяющих криогенез, отводится климату Земли — не только как случайной функции в пространстве-времени, но как взаимодействию космических, геологических, биосферных и социально-экономических факторов, каждый из которых способен образовать свой перечень последствий от вполне благополучных, до чрезвычайных опасных для жизни и деятельности людей. При этом климат, включая процессы теплообмена в нижней атмосфере представляется промежуточным звеном на пути энергии Солнца до объектов наземной инфраструктуры. Криосфера здесь — самостоятельное звено этого процесса, реагирующее на климатические вариации и трансформирующееся под воздействием турбулентного теплообмена с нижними слоями атмосферы и процессов теплообмена другой природы с горными породами.

Климатические изменения, обусловлены, в первую очередь, режимом солнечной активности и составом атмосферы, а также зависимым от них и крайне нестабильным радиационно-тепловым балансом земной поверхности и, в меньшей степени, температурным режимом горных пород. Основные климатические параметры — температура воздуха и другие — на современном этапе рассчитываются в целях прогнозирования состояния теплообмена в криолитозоне. Иногда можно воспользоваться, например, формируемым Климатическим центром Росгидромета ресурсом сценарных моделей на основе глобальных моделей (средние за 20 лет значения климатических характеристик), разработанных в рамках международного проекта сравнения объединенных моделей (CMIP5) [4] .

Общеизвестно, что состояние климатической системы, организация жизни на Земле, зависимы от глобального источника энергии — Солнца. Повышение средней температуры климатической системы Земли (глобальное потепление) признается научно доказанным уже несколько десятилетий. Обуславливающие этот процесс колебания солнечной активности происходят в диапазоне временных масштабов и напрямую связаны с периодическими изменениями солнечного магнитного поля. Основные циклы включают 11-летний (цикл Швабе), 22-летний (магнитный цикл Хейла), вековой (цикл Глайсберга, 60-120 лет) и двухвековой (Зюсса). 11-летний цикл представлен на рис. 1 в привязке к пятилетнему делению шкалы. Наглядно 11-летний цикл можно показать, как графическое отображение показателя солнечной активности (число солнечных пятен) в соотношении с числом магнитных бурь за тот же периоды интенсивности за 1953-2025 гг. (вертикальные прямые линии показывают моменты событий с солнечными космическими лучами (события GLE)).

Можно полагать, что и комплексы климатических (метеорологических) явлений, и деградация вечной мерзлоты, и криогенные процессы, воздействующие на инфраструктуру, в своей основе могут характеризоваться такой же временной периодизацией.

Во взаимосвязи с солнечной активностью основным фактором в климатообразовании Земли является состав атмосферы (прежде всего, влажность — т.е. содержание воды $H_2O$), определяющий парниковый эффект, а также величину альбедо (отражения приходящей от Солнца коротковолновой радиации) [5], [6]. Присутствие воды $H_2O$, в том или ином её агрегатном состоянии, по сути, определяет развитие криогенных процессов и формирование криолитозоны [7]. На этом основано также предложение смягчения последствий глобального потепления, связанное с целенаправленным вмешательством в климатическую систему и управлением солнечным излучением (SRM), изменяя альбедо [8].

Солнечное излучение воздействует на атмосферу, обеспечивая нахождение в ней влаги в дисперсном состоянии. Находящаяся в нижней атмосфере влага воздействует на тепловой баланс как напрямую (через скрытую теплоту фазовых переходов), так и косвенно (через парниковый эффект и облачность: водяной пар – самый мощный парниковый бекфиллер, более влажная атмосфера имеет меньшую молекулярную теплопроводность, но на практике это перекрывается турбулентным переносом. Таким образом, с повышением влажности, величина теплообмена увеличивается, демонстрируя действие второго закон термодинамики.

Атмосфера Земли выполняет функции не только донора влаги на поверхность, но и ее акцептора, испаряемой с поверхности Земли.

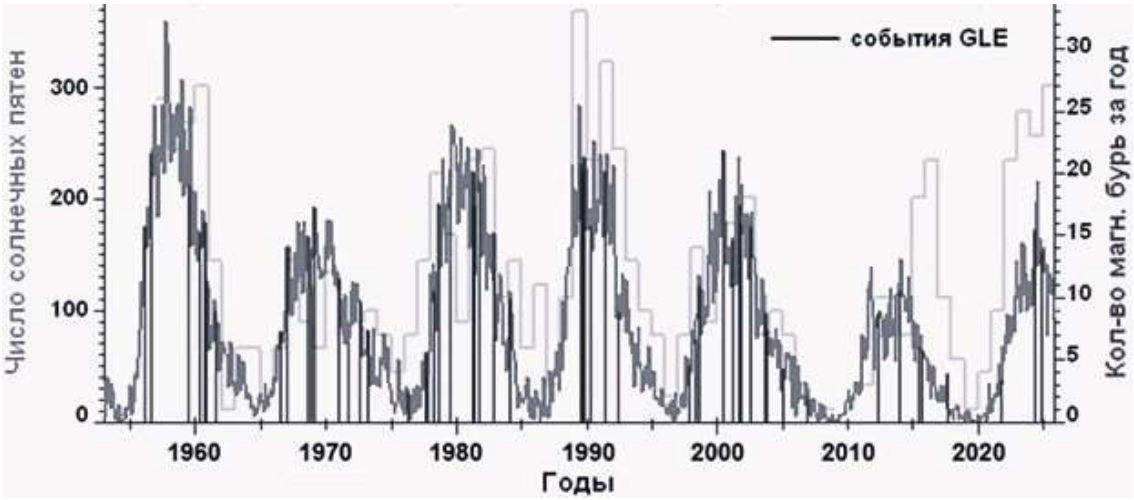



Рис. 1 Графическое отображение показателя солнечной активности за периоды интенсивности 1953-2025 гг. © ПГИ (г. Апатиты), 2026.

При повышении температуры поверхности и грунтов в условиях потепления происходит снижение несущей способности оснований и нарушение устойчивости зданий и инженерных сооружений [9].

Говоря об объектах инфраструктуры, в первую очередь необходимо иметь в виду промышленные объекты, поскольку именно они в большинстве случаев являются критически важными и потенциально опасными объектами, наиболее уязвимыми для опасных процессов, а также потому, что природно-техногенные последствия таких воздействий на эти объекты могут причинить большой экономический и экологический ущерб, как минимум, в региональном масштабе.

Исходя из установленных правовых норм, промышленная и технологическая инфраструктура — это совокупность стационарных объектов, объектов транспортной и коммунальной инфраструктуры, необходимых для осуществления деятельности в сфере промышленности, а также стационарных объектов и оборудования, необходимых для осуществления научно-технической или инновационной деятельности [10].

Основным способом стабилизации вечномёрзлых оснований является понижение его температуры [11].

Моделирование и прогноз пространственной изменчивости различных элементов природной среды является основой долгосрочного прогноза НЯ и ЧС. При этом исследуемые природные явления обуславливают необходимость постоянного мониторинга НЯ и заблаговременное прогнозирование природно-техногенных ЧС, со значительным выходом работ за рамки установленного и проводимого в настоящее время. Более того, мониторинг воздействия климатических изменений на объекты инфраструктуры предполагает подготовку мер реагирования на НЯ и в случае ЧС весьма заблаговременно. В осуществляющих мониторинг и прогнозирование ЧС подразделениях учреждений Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) такой ориентированный мониторинг не осуществляется или осуществляется в узкоотраслевых целях, методические указания по подготовке мер реагирования не содержат представления о надлежащем реагировании на эти процессы [12], [13].

Учитывая массив пространственных связей системы «климат-криосфера-инфраструктура», который необходимо обработать в процессе прогнозирования природных и последовательно связанных с ними природно-техногенных НЯ и ЧС, необходимо применение системного (включая

математическое моделирование и/или цифровое картографирование) анализа больших массивов данных, машинного обучения, систем автоматизации обработки информации и искусственного интеллекта [14], что предполагает, в том числе, внедрение современных методов интерпретации накопленной информации для решения задач мониторинга и прогнозирования экзогенных и процессов.

Наиболее высоки риски наступления и развития ЧС вблизи максимуму коротковолновой радиации и теплообмена на поверхности. Однако процессы деградации вечной мерзлоты и деформации объектов инфраструктуры, как правило, запаздывают – это можно считать отложенным последствием стресса (как аналог автошока после основного землетрясения). Составляющие глобального радиационно-теплового баланса наглядно представлен на схеме по Б.П. Алисова и др.: определены тепловые потоки по отношению к земной поверхности [16]. Позволим добавить к этой схеме соответственное развитие ЧС в виде нарушения температурного режима, деградации вечной мерзлоты и разрушений зданий и сооружений согласно установленным критериям информации о ЧС [16].

Использование показателей радиационно-теплового баланса позволяет разработать как инженерно-геокриологический, так и прогноз ЧС. Учитывая динамику изменения тепловых потоков, они могут служить основой прогнозной оценки состояния криолитозоны и таким образом использоваться в целях прогнозирования рисков возможного разрушения объектов инфраструктуры, то есть наступления ЧС.

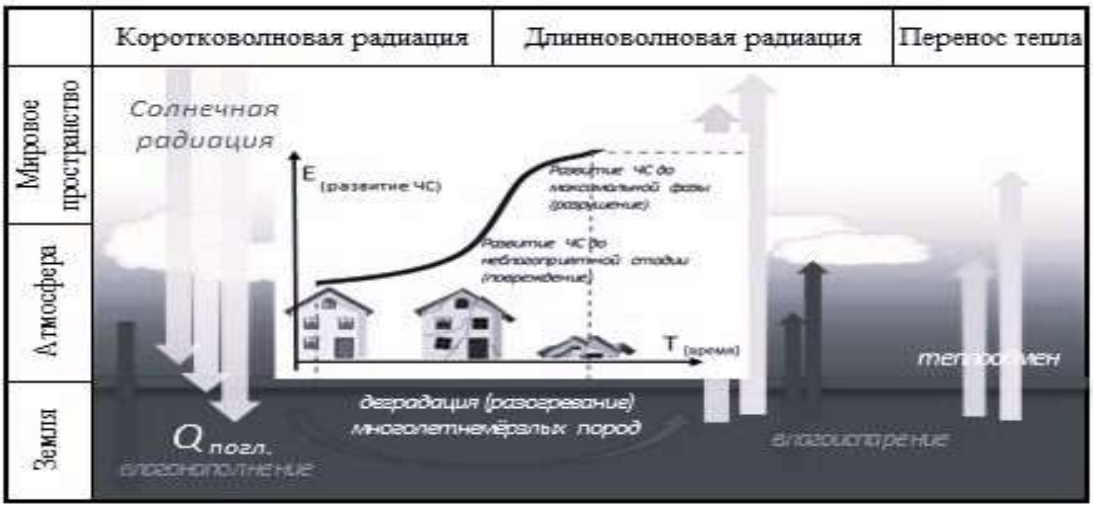



Рис. 2. Механизм глобального радиационно-теплового баланса с представлением развития ЧС (© А.Н. Гордиенко, 2026)

Кроме того, опасные экзогенные геологические процессы (ЭГП) сами по себе являются значимым фактором риска возникновения ЧС, в первую очередь – в зонах распространения многолетнемёрзлых пород. Непосредственно ЭГП на застроенных территориях образуют, так называемые, «медленные» катастрофы. Соответственно, период геокриологических прогнозов может быть как краткосрочным (на период от 1 до 10 лет), базирующимся на короткопериодных (3-11 лет) колебаниях климата, так и долгосрочным (от 10 до 100 лет).

Таким образом, во взаимосвязи с солнечной активностью, отражением приходящей от Солнца коротковолновой радиации (альбедо), состав и состояние атмосферы (прежде всего, влажность — содержание воды $H_2O$) определяют температурный режим Земли и его изменение [5], [6]. Специальная математическая программа может позволить оперативно рассчитывать зависимость состояния различных районов криолитозоны от показателей солнечной активности с учетом климатических факторов радиационно-теплового баланса.

Учитывая динамику его изменения, данные по измерениям радиационных потоков могут служить основой прогностической оценки состояния криолитозоны и таким образом использоваться в целях прогнозирования рисков возможного разрушения объектов инфраструктуры, то есть наступления ЧС.

***Литература***

1. Шрайбер В.М. Из истории исследований парникового эффекта земной атмосферы // «Биосфера», 2013, т. 5, № 1, с. 37-46;

2. Монин А.С., Шишков Ю.А. История климата. Гидрометеоиздат, Ленинград; 1979, с. 407;

3. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. Учебное пособие. Изд. 2-е, переработанное и дополненное /под ред. Л.С. Гарагули и А.В. Брушкова //М.; Издательство «Геоинфо», 2016, С. 30;

4. Сценарные модели на основе глобальных моделей CMIPS. Климатический центр Росгидромета [Электронный ресурс] Режим доступа: https:// cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke (дата обращения 25.04.2026);

5. Монин А.С., Берестов А.А. Новое о климате // Вестник Российской академии наук, Том 75, 2005, № 2, с. 126–138;

6. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики. Успехи физических наук, Том 170, 2000. № 4, с. 419–445 // Режим доступа: https://doi.org/10.3367/UFNr.0170.200004d.0419 (дата обращения 25.04.2026);

7. Мельников В.П. Криосфера Земли как объект криологии // Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 1, с. 5-13;

8. Алиев Рамиз. Что случилось с климатом /Р. Алиев. // М: Паулсен, 2022. С. 298;

9. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов / В. П. Мельников, В. И. Осипов, А. В. Брушков [и др.] // Криосфера Земли. – 2021. – Т. 25, № 6. – С. 3-15. – DOI 10.15372/KZ20210601. – EDN HEVLIU.

10. Федеральный закон от 31.12.2014 № 488-ФЗ «О промышленной политике в Российской Федерации» (п. 8 и 18, ст. 3) / Собрание законодательства Российской Федерации, 2015, № 1, ст. 41; 2016, № 27, ст. 4298; 2018, № 27, ст. 3943; 2019, № 31, ст. 4449; 2022, № 41, ст. 6952; № 50, ст. 8790; 2023, № 25, ст. 4434; 2024, № 1, ст. 35, 39; № 26, ст. 3546; № 44, ст. 6497; 2025, № 14, ст. 1584; № 21, ст. 2543; № 48, ст. 7236;

11. Закон Ямало-Ненецкого автономного округа от 22.12.2023 № 105-ЗАО «О многолетней (вечной) мерзлоте в Ямало-Ненецком автономном округе» (п. 1 ст. 3) / Официальное опубликование правовых актов, Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru, дата опубликования 16.09.2021, № 8900202312250014, дата обращения 24.04.2026;

12. НИР «Научно-методическое сопровождение совершенствования методов прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» /М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2023;

13. Мониторинг вечной мерзлоты для предупреждения чрезвычайных ситуаций в Арктике / А. В. Брушков, А. Н. Гордиенко // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации: материалы научно-практической конференции, Мурманск, 04–07 апреля 2023 года. – Мурманск: Мурманский арктический государственный университет, 2023. – С. 59-61. – EDN WLYJHK;

14. План фундаментальных и поисковых научных исследований на 2021 - 2030 годы / Приложение № 1 к Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 - 2030 годы) (в актуальной редакции), распоряжение Правительства Российской Федерации от 31.12.2020 № 3684-р, Разд. 1.5, Стр. 36-37 / Официальный интернет-портал правовой информации, Режим доступа: http://pravo.gov.ru, дата размещения 09.01.2021, № 0001202101090048; Собрание законодательства Российской Федерации, № 3, 18.01.2021, ст. 609;

14. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. Учебное пособие. Изд. 2-е, переработанное и дополненное /под ред. Л.С. Гарагули и А.В. Брушкова // М., Издательство «Геоинфо», 2016, С. 31;

15. Критерии информации о чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера, утверждены приказом МЧС России от 05.07.2021 № 429 (зарегистрирован Минюстом России 16.09.2021 за № 65025) / Официальное опубликование правовых актов, Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru, дата опубликования 16.09.2021, № 0001202109160036, дата обращения 24.04.2026

## МОЩНОСТЬ МЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ КАК ФАКТОР В ПРОГНОЗЕ СОСТОЯНИЯ ПОРОД ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ

***Я.Б. Горелик, И.В. Земеров***

*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г Тюмень*

Прогноз состояния многолетнемерзлых грунтов при техногенных или природных воздействиях является одной из наиболее важных задач инженерной геокриологии. Среди таких воздействий наиболее распространенными являются поверхностные воздействия, которые передаются вглубь массива через его верхнюю границу. Необходимо отметить принципиальную разницу между техногенными и природными поверхностными воздействиями. Она заключается в существенном отличии площади их воздействия относительно площади горизонтального простирания мерзлых массивов. Техногенные нарушения носят локальный характер и в подавляющем числе практических ситуаций отношение указанных площадей близко к нулю. Площадь же климатического воздействия в том же отношении близка к единице. Применяемые сегодня для проектирования и строительства сооружений методы расчета теплового взаимодействия с мерзлыми грунтами (в том числе с учетом климатических изменений) основаны на решении задач по определению динамики температурного поля в полуограниченном пространстве [1-3]. Для полуограниченного массива можно сформулировать достаточно очевидное утверждение (независимо от типа воздействия): полуограниченный массив мерзлого грунта обладает неограниченным запасом холода и по этой причине любое поверхностное воздействие конечной величины и длительности приводит только к таким изменениям, которые после прекращения воздействия полностью восстанавливаются до первоначального состояния (здесь и ниже под изменением состояния грунтов понимаются характеристики его протаивания - промерзания и изменения температуры). Однако, реальные мерзлые массивы ограничены в своей вертикальной протяженности. Если представить такой массив в виде бесконечной в горизонтальном направлении плиты конечной толщины, то ее запас холода будет также неограничен, но высказанное выше утверждение будет справедливым только для нарушений техногенного типа (в силу ограниченности площади воздействия). При климатическом потеплении будет справедливо противоположное утверждение: любое конечное по величине и длительности воздействие на мерзлый массив конечной мощности является необратимым. После прекращения воздействия первоначальное состояние массива не восстанавливается при любом сроке ожидания этого события. Здесь необходимо пояснить, что под прекращением воздействия в данной работе понимается такие новые условия на поверхности, которые не вызывают дополнительного охлаждения массива с поверхности, сопровождающегося его промерзанием за счет внешних источников. То есть, по существу здесь речь идет о процессах самовосстановления состояния мерзлого массива за счет его первоначальных запасов холода (содержащихся в нем до начала потепления).

Качественная картина изменения состояния мерзлого массива при действии поверхностных нарушений климатического типа представляется достаточно очевидной. Однако наибольший интерес представляют количественные характеристики этого процесса. В частности, сюда относятся величина многолетнего протаивания за время потепления, а также время обратного промерзания до исходного положения (в случаях, когда это возможно) при последующем похолодании. Важное значение имеет определение условий, при которых возможно самовосстановление мерзлого состояния массива (т.е., когда обратное промерзание приводит кровлю мерзлых пород в исходное положение, существовавшее до потепления). При этом исходная температура не может быть достигнута. Представляет интерес величина отрицательной температуры мерзлого массива, которая формируется после завершения процесса обратного промерзания. Количественная оценка перечисленных выше характеристик напрямую связана с исследованием влияния мощности мерзлой толщи и геотермического потока тепла в процессах многолетнего протаивания и обратного промерзания пород. Рассмотрение способа получения количественных оценок этих процессов является основной целью настоящей работы. Результаты такого рассмотрения могут быть полезными в прогнозе состояния мерзлых грунтов в основании сооружений, поскольку в таких задачах граничные условия вне контура сооружения выставляются в том виде, который соответствует свободной поверхности. Они также важны для выяснения условий, при которых может быть использована более простая модель полуограниченного массива грунта. Отметим здесь, что важность конечности размеров мерзлой толщи ранее отмечена Д.В. Редозубовым [4] при разработке методов интерпретации данных геотермии. Ниже при рассмотрении указанных вопросов используется комбинация численного и аналитического методов, что является наиболее надежным способом достижения понимания процессов и подтверждения достоверности полученных выводов. В качестве примера рассматривается однородный по свойствам неограниченный слой мерзлого грунта заданной мощности $z_b$, заключенный между подошвой слоя сезонного протаивания и подошвой мерзлого

грунта. На верхней границе слоя задается постоянное во времени значение среднегодовой температуры подошвы слоя сезонного протаивания $t_0$<$0^0$C. На его нижней границе, контактирующей с подстилающими талыми породами, задается значение температуры фазового перехода грунтовой влаги (принимается равной $0^0$C) $t_b$=$0^0$C, а также характерное значение геотермического потока тепла с внешней стороны слоя $q$. Начальное состояние слоя принимается стационарным, что влечет необходимость выполнения равенства $q$=- $\lambda_f$ $t_0/z_b$. Среди бесконечного количества вариантов возможных начальных условий стационарное состояние, хотя и является искусственным, но имеет чисто методическую возможность проследить на его фоне изменения состояния массива наиболее наглядным и понятным способом. Характеристики грунта приняты следующими: коэффициент теплопроводности, объемная теплоемкость и коэффициент температуропроводности талого грунта (индекс $u$) соответственно: $\lambda_u$= 1,8 Вт/м град; $c_u$ =7.5 $10^6$ Дж/м$^3$град; $a_u$= 2.40 $10^{-7}$ м$^2$/с; те же параметры для мерзлого грунта (индекс $f$) приняты: $\lambda_f$ = 2.0 Вт/м град; $c_f$ =6.0 $10^6$ Дж/м$^3$град; $a_f$= 3.33 $10^{-7}$ м$^2$/с; объемный вес скелета грунта $\gamma_s$ = 1800 кг/м$^3$; весовая влажность грунта $w$=0.20 д.е.; объемная теплота фазового перехода $\kappa_w$ = 1.20 $10^8$ Дж/м$^3$. С целью выявления наиболее важных особенностей в изменении состояния грунта в простейшей модели изменения климата рассматривается двухфронтовая постановка задачи Стефана (для подошвы мерзлого слоя и его верхней границы). Климатические изменения моделируются скачкообразным изменением граничной температуры на верхней поверхности: потепление – повышением температуры до постоянного положительного значения $t_s$ >$0^0$C в течение промежутка времени $\tau_S$, последующее похолодание – скачкообразным понижением температуры от $t_s$ до значения $t_f$ =$0^0$C. Похолодание до отрицательных температур приводит к задаче двустороннего промерзания образовавшегося при потеплении талика: промерзание его с поверхности и обратного промерзания со стороны остатка мерзлого массива при температуре на верхней границе $0^0$C. Поскольку первый из этих фрагментов изучен достаточно хорошо, то здесь анализируется только вопрос обратного промерзания.

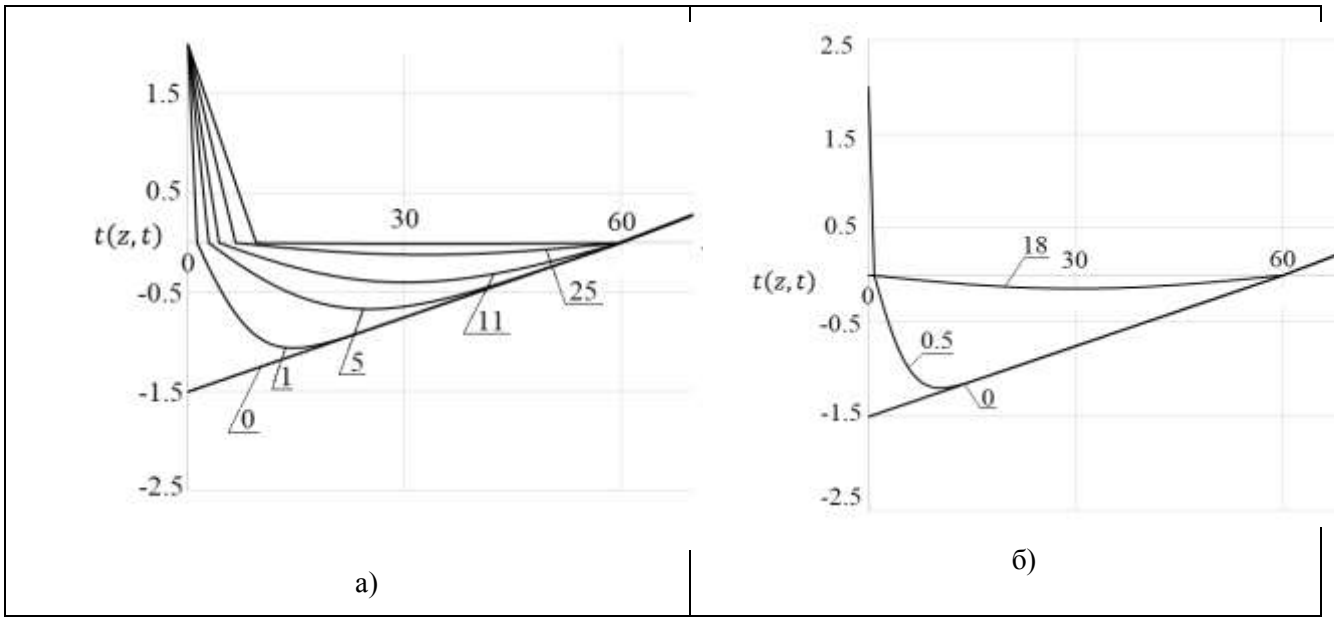



Рис.1. Результаты численного расчета (условия и описание – в тексте): а) движение фазовых границ и динамика изменения температуры при потеплении общей длительностью 50 лет; б) процесс восстановления мерзлого состояния за счет собственного ресурса холода при похолодании после потепления продолжительностью 0,5 года. Цифры на кривых соответствуют моменту времени в годах. Шкала $z$ – в метрах,

Динамика изменения температуры на верхней границе задает верхнее граничное условие задачи. На нижней границе заданы температура $t_b$=$0^0$C и с ее внешней стороны –заданный поток $q$. Начальное условие определяется описанным выше стационарным состоянием. Решение задачи численным методом осуществлялось с помощью учебной программы Q-Frost. Результаты примера вычислений для периода потепления $\tau_S$ = 50 лет при $t_0$=-1,5$^0$C, $t_s$=+2,0$^0$C, $z_b$=60 м показаны на Рис. 1.а, где приведено положение фронта протаивания со стороны верхней границы и распределение температуры по глубине массива в промежуточные моменты времени (протаивание снизу за 50 лет не превышает 0,4 м и не видно в масштабе рисунка). Процесс потепления (Рис. 1.а) вызывает существенное продвижение верхней границы мерзлого массива вниз (1,3 м за 1-й год и 9,5 м за 50

лет). Температура мерзлого слоя монотонно растет со временем, при этом до определенного момента времени (в примере – до момента примерно 11 лет) распределение имеет асимметричный вид с минимумом температуры, который со временем смещается в сторону подошвы. Важная особенность этих кривых заключается в том, что они состоят из двух участков: первый прилегает к кровле слоя и испытывает существенные тепловые изменения; ниже точки минимума температуры первый участок плавно сопрягается со вторым, который представляет собой прилегающую к подошве часть невозмущенного начального распределения. Точка сопряжения со временем также смещается к подошве. В некоторый момент времени (в примере-11 лет) точка сопряжения достигает подошвы. С этого момента и до полного исчерпания запасов холода (на 50-й год температура по всему слою остается отрицательной, но не превышает сотых долей градуса по модулю) распределение температуры является симметричным с постоянным положением минимума температуры в середине слоя. Величина минимума растет со временем (в диапазоне отрицательных температур увеличивается до $0^0$C).

Похолодание может начаться в любой момент на временном промежутке от 0 до 50 лет. Пример, показанный на Рис. 1.б характеризует этот процесс после потепления, продолжавшегося 0,5 года. Кривая 1 показывает распределение температуры на момент начала похолодания. Кривая 2 – температура на 18-й год похолодания демонстрирует существенное истощение запасов холода. При этом, левый край этой кривой имеет небольшой горизонтальный отрезок (упирающийся в ось температуры) длиной около 30 см, который не виден в масштабе рисунка, но показывает, что за это время не произошло полного восстановления мерзлого состояния рассматриваемого слоя. Более длительный расчет (на 50 лет) показывает отсутствие такого события даже при практически полном истощении запасов холода в мерзлой части. Причина этого заключается в том, что запас холода в мерзлом грунте недостаточен, чтобы проморозить образовавшийся талик в процессе обратного промерзания при похолодании. Условие достаточности такого запаса в наиболее простом виде (пригодном для грубой оценки) можно получить из сравнения теплоты, необходимой для протаивания грунта на величину $\xi_u(\tau_S)$ в период потепления с начальными запасами холода в слое: $\kappa_w \xi_u(\tau_S) < -0{,}5 c_f t_0 z_b$. Если принять для $\xi_u(\tau_S)$ простейшее выражение в виде формулы Стефана, то отсюда можно получить ограничение на предельное время теплового воздействия ($\tau_p$), при котором еще возможно восстановление мерзлого состояния массива в период похолодания в следующем виде: $\tau_p < (-0{,}5\, c_f t_0 z_b)^2 / 2 \lambda_u t_0 \kappa_w$. По этой формуле предельное время оценивается величиной $\tau_p < 0{,}43$ года. В рассматриваемом примере время теплового воздействия ($\tau_S = 0{,}5$ года) превышает приведенное значение $\tau_p$, что объясняет полученный результат. Однако, для практических расчетов приведенная оценка недостаточно точна, поскольку теплосодержание (стоящее в правой части неравенства) непрерывно изменяется в процессе протаиванияи и последующего обратного промерзания. Для учета этого обстоятельства и более точного расчета величины $\tau_p$, а также для выяснения общих закономерностей рассматриваемых процессов применение численных методов не всегда удобно ввиду необходимости анализа большого количества вариантов расчета и частых прерываний счета. Для этих целей весьма полезным оказывается применение аналитических методов. Ниже для описания процессов использован метод теплового баланса [5]. Для этого подбирается функция $t(z, \tau)$, наиболее точно соответствующая характеру поведения температуры вдоль мерзлой части массива, описанному выше и показанному на Рис.1. Перечислим наиболее важные элементы этого соответствия: а) вид функции не зависит от направления процесса (протаивание или промерзания), но определяется только воздействием температуры фазового перехода на обеих границах и имеет минимум во внутренней точке; б) функция $t(z, \tau)$ состоит из двух участков: первый представляет зону теплового возмущения, второй – невозмущенный участок начального распределения, сопряжение участков - гладкое; в) положение точки сопряжения зависит от времени (характеризуется протяженностью возмущенного участка – радиусом теплового влияния $L(\tau)$); г) после достижения радиусом теплового влияния подошвы слоя температура является симметричной функцией относительно середины слоя и имеет минимум в его центре. Довольно простой вид такой функции получается в виде квадратичной зависимости от аргумента $z/L(\tau)$. Радиус теплового влияния определяется из условия теплового баланса [5] и имеет следующее выражение: $L(\tau)=(12 a_f \tau)^{1/2}$. Момент достижения радиусом влияния подошвы слоя ($\tau_b$) определяется этим выражением из условия $L(\tau_b)=z_b$. Для рассматриваемого примера величина $\tau_b$=11,5 лет. На Рис. 2. показано поведение температуры внутри мерзлой части массива для отдельных промежутков времени (при $\tau < \tau_b$ –Рис.2.а, при $\tau > \tau_b$ - Рис.2.б). Кривая, соответствующая моменту времени 11.5 лет, на каждом из них относится к моменту времени $\tau_b$ и вполне соответствует кривой на Рис.1.а, полученной численным методом для близкого момента времени (11 лет).

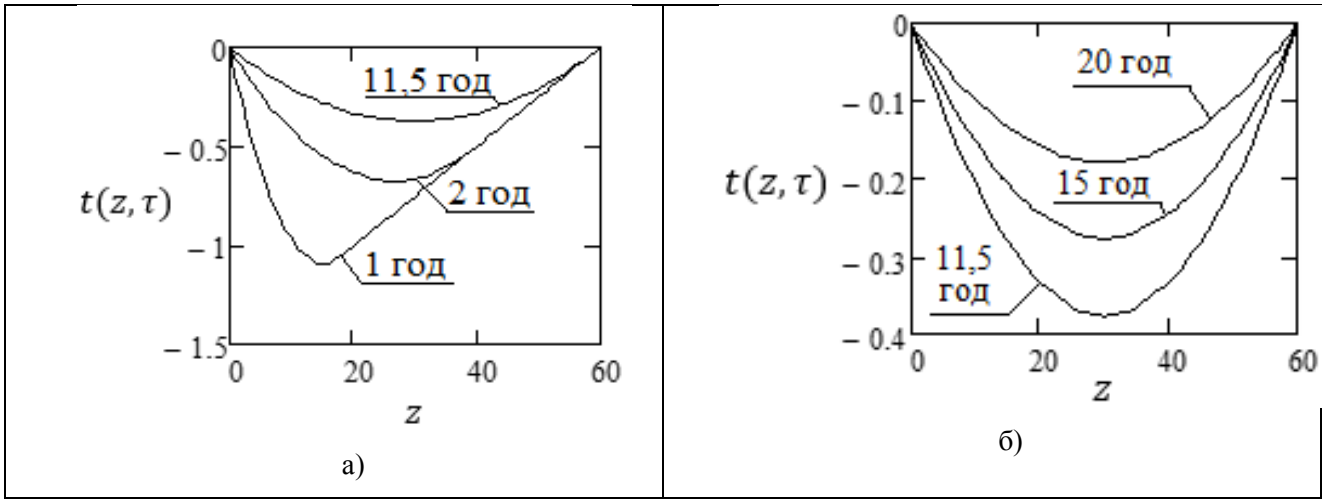



Рис. 2. Поведение температуры по глубине мерзлого массива в различные моменты времени: а) при $\tau < \tau_p$; б) при $\tau > \tau_p$.

Сравнивая рисунки 1 и 2 можно убедиться, что между ними имеется не только качественное, но и довольно хорошее количественное соответствие. Для нахождения предельного времени теплового воздействия решается задача обратного промерзания с использованием найденной функции ***t(z, τ).*** Ее решение сводится к квадратному уравнению относительно времени обратного промерзания как функции времени теплового воздействия $\tau_f(\tau_S)$**.** Предельное время $\tau_p$ определяется условием положительности дискриминанта решения этого уравнения. Для рассматриваемого примера искомое время оказывается равным 0,174 года, что значительно отличается от приведенной выше оценки. В приведенной ниже Таблице показано, как изменяются расчетные параметры при изменении исходных данных задачи ($z_b$ и $t_0$) при прочих фиксированных характеристиках. В Таблицу включена величина протаивания грунта за время потепления $\xi_u(\tau_S)$**.** Время теплового воздействия $\tau_S$ во всех случаях принято

Таблица 1

Параметры процессов протаивания и обратного промерзания.

| $z_b$=60 м; $\tau_b$=11.46 год. | | $z_b$=120 м; $\tau_b$=45.85 год.. | |
|---|---|---|---|
| $t_0$=-1,5 $^0$C | $t_0$=-3,0 $^0$C | $t_0$=-1,5 $^0$C | $t_0$=-3,0 $^0$C |
| $\tau_p$=0.174 год | $\tau_p$ =0, 628 | $\tau_p$ =0.697 | $\tau_p$ =2.512 |
| $\xi_u(0,1)$=0.40 м | $\xi_u(0,1)$= 0.37 м | $\xi_u(0,5)$=0,90 м | $\xi_u(0,5)$= 0,84 м |
| $\tau_f(0,1)$=25 год | $\tau_f(0,1)$=15 год | $\tau_f(0,5)$=111 год | $\tau_f(0,5)$=47 год |

ниже предельного значения $\tau_p$**.** Отметим, что в Таблице время обратного промерзания $\tau_f$ ($\tau_S$) всегда оказывается примерно на 2 порядка больше, чем время протаивания $\tau_S$ – процесс обратного промерзания является весьма длительным. Сравнивая данные Таблицы при изменении только одного параметра (например, 1-ю и 2-ю, 1-ю и 3-ю колонки) можно убедиться, что предельное время $\tau_p$ сохраняет квадратичную зависимость от мощности толщи $z_b$ и начальной температуры $t_0$ как это следует из простейшей оценки по формуле Стефана, но отличаются от нее количественно. Отсюда следует, что наиболее восприимчивыми к необратимым изменениям при потеплении оказываются маломощные, высокотемпературные мерзлые пласты ($z_b$ -несколько десятков метров, $t_0$ не ниже минус 5$^0$C). Поскольку проектный срок эксплуатации капитальных сооружений оценивается примерно в 30-50 лет, то это обстоятельство необходимо принимать во внимание при теплотехнических расчетах с учетом климатических изменений, а также на стадии инженерных изысканий при проектировании и строительстве на многолетнемерзлых грунтах. Для более низких температур зависимость от $t_0$ может измениться.

Представленные на рисунках 1 и 2 температурные кривые сильно сжаты по координате z. Если их растянуть по этой оси, то они будут подобны довольно часто встречающимся кривым термометрических исследований с заметным горбом в верхней части разреза [4,6-10]. Анализ функции ***t(z, τ)*** показывает, что при $\tau_S < \tau_b$ координата минимума зависит от времени и определяется выражением $z_m(\tau) = L(\tau)\ (1 - L(\tau)/2z_b)$ (при $\tau = \tau_b$ имеем $L(\tau_b) = z_b$ и $z_m(\tau_b) = z_b/2$, сохраняющаяся

постоянной в дальнейшем процессе). Важными характеристиками последовательно протекающих процессов протаивания и обратного промерзания могут быть положение и скорость смещения этого минимума, а также наклон невозмущенной части температурной кривой. Эти параметры могут быть определены путем анализа поведения функции t(z, τ) и в совокупности с мониторинговыми наблюдениями за их реальным изменением в конкретном местоположении могут дать весьма ценную информацию по климатическим изменениям прошлого времени как в заданном регионе, так и по планете в целом. В частности, полезными могут быть следующие результаты (подтверждающиеся совпадением численного и аналитического методов расчета): величина минимума температуры в каждый момент определяется выражением $t(z_m,\tau)= t_0 (1- L(\tau))^2/2\ z_b$ и при $\tau= \tau_b$ этот минимум равен $t_0/4$; имеют явное выражение скорость смещения минимума и координата точки сопряжения участков температурной кривой. Все эти величины могут быть определены путем прямых наблюдений достаточной длительности в термометрических скважинах и с помощью указанных выше зависимостей с определенной точностью могут быть восстановлены исходные климатические параметры $t_0$, $t_s$, а также глубина залегания подошвы $z_b$ (если забой скважины находится выше этой точки).

Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН по теме Госзадания № FWRZ-2026-0025.

***Литература***

1. Порхаев В.Г. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с мерзлыми грунтами. М., Наука, 1970, 208 с

2. Хрусталев Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. М., Инфра-М, 1996, 542 с.

3. Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М., МГУ, 1999, 517 с.

4. Редозубов Д.В. Геотермический метод исследования мерзлых толщ. М., Наука, 1966, 155 с.

5. Баренблатт Г.И. О некоторых приближенных методах в теории одномерной неустановившейся фильтрации жидкости при упругом режиме // Известия АН СССР. Отд. техн. наук, 1954, 9, 35-49.

6. Баулин В.В. Многолетнемерзлые породы нефтегазоносных районов СССР. М., Недра, 1985, 176 с.

7. Баулин В.В., Белопухова Е.Б., Дубиков Г.И., Шмелев Л.М. Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности. М., Наука, 1967, 214с.

8. Хрусталев Л.Н., Никифоров В.В. Стабилизация вечномерзлых грунтов в основании зданий. Новосибирск: Наука, 1990, 207 с.

9 Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 194 с.

10. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона. Новосибирск, Наука, 2005, 220 с.

## ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ФОРМИРОВАНИЕ СУБАЭРАЛЬНЫХ НАДМЕРЗЛОТНЫХ ТАЛИКОВ В ЮЖНОЙ ЛЕСОТУНДРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

***А.Г. Гравис, Д.С. Дроздов, О.Е. Пономарева, А.З. Халимьянов, А.М. Царев***
*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень*

**Введение**

Современные климатические изменения конца XX – начала XXI вв. существенно трансформируют геокриологические условия криолитозоны, что проявляется в увеличении мощности сезонноталого слоя и повышении температуры многолетнемерзлых пород (ММП) в пределах слоя годового теплооборота [1-3]. Эти процессы обусловливают снижение несущей способности грунтов, что требует корректировки инженерных решений и применения специальных мер стабилизации оснований сооружений [4].

В ряде регионов отмечается понижение глубины залегания кровли ММП и формирование субаэральных радиационно-тепловых таликов. Изучению этих таликов посвящены лишь единичные работы, выполненные для условий Восточной Сибири [5, 6]. Изученность надмерзлотных таликов в Западной Сибири остается недостаточной. Не определены темпы их пространственного расширения, влияние на гидрологические условия и развитие экзогенных процессов. Особую актуальность проблема приобретает для линейных сооружений в южной криолитозоне, где формирование таликов приводит к неравномерным деформациям оснований. Целью данного исследования является анализ

условий формирования субаэральных надмерзлотных таликов в южной лесотундре Западной Сибири - регионе с развитой нефтегазовой инфраструктурой.

**Район исследований**

Для изучения формирования субаэральных таликов выбран участок в 30 км к северо-востоку от г. Новый Уренгой, обеспеченный архивными данными ИКЗ ТюмНЦ СО РАН с 1975 г., включая материалы инженерно-геокриологической съемки и мониторинга (рис. 1).

Район работ расположен на границе умеренного и субарктического поясов. Среднегодовая температура воздуха (1991–2020 гг.) составляет -6.4 °С, средняя температура января -24.8 °С, июля 15.3 °С; продолжительность периода с отрицательными температурами - около 280 суток. С 1998 г. отмечается ускорение темпов потепления с 0.06 до 0.11 °С/год. Мощность снежного покрова составляет 0.5–0.7 м. Судя по увеличению (1,2 мм в год) суммы выпадающих за холодное время осадков высота снежного покрова должна увеличиваться незначительно. На изучаемой территории выделено 10 природных комплексов ранга урочищ (см. условные обозначения к Рис. 1), с учетом возможных их сочетаний - 14 урочищ (фрагмент карты). На поверхности равнин выделено 3 типа урочищ редин и редколесий, в долинах рек, на болотах и буграх по 1 урочищу, на торфяниках - 2 тундровых урочищ – 2.

Исследуемая территория расположена в пределах IV озерно-аллювиальной равнины (абс. отм. 50–65 м), расчленённой левым притоком II порядка р. Пур с глубиной вреза до 5 м. Озерно-аллювиальные отложения (пески, супеси, суглинки) залегают на эродированной поверхности морских отложений салехардского возраста и перекрыты торфом мощностью до 1,5 м.

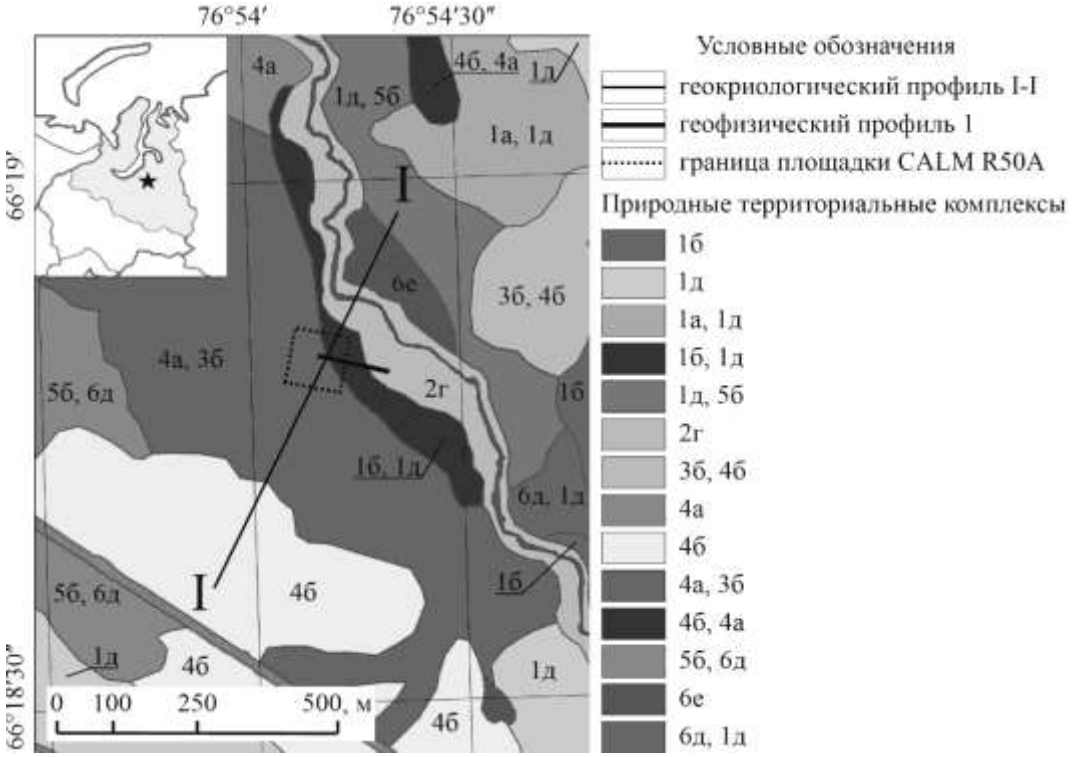



Рис. 1. Размещение объектов актуальной наблюдательной сети на фрагменте ландшафтной карты изучаемой территории. ПТК (ранга урочищ): редины и редколесья на равнинах: 1а - дренированные лишайниковые редколесные леса, 1б –дренированные лишайниковые редины, 1д –слабодренированные мохово-лишайниковые редины; долины малых рек: 2 г - с кустарниками, фрагментами болот и торфяников; болотные урочища: 3б – травяно-моховые; торфяники: 4а - низкие лишайниковые, 4б – мелкобугристые мохово-лишайниковые с мочажинами; бугры и гряды пучения: 5б – минеральные с пятнами-медальонами и отдельными деревьями; тундровые урочища: 6д – плоские слабодренированные мохово-лишайниковые с мочажинами, 6е – холмистые мелкокочковатые дренированные мохово-лишайниковые.

**Обсуждение результатов**

На наблюдательной площадке размером 100×100 м, организованной, в пределах ПТК торфяников (4а), болот (3б) и редин (1б, 1д), в 2008–2022 гг. в рамках международной программы CALM [7] проводился мониторинг глубины сезонного протаивания. Мониторинг выполнялся на ландшафтной основе, для этого Н.Г. Украинцевой в 2008 г. [8] была составлена ландшафтная карта площадки в

ранге фаций. На карте было выделено 9 фаций: одна фация на безлесных участках, две в лиственничных рединах, четыре фации на торфяниках, и по одной фации в ложбинах и логах.

Анализ архивных и новых полевых данных выявил устойчивую тенденцию роста мощности сезонноталого слоя (СТС) на всей площадке в 2008–2025 гг. Во всех 4 фациях торфяников протаивание увеличилось (местами вдвое) до 0,83–0,85 м при мощности органогенного горизонта >0,4 м. В остальных 5 фациях кровля ММП погрузилась ниже уровня сезонного промерзания, сформировались надмерзлотные субаэральные талики дождевого-радиационного типа по классификации Н.Н. Романовского [9], занимающие 33,3% площади (против 14,6% в 2008 г.) при мощности торфа 0,05–0,3 м; здесь инфильтрация осадков усиливает протаивание деятельного слоя, представленного песками.

Для оценки динамики таликов использованы данные измерения мощности СТС на геокриологическом профиле I-I, длинной 730 м, размеченном в 2023 г. (рис. 2). Этот профиль проходит вблизи существующих термометрических скважин, пересекает 7 природно-территориальных комплексов (ПТК) по легенде ВСЕГИНГЕО, в ранге урочищ [10].

Мощность СТС, определенная в 1975 г. для шести из них, не отличалась от средних значений, установленных для аналогичных урочищ в ходе инженерно-геологической съемки. Субаэральные талики на месте разреза в 1970-х гг. отсутствовали. Существование узкого гидрогенного талика под руслом реки (в пределах урочища 2г) прямыми наблюдениями не подтверждалось, однако высокая вероятность его существования следовала из общих закономерностей, выявленных при съемке.

В середине 1990-х гг. разовые температурные замеры в скважинах 1/75 и 5/75 выявили субаэральный надмерзлотный талик в прибровочной части террасы под рединой (урочища 1б, 1д, рис. 2). Здесь пески, перекрытые маломощным органогенным слоем, находились в талом состоянии. Плановая конфигурация талика и глубина кровли ММП уточнены в 2025 г. по данным термометрии, геофизических исследований и мониторинга СТС.

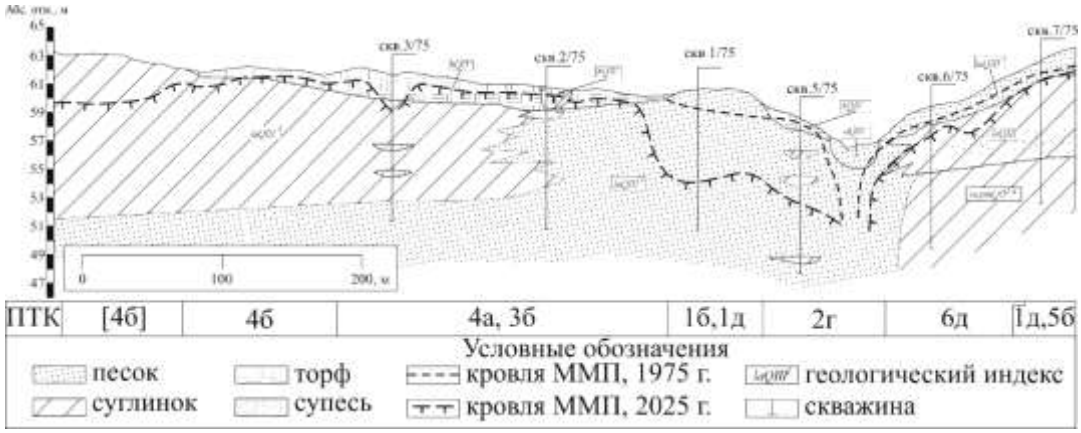



Рис. 2. Геокриологический профиль I-I

Помимо перечисленных таликов в урочищах 2г, 1б, 1д, в 2025 г. установлено начало формирования талика на склоне водораздела (урочище 6д). Склон сложен преимущественно песками, перекрытыми маломощным органогенным слоем и подстилаемыми суглинками. Кровля ММП залегает на глубине 2,0–2,5 м. В настоящее время талик относится к дождевально-радиационному типу.

Талик на пирогенном торфянике (урочище [4б]), выявлен последними исследованиями, сложен суглинками; органогенный слой прерывистый, маломощный (до 0,20 м). По классификации Н.Н. Романовского талик относится к радиационному типу. Его формирование обусловлено особенностями напочвенного покрова. Вероятно, малая мощность торфа связана с пожарами прошлых лет.

Участки, лишенные растительного слоя в урочище [4б], нередко принимают за пятна-медальоны, что не всегда очевидно [11]. Эти участки представляют собой понижения глубиной 0,25–0,35 м, с плановыми размерами от 0,5 до 2,5 м. Они имеют сложную изометричную форму, расположены хаотично. Центральная часть дна понижений иногда покрыта разреженным напочвенным покровом, но чаще маломощным (первые миллиметры) слоем органики; по краям видны следы выдавливания (или вымывания) светлого минерального грунта. Под кочками у границ с понижениями обнаружены узкие субгоризонтальные пустоты - щели (протяженностью около 0,15 м), через которые, предположительно, происходит поступление минерального материала. Грунт в понижениях

находится в тиксотропном состоянии. В холодный период здесь накапливается снег, в тёплый - при затяжных дождях часто застаивается вода.

В 2025 г. на торфяниках и болотах (4б, 4а, 3б) с мощностью органогенного слоя более 0,4 м глубина протаивания составляла ~0,8 м. В этих урочищах СТС сложен торфом, мощность которого исключает условия для формирования субаэральных таликов. На профиле I–I протяжённостью 730 м выявленные талики занимают 53 % его длины.

Для анализа температурного режима пород в 2025 г. использованы данные скважины 1/75, на основе которых построен график термоизоплет. Выбор скважины обусловлен наличием высокоточной измерительной аппаратуры (логгер и термокоса с шагом датчиков 1 м), а также наиболее длительным и непрерывным рядом наблюдений с 2016 г.

По данным анализа графика термоизоплет за период август 2016 - август 2025 гг. (рис. 3) выявлена устойчивая тенденция повышения температуры в слое годовых теплооборотов. Кровля ММП опускается со скоростью ~0,22 м/год. Если до зимы 2020–2021 гг. в экстремально холодные периоды возможно было смыкание кровли ММП с подошвой СТС, то после этого сезона сформировался стабильный надмерзлотный талик.

В 2025 г. на исследуемом участке выполнены повторные сейсмические исследования методом преломленных поперечных SH-волн, включавшие работы в скважине 1/75 и вдоль профиля I (см. рис. 1). Схема наблюдений модернизирована: профиль 2008 г. продлен и дополнен новыми пунктами возбуждения. Скорость распространения сейсмических волн является показателем состояния пород. В дисперсных мерзлых породах ее изменение напрямую связано с промерзанием, которое кардинально меняет свойства скелета за счет цементации порового пространства льдом, формируя резкий скачок скорости на границе «талая порода – мерзлая порода» [12]. По данным вертикального сейсмопрофилирования (ВСП) в скважине 1/75, резкие скачки скорости фиксировались в 2008 г. на глубине 3 м, в 2018 г. – на 5 м, в 2025 г. – на 6 м (рис. 4а).

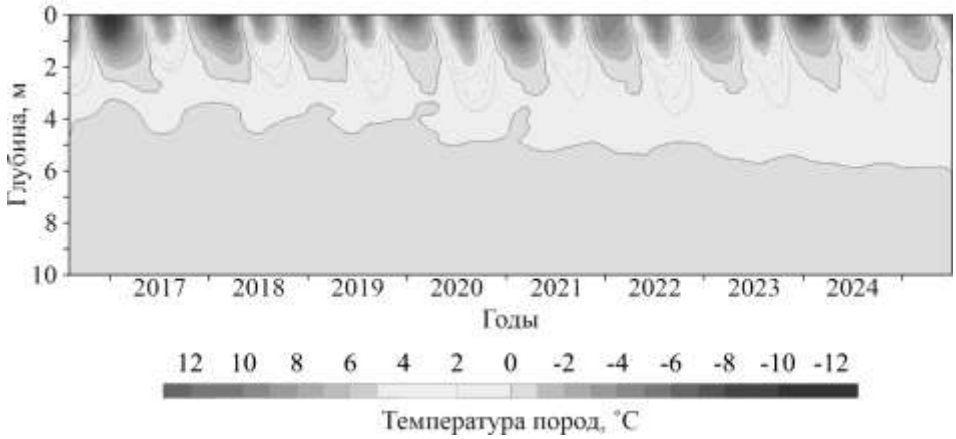



Рис. 3. График термоизоплет пород (скважина 1/75)

По данным термометрических наблюдений в скважине 1/75, распространение положительных температур на глубину более 2,5 м началось с середины 1990-х гг. Несмотря на известную неточность измерений в условиях, близких к 0 °С, это позволяет предполагать, что формирование талика в прибровочной залесенной части террасы началось примерно в это же время. Вертикальное сейсмопрофилирование 2008 г. в той же скважине зафиксировало залегание твердомерзлых пород на глубине ~3 м.

Сравнительный анализ данных ВСП в скважине 1/75 за август 2008, 2018 и 2025 гг. выявил устойчивую тенденцию к опусканию кровли ММП. Верхняя граница ММП последовательно снижалась с 3 м в 2008 г. до 5 м в 2018 г. и 6 м в 2025 г. (рис. 4а). Средняя скорость опускания за весь период наблюдений (2008–2025 гг.) составила ~0,18 м/год. Процесс протекал неравномерно: в интервале 2008–2018 гг. скорость достигала 0,2 м/год, а в 2018–2025 гг. снизилась до 0,14 м/год, что обусловлено затуханием амплитуды температурных колебаний с глубиной. Полученные зависимости согласуются с результатами термометрических наблюдений в данной скважине и с выводами по анализу графика термоизоплет.

Геофизический профиль 1 протяжённостью 110 м (рис. 4б) пересекает три типа ПТК ранга урочищ (1б, 2г, 4а). Наибольшей устойчивостью к климатическим изменениям обладают урочища торфяников, где глубина протаивания в среднем составляет 0,8 м. Урочища лиственничных

редколесий и высокоствольных кустарниковых сообществ, напротив, предрасположены к образованию надмерзлотных таликов. Это обусловлено сочетанием следующих факторов: накоплением снега зимой, снижающим теплопотери, и слабой теплоизоляцией растительного покрова с глубокой инфильтрацией дождевых вод, способствующей аккумуляции тепла в грунтах летом.

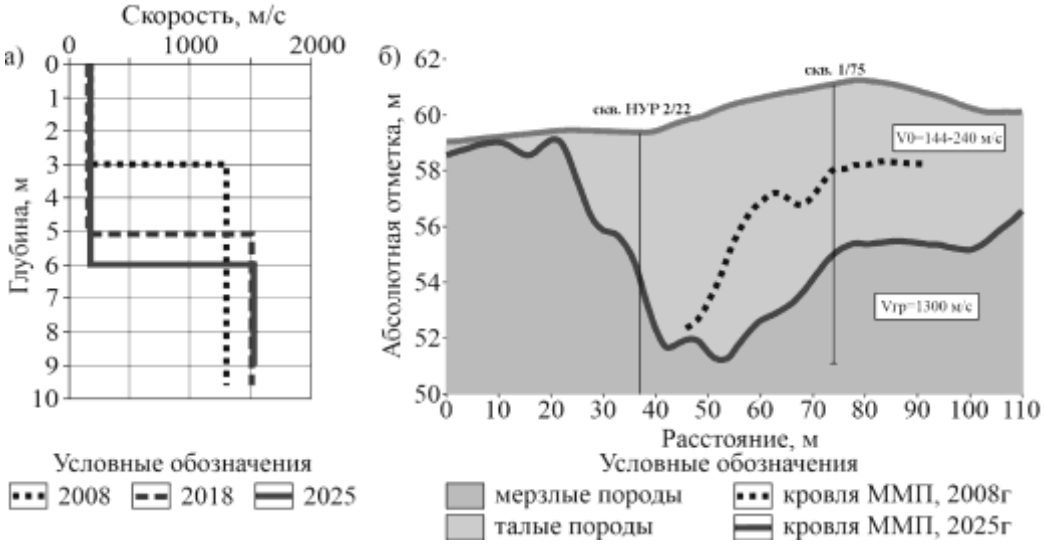



Рис. 4. Результаты сейсмических исследований: а) - распределение скорости поперечных SH-волн в скважине 1/75; б) – положение кровли ММП по данным наземных наблюдений с помощью преломленных поперечных SH-волн в 2008 и 2025 гг.

Сравнительный анализ данных профиля 1 за 2008 и 2025 гг. выявил контрастную пространственную динамику кровли ММП в различных ПТК. На участках кустарниковых сообществ на границе торфяников (урочище 4а) и редколесий (урочище 1б), где в 2008 г. кровля ММП залегала на глубине 7,5–8,0 м, изменения оказались минимальными: средняя скорость опускания за 17 лет составила около 0,03 м/год. Напротив, в ПТК лиственничных редколесий опускание кровли ММП было наиболее значительным - средняя скорость достигла ~0,21 м/год.

По имеющимся данным надмерзлотные субаэральные талики в песчаных отложениях являются водоносными.

**Выводы**

1. В современных климатических условиях в южной лесотундре происходит увеличение площади надмерзлотных субаэральных таликов и формирование новых. Они тяготеют к долинам ручьев и краевым частям террас, особенно к участкам с маломощным органогенным горизонтом
2. В естественных условиях эти талики в пределах деятельного слоя сложены песками, обводнены, а в непосредственной близости от уступов дренированы. Обычно с поверхности эти участки покрыты лиственничным или берёзовым редколесьем, или высокоствольными кустарниками.
3. Глубина залегания кровли ММП в субаэральных таликах составляет 3-8 м.
4. Глубина сезонного протаивания в торфяниках с мощностью органогенного слоя более 0.4 м под влиянием изменения климата меняется мало. При меньшей мощности торфа начинается оттаивание мерзлоты с поверхности.
5. Термометрия в скв. 1/75 (2016–2025) выявила устойчивый рост температур в слое годовых теплооборотов и планомерное опускание кровли ММП со скоростью ~0.22 м/год; после зимы 2020–2021 гг. сформировался стабильный надмерзлотный талик.
6. Данные сейсморазведки согласуются с термометрией: кровля ММП опустилась с ~3 м (2008) до ~5 м (2018) и ~6 м (2025); средняя скорость ~0.18 м/год, с замедлением с ~0.20 м/год (2008–2018) до ~0.14 м/год (2018–2025) из-за затухания тепловых колебаний с глубиной.

Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект № 22-27-00144). «Расширение надмезлотных таликов и изменение инженерно-геокриологических условий (южная криолитозона Западной Сибири)»

***Литература***

1 Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Федоров А.Н. Оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов к современному потеплению климата (на примере Центральной Якутии) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2025. - Т30, №3. С. 376–391

2 Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В., Облогов Г.Е., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Стрелецкая И.Д., Стрелецкий Д.А., Устинова Е.В., Широков Р.С. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики. // Криосфера Земли. - 2020. - Т. XXIV, № 2. - С. 15-30.

3 Дроздов Д.С., Украинцева Н.Г., Царев А.М., Чекрыгина С.Н. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008). // Криосфера Земли. – 2010. - Том XIV, № 1. - С. 22–31.

4 Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Бадина С.В., Великин С.А., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Жданеев О.В., Железняк М.Н., Кузнецов М.Е., Осокин А.Б., Остарков Н.А., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Устинова Е.В., Федоров Р.Ю., Фролов К.Н., Чжан Р.В. Снижение устойчивости инфраструктуры ТЭК России в Арктике как следствие повышения среднегодовой температуры приповерхностного слоя криолитозоны // Вестник РАН. 2022. Т.92. № 4. С. 303-314;

5 Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М., Федоров М.П., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Надмерзлотные субаэральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 1. С. 40-50.

6 Попов С.В., Кашкевич М.П., Романова Н.Е., Малышева А.М., Лебедева Л.С. Выявление субаэральных таликов геофизическими методами в средней части бассейна р. Лена, Центральная Якутия // Записки Горного института. 2025. Т. 274. С. 63-75.

7 Brown, J., Hinkel, K.M., & Nelson, F.E. The circumolar active layer monitoring (CALM) program: Research designs and initial results. // Polar Geography. 2000 V. 24. №3. P. 166–258.

8 Украинцева Н.Г., Дроздов Д.С., Попов К.А., Гравис А.Г., Матышак Г.В. Ландшафтная индикация локальной изменчивости свойств многолетнемерзлых пород (Уренгойское месторождение, Западная Сибирь) // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 4. С. 37-40.

9 Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М: Изд-во Моск. ун-та, 1983. - 231, с.

10 Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции / под ред. Е.С. Мельникова – Новосибирск: Наука, 1983. - 165 с.

11 Гравис А.Г., Устинова Е.В., Пономарева О.Е., Дроздов Д.С., Бердников Н.М., Голубкова Я.А. Основные результаты мониторинга мощности деятельного слоя на площадках CALM Надымского стационара // Вестник МГТУ, 2024. Т.27, №1. С. 39-51

12 Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / Под ред. Горяинова Н.Н. - М.: Недра 1992. - 264 с.

## ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОД

***Гребенкин С.И., Бутаков В.И., Николайчук Э.В., Дугин И.В., Слобожанина О.И., Санников А.О.***
*«Газпромнефть-Заполярье», Тюмень, Россия*

**Введение.** Современные климатические изменения, наиболее заметные в арктических и субарктических регионах [1,2], вызывают интенсивное повышение температуры многолетнемёрзлых пород и активизацию криогенных процессов и явлений. Одновременно с этим рост промышленной активности в северных широтах приводит к увеличению антропогенного воздействия на хрупкие экосистемы. В этих условиях особое значение приобретают комплексный мониторинг и прогноз, включающие оценку состояния криолитозоны и анализ влияний инженерной деятельности.

В зависимости от масштаба проводимых исследований, существуют различные прогнозные инструменты. Использование космических данных позволяет получать сплошные данные по изменению теплового баланса поверхности в масштабе всей Земли, однако глобальные модели не позволяют использовать данные о детальном строении ММП, что отражается на значительной погрешности таких прогнозов. В региональном и локальном же масштабах созданы комплекты карт, основанные на материалах геокриологичекой съемки и инженерных изысканий.

Современные возможности по хранению и обработке информации позволяют в рамках одного проекта собирать фактические данные разного формата из разных источников, проводить их комплексную обработку и публикацию. Учитывая, накопленный научный мировой опыт [3,4], авторами предлагается комбинировать методы использующиеся для глобальных прогнозов с классическими прогнозами, основанными на данных инженерных изысканий.

Целью данного проекта является разработка инструмента мониторинга и прогноза температурного режима горных пород и развития экзогенных процессов в районах месторождений Ямала.

**Материалы и методы.** Основными инструментами проекта являются средства цифровизации и обработки данных (Офисные пакеты, средства управления базами данных (БД)), а также программный комплекс QGIS со специально разработанными модулями расчета температурного режима грунтов для обработки и представления геопространственных данных.

Исходными данными являются данные инжерных изысканий, ретроспективные данные температуры поверхности, снегонакопления и др на основе данных метеостанций и данных космической съемки.

Алгоритм создания геоинформационной модели включает следующие этапы:

1. Создание инженерно-геокриологической БД. Сбор, систематизация и анализ текстовых, табличных и графических данных ИГИ района, включающей температуру, строение, состав и свойства верхней части разреза ММП;
2. Приведение к единой дате данных термометрии численным методом. С помощью специализированного программного обеспечения проведен расчет БД по неявной схеме методом конечных элементов к стартовой дате модели 01.12.2025 г.
3. Проведение районирования территории с использованием матричной схемы. Анализ ландшафтных условий региона, разработка алгоритма последовательной генерализации инженерно-геологических элементов, Построение и анализ геологических разрезов.
4. Формирование БД модели. Алгоритм присваивания элементам модели свойств достаточных для проведения теплофизического прогноза численными методами.
5. Верификация ИГМ на архивных данных. Сопоставление архивных и модельных данных полученных на одной территории в разный период времени
6. Прогнозирование температурного режима для каждого элемента матричной классификации территории на основе уточненных климатических сценариев для заданного региона.
7. Анализ рисков для новых и существующих объектов региона

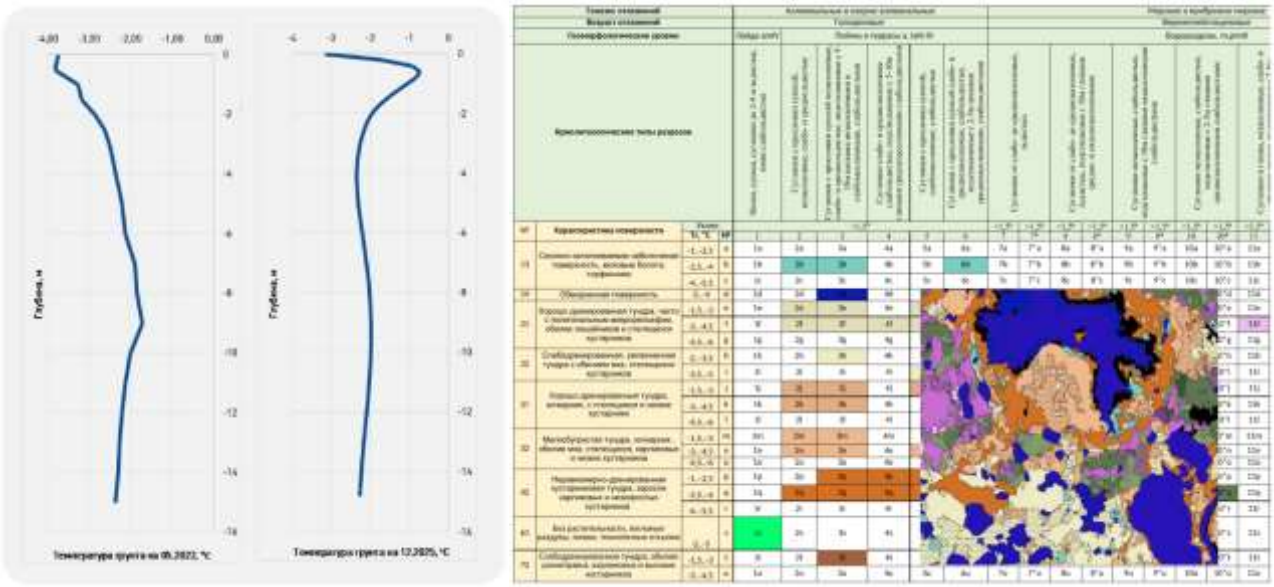
В качестве пилотного участка выбрана территория западного Ямала, характеризующаяся сложными геокриологическими условиями, активно реагирующими на изменения климата. Помимо этого, по данному региону опубликованы многочисленные материалы, которые позволят верифицировать создаваемую модель и провести анализ изменения условий за последние 40 лет.

**Результаты.** База фактического материала исследования сформирована на основе материалов полевых и лабораторных исследований территории Западного Ямала за период 2020–2025 гг., включает температуру, строение, состав и свойства более 3000 скважин.

На этапе создания БД проведено заполнение пропущенных значений физических характеристик на основе средних значений по ИГЭ и исключены некорректные значения – опечатки и значения показателей за диапазонами возможных. Значения теплофизических характеристик рассчитаны по формулам [СП 25.13330.2020]. Часть термометрических эпюр была исключена (5 %) как сомнительные.

Поскольку фактический материал содержит термометрию за период времени, включая разные сезоны, разработано специализированное программное обеспечение для расчета уравнения теплопроводности по неявной схеме методом конечных элементов [РСН 67-87] для приведения температур к стартовой дате модели 01.12.2025 г (рис.1а).

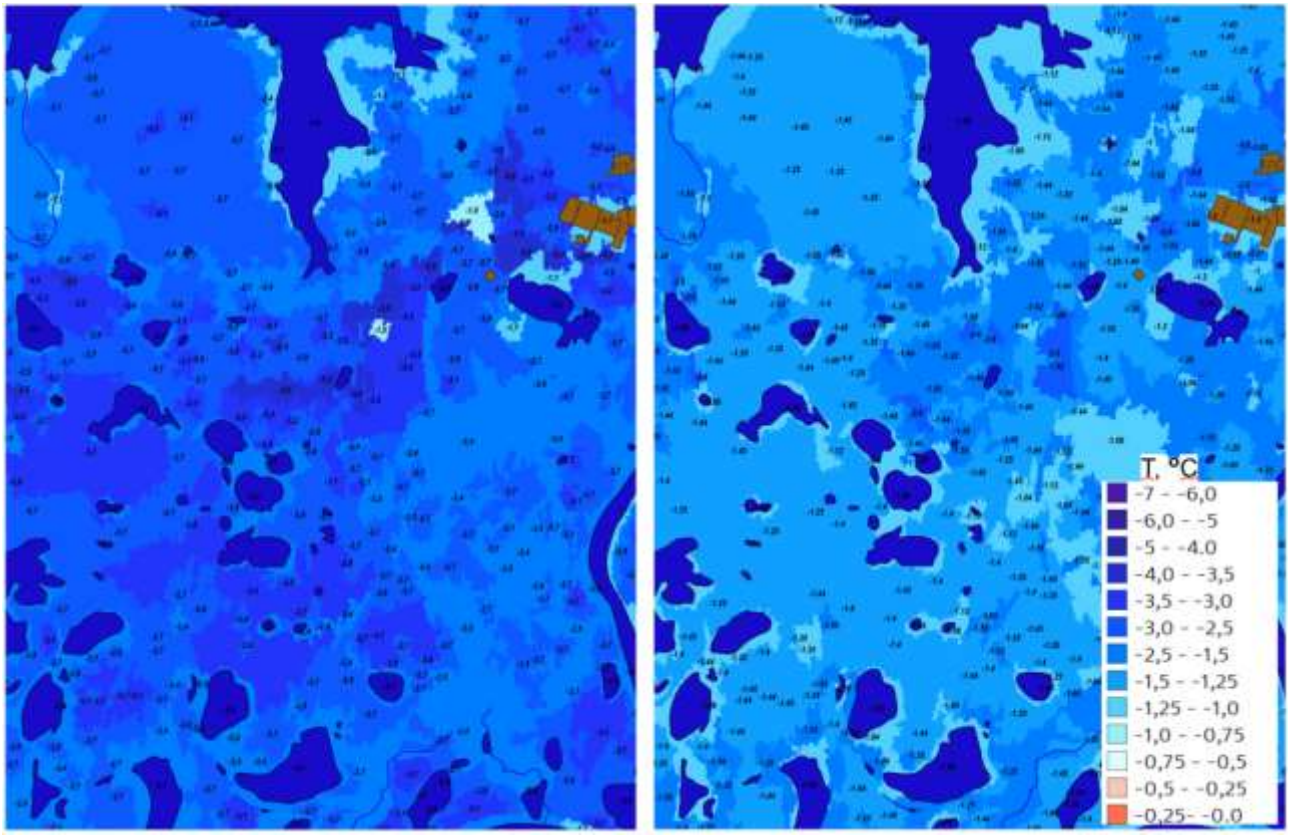
Чтобы оценить геокриологические условия региона проведено матричное природное районирование территории (рис.1б), где классификационными признаками явля-ются: геолого-генетические свойства грунтов, геоморфологический уровень, уклон поверхности, мезо- и микрорельеф, дренированность, растительность. Выде-ленные на основе перечисленных признаков типы природных микрорайонов являются комплексными ландшафтными индикаторами геокриологических условий. Внешний облик природных микрорайонов дает возможность судить о распространении многолетнемерзлых пород, их составе, льдистости, засоленности среднегодовой температуре.



а) б)

Рис. 1. Приведение температурных кривых к одной дате (а) и матричная классификация геокриологических условий с фрагментом модели (б)

В результате проведенного районирования было получено 83 матричных элемента для последующего прогнозного моделирования. На 2025 год (рис.2а) среднегодовая температура грунтов выбранного участка составила -2,9°С. Более высокие температуры характерны для пойменных территорий, где среднегодовые значения могут достигать -1°С (рис.2а), что связано с регулярными подтоплениями территории паводковыми водами и повышенным снегонакоплением на участках с разнотравьем. Низкие температуры – до -4 °С (рис.2а) характерны для водораздельных поверхностей, хорошо дренированных в летний период.



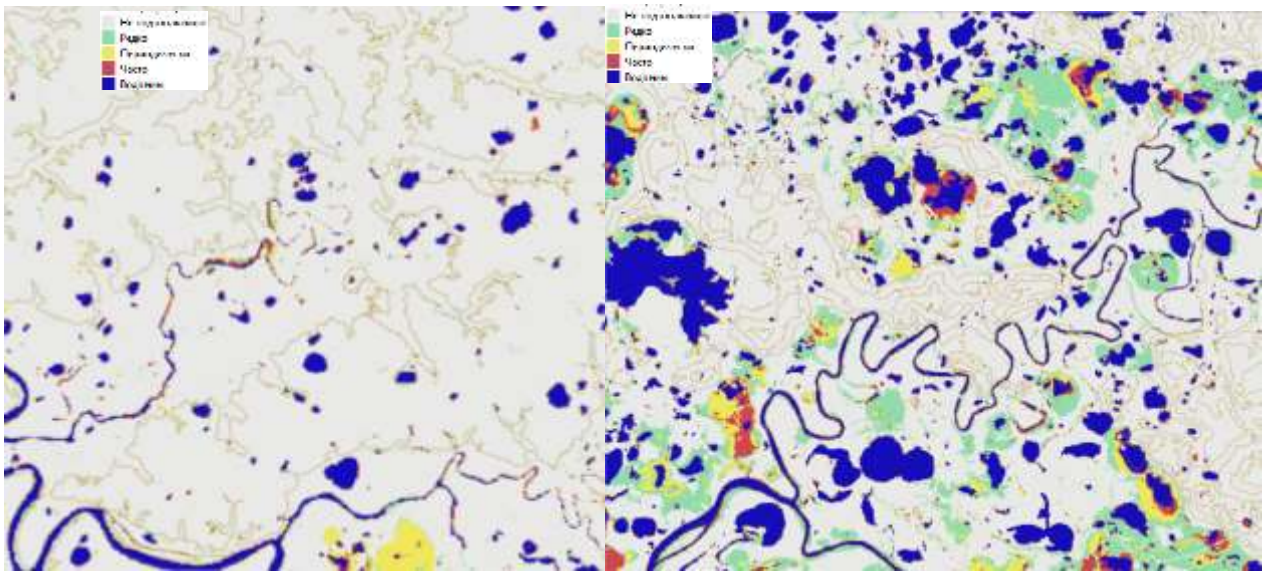

а) б)

Рис. 2. Температура грунтов на глубине 15 м на 2025 год (а) и 2050 (б)

Прогнозирование температурного режима до 2050 года проводилось с учетом температурного тренда температуры воздуха 0,06°С/г. Наибольшие изменения температуры получены для водораздельных поверхностей – где изменения составят до 2°С. На пойменных территориях среднегодовые температуры грунтов на 15 м составят -1,5 °С. При этом наблюдается выравнивание температур на водораздельных и пойменных территориях.

Проведенный прогноз является первым элементом системы прогнозирования. На следующих этапах развития модели будет осуществлен прогноз температурного режима на основе нескольких климатических сценариев.

На первом этапе оценки геокриологических условий также была проведена оценка сезонных подтоплений территории на основе анализа космоснимков в период 2016–2025 гг. в паводковый и меженный периоды (рис. 3).



а) б)

Рис. 3. Частота подтопления Северного (А) и Южного (Б) участков.

Исследование охватывает два участка в пределах Западного Ямала (Северный и Южный), отличающиеся соотношением водораздельных и пойменных территорий. На северном участке распределение водораздельной и пойменной территорий примерно одинаково, тогда как на южном участке только треть территории занимают водораздельные поверхности.

Выделение водных объектов осуществлено с использованием спектрального индекса NDWI (нормализованного водного индекса), расчитанного по зеленому и инфракрасному спектрам [4]. С учётом разрешения исходных снимков проанализированы озера площадью более 5000 м² [5, 6].

По частоте подтопления были выделены не подтопляемые территории, которые не затапливались в исследуемый период времени, редко подтопляемые – затапливались 1–2 раза за 10 лет, периодически подтопляемые – 3–4 раза за 10 лет, часто подтопляемые – более 5 раз за последние 10 лет, также на рисунке отображены границы водоемов для сравнения обводненных территорий в паводковый и меженный периоды.

Анализ территории в паводковый период показал, что Северный участок менее подвержен затоплению. Это связано с особенностями ландшафтных условий – территория находится, преимущественно на высокой водораздельной поверхности на абсолютных отметках 25–35 м (рис. 3а). Паводковые воды на данном участке хорошо дренируются развитой овражной сетью.

Южный участок подвержен площадному затоплению (рис. 3б), поскольку находится в пределах объединённой поймы рек Се-Яха и Надуяха с абсолютными отметками от 0 до 7 м, а водораздельные поверхности с пластовыми льдами термоденудированы — отметки редко достигают 30 м. Активная термоденудация Южного участка связана с современными ладшафтно-климатическими условиями [7, 8], а также активной неотектоникой данного района.

**Выводы.** В ходе проведенного исследования были разработаны и апробированы комплексные методические подходы к созданию геоинформационной модели многолетнемерзлых пород для прогнозирования их температурного состояния численными методами.

Методологическая основа исследования включает алгоритм сбора, систематизации и анализа инженерно-геокриологических данных, который предусматривает обработку текстовых, табличных и

графических материалов. Разработана методика статистической обработки и укрупнения инженерно-геологических элементов, а также подход к построению геологических разрезов.

База фактического материала исследования сформирована на основе материалов полевых и лабораторных исследований территории Западного Ямала за период 2020–2025 гг., включает температуру, строение, состав и свойства более 3 000 термометрических скважин.

В ходе работы была выполнена подготовка базы данных для теплотехнических расчетов, проведен прогноз численными методами более 1 500 инженерно-геологических скважин. Расчеты прошли верификацию на сертифицированных программных комплексах, что подтвердило их достоверность.

Проведено геокриологическое районирование территории с использованием матричной схемы, позволившей выявить зависимости между параметрами рельефа, ландшафтов и геологической среды.

На основе полученных данных были установлены закономерности для интерполяции и экстраполяции инженерно-геокриологических условий на территориях с недостаточной степенью изученности. В результате сформирована модельная база данных с характеристиками, необходимыми для проведения теплотехнического прогноза численными методами, на основе которой создана динамическая геоинформационная модель мерзлотных условий.

Проведен пилотный расчет температур грунтов до глубины 20 м за период 2025-2050 год с использованием линейного тренда температур воздуха 0,06°С/г.

Выполнен анализ изменения площадных и количественных характеристик заозеренности территории Западного Ямала по космическим снимкам за период 2016–2025 гг. и обнаружены корреляции с ретроспективными параметрами климатической модели для двух участков, различающихся соотношением геоморфологических элементов.

Практическая значимость разработанных подходов заключается в их универсальности применения при планировании деятельности в криолитозоне. Они могут эффективно использоваться при проведении инженерных изысканий для разработки проектной документации, выполнении теплотехнического прогноза температур грунтов на этапе проектирования, а также в рамках геотехнического мониторинга на стадии эксплуатации объектов.

***Литература***

1 Мониторинг вечной мерзлоты. М.: Академический проект, 2024, 463с.

2 Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Росгидромет, Москва, 2025, 104 стр.

3 Дроздов Д.С. Оценка достоверности ландшафтной индикации инженерно-геокриологических условий при переходе от крупного масштаба к среднему при региональных работах в Западной Сибири / Криосфера Земли, 1997, том 1, № 4, с. 35-41

4 Ривкин Ф. М., Иванова Н. В. Геоинформационное моделирование инженерно-геокриологических условий для сооружения систем магистральных трубопроводов //Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – №. 9. – С. 35-43.

5 Li W. et al. Lake changes and their driving factors in circum-arctic permafrost regions from 1990 to 2022 //Ecological Indicators. – 2024. – Т. 163. – С. 112066.

6 Кравцова, В. И. Исследование динамики площади и количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам / В. И. Кравцова, Т. В. Родионова // Криосфера Земли. – 2016. – Т. 20, № 1. – С. 81-89. – EDN VPQFAH.

7 Urbański J. A. Monitoring and classification of high Arctic lakes in the Svalbard Islands using remote sensing //International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2022. – Т. 112. – С. 102911

8 Баду Ю.Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи – М.: Научный мир, 2018. – 232 с.

9 Хомутов А.В., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А. Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг. Проблемы Арктики и Антарктики. 2024;70(2):222-237. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-222-23

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ В ПРОЦЕССЕ ОТТАИВАНИЯ

***Д.В. Григорьев***

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ им. М.В. Ломоносова), геологический факультет, кафедра геокриологии, Москва, Россия*

Применение геофизических методов в геокриологии позволяет получить комплекс информативных данных о строении, состоянии и динамике развития мерзлых толщ. Многими научными группами исследовались зависимости изменения электрических и акустических свойств мерзлых пород в различных температурных диапазонах [2;6]. Для определения значений УЭС в лабораторных условиях используют метод вертикального электрического зондирования [4]. Акустические свойства грунтов в лабораторных условиях определяют ультразвуковым методом просвечивания, посредством применения которого измеряются скорости распространения упругих волн в образцах [1; 5]. Для подтверждения достоверности получаемых результатов производится определение фазового состава влаги посредством измерения содержания влажности за счет незамерзшей воды контактным и криоскопическим методами [3; 7].

Для измерения электрических и акустических свойств мерзлых грунтов в процессе оттаивания была разработана специальная лабораторная установка, учитывающая специфику таких исследований. Ее применение позволяет детально прослеживать закономерности изменения этих свойств при температурах, близких к 0 °С. Ранее эксперименты по определению удельного электрического сопротивления и скоростей распространения продольных волн проводились с температурным шагом не менее 0,5 °С, тогда как диапазон от -2 до +1 °С оставался изучен недостаточно. В связи с этим предложена схема, при которой оттаивание образца осуществляется вне морозильной камеры, в условиях регулируемого притока тепла, при одновременном измерении его акустических и электрических характеристик. Предварительно замороженный образец помещается в теплоизолированный контейнер, крышка которого оснащена резистором-нагревателем и датчиком температуры. Контроль температуры внутри образца обеспечивается четырьмя термопарами. Для измерения скоростей прохождения продольных волн на торцевых гранях установки размещены излучатель и приемник, встроенные в верхнюю и нижнюю крышки контейнера.

В качестве регистрирующей аппаратуры использовался 16-канальный цифро-аналоговый преобразователь компании ZetLab. В 6 каналов АЦП устанавливаются температурные датчики типа “термопара”, 4 из которых находились в образце грунта, 2 оставшихся – на крышке и подставке установки. Аналогичным образом устанавливались два питающих и два принимающих электрода, необходимые для проведения испытаний по определению удельного электрического сопротивления, а также два источника и два приемника, которые необходимы для применения ультразвукового метода просвечивания образцов (рис. 1).

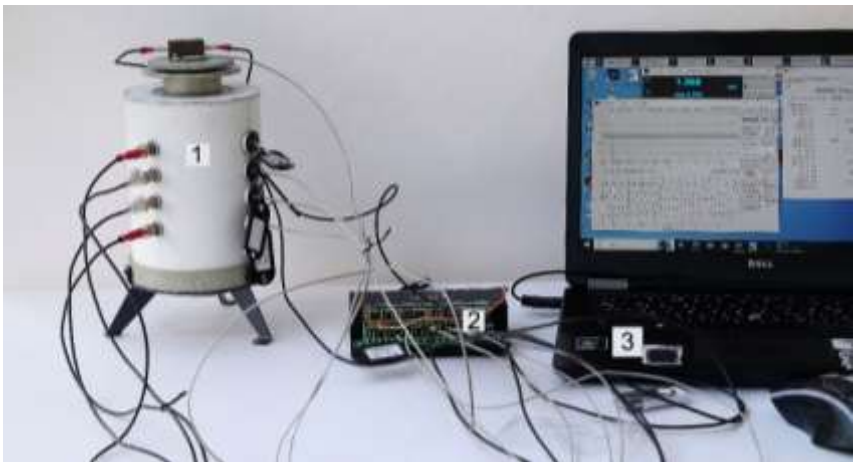



Рис. 1. Общий вид установки: 1 – контейнер грунта; 2 – регистрирующее устройство ZETLAB211; 3 – персональный компьютер с программным обеспечением SCAD система ZETVIEW

Результаты измерений, выполненных в цикле оттаивания мерзлого образца представлены в виде графиков изменения скоростей прохождения продольных волн (Vp) и значений удельного электрического сопротивления (УЭС) супесей различной влажности при отрицательных температурах (рис. 2). Испытания проводились на образцах супесей песчанистых незасоленных различной влажности. На каждом образце при заданной температуре было выполнено по 7 измерений значений изучаемых характеристик

Зависимости изменения скоростей прохождения продольных волн через образец от температуры коррелируются с результатами экспериментов по определению значений сопротивлений. На них аналогичным образом можно выделить 4 описанных выше участка. Однако, следует отметить, что

изменения значений скоростей продольных волн менее выражены, чем на графиках изменения значений УЭС от температуры. Так, в температурном диапазоне -0,5 – 0 °С значения сопротивлений супеси с влажностью 25% изменяются в 4,5 раза, в то время как значения скоростей продольных изменяются в 1,2 раза.

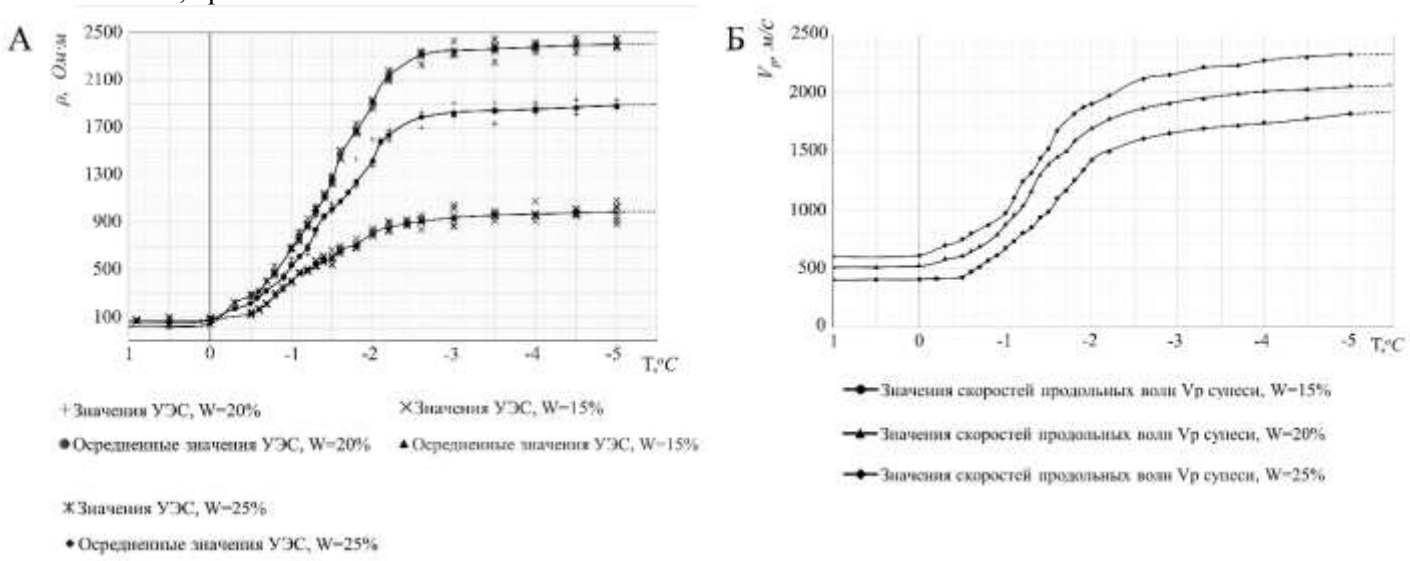



Рис. 2. А) зависимость изменения значений удельного электрического сопротивления (ρ) супесей различной влажности от температуры (Т); Б) Результаты измерений скоростей продольных волн (Vp) супесей различной влажности от температуры (Т)

Анализируя полученные результаты, можно говорить о том, что переход влаги при оттаивании грунта из твердого состояние в жидкое сопровождается снижением значений УЭС и скоростей прохождения продольных волн. С ростом влажности талых образцов возрастают скорости прохождения продольных волн, в то время как для значений сопротивлений наблюдается обратная зависимость. Важной особенностей полученных результатов является то, что переход температуры образцов в положительную область не всегда сопровождается резким снижением значений изучаемых характеристик.

Применение геофизических методов в значительной степени способствует изучению состава, строения, свойств и динамики развития мерзлых толщ. Дальнейшая работа в этой области и составление соответствующих корреляций способны во многом упростить и ускорить процесс инженерно-геокриологических изысканий.

***Литература***

1. Вознесенский А. С, Куткин Я. О., Красилов М.Н. Взаимосвязь акустической добротности с прочностными свойствами известняков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2015. — № 30. — С. 30–39.

2. Воронков О.К. Инженерная сейсмика в криолитозоне // Изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2009. 401 с.

3. Ершов Э. Д., Мотенко Р. Г., Комаров И. А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств и фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 1999. — № 3. — С. 232–242.

4. Зыков Ю. Д. Геофизические методы исследования криолитозоны: Учебник.-М.: Изд-во МГУ, 2007. -272 с.

5. Зыков Ю.Д., Червинская О.П. Акустические свойства льдистых грунтов и льда. М.: Наука, 1989. 129 с.

6. Кошурников А.В., Котов П.И., Агапкин И.А. Влияние засоленности на акустические и электрические свойства мерзлых грунтов. ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 4. ГЕОЛОГИЯ. 2019;(6):99-106.

7. Мотенко Р.Г., Алексютина Д.М. Теплофизические свойства и фазовый состав влаги мерзлых грунтов ральского берега Байдарацкой губы // Инженерная геология. 2013, №3, с. 36 – 43.

# ПОТОКИ МЕТАНА ИЗ СУБАКВАЛЬНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ И ОТТАИВАЮЩИХ ТОЛЩ В ПРИБРЕЖНО-ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

***М.Н. Григорьев***
*ФГБУН Институт мерзлотоведения СО РАН им П.И. Мельникова, г. Якутск*

В ходе многочисленных буровых работ с морского льда при исследованиях подводной мерзлоты на прибрежном шельфе моря Лаптевых, в морских лагунах, под прибрежными озерами и под руслами проток в дельтах рек весьма часто фиксируются достаточно мощные газопроявления в виде «факелов» метана в разных диапазонах глубин проходки. При этом, они обнаруживаются, как правило, случайно, при прогреве бурового снаряда, для облегчения выхода керна их колонковой трубы, или при пузырьковом бурлении воды в околоскважинном пространстве (рис. 1-4). Возможно, что при специальных исследованиях газовых выбросов из скважин, выявление таких факелов может стать частым явлением.

Рис. 1. Горящий газ, в устье скважины на мелководном шельфе моря Лаптевых (губа Буор-Хая)

Рис. 2. Бурление метана в устье скважины на Омулевой лагуне (Быковский п-ов)

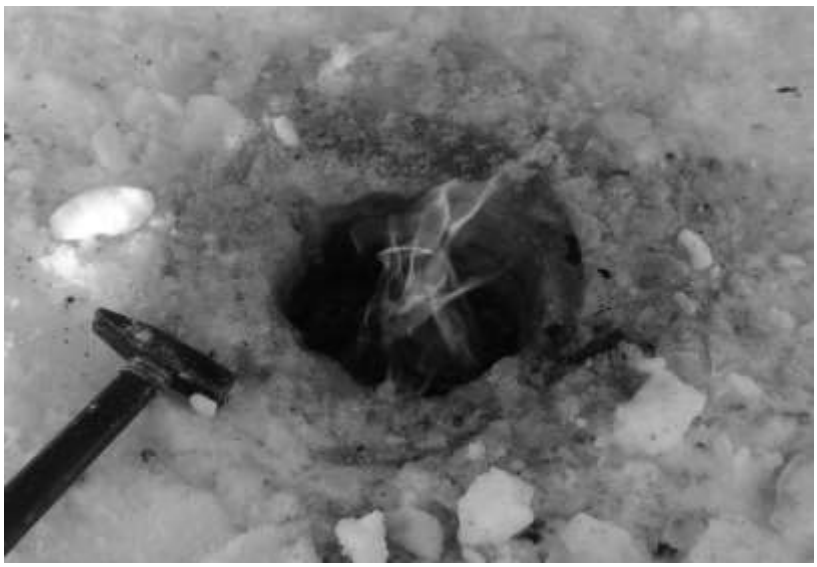


Рис. 3. Горящий газ, в устье скважины на льду Туматской протоки (дельта р. Лены)

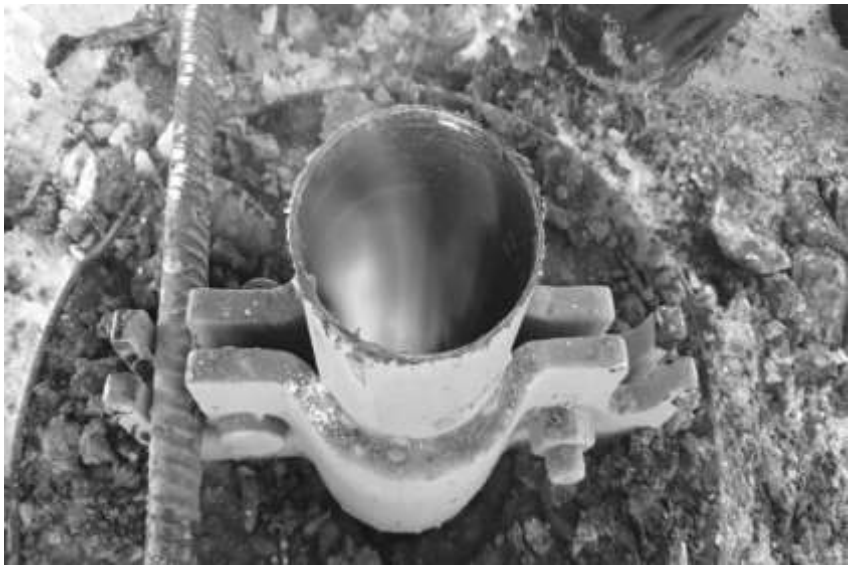


Рис. 4. Горящий газ, в устье скважины на льду прибрежного озера Гольцового (Быковский п-ов)

Довольно продолжительный факел, горящий около получаса, высотой около 30 см, в верхней части имевшего голубой цвет, был зафиксирован в скважине 1Д-2015 (см. рис. 1). Источник газа находился на глубинах проходки в интервале от 13 до 16 метров ниже уровня льда. Анализ проб воздуха в устье скважины показал, что концентрация метана составляла до 45%. Существенным препятствием для быстрого выхода накапливающегося газа в воду и, затем, атмосферу, по-видимому, служат плотные придонные слои суглинков и илов, мощность которых в месте бурения была около 4 м (с 9,5 до 13,5 м).

Обычно такие горящие газовые сипы имеет высоту от 20 до 50 см. Максимальная длительность горения составляет около 30 минут. Анализ проб воздуха из устья скважины показывает, что максимальная концентрация метана в них достигает 30-45%.

При бурении профиля с морского льда в западной части моря Лаптевы (Анабар-Оленекское междуречье, мыс Мамонтов Клык) в составе Российско-германской экспедиции «Лена» были получены данные по составу подводной мерзлоты и скоростям понижения ее кровли (рис. 5). В скважине С-2 в 12 км от берега был установлен выброс метана в течение примерно 50-ти минут.

Видимая высота факела составляла около 30—40 см в первую минуту, затем уменьшилась до 10—20 см. Цвет факела был синим. Отобранный в пластиковые банки газ при последующем вскрытии банки загорался на несколько минут. Распределение солей в керне скважине С-2 показало, что морское засоление проникает до глубины 24 м ниже дна. Распределение температур в этой скважине оказалось почти безградиентным, с некоторым их повышением в нижней части разреза почти до –1

°C. Начиная с глубины 65 м, когда встретились первые прослои пластично-мерзлых глин, в обсаженную буровую колонну снизу стала поступать вода. Еще ниже снова встретились сцементированные ММП (песчано-суглинистые прослои) и поступление воды временно прекращалось. Температура грунта около –1 °C является предельно высокой для существования подводной мерзлоты, особенно в случае наличия глинистых пород или наличия повышенного засоления [1, 2].

Рис. 5. Лагерь санно-тракторного бурового поезда экспедиции на морском льду

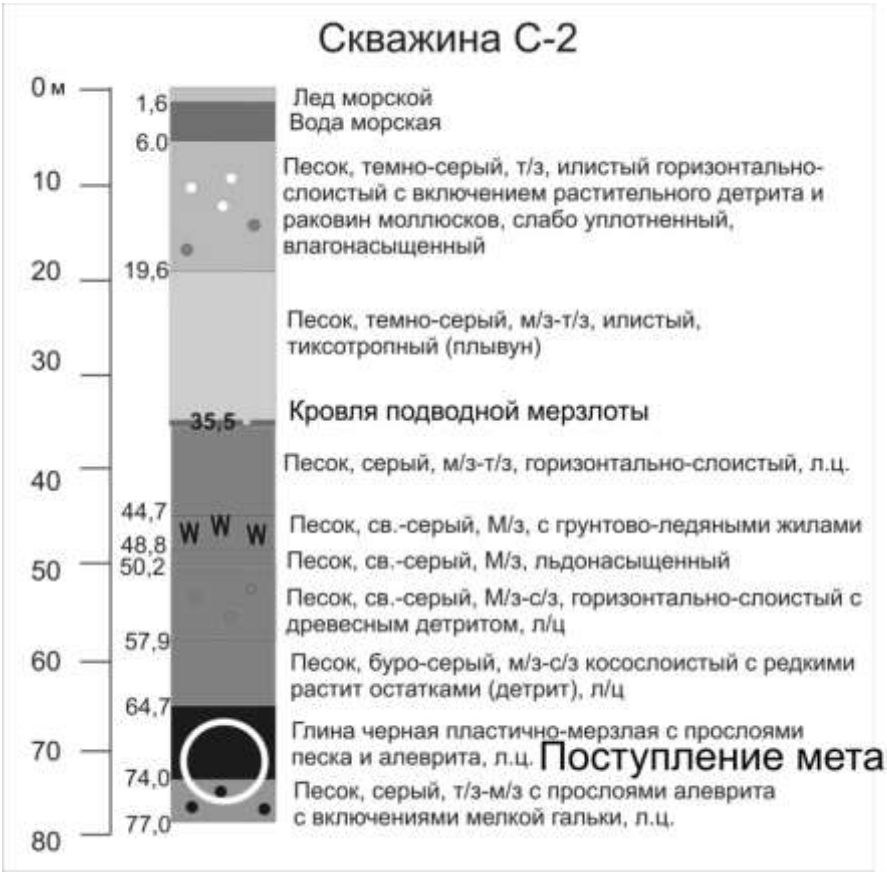



Рис. 6. Скважина С-2. Поступление метана в скважинное пространство из нижней части скважины

Рис. 7. Максимальный объем органического материала (в данном случае древесного детрита) в мерзлом керне скважины С-2 достигает 30 весовых процентов

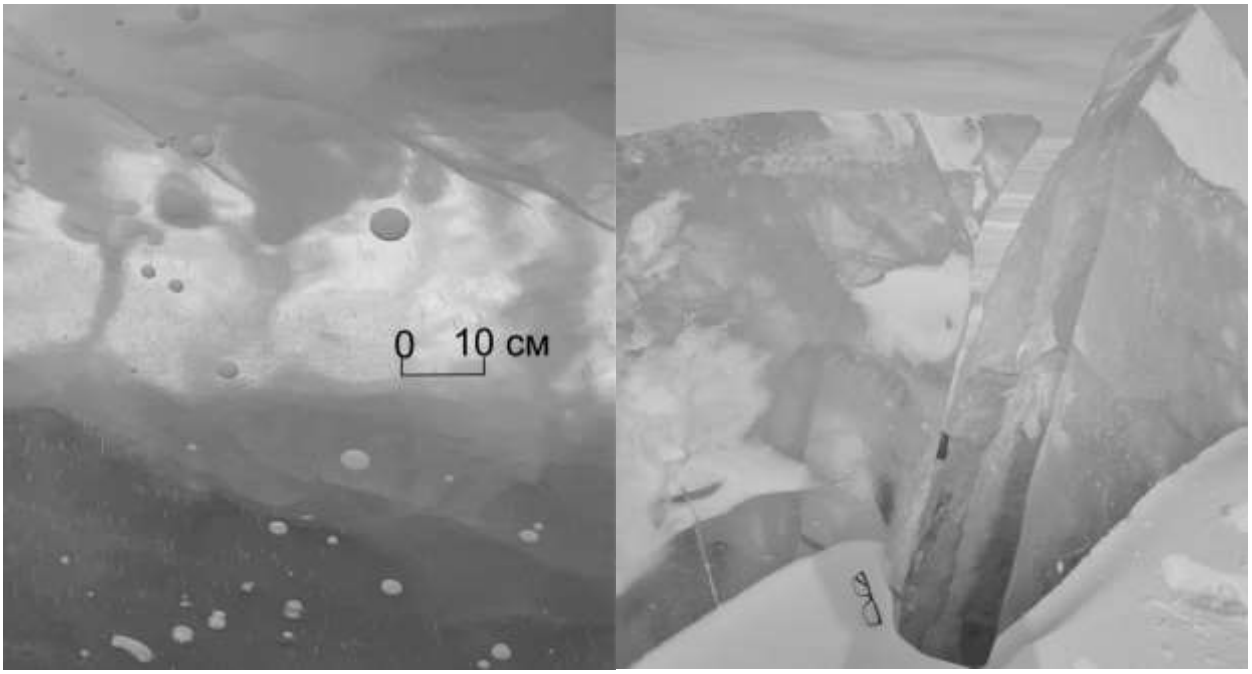



Рис. 8. Газовые включения в массивах льда в приустьевой части устья Сардахской протоки дельты Лены

*Исследование выполнено при поддержке проекта НИОКТР* 126020516709-1 *«* История развития и современная динамика континентальной и шельфовой криолитозоны Сибири и Арктики».

***Литература***

1 Сафронов А.Ф., Шиц Е.Ю., Григорьев М.Н., Семенов М.Е. К проблеме образования газогидратных залежей на шельфе арктических морей Сибири // Геология и геофизика, Т. 51, №1, 2010. – С. 106-112.

2 Overduin P.P., Grigoriev M.N., Junker R., Rachold V., Kunitsky V.V., Bolshiyanov D.Yu., Schirrmeister L. (2007): Subsea permafrost studies in the near-shore zone of the Laptev Sea. In: Reports on Polar and Marine Research. Russian-German cooperation System Laptev Sea: Coast Drilling Campaign 2005: The Expedition COAST 1. Vol. 550. Paul Overduin, ed. Bremerhaven. Germany. P. 1-40.

# КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПО БЕРЕГАМ ОЗЁР В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ПУР-ТАЗОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

***М.М. Данько, А.В. Хомутов***
*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень*

С середины прошлого столетия известна и широко обсуждается активизация криогенных процессов, связанных с вытаиванием разных типов подземных льдов на фоне тренда повышения температуры воздуха [1-3], особенно прослеживающегося в Арктике [4]. Заозёренность на севере Западной Сибири местами превышает 25% [5]. Среди наиболее опасных для динамики озёр северной части Пур-Тазовского междуречья процессов в условиях сохраняющегося тренда потепления в Арктике являются термокарст, термоэрозия и термоабразия берегов, сложенных торфяными отложениями. Эти процессы развиваются при вытаивании повторно-жильных льдов (ПЖЛ) в многолетнемерзлых полигональных торфяниках, широко распространенных в южных тундрах. Полигональный рельеф образуется сетью ПЖЛ мощностью в основном до 5 м [6, 7]. ПЖЛ деградируют в настоящее время под совместным влиянием естественных и антропогенных факторов [8], особенно в южной части сплошной криолитозоны.

В 2021 г. для мониторинга развития полигональных торфяников в зоне взаимодействия торфяник-озеро на севере Пур-Тазовского междуречья заложено несколько площадок мониторинга по берегам озёр и выделены главные факторы влияния на полигональные торфяники, такие как воздействие озёрной воды, распределение снежного покрова и мозаичность растительного покрова. По результатам нескольких лет мониторинга, учитывая данные детальных исследований полигональных торфяников, начатых в 2016 г. [9-12], выявлено, что на фоне современных климатических колебаний основной естественный фактор активизации термоэрозионных и термоабразионных процессов, приводящих к деградации полигонального рельефа по берегам озёр, – волновое воздействие озёрной воды. Воздействие характера снежного и растительного покровов определяется как ландшафтно-геоморфологическими условиями территории исследований, так и изменениями условий на каждой площадке мониторинга [8].

Важное значение для динамики озёр криолитозоны имеет анализ выноса органических [13] и неорганических веществ [14] как в результате углубления сезонноталого слоя вследствие сохраняющегося тренда повышения температуры воздуха, так и при термоабразионно-термоэрозионном разрушении торфяных берегов озёр. Этот процесс важен на участках залегания торфяных залежей, значительно превышающих по мощности глубину сезонного протаивания.

Для комплексного дифференцированного анализа влияния криогенных процессов на гидрохимию озёр изучаемого района необходима основа, полученная в результате картографирования устойчивости полигональных торфяников к изменениям под влиянием естественных факторов с учетом антропогенной нагрузки [15]. Для этого по данным комплексного мониторинга ключевых участков и космическим снимкам, находящимся в свободном доступе (©ESRI World Imagery), для Пур-Тазовского междуречья была проведена детальная инвентаризация всех полигональных торфяников. Все выделенные полигональные торфяники были проанализированы, определены критерии и ранги факторов влияния на них (климатические колебания, влияние озёр и антропогенное воздействие). С помощью инструментария ArcGIS были построены картосхемы дифференциации полигональных торфяников по степени устойчивости к каждому фактору по отдельности и в совокупности и выделены участки с наиболее и наименее стабильными торфяниками в северной части Пур-Тазовского междуречья. В результате были выделены районы, различающиеся по влиянию каждого из анализируемых факторов. Сильное влияние волнового воздействия озёрной воды выделяется в северо-восточной и центральной частях изучаемой территории, а также на северо-западе и юге на локальных участках. При анализе совокупного влияния рассматриваемых факторов количество полигональных торфяников, не устойчивых к внешнему воздействию, увеличивается в сравнении с результатами по каждому фактору влияния в отдельности.

Таким образом, полученная основа в виде карты распространения полигональных торфяников, карты устойчивости полигональных торфяников к изменениям под влиянием естественных факторов с учетом антропогенной нагрузки и картосхем распространения и развития полигональных торфяников под влиянием каждого из трех факторов (климата, озёр, антропогенных объектов) и всех этих факторов в совокупности позволяет выделить участки потенциальных изменений потоков химических элементов в озёрно-болотных системах в результате проявления криогенных процессов по берегам озёр.

Работа выполняется в ИКЗ ТюмНЦ СО РАН в рамках гос. задания Минобрнауки РФ (рег. № 126022618021-5).

***Литература***

1 Воскресенский К.С., Совершаев В.А. Роль экзогенных процессов в динамике арктических побережий. Динамика арктических побережий России. - М.: Издательство Московского университета, 1998. – С. 35-48.

2 Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. - М.: Институт криосферы земли СО РАН, 2007. - 206 с.

3 Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., et al. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // Nature Geoscience. - 2016. – V.9. - №4. - P. 312-318.

4 Переведенцев Ю.П., Васильев А.А., Гурьянов В.В., Мирсаева Н.А., Николаев А.А Тенденции изменения основных климатических показателей на территории России в период 1976–2023 годов // Метеорология и гидрология. - 2025. - №10. - С. 44-62.

5 Ананьева Г.В. Изучение озерности Российской Арктики с использованием ГИС-технологий // Криосфера Земли. - 2000. - Т.4. - №1. - С. 67-73.

6 Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Мощные полигональные торфяники в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири // Криосфера Земли. - 2016. – Т. 20. - №4. - С. 3-15.

7 Кашперюк П.И. Типы и инженерно-геологические особенности многолетнемерзлых торфяных массивов севера Западно-Сибирской плиты: Дис. … канд. геол.-мин. наук. - М., 1985. - 291 с.

8 Данько М.М., Хомутов А.В. Первые результаты мониторинга развития полигонального рельефа в зоне взаимодействия торфяник–озеро на севере Пур-Тазовского междуречья в 2021–2023 гг. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2025. – Т.30. - №1. – С. 49–60.

9 Бабкин Е.М., Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Хайруллин Р.Р., Бабкина Е.А. Изменение рельефа торфяника с вытаивающим полигонально-жильным льдом в северной части Пур-Тазовского междуречья // Проблемы региональной экологии. – 2018. - №4. – С.115–119.

10 Хайруллин Р.Р., Хомутов А.Б., Дворников Ю.А., Бабкин Е.М., Бабкина Е.А., Сощенко Д.Д // Анализ изменения торфяников северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья по дистанционным и наземным данным мониторинга. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т.16. - №4. – С.54–62.

11 Тихонравова Я.В., Слагода Е.А., Рогов В.В., Бутаков В.И., Лупачев А.В, Кузнецова А.О, Симонова Г.В. Гетерогенное строение полигонально-жильных льдов в торфяниках Пур-Тазовского междуречья // Лёд и Снег. – 2020. – Т.60. - №2. – С.225–238.

12 Королева Е.С., Слагода Е.А., Мельников В.П., Бабкина Е.А., Хомутов А.В., Опокина О.Л., Данько М.М., Тихонравова Я.В. Идентификационные признаки переходного и промежуточного слоев в полигональных торфяниках севера Западной Сибири // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т.498. - №2. – С.131–137.

13 Тимофеева М.В., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бочкова С.Д., Кадулин М.С. Вынос углерода из торфяных почв севера Западной Сибири в разных гидрологических условиях // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. - 2024. - Т. 119. - С. 211-241.

14 Куликова М.А., Соромотин А.В. Элементный состав донных отложений термокарстовых озер на севере Западной Сибири (на примере Пур-Тазовского междуречья) // Географический вестник. - 2025. – Т. 75. - № 4. - С. 130–142.

15 Данько М.М., Хомутов А.В., Хайруллин Р.Р. Оценка устойчивости полигональных торфяников при современных климатических колебаниях с учетом антропогенной нагрузки // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2026. – Т.31. - №1. – С. 80-92.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ 3D МОДЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ОСНОВАНИЯ

***И.Н. Дембовский***
*ООО НТЦ «Симмэйкерс», г. Москва*

В ходе проведения геотехнического мониторинга (ГТМ) в области распространения многолетнемерзлых грунтов генерируется большое количество информации, которая не ограничивается только данными измерений, но и включает также результаты лазерного

сканирования, тепловизионной съемки термостабилизаторов, фотографии объектов и др. Весь этот объем информации должен храниться и обрабатываться, а по результатам мониторинга должна быть сформирована отчетная документация. Для предупреждения аварийных ситуаций на объекте необходим механизм обнаружения и своевременного оповещения об отклонении контролируемых параметров от нормативных значений. Поскольку даже в рамках отдельных площадок количество элементов сети ГТМ может достигать десятков тысяч, проведение подобных мероприятий является достаточно трудоемким процессом. Масштабы работ во время проведения мониторинга и объем информации, требующей дальнейшей обработки, приводят к необходимости использования специального программного обеспечения, позволяющего автоматизированно собирать и обрабатывать данные в режиме реального времени.

Для решения этих задачи научно-технический центр «Симмэйкерс», разработчик ПО Frost 3D [1], предлагает новое программное обеспечение Frost.ГТМ [2], учитывающее особенности проведения геотехнического мониторинга на многолетнемерзлых грунтах.

ПО **Frost.ГТМ** позволяет аккумулировать и автоматически обрабатывать данные геотехнического мониторинга и, таким образом, упростить и ускорить выполнение задач для специалистов ГТМ. В случаях определения вероятности отклонения контролируемых параметров от нормативных значений или в случае, когда система зафиксировала факт достижения критических значений, Frost.ГТМ оповещает пользователей системы с помощью уведомлений по удобному каналу связи.

Рис. 1. Визуализация температурного распределения в окрестности резервуарного парка во Frost.ГТМ

Помимо выявления вероятности развития негативных процессов на основании замеров, у специалистов геотехнического мониторинга возникает задача проведения достоверного прогнозирования температурного режима грунтов основания сооружения. Такой прогноз позволит оценить несущую способность грунтов основания и, при необходимости, принять своевременные меры по дополнительной термостабилизации. Для этих целей необходимо использовать программный комплекс Frost 3D, который позволяет создавать трехмерную инженерно-геологическую модель основания сооружения и численно прогнозировать температурное поле на выбранный период времени, рассчитывать осадку грунта при оттаивании и несущую способность свай.

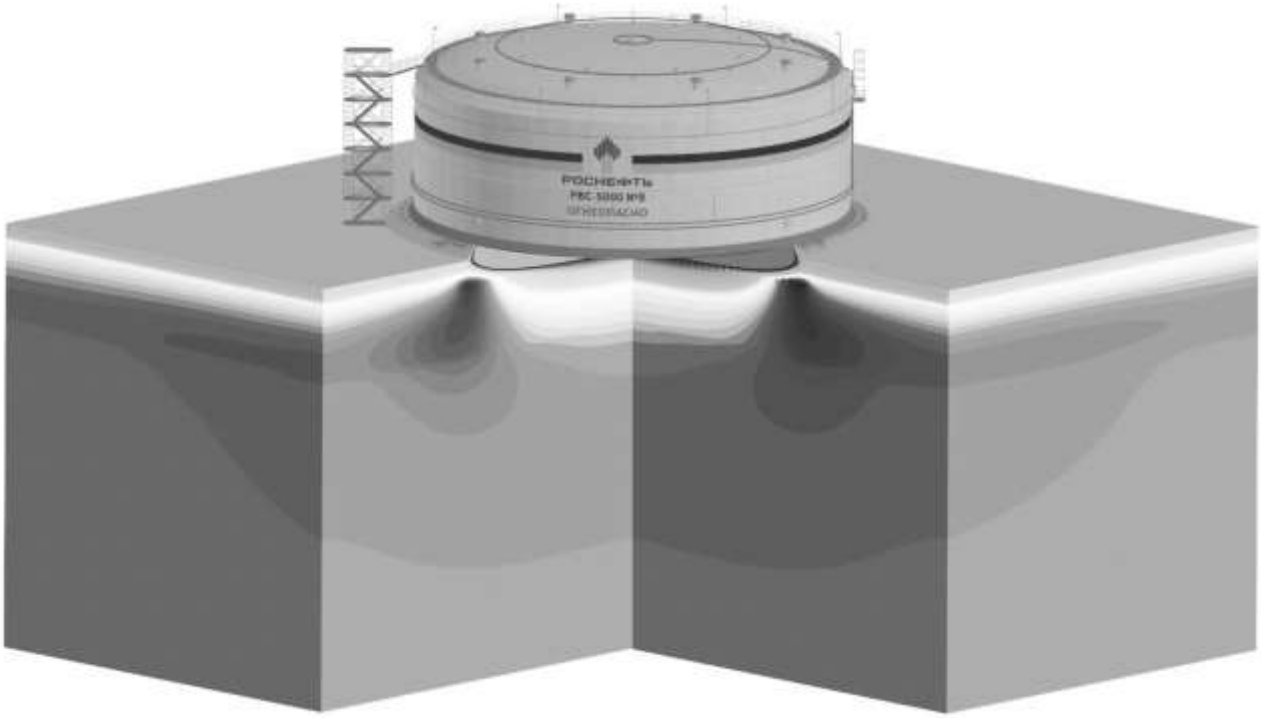


Рис. 2. Визуализация трехмерного температурного распределения в основании резервуара, полученная с помощью численного моделирования во Frost 3D

Созданный во Frost 3D цифровой двойник – это постояннодействующая компьютерная модель грунтов основания инженерного сооружения, верифицированная данными ГТМ, и учитывающая инженерно-геологическое строение, положение строительных и фундаментных конструкций подземной части сооружений, наличие термостабилизирующих устройств.

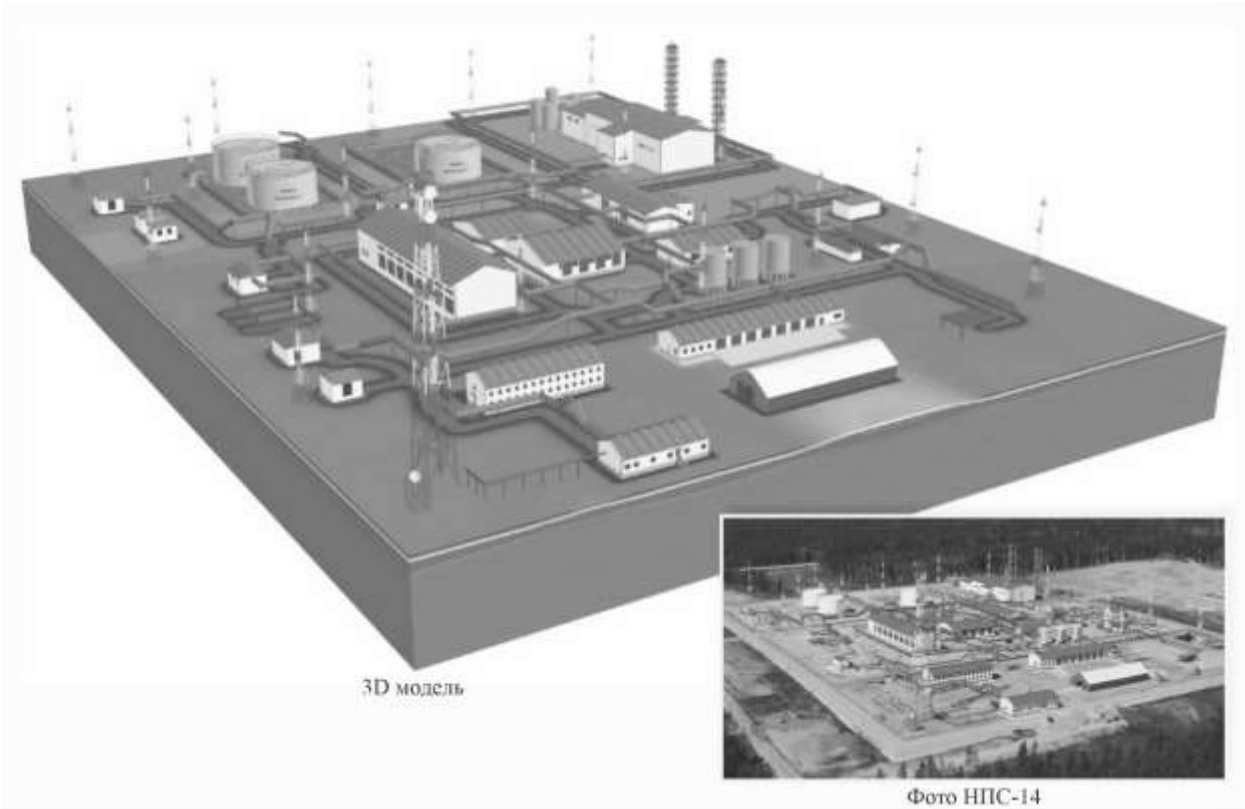



Рис. 3. Цифровой инженерно-геокриологический двойник

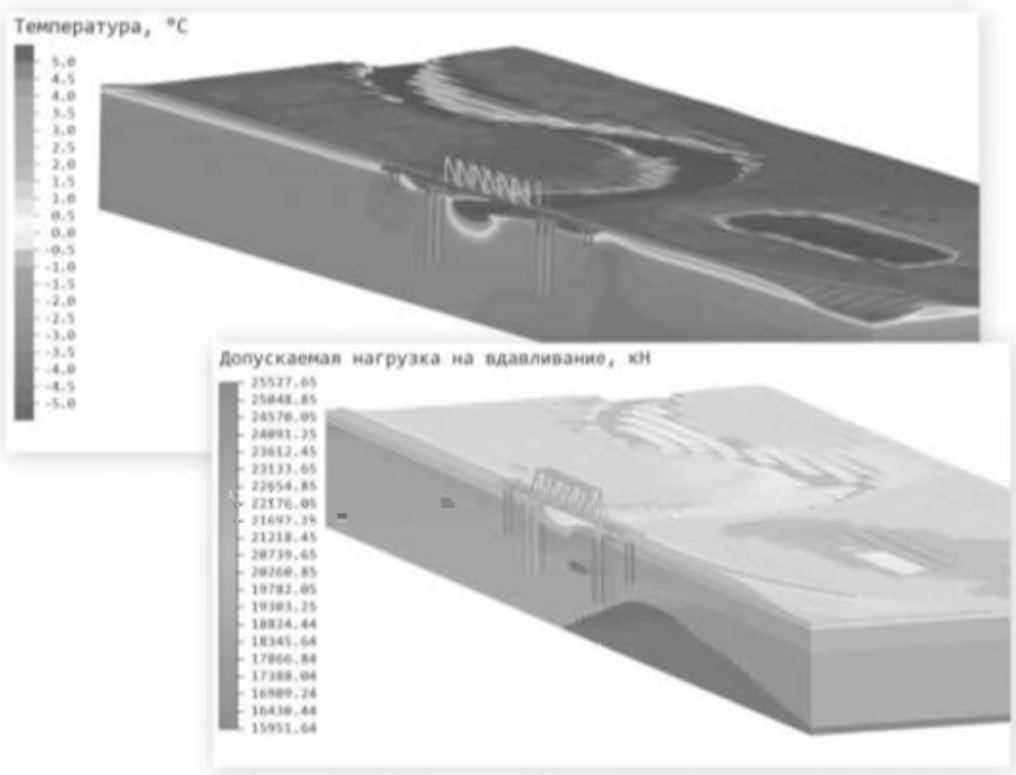



Рис.4. Цифровой двойник мостового перехода созданный во Frost 3D

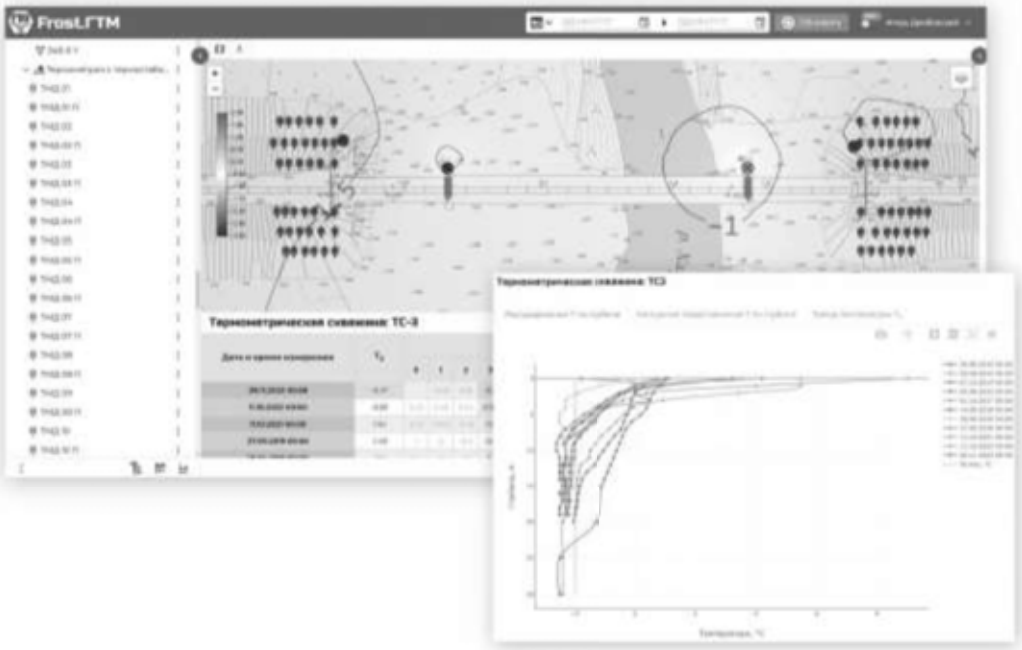



Рис.5. Визуализация данных геотехнического мониторинга мостового перехода во Frost.ГТМ

Таким образом, совместное использование Frost 3D и Frost.ГТМ в процессе геотехнического мониторинга предоставляет уникальный сервис – “***Цифровой инженерно-геокриологический двойник”***, который выполняет следующие функции:

– визуализация текущего состояния грунтов на всей территории предприятия;

– численный геокриологический прогноз состояния грунтов на основании данных мониторинга;

– автоматическое оповещение о негативных трендах при отклонении от допустимых значений.

– расчет несущей способности свай в режиме реального времени и прогноз их состояния на несколько лет вперед на основании актуальных данных мониторинга;

– контроль уровня грунтовых вод и определение их влияния на температурный режим и деформации грунтов оснований;

– ретроспективный анализ с целью адаптации модели.

***Литература***

1 Ковенькин Д. А., Насников Д. Н., Чернецкая И. С. Применение программного комплекса Frost 3D для проведения прогнозных теплотехнических расчетов земляного полотна //Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – №. 3 (75). – С. 80-90.

2 Дембовский И. Н. Frost.ГТМ – инструмент для ведения геотехнического мониторинга в условиях криолитозоны / Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений: Сборник тезисов V научно-технической конференции, Томск, 21–22 сентября 2022 года / Отв. редактор А.Г. Чернов. – Томск: Акционерное общество "Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа", 2022. – С. 147-152.

## ТЕРМОКАРСТОВАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА КРИОЛИТОЗОНЫ И ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ МЕРЫ ПО СНИЖЕНИЮ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ НА ПРОЖИВАНИЕ НАСЕЛЕНИЯ

***Р.В. Десяткин***

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск*

Глобальное изменение климата стало серьезным вызовом для человечества [1]. Это известный фактор изменений в мировом сельском хозяйстве и обеспечении продовольствием [2]. Согласно обзору Э. Шуура и М. Мака [3], Арктика и прилегающая к ней территория континентальной вечной мерзлоты в последние десятилетия испытывают беспрецедентные климатические изменения. Повышение температуры в северных высокоширотных районах происходило в 2,5 раза быстрее, чем на всей Земле [1]. Это явление привлекает внимание специалистов-агрономов, направляя их на поиски новых возможностей устойчивого земледелия в этих традиционно малоосвоенных регионах как на всем Приполярном Севере [4], так и в отдельных его районах [5, 6]. Некоторые тенденции развития земледелия в холодных регионах кажутся весьма оптимистичными; так, в 2012–2017 гг. количество ферм на Аляске увеличилось до 30 % [7]. Однако известно также, что пахотные площади Севера демонстрируют разные тенденции. Так, в большинстве северных регионов России в недавнем прошлом произошло выраженное сокращение посевных площадей [8]. Причины такого снижения могут быть разными. В данной работе рассматривается неблагоприятное влияние природных процессов, происходящих в результате потепления климата в условиях вечной мерзлоты Якутии на состояние почвенного покрова.

Согласно действующей схеме почвенно-географического районирования страны (Национальный…, 2011), равнинная территория Якутии входит в два пояса: полярный и бореальный. Северная половина Новосибирских островов входит в зону арктических почв Арктики, южная половина архипелага и другие острова, а также вся зона тундры на континентальной части республики - в зону тундровых глеевых и тундровых иллювиально-гумусовых почв Субарктики. В строении почвенного покрова территории республики в пределах бореального пояса принимают участие 2 равнинные подзоны и 3 горные провинции Восточно-Сибирской мерзлотно-таежной области. Почвенный покров равнинных территорий представлен подзонами глее-мерзлотно-таежных почв северной тайги и мерзлотно-таежных почв средней тайги. Почвенный покров горных территорий республики представлен провинциями: а) Колымской горных тундровых; б) Верхоянской горных глее-мерзлотно-таежных, горно-таежных криоаридных палевых и горно-степных дерновых и горных тундровых почв; в) Приалданской горных мерзлотно-таежных и горных тундровых почв. Структура почвенного покрова Якутии дана в таблице 1, названия типов и подтипов почв даны по Л.Г.Еловской (1987).

Влияние потепления климата на почвенный покров криолитозоны Якутии рассмотрим на примере бореального пояса. Территория отличается большей континентальностью климата вследствие низких зимних температур и меньшей увлажненностью (Почвы…, 2009). Сумма положительных температур выше 10 ºС составляет 1400-1600 ºС, за год выпадает до 200-300 мм осадков. Длина вегетационного периода около 100 дней. В вегетационный период почвы под таежной растительностью оттаивают на глубину 100-130 см, на песках – до 200 см и глубже. Существенные различия термических условий и условий увлажнения в различных частях бореального пояса создают разнообразие природных

условий. Общими чертами почв и почвообразования таежной мерзлотной области являются: 1) малая мощность почвенного профиля, связанная с близким залеганием мерзлоты, подавляющим биологическую активность; 2) слабое проявление подзолистого процесса в результате короткого вегетационного сезона, недостатка влаги и отсутствия промывного режима; 3) отсутствие выноса продуктов почвообразования и выветривания за пределы деятельного слоя и их аккумуляции в почвенной толще; 4) замедленность биологического круговорота веществ и энергии; 5) преобладание фульвокислот и нерастворимых остатков (гуминов) в составе гумуса; 6) решающее значение механического состава в формировании вводно-теплового режима, следствием чего является образование в одинаковых биоклиматических условиях на породах разного механического состава различных типов почв.

Таблица 1

Почвенный покров Якутии

| Почвы | Горы | | Равнины | |
|---|---|---|---|---|
| | % | тыс. кв. км | % | тыс. кв. км |
| Мерзлотные тундровые | - | - | 7% | 217,2 |
| Мерзлотные северотаежные (криоземы) | 17 | 527,5 | 6% | 186,2 |
| Мерзлотные палевые карбонатные | - | - | 4 | 124,1 |
| Мерзлотные таежные | - | - | 10 | 310,3 |
| Мерзлотные дерново-карбонатные | 9 | 279,3 | 2 | 62,1 |
| Мерзлотные подзолистые | 2 | 62,1 | 1 | 31,0 |
| Мерзлотные болотные | 8 | 248,3 | 9 | 279,3 |
| Мерзлотные лугово-черноземные и черноземы | - | - | 1 | 31,0 |
| Мерзлотные пойменные | - | - | 2 | 62,1 |
| Курумники и гольцы | 12 | 372,4 | - | - |
| Мерзлотные подбуры | 10 | 310,3 | - | - |
| Итого: | 58 | 1799,9 | 42 | 1303,3 |

На равнинах Центральной Якутии господствует травянисто-брусничная светлохвойная тайга из лиственницы. На фоне тайги распространены участки болот, лугов, лесостепи и степи по аласам и долинам малых рек, площадь которых местами доходит до 30 % от общей площади местности. Наибольшую площадь занимают мерзлотные палевые почвы. В земледельческих районах они составляют 60–65 % общей площади. Они развиты на плакорах под пологом лиственничников с мерзлотным нанорельефом. Генетические горизонты дифференцированы нечетко. Реакция почв нейтральная или слабощелочная, содержание гумусов в верхнем горизонте 3–5 %. Поглощающий комплекс емкостью до 35 мг-экв. на 100 г почвы полностью насыщен основаниями. В составе последних до 3–10 % занято поглощенным натрием, который придает этим почвам солонцеватые свойства. На плоских нерасчлененных поверхностях под лиственничниками низкого бонитета развиты мерзлотные палевые осолоделые почвы. В отличие от предыдущих почв профиль осолоделых почв более четко дифференцирован по элювиально-иллювиальному типу. Мощность осолоделого горизонта до 20 см. На мерзлотных палевых почвах расположен основной пахотный клин республики. В долинах рек, по олуговелым надпойменным террасам развиты лугово-черноземные, черноземно-луговые почвы.

В понижениях рельефа здесь повсеместно встречаются гидроморфные почвы. Центральная Якутия является областью континентального соленакопления, преобладающий тип засоления почв содовый и сульфатно-содовый. Засоленных почв много под сухими и настоящими лугами, среди них встречаются пятна солончаков. Своеобразно почвообразование в термокарстовых котловинах, где формируются специфичные аласные почвы (Десяткин, 2008). На элювии коренных пород повышенных плато подзоны под мохово-кустарничковыми листвягами развиваются мерзлотно-таежные кислые почвы. Они имеют слабодифференцированный буроватый профиль, оттаивающий летом на глубину 100 см и более с признаками надмерзлотного оглеения. В местах, где глубже оттаивают почвы, а породы обладают лучшей водопроницаемостью, сформированы глубокомерзлотные таежные оподзоленные почвы. Сельскохозяйственные угодья составляют около 2

% общей площади подзоны. Земледельческая освоенность очаговая, площадь освоенных под пашни земель не превышает 0,1 % общей территории.

Низкие температуры деятельного слоя препятствуют нормальному развитию микробиологических и биохимических процессов в почве, замедляют трансформации органических остатков и снижают темп биологического круговорота веществ и энергии. Первым из исследователей Р.И. Аболин [1929] указал на роль многолетней мерзлоты на почвообразовательный процесс. Он определил мерзлоту как фактор, регулирующий водный режим почвы благодаря консервации осенних излишков влаги. По его мнению, только наличие многолетней мерзлоты несмотря на засушливость климата способствует нормальному росту и развитию здесь таёжной растительности, а также возделыванию посевных культур. По его выражению «…не будь этого источника, вся Лено-Вилюйская равнина превратилась бы в безводную пустыню, и ни о какой земледельческой культуре нельзя было бы и мечтать…» [Аболин, 1929, с. 64]. В условиях слабой теплообеспеченности северных территорий в деятельном слое почв действует перманентный антагонизм тепла и влаги, который приводит к формированию низкопродуктивных, крайне не устойчивых к изменению экзогенных условий экосистем.

Рост средней температуры атмосферы Земли в послевоенный период достиг максимальных значений и ожидается его дальнейшее повышение. В частности для территории нашей республики, полностью расположенной в зоне вечной мерзлоты по сравнению с 60-мы годами прошлого столетия среднегодовая температура воздуха на разных частях повысилась на 2 - 3,5 ˚С.

Удлиняется продолжительность теплого периода года, весна приходит примерно раньше до двух недель, а начало зимы опаздывает на 2-3 недели, чем это было в 70-ые годы. Удлинение теплого периода года ведет к росту расхода влаги на испарение, что в летнее время вызывает нехватку воды для роста и накопления биомассы растений, высыхание озер и обмеление рек. Рост температуры воздуха приводит к повышению суммы положительных температур поступающих на поверхность земли и способствует увеличению мощности деятельного слоя почвы и грунтов. Так, если 50-60 лет тому назад глубина летнего протаивания почвы под лесом в Центральной Якутии составляла примерно 1 м, то сегодня это величина достигает 1,5 и более метров, в зоне северной тайги, соответственно, 0,7 и 1,3 и более.

Почти одна треть территории республики на равнинных пространствах расположена на льдистой мерзлоте – ледовом комплексе, где содержание льдов занимает до 60-70 % от объема, а мощность доходит до 40 и более метров. В последние десятилетия, двухкратное увеличение глубины сезонного протаивания грунтов на территории с ледовым комплексом вызывало таяние подземных льдов. Началась термокарстовая деградация криогенных ландшафтов, которая может иметь катастрофические последствия для проживания и хозяйственной деятельности населения.

Пример термокарстовой деградации мерзлотных ландшафтов наглядно видно на примере окрестностей села Чурапча (рис. 1.). Население села здесь раз в пятилетку вынуждено произвести засыпку нарушенных участков и подъем деформированных зданий и хозяйственных строений. Работы требуют больших материальных затрат. Но таяние льдов продолжается, поверхность территории уходит все дальше вниз и она будет идти до полного исчезновения запасов подземных льдов. Это процесс длительный, может занимать десятилетия. В естественных условиях в результате таяния льдов на провалах появляются термокарстовые озера (рис. 2), что и ждет в ближайшем будущем деградированные территории вокруг с. Чурапча.

Термокарстовая деградация на территории Центральной Якутии происходит повсеместно. Она прогрессирует на нарушенных человеком площадях, вокруг населенных пунктов, на раскорчевках под пашни, на вырубках, на гарях, т.е. где леса потеряли свои защитные функции. А это миллионы освоенных и нарушенных человеком гектаров. Полумеры вроде отсыпки деградированных земель - былларов не остановят таяние льдов, оно будет идти до полного истощения запасов льдов ледового комплекса. Вся это территория со временем превратится в нарушенные земли не пригодные для проживания и хозяйственной деятельности.

Для смягчения удара глобальной катастрофы экономике и жизни людей из-за таяния подземных льдов жителям республики есть единственный путь – это переселение населения на участки без содержания подземных льдов. В Центральной Якутии есть крупные массивы лишенных ледового комплекса площадей, не говоря о южных и юго-западных районов. Для переселения населения требуется к ним подвести дороги и электроэнергию за счет государства и помочь людям при перевозке своих строений. Традиционный скотоводческий уклад жизни при этом не пропадет, корма можно заготовить вахтовым методом, подвозя к месту новых поселений без больших затрат. В летнее время испокон веков якутские скотоводы имели традицию переезжать к местам выпаса скота и

заготовки кормов - сайылык. Возрождение традиционного уклада жизни только усилит адаптацию хозяйственной деятельности в условиях изменений климата.

Рис. 1. Термокарст на пахотных угодьях.

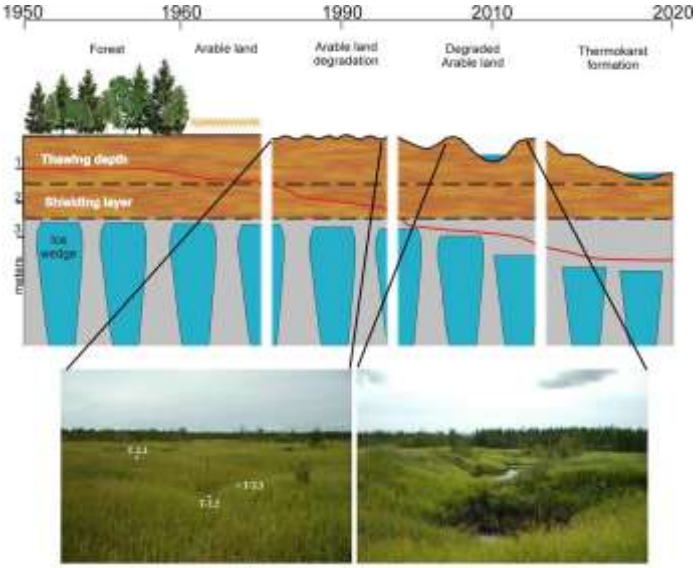



Рис.2. Деградация почвенного покрова Ц,Я,

Термокарстовая деградация почв мерзлотных ландшафтов охватила всю территорию республики. В зоне северной тайги она в сочетании с лесными пожарами привел к сокращению площади зональной растительности – лишайниковой тайги. Термокарст здесь за счет таяния льдов под лесом формирует начальные формы бугристо западинного рельефа, где по западинам начинается процесс заболачивания за счет влаги, поступающей при таянии льдов. Площадь западин и бугров примерно равна, на переувлаженных западинах лишайники не произрастают. В результате бывшие лишайниковые леса превращаются в осоково-вейниковые заросли, сокращая площади зимних пастбищ для оленя. Процесс идет на площади миллионов гектаров и является главной причиной сокращения поголовья оленей. Если в 70-ые годы прошлого столетия численность диких оленей Якутии достигала 600-700 тысяч, то сегодня она оценивается лишь на уровне 150 тысяч. Такое резкое сокращение поголовья диких оленей вызвано не охотой и браконьерством, а исчезновением больших площадей зимних пастбищ. Домашнее оленеводство также испытывает влияние термокарстовой деградации почв зимних пастбищ.

Таковы негативные последствия глобального потепления на почвенный покров бореальной зоны республики. Процесс деградации почвенного покрова масштабный и обусловлен широким распространением ледового комплекса на равнинной части (до 1/3 площади) и усилением изменений климата. Человечеству не в силах остановить этот глобальный процесс. В этих условиях от человека требуется лишь адаптация к новым вызовам, чем скорее будут разработаны и приняты меры снижения негативного воздействия природных сил тем мягче могут быть негативное влияние происходящих изменений.

В первую очередь требуется объявление зоной экологического бедствия территории, охваченные термокарстовой деградацией вокруг населенных пунктов. В такие зоны также следовало бы включить территории населенных пунктов в бассейнах северных рек часто затопляемых паводками, связанных с нарушением гидрологического режима при дополнительном поступлении огромного объема воды за счет таяния подземных льдов. В последующем на этих территориях требуется постепенное решение вопроса переселения населения на площади без ледового комплекса. Таковы лишь начальные мероприятия адаптации жизненного уклада населения в условиях масштабных нарушений почвенного покрова в результате термокарстовой деградации огромных площадей с ледовым комплексом. В будущем требуется усиление научных работ по изучению механизмов деградации мерзлотных ландшафтов и разработке научно обоснованных мер по снижению негативного воздействия происходящих изменений на жизнь и хозяйственную деятельность населения на территории распространения льдистой мерзлоты.

***Литература***

1. Intergovernmental Panel on Climate Change.*Climate Change 2014: Synthesis Report.*Eds. Pachauri, R.K. and Meyer, L.A., Cambridge University Press, 2014, 151 pp.
2. Rosenzweig, C.; Parry, M.L. Potential impact of climate change on world food supply. Nature **1994**, 367,133–138.
3. Schuur, E.A.G.; Mack, M.C. Ecological response to permafrost thaw and consequences for local and global ecosystem services. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.***2018**, 49, 279–301. doi 10.1146/annurev-ecolsys-121415-032349
4. Poeplau, C.; Schroeder, J.; Gregorich, E.; Kurganova, I. Farmers' perspective on agriculture and environmental change in the circumpolar north of Europe and America. *Land***2019**, 8, 190.
5. Stevenson, K.T.; Rader, H.B.; Alessa, L.; Kliskey, A.D.; Pantoja, A.; Clark, M.; Smeenk, J.; Giguère, N. Sustainable agriculture for Alaska and the circumpolar North: Part II. Environmental, geophysical, biological and socioeconomic challenges. *Arctic***2014**, 67, 296–319.
6. Lader, R., Walsh, J.E., Bhatt, U.S. and Bieniek, P.A. Agro-Climate Projections for a Warming Alaska. *Earth Interactions,***2019**, 22, 1–24.
7. Crampton, L. Alaska's agriculture boom is driven by a local-first spirit. 2019. Available online: https://www.politico.com/story/2019/04/30/alaskas-agriculture-boom-is-driven-by-a-local-first-spirit-1381727.
8. Lyuri, D.I.;Goryachkin, S.V. Global land use change and its specificity in permafrost-affected regions: consequences for Cryosols. In: Kane, D.L. &Hinkel, K.M. (Eds). *Ninth International Conference on Permafrost*. Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008, 1093–1097.
9. Национальный атлас почв Российской Федерации – М.: ООО Астрель, 2011. – 631 с.
10. Еловская Л.Г. Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. — Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1987.— 172 с.
11. Почвы Якутии / Десяткин Р.В., Оконешникова М.В., Десяткин А.Р. – Якутск: Бичик, 2009. – 64 с., ил. (в соавторстве).
12. Десяткин Р.В. Почвообразование в термокарстовых котловинах – аласах криолитозоны. – Новосибирск: Наука, 2008. – 324 с
13. Аболин Р.И. Геоботаническое и почвенное описание Лено-Вилюйской равнины. - Тр.комис. по изуч. ЯАССР. - Л., 1929, т. 10. - 378 с.

## ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ СЕЗОННО-ТАЛОГО СЛОЯ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ МЕРЗЛОТОМЕРОВ И РЕЗУЛЬТАТАХ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

***Д. В. Добрынин[1], О. В. Сухова[2], А. Н. Рачкова[3]***
*[1, 2] Институт системного анализа и управления*
*ФГБОУ ВО «Университет «Дубна»*
*3, Арктический и антарктический*
*научно-исследовательский институт (ААНИИ)*

В 20-х годах XXI века климатические изменения стали причиной возникновения ряда новых природных процессов на территории островов и архипелагов арктической зоны. На острове Большевик стали наблюдаться явления, связанные с ростом глубины сезонно-талого слоя почв и грунтов: усиление интенсивности криотурбационных процессов, сезонные пучения грунтов, просадочные явления, формирование локальных несквозных таликов в долинах рек [1]. С 2020 года, в поймах рек северо-западной части острова Большевик стали фиксироваться наледные бугры, ранее не отмечавшиеся для этой территории. В растительном покрове, также, стали выявляться изменения, причиной которым может связана с увеличением глубины сезонно-талого слоя и продолжительности периода положительных температур. По всей территории наблюдается гибель мхов и печеночников. На их разлагающихся остатках активно развиваются злаки (Deshampsia borealis) и ясколки (Cerastium regelii). Существенные изменения претерпел и характер поверхностного стока талых вод. В конце прошлого — начале нынешнего века, при более низких средних температурах весенне-летнего периода, на равнинных и слабовсхолмленных территориях острова Большевик поверхностный сток проходил очень постепенно, локализуясь по микропонижениям сети бороздок, направленных вдоль склона. Отепляющее влияние талых снежных вод давало возможность развиваться вдоль бороздок

моховой растительности. В несколько более увлажненных позициях основания склонов формировались покровы печеночников. В последнее время характер снеготаяния сильно изменился. Исчезновение снега проходит гораздо интенсивнее. На склонах развиваются короткоживущие бурные потоки, разрушающие системы микроборозок и приводящие к гибели моховой и печеночниковой растительности. Интенсивные половодья, развивающиеся вследствие бурного снеготаяния, переформировывают пойменную растительность, искореняя большинство растений со слаборазвитыми корневыми системами. На водораздельных пространствах, ранее, отличавшихся бедностью флористического состава, напротив наблюдается активное освоение цветковыми растениями новых местообитаний, что несомненно может быть воспринято в качестве индикатора увеличения глубины сезонно-талого слоя и продолжительности его развития в период положительных температур. Для системного анализа реакций природных комплексов острова Большевик на текущую климатическую динамику требуется сформировать представление о пространственной неоднородности сезонно-талого слоя почв и рыхлых грунтов.

С 2013 года на северо-западе острова большевик проводятся работы на гидролого-криосферном полигоне научно-исследовательской станции «мыс Баранова». В 2017 году, вблизи наблюдательного створа, в долине реки Мушкетова, развернута сеть мерзлотомеров, характеризующих динамику сезонно-талого слоя в наиболее распространенных по территории острова Большевик поверхностных отложениях, залегающих на различных элементах рельефа. Из пяти мерзлотомеров две пары расположены на склонах северной и южной экспозиции и фиксируют глубину сезонно-талого слоя дренированных грубоглыбистых грунтов приводораздельной части и дисперсных каменисто-щебнистых грунтов с включениями линз суглинков средней части борта речной долины. Пятый мерзлотомер установлен в пойме для наблюдения за сезонно-талым слоем отложений галечникового аллювия. Данные, получаемые с мерзлотомеров в долине реки Мушкетова дополняют показания мерзлотомеров, расположенных недалеко от метеоплощадки научно-исследовательской станции «Мыс Баранова». Кроме того, на расположенной рядом с мерзлотомерами снегомерной площадке №1, в период фенологической весны, проводится мониторинг снеготаяния с фиксацией начальных фаз оттаивания грунтов, освобождающихся от снега. Характер развития сезонно-талого слоя рыхлых грунтов изучаемой территории представлен на графиках рисунка 1. На них, для мерзлотомеров, вокруг которых в начале периода наблюдения в 2025 году (с 10 июня) сохранился снежный покров, в верхней части дан график изменения его глубины. Для мерзлотомеров, вокруг которых в начале периода наблюдения снежного покрова не наблюдалось, графики снижения его глубины не приводятся.

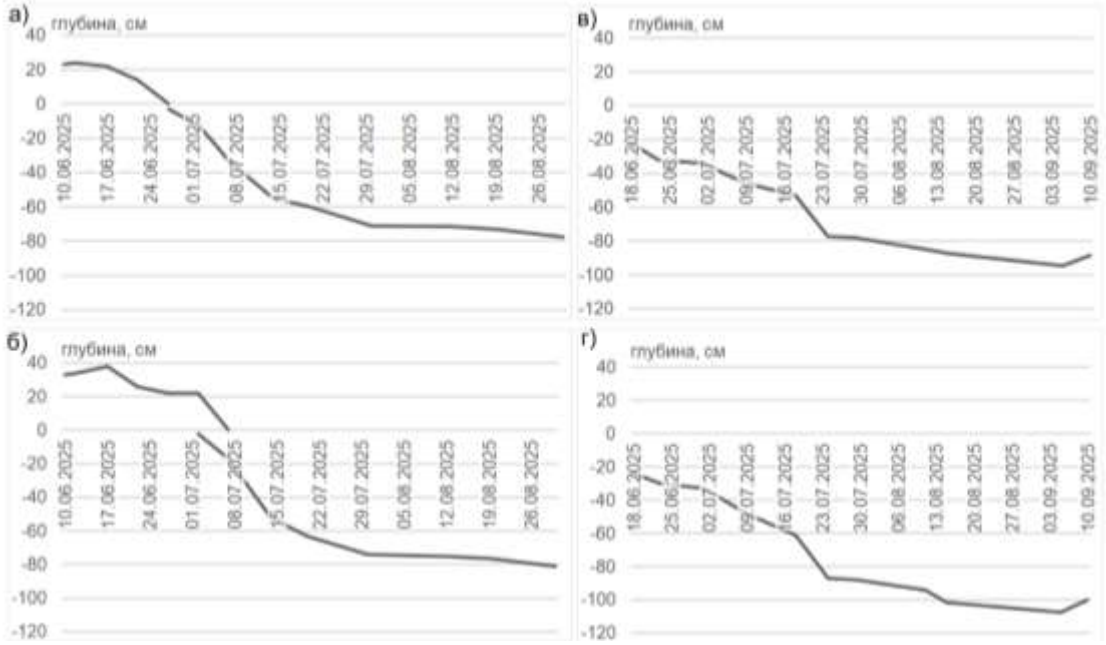



Рис. 1. Графики схода снежного покрова и развития сезонно-талого слоя на модельных мерзлотомерах а) равнинные условия, продолжительный период снеготаяния, щебнисто-каменистые грунты с линзами суглинков; б) пологий склон северной экспозиции, продолжительный период снеготаяния, щебнисто-грубоглыбистые грунты; в) отсутствие снежного покрова, щебнисто-грубоглыбистые грунты на водоразделе; г) отсутствие снежного покрова, пологий склон южной экспозиции, щебнисто-каменистые грунты с линзами суглинков

Исчезновение снежного покрова является, для большинства почв и грунтов острова Большевик, стартовым моментом формирования сезонно-талого слоя. Поэтому, в почвах и грунтах, расположенных на участках маломощного и прерывистого снежного покрова, сроки начала формирования сезонно-талого слоя опережают аналогичные по строению отложения, перекрытые снежным покровом. Для части грунтов, над которыми формируется снежный покров достаточной толщины, начальные фазы оттайки развиваются сразу после полного снеготаяния. В то же время, выявляются грунты, формирование сезонно-талого слоя которых происходит существенно раньше, чем исчезнут остатки снежной толщи. Сопоставление показаний мерзлотомеров, фиксирующих разброс сроков начала формирования сезонно-талого слоя и невыдержанность ими периода полного освобождения от снега привел к следующим выводам. Чем больше каменистого материала в грунте, чем меньше в нем линз и поверхностных слоев суглинков, тем раньше и интенсивнее начинает развиваться сезонно-талый слой. И, тем менее этот процесс связан с полным исчезновением снежного покрова над рыхлыми отложениями.

И, напротив, чем больше содержания супесчано-суглинистой фракции в грунте, тем больше период задержки начала формирования сезонно-талого слоя после полного стаивания снега. Гранулометрический состав грунтов, на территории острова Большевик, также влияет и на скорость развития сезонно-талого слоя вглубь. Чем меньше процент тонких фракций (супеси, суглинки), тем выше скорость развития сезонно-талого слоя.

Таким образом, для равнинных и слабовсхолмленных ландшафтов острова Большевик можно сформулировать два основных фактора, влияющие на интенсивность формирования и глубину сезонно-талого слоя: гранулометрический состав верхней части толщи рыхлых отложений и длительность таяния снежного покрова. Традиционно используемый фактор экспозиции склонов в рассматриваемых ландшафтах практически не работает, из-за незначительности перепадов рельефа. В то же время, он дублируется фактором снегонакопления, глубина которого часто связана с неоднородностями рельефа.

Опираясь на выявленные закономерности, представляется возможным создание пространственной модели неоднородности сезонно-талого слоя острова Большевик на основе данных о снежном покрове и характере рыхлых грунтов. Для этого, в настоящей работе предпринята попытка сформировать информационные слои, характеризующие эти факторы на основе разносезонных спутниковых снимков.

Для создания информационного слоя снежного покрова были использованы снимки ранневесеннего и летнего периодов (рис. 2), для создания карты типов рыхлых отложений — снимки начала августа (рис. 3).

Цифровой слой, характеризующий типы рыхлых отложений, был трансформирован методами тематической индексной калибровки, в два слоя, описывающие интенсивность развития сезонно-талого слоя в период снеготаяния и в период максимальных среднесуточных температур. Таким образом, удалось учесть особенности развития сезонно-талого слоя в грунтах разного типа во все сезоны его интенсивной динамики.

Совмещая результаты автоматизированного распознавания типов грунтов и глубин снежного покрова с точками установки мерзлотомеров возможно создание сценариев цифрового комплексирования данных информационных источников.

При моделировании пространственной структуры сезонно-талого слоя почв и рыхлых отложений острова большевик были подобраны коэффициенты, адаптирующие информационную нагрузку слоев. Слой, моделирующий глубину снежного покрова в период слоя максимального снеготаяния, а, также, скорость снеготаяния использовался с повышающим коэффициентом информационной значимости. Слои (цифровые модели), характеризующие интенсивность развития сезонно-талого слоя в грунтах различного состава, получили понижающие коэффициенты информационной значимости, чтобы сохранить в итоговой модели структурную составляющую неоднородности снежного покрова.

Результат комплексирования факторов неоднородности сезонно-талого слоя почв и грунтов острова Большевик представлен на рисунке 4 (левая часть). Его верификация проведена по показаниям мерзлотомеров, не участвующих в формировании модели и по данным оценки глубины сезонно-талого щупом в процессе маршрутов, в период достижения максимального уровня оттайки. На рисунке 4 (правая часть) показан фрагмент карты пространственной структуры сезонно-талого слоя почв и грунтов северо-западной части острова Большевик, охватывающая территории приморских равнин и часть возвышенности, на которой залегает ледник Мушкетова.

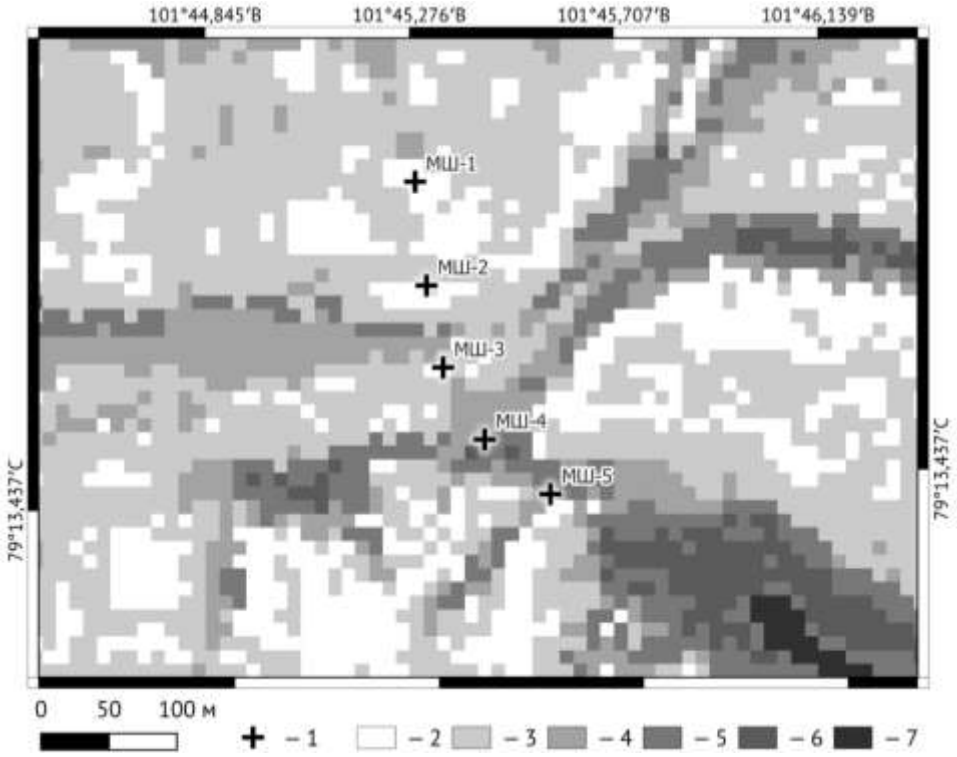



Рис. 2. Фрагмент модели распределения снежного покрова территории водосборногобассейна «река Мушкетова» в окрестностях сети мерзлотомеров. 1 — точки установки мерзлотомеров; 2 — без снега; 3 — неглубокий снег; 4 — снег средней глубины; 5 — глубокий снег; 6 — очень глубокий снег; 7 — ледники и снежники

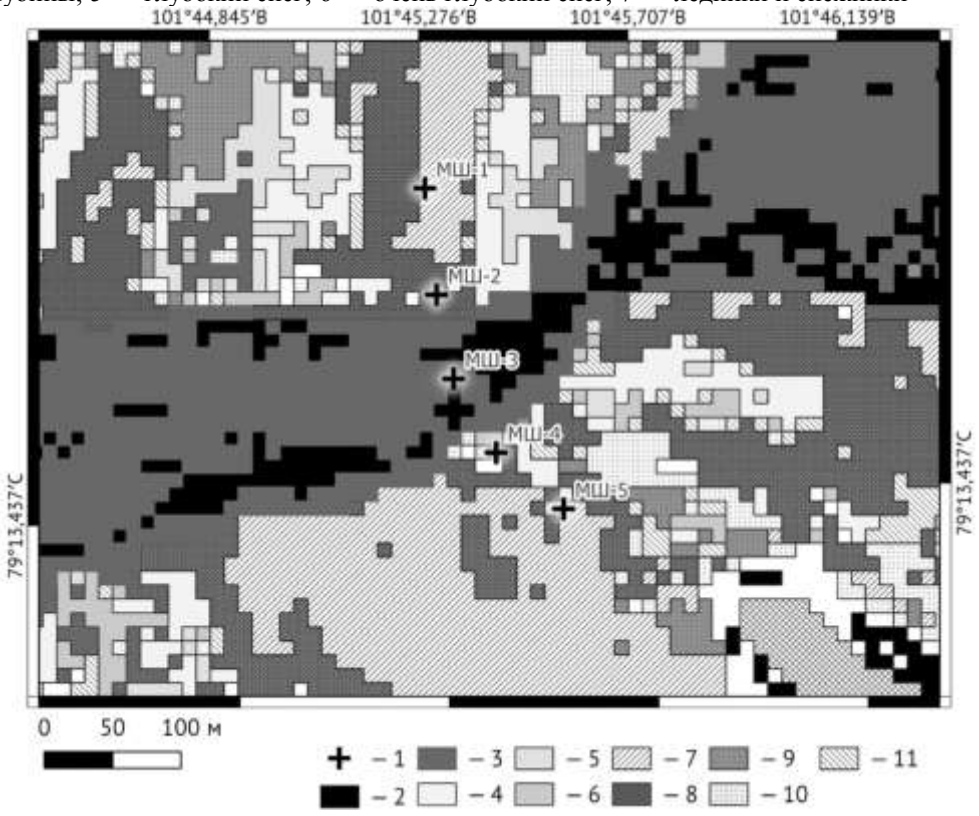



Рис. 3. Фрагмент карты рыхлых отложений северо-западной части острова Большевикв окрестностях сети мерзлотомеров на р. Мушкетова. 1 — точки установки мерзлотомеров; 2 — водоемы; 3 — пойменные отложения; 4 — дисперсионные грунты длительного или постоянного переувлажнения; 5 — дисперсные грунты с поздними сроками развития переувлажненности и активизации криотурбаций; 6 — дисперсные грунты с ранними сроками развития переувлажненности и активизации криотурбаций; 7 — дренированные грубоглыбистые грунты и скалы; 8 — дренированные каменистые и щебнистые грунты с незначительными включениями линз суглинков;9 — наиболее водонасыщенные грунты стоковых ложбин и депрессий малых

озер;10 — умеренно водонасыщенные грунты стоковых ложбин и депрессий малых озер;11 — сезонно поверхностно переувлажненные каменистые грунты, перекрытые тонким слоем суглинистого материала

Выводы:

Для примитивных почв и грунтов острова Большевик, на серии профилей мерзлотомеров, установлены закономерности формирования сезонно-талого слоя.

Данные закономерности связаны с гранулометрическим составом рыхлых отложений, их каменистостью и длительностью стояния снежного покрова над ними.

Методами автоматизированного дешифрирования, для северной части территории острова Большевик, построены карты факторов, определяющих интенсивность формирования и глубину сезонно-талого слоя, неоднородности снежного покрова и динамики снеготаяния, а также типов рыхлых отложений.

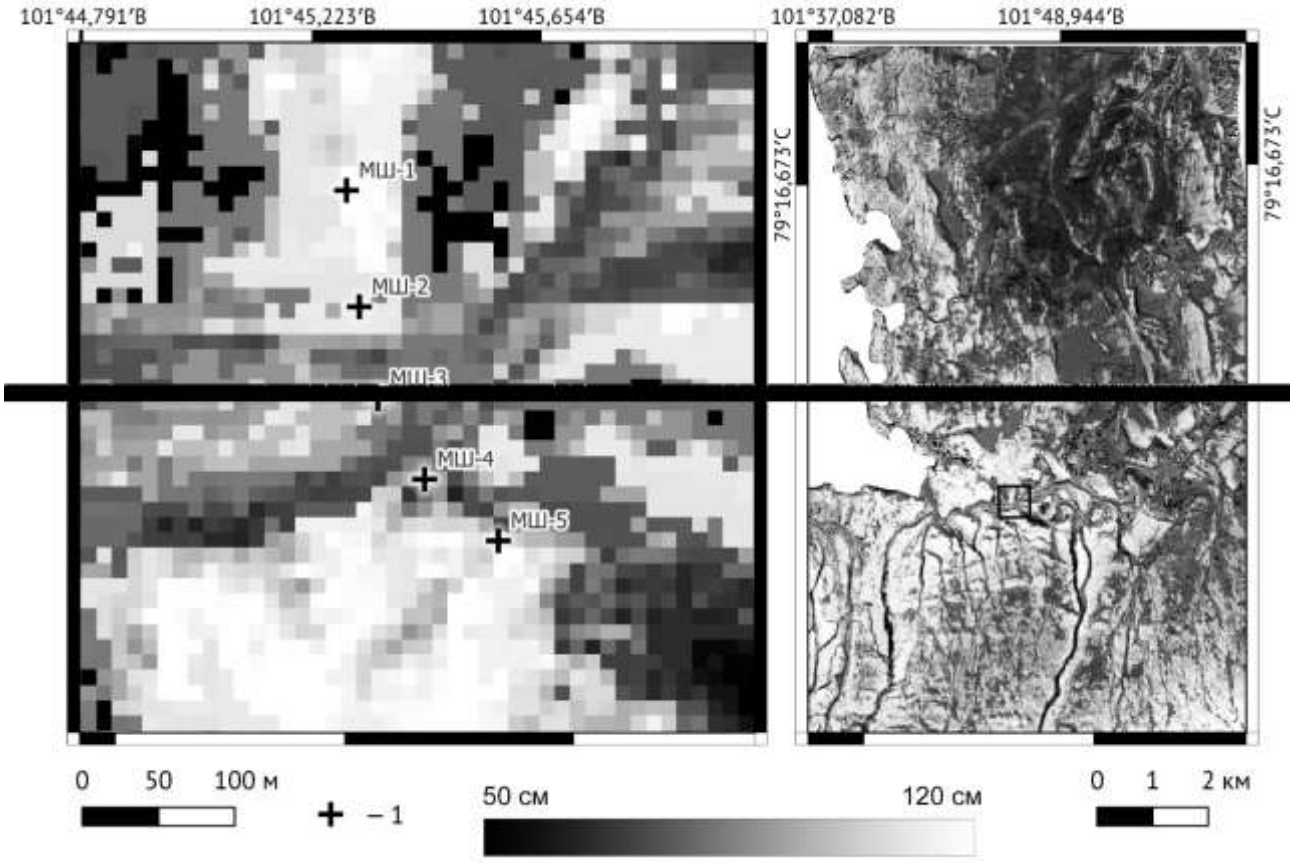



Рис. 4. Фрагмент карта рыхлых отложений и их гидрологического режима в окрестностях сети мерзлотомеров (1 — точки установки мерзлотомеров)

Карта типов рыхлых отложений, методами тематической калибровки преобразована в два самостоятельных цифровых слоя, характеризующих темпы формирования сезонно-талого слоя в грунтах разных типов в период снеготаяния и в период максимальных среднесуточных температур.

Комплексирование этих информационных слоев позволило создать итоговую модель пространственной неоднородности сезонно-талого слоя почв и грунтов северной части острова Большевик.

Модель показало хорошее сходство с показаниями контрольных мерзлотомеров.

Участки наиболее глубокого сезонно-талого слоя хорошо коррелируют с пятнами интенсивного развития высшей растительности (кочковатые злаковники и пятна полярного мака высокой сомкнутости), что позволяет использовать предложенный подход не только для моделирования глубин сезонной оттайки грунтов, но и для оценки пригодности новых местообитаний растительности острова Большевик в условиях текущей климатической динамики.

***Литература***

1 Добрынин Д. В., Рачкова А. Н., Сухова О. В. Пространственно-временная динамика грунтовых просадок на территории НИС «Ледовая база Мыс Баранова» // Российские полярные исследования. – 2025. – № 4(62). – С. 24-29.

## МОНИТОРИНГА ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ, КАК ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

***В.А.Дубровин [1], Брушков А.В[2], Дроздов Д.С[3]., Железняк М.Н.[4], Садуртдинов М.Р.[3], Сергеев Д.О[5]., Остарков Н.А.[2], Осокин А.Б[6]***

*[1]ФГБУ Гидроспецгеология, г. Москва*
*[2]МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва*
*[3]ИКЗ СО РАН, г. Тюмень*
*[4]ИМЗ им. П.И. Мельникова, СО РАН, г. Якутск*
*[5]Институт Геоэкологии РАН, г. Москва*
*[6]Газпром добыча Надым, г. Надым*

### *1.Состояние проблемы*

По существующим оценкам, в результате совместного влияния климата и техногенеза число деформированных оснований зданий и сооружений, построенных по I-принципу в арктической зоне, может достичь к середине века 70% от общего их числа [1]. Высокие темпы повышения температуры мерзлых толщ (от 0,03°С/год до 0,05-0.08°С/год и даже выше 0,1 °С/год)) и деградационные процессы в основаниях зданий и сооружений могут обусловить к середине века только в АЗРФ экономический ущерб в 10-12 трлн. рублей, но при сохранении прежних методов проектирования и строительства, не учитывающих в подавляющем большинстве прогноз изменения теплового состояния мерзлых толщ, величина ущерба может возрасти кратно [1, 2].

*2. Основные причины обусловливающие необходимость ускоренного создания государственной системы мониторинга вечной мерзлоты.*

Первое

- *Недостаточная региональная инженерно-геокриологическая изученность АЗРФ.* После передачи в недропользование почти всех разведанных месторождений в Арктике региональные работы геокриологической, инженерно-геологической и гидрогеологической направленности (Мингео СССР, позднее Минприроды) полностью прекращены. Полистное гидрогеологическое и инженерно-геологическое картирование Севера (масштаб 1:1 000 000, с 2020 г.) — практически полностью камеральное, без полевых наблюдений и нового фактического материала. Региональные геокриологические и гидрогеологические исследования не проводятся 30 лет. Недропользователи ведут геокриологические исследования только в границах лицензионных участков и коридоров коммуникаций, без увязки с фоновым мониторингом.
- *Отсутствие межведомственного обмена геологической информацией.* Доступ к результатам инженерно-геологических изысканий компаний для экспертного и научного сообщества затруднён (за редким исключением). Это касается геокриологических материалов большинства недропользователей и предприятий строительной индустрии.

Второе

- *Ведомственный подход.* В организации мониторинга преобладает ведомственный и непрофессиональный подход. Гидрометеорологическая служба Минприроды (Росгидромет, ФГБУ ААНИИ), не имея геокриологов, возглавила создание государственной системы «фонового мониторинга многолетней мерзлоты»

(Поручение Президента РФ № Пр-1971, п. 1в, ВЭФ-2021). Учёные-геокриологи в подготовке документа не участвовали и относятся к нему отрицательно [3]. Единичные встречи с представителями Минприроды касались обсуждения законодательной инициативы (в каком виде включить мониторинг в ФЗ-7 «Об охране окружающей среды»), а не сути концепции Росгидромета и альтернативного варианта Ассоциации мерзлотоведов РФ. В протоколы внесены искажённые данные: якобы ведущие геокриологи поддержали вариант Росгидромета.

- *Концепция «фонового мониторинга» Росгидромета заключается в следующем: н*а территории метеостанции бурится одна скважина глубиной 25,2 м с термокосой на 32 датчика. Планируется 140 метеостанций по сетке ~78–80 тыс. кв. км. Недостатки:

площадки метеостанций нерепрезентативны, недостаточно изучены геокриологические условия, не привязаны к районам хозяйственной деятельности; мозаичность мерзлотных обстановок требует обустройства 15–20 наблюдательных скважин, а не одной; для определения подошвы криогенной толщи необходимы дополнительные глубокие скважины; единичные скважины на территории метеостанций не обеспечит адекватное состояние температурного поля приповерхностной части разреза; состав наблюдаемых параметров недостаточен для геокриологического прогноза Программа Минприроды не предусматривает мониторинг опасных мерзлотных процессов, геокриологические прогнозы и карты. Не предусмотрена связь с геотехническим мониторингом.

Третье

*В геотехническом мониторинге (ГТМ) отсутствуют фоновые наблюдения.* Предприятия нефтегазовой промышленности развивают свою систему ГТМ (площадные и линейные объекты: месторождения, трубопроводы, ЛЭП, дороги). Контролируются состояние объектов и геологической среды в зоне взаимодействия с сооружениями: инструментальные измерения высотного (иногда планового) положения зданий, температурный режим многолетнемёрзлых грунтов оснований, динамика мерзлотно-геологических процессов вблизи инфраструктуры. В последние годы внедряются автоматизированные системы измерений и сбора информации. Базы данных имеют колоссальный (десятки тысяч замеров ) объём, но методики их комплексной обработки и интерпретации не разработаны.

Недостаток систем ведомственного ГТМ: в большинстве случаев не предусмотрен контроль динамики геокриологических условий вне зон застройки (фоновый геокриологический мониторинг) — требования отсутствуют в федеральных и корпоративных нормативных документах. Отсутствие наблюдений за фоновым состоянием не позволяет обоснованно принимать решения по реконструкции и новому строительству с учётом прогнозных оценок на региональном уровне.

Четвертое

*Отсутствует единый координационный методический центр,* включая отделы государственных фоновых и геотехнических геокриологических прогнозов, а также институт проектирования восстановления и реновации зданий и сооружений гражданского назначения для арктической криолитозоны.

Пятое

*Фактор потепления не учитывается в полной мере.* Отсутствует утверждённый государственный климатический прогноз. Сценарии возможного развития климата на ближайшие 50 лет и до конца столетия прогнозируют повышение среднегодовой температуры воздуха от 1,5°С до 4,0°С и более, но эти данные распространяются на огромные территории. Разница между 1,5°С и 4,0°С в строительстве и эксплуатации инфраструктуры могут составить расходы в триллионы рублей. Как использовать эти результаты — ответа нет [1].

***3.Пути решения***

Общепризнанным, в решении возникших проблем, считается путь *создания государственной системы мониторинга вечной мерзлоты* на основании которой, данные регулярных наблюдений позволят осуществлять прогноз и корректировку требований к проектам строительства и эксплуатации инфраструктуры промышленного и гражданского назначения [1].

Создание федеральной структуры по изучению, мониторингу, прогнозу теплового состояния вечной мерзлоты и проектированию объектов гражданского назначения в условиях климатических изменений представляется одной из *главных государственных задач* освоения и сохранения инфраструктуры в Арктике и Субарктике.

*Однако, априори следует признать, что в настоящее время в стране отсутствует организация федерального уровня, которая самостоятельно смогла бы обеспечить решение задачи создания комплексного мониторинга вечной мерзлоты.*

Очевидно, что с учетом масштабов проблемы, необходимости реорганизации ведомственных систем мониторинга вечной мерзлоты и обеспечение единой технической политики требуется создание специализированной структуры управления и финансирования этих работ в долгосрочной перспективе. Такой структурой могло бы стать федеральное агентство (служба) при Правительстве РФ с необходимыми полномочиями по межведомственной интеграции.

Однако, выстроить такую структуру «с нуля», при определенном дефиците кадров и правового обоснования на уровне федерального закон (ФЗ) было бы достаточно опрометчивым.

Исходя из безусловной сложности поставленной задачи, представляется другой путь – *путь инкубационного решения проблемы,* широко применяемого в зарубежном и отечественном бизнесе.

В этой связи создание «Научно-методического центра мониторинга вечной мерзлоты РФ», далее «Центр» (в соответствии с Поручением Президента РФ 1971 п.1 в., Мурманск 2025,) на базе Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, представляется пионерным проектом на пути создания федеральной (государственной) службы мониторинга вечной мерзлоты Российской Федерации. Проект может включать три основных этапа разработки.

*Первый этап* – создание научно-методического центра в крупном научном и учебном заведении, где вопрос обеспечения Проекта высококвалифицированными кадрами не является актуальным.

*Второй этап* – создание постояннодействующей модели Проекта, промышленная апробация и законодательное обеспечение взаимодействий соисполнителей Проекта.

*Третий этап* – передача действующей структуры в систему государственного функционирования.

*Целевое направление работ***.**

Создание Центра при МГУ им. М.В. Ломоносова направлено на разработку промышленной постоянно-действующей модели федеральной структуры межведомственного мониторинга вечной (многолетней) мерзлоты, *включая институт восстановления и реноваций зданий и сооружений гражданского назначения в арктической части территории криолитозоны Российской Федерации*. На последующих этапах работы, по завершению апробации, включая законодательное обеспечение и проведения приемо-сдаточных испытаний, осуществить передачу разработанной структуры в систему государственного функционирования.

Московский университет обладает двумя неоспоримыми преимуществами для реализации этого пионерного проекта. Первое – концентрацией здесь ученых и специалистов высокой квалификации - геокриологов, инженер-геологов, гидрогеологов, метеорологов, климатологов, программистов, экономистов и юристов и др. , и второе - первостатейная возможность обеспечить необходимыми кадрами будущие государственные структуры на всем протяжении их функционирования.

С учетом существующих на сегодняшний день различных, нередко противоположных взглядов, на решение проблемы адаптации к климатическим изменениям и организации структуры мониторинга, как государственной службы, главной задачей и целевым направлением работ будущего «Центра» является интеграция всех существующих многочисленных видов фонового и геотехнического мониторинга вечной мерзлоты в единый межведомственный мониторинг федерального и регионального уровней , обеспеченный всеми необходимыми правовыми нормами государственных законов (и подзаконных актов).

### *4. Мониторинг вечной мерзлоты, как государственная система*

Мониторинг вечной мерзлоты – это система изучения, прогноза и контроля геокриологической среды, оценки изменения мерзлотных, инженерно-геологических и гидрогеологических условий северных регионов под влиянием природных факторов и хозяйственной деятельности человека. Он объединяет фоновый мониторинг (в ненарушенных условиях) и геотехнический мониторинг (ГТМ) зданий и инженерных сооружений, и должен обеспечить надёжную эксплуатацию хозяйственных объектов и защиту окружающей их природы на основе максимального сохранения природных мерзлотно-геологических условий. Эта цель достигается путём координации инженерно-геологических, гидрогеологических и геокриологических исследований, изучения закономерностей механического, теплового, гидродинамического и геохимического взаимодействия объектов с горными породами, а также наблюдением, анализом и прогнозом развития инженерно-геологических процессов [1, 3, 4].

Система геокриологического мониторинга базируется на информационных технологиях (получение данных путём измерения определённых параметров, передача, хранение, обработка и представление информации), а также на разработке прогнозов и технических решений для управления объектом мониторинга.

*Цели и задачи системы мониторинга вечной мерзлоты*

*Цели:*

а) создание и сопровождение геоинформационной системы (ГИС) состояния вечной мерзлоты в РФ, включая состояние территорий перспективного освоения и грунтов оснований зданий и инженерных сооружений;

б) разработка и предоставление заинтересованным организациям и предприятиям краткосрочных и долговременных прогнозов состояния вечной мерзлоты, ее деградации и взаимодействия с основаниями и фундаментами зданий и инженерных сооружений, развития мерзлотных процессов на территории криолитозоны;

в) сбор, хранение и предоставление данных в информационные системы и заинтересованные структуры ФОИВ, органы власти местного самоуправления, учреждения и предприятия, ведущие хозяйственную деятельность на территории распространения вечной мерзлоты;

г) методическое обеспечение наблюдений и разработки прогнозов состояния вечной мерзлоты, проводимыми учреждениями и предприятиями различных ведомств и форм собственности.

Задачи:

а) обеспечение автоматического контроля параметров состояния грунтов, оснований, фундаментов и конструкций;

б) интеграция данных автоматического мониторинга с данными инструментального контроля конструкций, оснований, грунтов;

в) разработка алгоритмов обработки данных, их подготовки для расчётных моделей прогноза;

г) разработка методик и рекомендаций по ведению мониторинга, основанных на научно-исследовательских работах профильных научных учреждений.

д) разработка математических моделей по прогнозу температурного режима грунтов и развития опасных мерзлотных процессов;

ж) предоставление услуг по сбору и обработке данных мониторинга с целью предоставления рекомендаций для прогноза и оперативного реагирования;

з) построение сети передачи и обработки данных на ресурсах провайдеров;

и) использование технологий дистанционного мониторинга – спектрозональных съемок, интерферометрии и контроля вертикальных смещений территорий и объектов с целью прогноза нештатных ситуаций;

к) создание и сопровождение геоинформационной системы (ГИС) состояния вечной мерзлоты в РФ на основе данных объектовых систем мониторинга, верификация данных дистанционными наблюдениями;

л) формирование нормативно-технической базы, обеспечивающей работу системы, как на федеральном, так и на территориальных и объектовых уровнях;

м) обеспечение юридического статуса базы данных и ГИС;

н) формирование федеральной базы данных, реестра пользователей, разработка правил пользования;

о) построение модели развития и внедрения системы на объектах, в промышленных кластерах, территориальных образованиях;

п) предоставление образовательных услуг по повышению квалификации специалистов, работающих на территории криолитозоны.

Законодательное обеспечение совместно с профильными комитетами ГД и СФ

Ответственными исполнителями предполагаются государственные структуры в лице:

- Министерства развития Дальнего Востока и Арктики (***или Федерального агентства по вечной мерзлоте (ФАМ)***
- Министерства природных ресурсов и экологии РФ (ФА "Роснедра", ФА "Росгидромет", ФА "Росприроднадзор")
- Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ,
- Министерство транспорта, Министерство энергетики и др.
- Министерство энергетикиРФ
- Министерства науки и образования РФ (РАН, ВУЗ)
- Региональные органы исполнительной власти

Мониторинг будет эффективным если удастся осуществить:

- ускоренное доизучение и картографирование инженерно-геокриологических и гидрогеологических условий территорий, информация о которых требует актуализации, как не соответствующая современному уровню, необходимому для опережающего экономического развития АЗРФ;
- создание региональных баз и федерального банка пространственно привязанных данных и модулей анализа геокриологических данных, включая данные о факторах изменения геокриологических условий и активности криогенных процессов.
- осуществить сопряжение различных ведомств и координацию их деятельности в части изучения вечной мерзлоты регионов АЗРФ;
- сохранение и использование криогенного технологического и микробиологического потенциала вечной мерзлоты, предотвращение и ликвидацию медико-биологических угроз в Арктике.

С целью эффективного использования результатов мониторинга и геокриологических прогнозов представляется необходимым создать в структуре федерального центра управления мониторингом «*Институт (центр) по проектированию и реконструкции зданий и сооружений гражданского назначения»*, расположенных в криолитозоне Арктики и Субарктики. Актуальность создания такого института и воссоздания ранее существовавших центров реконструкции инфраструктуры в Арктической зоне страны не вызывает сомнений. Безусловно здесь необходимо использовать опыт проведения подобных работ, ранее выполнявшихся на Воркутинской мерзлотной станции и, особенно, в Норильской мерзлотной лаборатории.

С учетом этого положения, одной из главных результирующих выше приведенных задач мониторинга является: разработка и опробование инженерных мероприятий в объемах полупромышленных экспериментов для последующего внедрения полученного опыта в практику работы строительной индустрии и эксплуатирующих организаций;

***5. Управление Центром мониторинга при МГУ им. Ломоносова***

Учитывая новизну предлагаемых решений, управление Центром мониторинга до передачи
его в систему государственного функционирования, должно осуществлять Правление Центра в составе Председателя Правления (одного из проректоров университета) и шести членов Правления, представляющих Университет, РАН и несколько ведущих министерств (Минприроды, Минстрой и ЖКХ, Минэнерго), при этом оперативное управление Центром выполняет Дирекция, назначаемая Правлением.

Главным требованием к персональному составу Центра является профессиональная ориентация специалистов и опыт работы в геологической отрасли в Арктике и Субарктике страны.

***Литература***

1. *Брушков А. В., Алексеев А. Г., Дроздов Д. С. и др.* Мониторинг вечной мерзлоты. — М.: Академический проект, 2024. — 468 с.
2. *Мельников В. П., Осипов В. И., А. В. Брушков и др.* Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов // Криосфера Земли. — 2021. — т. XXV. — № 6. — с. 3–15.
3. Заключение РАН: Проект Федерального закона «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части создания государственной системы мониторинга многолетнемерзлых грунтов» / Вице-президент РАН В. Н. Пармон (23.07.2021). — Новосибирск, СО РАН, 2021. — 2 с.
4. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / Кол. авт. В.А. Кудрявцев, В.Г. Меламед, Л.С. Гарагуля и др. / Под ред. А.В. Брушкова, Л.С. Гарагули. М.: МГУ, 2016.

## КАМЕННЫЕ ГЛЕТЧЕРЫ БАССЕЙНА РЕКИ ЦАГАН-ГОЛ, МОНГОЛЬСКИЙ АЛТАЙ

***Г.С. Дьякова, К.В. Кузнецов, О.В. Останин***
*ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», г. Барнаул*

В высокоприподнятых и засушливых регионах Западной Монголии каждый источник пресной воды имеет важное значение и должен учитываться при оценке водозапасов. Наиболее существенный вклад в обеспечение стока рек на данной территории вносят ледники. Помимо них, источником пресной воды являются подземные воды, которые пополняются во многом за счёт деградации многолетней мерзлоты, а также каменные глетчеры. Важной особенностью последних является высокая инерционность по отношению к климатическим изменениям, по сравнению с классическими ледниками.

В данной работе рассматриваются каменные глетчеры бассейна р. Цаган-Гол (левый приток р. Ховд), расположенного в северо-западной части Монгольского Алтая в пределах 48°52'-49°11' с.ш. и 87°48'-89°07' в.д. Исследуемая территория является частью трансграничного горного узла Табын-Богдо-Ола – ключевой точки, где сочленяются хребты Южный Алтай, Сайлюгем и Монгольский Алтай [6].

Рельеф бассейна р. Цаган-Гол характеризуется значительной вертикальной расчлененностью (превышение вершин над днищами долин достигает 1200-1500 м) и сочетанием островершинного альпинотипного облика с обширными фрагментами древних поверхностей выравнивания – пенепленов, поднятых на высоту более 3000-3500 м [2, 5]. Максимальная отметка – вершина Найрамдал – достигает 4374 м, являясь высшей точкой Монголии и вторым по высоте центром оледенения в горах Сибири и Центральной Азии после массива Белухи [1]. Долина р. Цаган-Гол имеет субширотное простирание, поэтому в бассейне преобладают склоны северной и южной экспозиции.

Климат территории характеризуется резкой континентальностью и выраженной криоаридностью, что обусловлено внутриконтинентальным положением и стационарным влиянием Азиатского (Монгольского) антициклона [1, 2]. Среднегодовая температура воздуха в нивально-гляциальной зоне составляет около –6,5 °С [1]. Для зимнего периода характерны температурные инверсии в межгорных котловинах, способствующие экстремальному выхолаживанию приземного слоя воздуха [1, 2].

Распределение атмосферных осадков демонстрирует значительные градиенты: от 100–250 мм на нижних высотных уровнях до 800–1000 мм в высокогорье [1, 3]. Около 80% осадков выпадают в летний период (май–сентябрь), часто в твердом виде. Инсоляционный режим характеризуется высокой интенсивностью солнечного сияния (2600–3200 часов в год) при низком количестве пасмурных дней [1].

Наиболее существенный вклад в обеспечение стока рек в бассейне р. Цаган-Гол вносят ледники; здесь сконцентрировано около 14% оледенения Монгольского Алтая. На территории бассейна насчитывается 30 ледников общей площадью около 60 км² [4]. Большая их часть (более 90%) расположена на северо-западных и северных склонах.

Территория расположена в зоне сплошного и прерывистого распространения многолетней мерзлоты [1, 5]. Мощность мерзлых толщ в высокогорье достигает 200–500 м при температуре грунтов от –1,5 до –2,5 °С [5]. Криогенный микрорельеф представлен буграми пучения, солифлюкционными террасами, полигональными грунтами и нагорными террасами, выработанными при заложении маргинальных каналов стока [1, 2, 5].

Промежуточное положение в ряду гляциальных и мерзлотных форм рельефа в бассейне занимают каменные глетчеры. Они представлены двумя конвергентными типами: гляциогенными потоками и криогенными потоками.

Гляциогенные потоки представляют собой форму рельефа, сформированную из моренных отложений, включающих ледяные линзы или ядра льда преимущественно гляциального происхождения, обладающую способностью к самостоятельному вязко-пластическому течению под действием силы тяжести, и имеющую генетическую связь с современным оледенением.

Криогенные потоки представляют собой форму рельефа, сформированную из скопления коллювиальных отложений, сцементированных льдом преимущественно неледникового происхождения, и обладающую способностью к самостоятельному вязко-пластическому течению под действием силы тяжести.

Помимо данных двух типов каменных глетчеров выделялись образования смешанного генезиса.

На основе данных дистанционного зондирования в бассейне р. Цаган-Гол выявлено, закартографировано и описано 252 каменных глетчера общей площадью 17,8 км$^2$ (рис. 1). Из них: 230 – криогенные потоки; 20 – гляциогенные потоки и 2 образования смешанного гляциально-мерзлотного происхождения. Средняя площадь каменных глетчеров в бассейне – 0,07 км$^2$; она колеблется в пределах от 0,001 до 0,6 км$^2$.

Результат комплексирования факторов неоднородности сезонно-талого слоя почв и грунтов острова Большевик представлен на рисунке 4 (левая часть). Его верификация проведена по показаниям мерзлотомеров, не участвующих в формировании модели и по данным оценки глубины сезонно-талого щупом в процессе маршрутов, в период достижения максимального уровня оттайки. На рисунке 4 (правая часть) показан фрагмент карты пространственной структуры сезонно-талого слоя почв и грунтов северо-западной части острова Большевик, охватывающая территории приморских равнин и часть возвышенности, на которой залегает ледник Мушкетова.

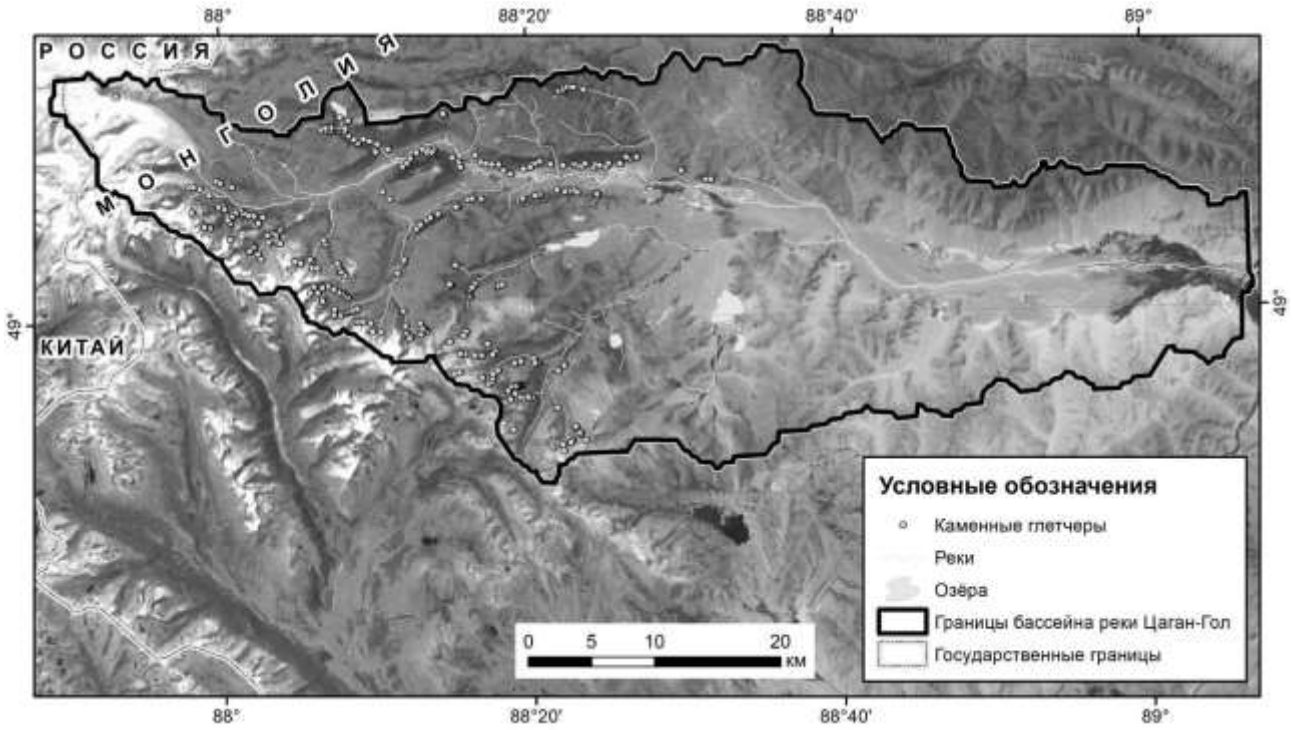



Рис. 1. Каменные глетчеры бассейна р. Цаган-Гол

Результат комплексирования факторов неоднородности сезонно-талого слоя почв и грунтов острова Большевик представлен на рисунке 4 (левая часть). Его верификация проведена по показаниям мерзлотомеров, не участвующих в формировании модели и по данным оценки глубины сезонно-талого щупом в процессе маршрутов, в период достижения максимального уровня оттайки. На рисунке 4 (правая часть) показан фрагмент карты пространственной структуры сезонно-талого слоя почв и грунтов северо-западной части острова Большевик, охватывающая территории приморских равнин и часть возвышенности, на которой залегает ледник Мушкетова.

Эскпозиционная приуроченность каменных глетчеров обусловлена субширотным простиранием бассейна р. Цаган-Гол (рис. 2): 60% каменных глетчеров приурочено к северному макросклону (склонам северной, северо-восточной и северо-западной экспозиций), 33% – к южному макросклону.

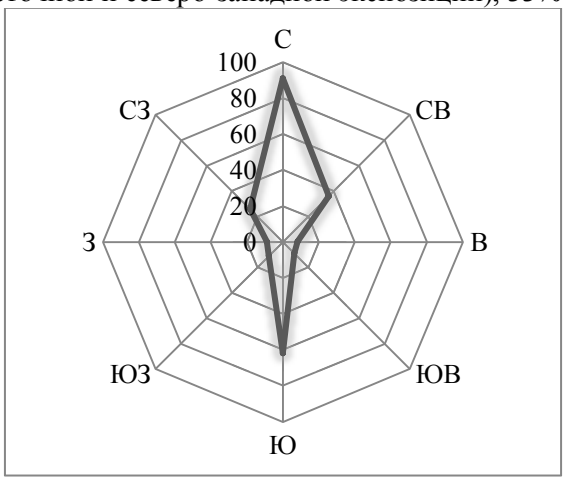



Рис. 2. Экспозиционная приуроченность каменных глетчеров бассейна р. Цаган-Гол

На территории исследования каменные глетчеры встречаются на высотах от 2260 до 3310 м. Распределение по высотным уровням неравномерно: более 70% объектов приурочено к высотам 2600–3000 м (табл. 1).

Каменные глетчеры являются одним из источников водных ресурсов на исследуемой территории. Несмотря на небольшую площадь, в сравнении с площадью оледенения, устойчивость к климатическим изменениям (в особенности изменениям температуры) делает их важным элементом, обеспечивающим устойчивое развитие территории.

Таблица 1

Высотно-экспозиционное распределение каменных глетчеров бассейна р. Цаган-Гол

| Интервалы высот | Экспозиция | | | | | | | | Всего, шт. | Доля, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ | | |
| 2260 – 2400 | 12 | 4 | | | 20 | 2 | | | 38 | 15,1 |
| 2401 – 2600 | 15 | | | | 8 | 2 | | 7 | 32 | 12,7 |
| 2601 – 2800 | 36 | 8 | 2 | 4 | 7 | 3 | | 4 | 64 | 25,4 |
| 2801 – 3000 | 21 | 17 | 4 | 3 | 19 | 3 | 7 | 10 | 84 | 33,3 |
| 3001 – 3200 | 7 | 7 | 2 | 1 | 8 | 1 | 2 | 5 | 33 | 13,1 |
| 3201 – 3310 | | | | 1 | | | | | 1 | 0,4 |
| Итого (шт.): | 91 | 36 | 8 | 9 | 62 | 11 | 9 | 26 | 252 | |

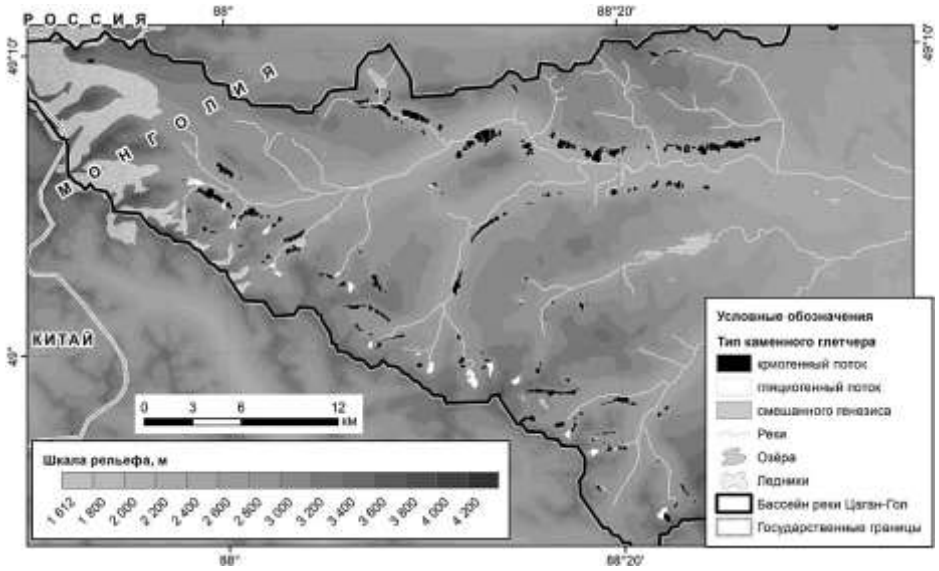



Рис. 3. Типы каменных глетчеров бассейна р. Цаган-Гол

***Литература***

1 Абдульмянов С.Н. Некоторые геокриологические особенности территории Западной Монголии (по результатам экспедиции на Монгольский Алтай) // Вестник МГПУ. Серия «Естественные науки». – 2018. – №2 (30). – С. 40-50.

2 Ганюшкин Д.А. Гляциогенные комплексы резкоконтинентального района северо-запада Внутренней Азии: дис. … д-ра геогр. наук. – СПб., 2015. – 430 с.

3 Ганюшкин Д.А., Чистяков К.В., Волков И.В., Банцев Д.В., Кунаева Е.П., Харламова Н.Ф. Новейшие данные об оледенении северного склона массива Таван-Богдо-Ола (Алтай) // Лёд и Снег. – 2017. – Т.57. – №3. – С. 307-325.

4 Лапина К.В., Останин О.В., Дьякова Г.С. Динамика оледенения хребта Монгольский Алтай (на примере бассейна реки Цаган-Сала-Гол) // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – №9 (155). – С. 72-76.

5 Михайлов Н.Н., Хадбаатар С., Абдульмянов С.Н. Криогенные формы рельефа высокогорий Алтая (на примере национального парка «Алтай Таван Богд», Западная Монголия) // География и природные ресурсы. – 2023. – Т.44. – №3. – С. 189-200.

6 Чистяков К.В., Ганюшкин Д.А., Курочкин Ю.Н. Современное состояние и динамика нивально-гляциальных систем массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола // Лёд и Снег. – 2015. – Т.55. – №1. – С. 49-60.

## УСЛОВИЯ НАКОПЛЕНИЯ МОРСКИХ ОСАДКОВ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ В ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВОЕ-ГОЛОЦЕНОВОЕ ВРЕМЯ

***А.В. Ермаков***

*Геологический институт РАН, г.Москва*

В ходе научных рейсов на НИС «Академик Николай Страхов» в юго-западной части Карского моря были закартированы крупные депрессии: предположительно, затопленные в ходе голоценовой трансгрессии палеодолины рек. В 52 рейсе АНС в одной из палеодолин с поверхности терассовидной площадки в восточном борту с глубины -112м, на участке выявленной разгрузки [1] была отобрана колонка осадков. Подводная долина расположена вблизи краевой зоны ледникового щита времени последнего ледникового максимума. Участки дна к востоку и в пределах самой подводной долины могли подвергаться осушению в период максимального падения уровня моря, о чем свидетельствует распространение островной мерзлоты в этом районе; кроме того, формы рельефа, предположительно связанные с деградацией многолетне-мерзлых пород, зафиксированы ближайшей окрестности долины на возвышенных участках дна. В месте отбора колонки зафиксированы признаки разгрузки газов.

Из рабочей половины колонки методом «субкоринга» был отобран полный разрез (7 секций общей мощностью 3,35м). Были измерены петрофизические свойства осадков (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность, влажность, магнитная восприимчивость), исследованы гранулометрический состав, карбонатность, содержание органического вещества. Из секций керна были отобраны образцы для центрифугирования; в выделившейся поровой воде были определены отношения стабильных изотопов кислорода и водорода. В 10 пробах воды также был определен состав макрокомпонентов методом капиллярного электрофореза. Химический состав осадков был исследован рентгенофлуоресцентным методом (XRF). Литологический состав осадков более подробно обсуждается в статье [1]. Важными особенностями являются: 1) преобладающий алевритовый состав осадков (55-80%), содержание глин лишь в нижней части достигает 25%, в верхней половине колонки имеются два небольших песчаных прослоя; 2) в средней части колонки в судовой лаборатории был обнаружен кристалл икаита размерами 6x2x2 см; 3) карбонатность имеет два максимума в верхней и нижней третях колонки и варьируется от 4 до 15%.

Результаты XRF анализа (концентрации элементов, выраженные в ppm) сопоставлялись с химическим составом поровых вод. Для выделения интервалов в разрезе использовалось отношение Ti/K: считается, что для морских осадков оно отражает интенсивность выветривания в источниках материала и преобладающий тип (физическое – при высоких значениях отношения, химическое – при низких). В разрезе можно выделить два максимума отношения: выше 1,1 и ниже 2,5 м; распределение по разрезу приблизительно соответствует поведению карбонатности. Обратную картину демонстрирует концентрация фосфора – максимумам Ti/K и карбонатности соответствуют минимальные его содержания, и наоборот. Распределение серы и кальция повторяет друг друга; при общем росте концентраций S и Ca от ~0,1% до ~2% вниз по разрезу, выделяются отдельные узкие пики, превышающие фоновые значения в 2-3 раза. Предположительно, минеральный состав представлен аутигенным гипсом, образование которого может быть связано с перемещением вверх сульфатно-метановой транзитной зоны при накоплении новых порций осадка.

В составе макрокомпонентов поровых вод преобладают $Na^+$ и $Cl^-$, рассчитанная по хлору соленость составляет от 30 до 40 ‰, лишь в узком интервале в нижней части колонки опускаясь до 23 ‰; минерализация по сумме катионов и анионов составляет от 30 до 54 г/л. В распределении концентраций ионов наблюдается сходная картина: максимальные значения приурочены к тем же глубинам разреза, на которых выделяются максимумы Ti/K и карбонатности и минимумы P. Концентрации ионов в общем существенно выше типичных морских значений, например, сульфат достигает значений 12 г/л (!). Состав скорее близок к замкнутым бассейнам, испытывающим периодическое разбавление и концентрирование. Изотопный состав постепенно утяжеляется к верху разреза за исключением самой нижней части колонки, где зафиксирован существенный сдвиг в сторону утяжеления по $\delta^{18}O$.

***Литература***

1 Мороз Е.А., Еременко Е.А., Ермаков А.В., Денисова А.П., Драздова А.В., Ананьев Р.А., Архипов В.В., Мазнев С.В. Литологический состав донных осадков в районе разгрузки флюидов в Карском море // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2025. – Т. 523. – № 2. С. 197-203.

# ГЕНЕРАЦИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕШЕНИЙ В ГЕОКРИОЛОГИИ

***А.Ф. Жирков[1], В.П. Осипов[2], Т.А. Винокурова[1], В.И. Балута[2], С.С. Варыханов[2], М.А. Сивцев[1]***
*[1] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*
*[2] Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

Оценка устойчивости природно-технических систем к современному потеплению климата – один из приоритетных вопросов современности. Наблюдаемая в настоящее время активизация криогенных процессов в арктических и субарктических регионах, особенно на нарушенных и антропогенных ландшафтах, показывает актуальность проведения таких исследований.

Начиная с 2023 года в рамках междисциплинарного проекта № 23-61-10032 Российского научного фонда Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (ИМЗ СО РАН) и Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН выполняют комплексные научные исследования по теме «Разработка методов гибридного интеллекта для решения задач диагностики состояния объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера на базе высокопроизводительных вычислительных систем». Успех процесса диагностики зависит от качества обработки экспериментальных и расчетных данных, на основе которых формируются базы знаний об исследуемых процессах и диагностические признаки изменения технического состояния природно-технических систем.

В процессе изучения природно-технических систем традиционно выделялись и до сих пор остаются в числе основных два подхода к описанию их поведения как сложных многопараметрических систем. Первый базируется на накоплении разнородных экспериментальных и натурных данных с их статистической обработкой и поиском эмпирических закономерностей. Второй основывается на использовании физических закономерностей и построении на их основе математических моделей системы. Причем во втором подходе эмпирическая информация частично используется в качестве входной для построения и калибровки моделей. Каждый из этих подходов не лишен недостатков. Недостатки первого подхода обусловлены невозможностью получения данных для всего вероятного спектра изменяющихся условий, высокой стоимостью экспериментальных исследований, трудоемкостью и сложностью обработки экспериментальных данных. Недостатки второго связаны с трудностями обеспечения моделей корректными исходными данными, большим объемом вычислительных работ в случае максимально полного учёта влияющих факторов либо в необходимости значительного упрощении физико-математических моделей среды с потерей прогностической точности.

В последние десятилетия интенсивно развивается альтернативный подход к описанию сложных слабоформализуемых многопараметрических систем, связанный с применением методов нейросетевого моделирования на базе интеллектуальной обработки данных. Нейросетевые модели менее чувствительны к качеству исходных данных, менее требовательны к затратам вычислительных ресурсов, проще адаптируются к различным вариациям входных параметров, сохраняя хорошие прогностические свойства. И тем самым представляются вполне перспективным направлением исследований в сфере геокриологии.

В их пользу свидетельствует и демонстрация успешного использования в аналогичных сферах. Так, в области прогноза погоды на сегодняшний день считается лучшей модель Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF), созданная в 1975 году и постоянно совершенствующаяся на протяжении 50 лет сотнями специалистов. Для расчетов прогноза погоды используется специально выделенный суперкомпьютер Atos производительностью 30 петафлопс, создание которого обошлось в 80 млн. евро., а ежегодные затраты на функционирование самого центра составляют более 170 млн. евро [1]. Команда Google Deepmind разработала нейросетевую модель прогнозирования погоды GraphCast, которая была просто обучена на цифровых исторических архивах погоды за период с 1979 по 2017 годы, а качество её прогнозов оказалось выше, чем у вышеупомянутой ECMWF, при этом сам 10-дневный прогноз рассчитывался за минуту и не требовал огромных суперкомпьютерных ресурсов, как в модели ECMWF [2].

Априори ясно, что условный закон «сохранения сложности» должен проявляться и при использовании нового подхода. Преимущества и упрощения, достигаемые за счет применения нейросетевых моделей в одних областях нивелируются переносом сложностей в другие, а именно, для качественного обучения таких моделей необходимы большие (или очень большие) объемы данных. Данные натурных исследований, накопленные за годы в ИМЗ СО РАН, оказались

недостаточны для получения качественной нейросетевой модели. В связи в этим были запланированы и осуществлены работы по их дополнению массивами синтетических данных, полученных расчетным методом.

**Методика формирования массивов синтетических данных.** В качестве основного метода формирования массива синтетических данных динамики геокриологических условий выбрано численное моделирование на программном продукте Frost 3D [3].

Frost 3D – программный комплекс для моделирования процессов тепломассопереноса в многолетнемёрзлых грунтах с учётом влияния внешних тепловых воздействий. Этот комплекс позволяет получать научно-обоснованные прогнозы тепловых режимов ММП в условиях теплового влияния трубопроводов, добывающих скважин, зданий, гидротехнических и других сооружений с учетом термостабилизации грунта.

Процесс математического моделирования включал следующие этапы. Выбор конкретных площадок, на которых размещены наблюдательные скважины и для которых известна литологическая структура залегающих пород с их характеристиками. Определение момента запуска расчета, исходя из имеющихся натурных данных наблюдений в части распределения температур по глубине скважины. Соответствующее поле температур принимается в качестве начальных данных для расчетной модели. Задание значений остальных входных параметров модели и запуск варианта расчета. В качестве выходных данных фиксируется распределение по глубине среднемесячных значений температуры для каждого месяца в течение года.

В качестве входных параметров, которые поочередно изменяются от варианта к варианту с некоторым шагом в пределах их возможных значений используются следующие. Основными климатическими параметрами для рассмотрения являются средняя температура воздуха, изменение высоты и плотности снежного покрова, изменение уровня атмосферных осадков. Что касается свойств грунтов и горных пород, то основными параметрами выступают влажность, плотность скелета грунта, гранулометрический состав (физико-механические характеристики), а также теплопроводность, теплоемкость и температура замерзания и оттаивания (теплофизические характеристики).

Для одних и тех же начальных данных проводились множественные расчёты при разных значениях входных параметров, выбор которых осуществлялся на основании нижеизложенных соображений.

**Исходные данные для подготовки обучающей выборки.** Для корректного обучения нейросетевых моделей желательно формировать массив синтетических данных с охватом всего возможного диапазона изменения геокриологических условий на экспериментальных участках Центральной Якутии при различных вероятных сценариях изменения природно-климатических факторов. С этой целью был проведен анализ имеющихся экспериментальных и натурных данных, включая климатические параметры территорий исследования, физико-механические и теплофизические свойства грунтов и горных пород, выделены диапазоны их изменений, а именно, извлечены минимумы и максимумы каждой из величин и вычислена разность между этими значениями. Эти данные были использованы для задания количества сценариев по каждому параметру в интересах обеспечения полноты массива синтетических данных.

Если говорить о климатических параметрах, то основными для рассмотрения являются средняя температура воздуха и изменение высоты снежного покрова. В Центральной Якутии наблюдаются значительные колебания этих величин в течение года.

Выполнение расчетов проводилось для экспериментальных участков железной дороги АЯМ, в которых проводится мониторинг состояния ММП силами ИМЗ СО РАН.

Для экспериментальных участков отобраны среднемесячные климатические данные в возможных пределах изменений по метеостанции Покровск. Рассматриваемый диапазон выбран с 1966 года по 2024 год. Использованы данные по среднемесячной температуре воздуха за рассматриваемый период с добавлением наблюдаемого помесячного тренда до 2050 г. и высоте снежного покрова. Проведено выделение минимальных и максимальных значений этих величин относительно каждого месяца за весь рассматриваемый период, а разность между этими значениями использована для вычисления шага изменения соответствующих параметров при задании количества вариантов расчетов.

Так, наибольшая разница между максимальным и минимальным значением приходится на ноябрь месяц – 17,3 °С. Соответственно, количество вариантов по изменению температуры воздуха предложено 18 путем одновременного увеличения шага по температуре в каждом месяце, начиная с минимальных значений, то есть для января месяца шаг составит 0,98, для февраля – 0,91, для марта – 0,92 и так далее.

По высоте снежного покрова наибольшая разница составила 0,43. Предложено 5 вариантов расчета с изменением этой величины, то есть для января, февраля и марта шаг будет составлять 0,09, для апреля – 0,08, для октября – 0,06, для ноября – 0,11, для декабря – 0,10. Таким образом количество вариантов с изменением температуры воздуха и высоты снежного покрова по м/с Покровск составило 90.

Изменение количества атмосферных осадков в наблюдаемом диапазоне учитывается в форме повышения влажности верхних слоев грунтов.

Как отмечено выше, основными параметрами грунтов и горных пород выступают влажность, плотность скелета грунта, гранулометрический состав (физико-механические характеристики), а также теплопроводность, теплоемкость и температура замерзания и оттаивания (теплофизические характеристики).

На экспериментальных участках железной дороги АЯМ, преобладающими горными породами являются супеси, суглинки и пески. В связи с этим классифицируем сценарии в первую очередь по горным породам, далее выделяем классификацию по влажности грунтов и затем по плотности скелета грунта, теплопроводности и теплоемкости. Для того, чтобы охватить всевозможные изменения физико-механических и теплофизических свойств грунтов помимо лабораторных данных, были взяты и расчетные данные по известным номограммам и формулам Р.И. Гаврильева [4].

После сбора и анализа данных, исходя из значений влажности и плотности скелета грунта, предложены следующие сценарии для задания расчетных вариантов:

- для супеси: при условии сухого грунта – 9 сценариев, при влажности 10% – 3 сценария, при влажности 20% – 4, при влажности 30% – 7, при влажности 40% – 6, при влажности 50% – 1;
- для суглинка: при условии сухого грунта – 10 сценариев, при влажности 10% – 10 сценария, при влажности 20% – 2, при влажности 30% – 4, при влажности 40% – 7, при влажности 50% – 5, при влажности 60% – 6, при влажности 70% – 3, при влажности 80% – 2;
- для песка: при условии сухого грунта – 6 сценариев, при влажности 10% – 4 сценария, при влажности 20% – 8, при влажности 30% – 2;

Итого количество сценариев по супесям – 30, по суглинкам – 49, по пескам – 20. Максимальное количество сценариев по пределу изменений физико-механических и теплофизических свойств грунтов составляет 64.

Для расчетов динамики поля среднемесячных температур ММП и глубины протаивания исследуемых участков железной дороги были выделены: пикет 6932 с высотой насыпи около 2,5 метров, пикет 6934 с высотой насыпи 7 метров и пикет 7179, где сооружена нулевая насыпь мощностью 2,2 м с заменой грунта сезоннопротаивающего слоя.

Для всех пикетов в качестве параметров внешней среды использовались граничные условия третьего рода:

- всевозможные варианты изменений температуры воздуха по метеостанции Покровск с добавлением наблюдаемого помесячного тренда до 2050 г.;
- высота снежного покрова в расчетах учитывалась согласно заданным сценариям, при этом теплопроводность снега рассчитывалась по методике Шендера [5].

На нижней границе расчетной области использовалось постоянное значение температуры грунта -2,8 °С для ПК 6932, -2,7 °С для ПК 6934, -1,9 °С для ПК 7179.

Для всех исследуемых участков рассматриваются всевозможные изменения физических и теплофизических свойств материалов (грунтов) согласно их инженерно-геологическим разрезам.

Аналогичным образом спланированы и будут проведены расчеты для других наблюдательных площадок института.

Таким образом, с помощью численного моделирования на основе программного комплекса Frost 3D удается получить массив синтетических данных общим объемом около 5800 строк для каждой моделируемой скважины. Можно полагать, что подобного объема данных достаточно для обучения нейросетевой модели.

**Результаты тестового нейросетевого моделирования.** Процесс разработки качественной прогностической нейросетевой модели предполагает обучение нейросети заданной структуры на части синтетических данных, проверки ее точности на неиспользованной части синтетических данных, а также последующее дообучение модели на натурных данных, полученных в ходе экспериментальных наблюдений за природным объектом.

В рамках настоящего исследования была проведена серия вычислительных экспериментов, направленных на оценку применимости искусственных нейронных сетей прямого распространения

(многослойных перцептронов, MLP) для решения задачи моделирования теплового состояния грунтов в криолитозоне. Целью исследования являлась проверка способности нейросетевых алгоритмов различной структурной сложности восстанавливать многомерную нелинейную зависимость между комплексом перечисленных выше входных климатических, физико-механических и теплофизических параметров и результирующим температурным профилем по глубине грунтовой среды, с выделением величины сезонно-талого слоя в качестве отдельного параметра.

Входные данные для моделирования описаны выше, целевыми переменными, подлежащими предсказанию (то есть выходными данными), являлись глубина протаивания и вектор значений температуры грунта на различных глубинах. Таким образом, размерность выходных данных задачи составляла одиннадцать независимых компонент, что характеризует ее как задачу множественной регрессии высокой размерности.

Для решения поставленной задачи аппроксимации были сконструированы и подвергнуты процедуре обучения три варианта архитектуры многослойного перцептрона, различающихся топологией скрытых слоев и, как следствие, общей емкостью модели. Выбор конкретных конфигураций был продиктован необходимостью проследить влияние увеличения глубины и ширины представления на точность предсказания параметров. Исследовались следующие архитектурные решения:

Первая, наиболее простая из рассматриваемых полносвязных нейросетевых топологий, характеризовалась наличием единственного скрытого слоя, содержащего 64 нейрона. Данная конфигурация может быть охарактеризована как модель с умеренным числом степеней свободы, ориентированная на выявление первичных нелинейных закономерностей в данных при относительно невысоких вычислительных затратах.

Вторая архитектура предусматривала переход к двухслойной структуре с последовательным уменьшением размерности скрытого пространства. Первый скрытый слой содержал 256 нейронов, обеспечивая широкое пространство для нелинейного преобразования входных признаков, а второй скрытый слой, сужающийся до 128 нейронов, выполнял функцию извлечения наиболее значимых признаковых инвариантов. Подобная конфигурация (256, 128) обладает существенно большей репрезентативной способностью и предназначена для улавливания более сложных взаимодействий между входными переменными.

Третья испытуемая архитектура представляла собой дальнейшее углубление сети до трех скрытых слоев с конфигурацией (256, 128, 64). Добавление третьего каскада нелинейных преобразований, завершающегося сужением до 64 нейронов, теоретически позволяет модели формировать иерархические абстракции высокого уровня, что может способствовать более точному воспроизведению тонкой структуры вертикального температурного профиля, особенно в зоне фазового перехода, характеризующейся резкими градиентами теплофизических свойств.

В качестве базисной линии для сравнительной оценки эффективности нелинейных методов была задействована классическая модель множественной линейной регрессии, построенная методом наименьших квадратов. Включение линейной модели в сопоставительный анализ необходимо для верификации гипотезы о наличии в данных существенной нелинейности, не поддающейся адекватному описанию в рамках линейной парадигмы.

В табл. 1 представлены сводные результаты оценки качества работы рассмотренных моделей на отложенной (контрольной) тестовой выборке синтетических данных. В качестве ключевой метрики эффективности использовалась среднеквадратичная ошибка (RMSE), характеризующая абсолютную величину невязки предсказания в физических единицах измерения.

Таблица 1

Среднеквадратичная ошибка (RMSE) для пикета 7179 (под объектом)
(ξ – глубина протаивания в метрах, T<число> – температура на глубине <число> в °C)

| Модель | ξ M | T0 °C | T1 °C | T2 °C | T3 °C | T4 °C | T5 °C | T6 °C | T7 °C | T8 °C | T9 °C | T10 °C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Регрессия | 4.805 | 2.248 | 2.033 | 1.982 | 1.906 | 1.689 | 2.235 | 2.535 | 2.59 | 2.504 | 2.355 | 2.189 |
| MLP (64) | 1.344 | 0.053 | 0.063 | 0.072 | 0.083 | 0.075 | 0.075 | 0.077 | 0.072 | 0.077 | 0.08 | 0.081 |
| MLP (256,128) | 0.949 | 0.036 | 0.044 | 0.045 | 0.057 | 0.053 | 0.057 | 0.069 | 0.062 | 0.072 | 0.076 | 0.068 |
| MLP (256,128,64) | 0.968 | 0.045 | 0.034 | 0.045 | 0.054 | 0.061 | 0.057 | 0.065 | 0.069 | 0.094 | 0.058 | 0.06 |

Анализ представленных в таблице численных значений позволяет констатировать следующее. Модель линейной регрессии демонстрирует крайне низкую прогностическую способность. Данное обстоятельство служит прямым эмпирическим подтверждением сложной нелинейной природы взаимосвязи между термодинамическими характеристиками мерзлого массива и факторами внешней среды, что делает применение нейросетевых методов прогнозирования более перспективными.

Даже простейшая архитектура с одним скрытым слоем на 64 нейрона позволяет повысить коэффициент детерминации почти в два раза по сравнению с линейным базисом, снизив ошибку предсказания температуры в несколько раз. Дальнейшее усложнение структуры сети посредством введения второго и третьего скрытого слоя приводит к незначительному приросту точности.

С целью обеспечения статистической значимости получаемых оценок была реализована процедура k-блочной кросс-валидации. Выбор данной методологии продиктован необходимостью получения оценки отражающей способности моделей, особенно критичной при работе с вычислительно емкими архитектурами многослойных перцептронов, склонными к переобучению в условиях ограниченного объема синтетических данных. Процедура кросс-валидации была унифицирована для всех тестируемых конфигураций MLP, а также для модели линейной регрессии, выступающей в роли эталонного базиса.

Синтетическая выборка была разделена на пять непересекающихся подмножеств приблизительно равного объема (фолды). В связи с упорядоченностью изменений входных параметров, данные распределялись по подмножествам случайным образом. На каждой итерации четыре из указанных подмножеств использовались для оптимизации весовых коэффициентов модели, в то время как оставшееся пятое подмножество резервировалось для расчета контрольных метрик. Данный процесс циклически повторялся таким образом, чтобы каждое подмножество единожды выступило в качестве валидационного.

Результатом кросс-валидационного анализа для каждой архитектурной конфигурации явилось не точечное значение ошибки, а распределение показателей точности по пяти независимым запускам. В качестве итоговой оценки эффективности модели использовалось среднее арифметическое коэффициента детерминации $R^2$ и среднеквадратичной ошибки RMSE по всем фолдам, характеризующее степень устойчивости модели к изменению состава обучающей подвыборки.

**Выводы.** Проведенное исследование убедительно демонстрирует преимущество многослойных перцептронов перед методами линейного регрессионного анализа при работе с данными, описывающими температурное поле мерзлых грунтов. Лучшей с точки зрения соотношения точности и структурной сложности для решения задачи предсказания глубины протаивания и распределения температуры до глубины 10 метров по имеющемуся синтетическому набору данных оказалась архитектура MLP с конфигурацией скрытых слоев (256, 128). Предсказание распределения температур по глубине на базе нейросетевой модели демонстрирует достаточно высокую точность. Хотя качество предсказания глубины протаивания несколько хуже, однако достаточно для использования в реальных задачах.

Таким образом можно заключить, что уже на текущем предварительном этапе применения нейросетевых моделей удалось получить вполне удовлетворительные результаты, показывающие перспективность данного направления работ.

***Литература***

1 Винштейн И. Нейросетевая революция в метеорологии. Как машинное обучение может навсегда изменить прогноз погоды. / [Электронный ресурс] URL: https://habr.com/ru/articles/775236/.

2. Remi Lam et al. Learning skillful medium-range global weather forecasting // Science, Vol. 382, No. 6677, p. 1416-1421, https://www.science.org/doi/10.1126/science.adi2336.

3. Специализированный программный комплекс Frost 3D. Сертификат соответствия № РОСС RU.НА36.Н04808, выданный центром сертификации программной продукции в строительстве.

4. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне: Справочное пособие. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 146 с.

5. Шендер Н.И. Рекомендации по прогнозу температурного режима грунтов (на примере центрального и восточного участков зоны БАМа). – Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1986. 58 с.

## ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ГОРОДЕ ЯКУТСКЕ

***Заболотник П.С., Чжан А.А.***

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

Город Якутск, являющийся административным центром Республики Саха (Якутия), расположен на левобережной террасе р. Лены в районе 62° с. ш. и представляет собой крупнейшее в мире поселение, возведенное в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Мониторинг температурного режима грунтов на городских объектах осуществляется многими организациями, в том числе Институтом мерзлотоведения СО РАН.

Климатические условия территории характеризуются выраженной континентальностью. В зимний период под влиянием сибирского антициклона устанавливается стабильно морозная и малооблачная погода; длительность холодного сезона (октябрь — апрель) составляет около 200 суток. Амплитуда годовых колебаний температуры воздуха достигает 100°С. Среднемноголетняя сумма осадков составляет 237 мм, из которых от 48% до 79% выпадает в теплый период года. Средняя годовая скорость ветра — 1,7 м/с с максимальными значениями в мае-июне и минимумом в декабре-январе [1].

Мощность криолитозоны в регионе варьируется от 100 до 300 м. Среднегодовые температуры ММП на глубине нулевых годовых амплитуд (20 м) в естественных условиях составляют от -2 до -4°С [2]. Данные параметры определяют приоритетность строительства по I принципу, предусматривающему сохранение мерзлого состояния грунтов оснований в течение всего периода эксплуатации зданий, что реализуется преимущественно через использование свайных фундаментов.

Геологический разрез верхней толщи представлен четвертичными аллювиальными отложениями и техногенными грунтами, подстилаемыми эродированной поверхностью юрских пород [3]. Морфология долины Лены, характеризующаяся фуркирующим руслом, обусловила специфику городской территории: она представляет собой систему реликтовых островов и проток, преобразованных в старичные озера. В ходе урбанизации данные депрессии были нивелированы насыпными грунтами, однако участки палеоводоемов до настоящего времени выделяются локальными тепловыми аномалиями и повышенными температурами грунтов.

Вторым важным фактором для формирования температурного поля является затенение территории. Строительство многоэтажных домов, и сооружений с большой площадью фундаментов привело к образованию обширных затененных участков. Для оценки влияния затененности территории и плотности застройки на температурный режим грунтов основания осенью 2022 года были пробурены 2 скважины глубиной 12 м на расстоянии 140 м друг от друга в пределах одного квартала (64 квартал Октябрьского района г. Якутска). Геологическое строение обоих участков идентично и представлено песком мелким с распределением влажности по глубине от 22 до 30 %.

Поверхностные условия обоих участков характеризуются наличием выровненного искусственного покрытия. Первый участок, в центральной части территории (скв. 66), представляет собой автостоянку с бетонным покрытием, застроенной многоквартирными домами по периметру. В зимний период снежный покров постоянно подвергается уплотнению за счет движения автотранспорта, что значительно уменьшает его теплоизоляционные свойства. Таким образом участок характеризуется длительным затенением, и уплотнением снега. Второй участок (скв. 67) располагается на открытой поверхности и относится к границе сквера между зданием и автодорогой с покрытием их тротуарной плитки. В зимний период на поверхности участка происходит уплотнение снега за счет движения людей. Боковая часть сквера, где непосредственно расположена наблюдательная скважина 67, не подвержена этому влиянию и накопление снежного покрова происходит в естественном режиме. В летний период площадка из-за её открытости подвержена естественной солнечной радиации.

Средние годовые значения температуры воздуха в г. Якутске по данным ЯУГМС были следующими: -6,9 °С в 2022 г., -7,8 °С – 2023 г., -7,1 °С – 2024 г. Измерения температуры грунтов в скважинах проводились: в 2022–2023 гг. ежемесячно, в 2024–2025 гг. – значительно реже в связи с малой изменчивостью значений температуры грунта из года в год.

На рисунке 1 представлено распределение температуры грунта по глубине.

Средняя годовая температура грунта (среднее значение) на участке скважины 66 составляет -5,04 °С (рисунок 1.2), у скважины 67 – -2,82°С (рисунок 1.3), то есть разница между средними годовыми значениями температуры грунта на глубине 12 м составляет около 2,2°С. Распределение температуры грунта по глубине представлено в крайних и средних значениях. Максимальная мощность слоя сезонного оттаивания у скважины 66 составило в сентябре около 1,2 м, а у скважины 67 – 3 м. Значения температуры грунта на глубине 12 м в начала октября 2025 г. имели значение: -5,6 и -3,1°С соответственно.

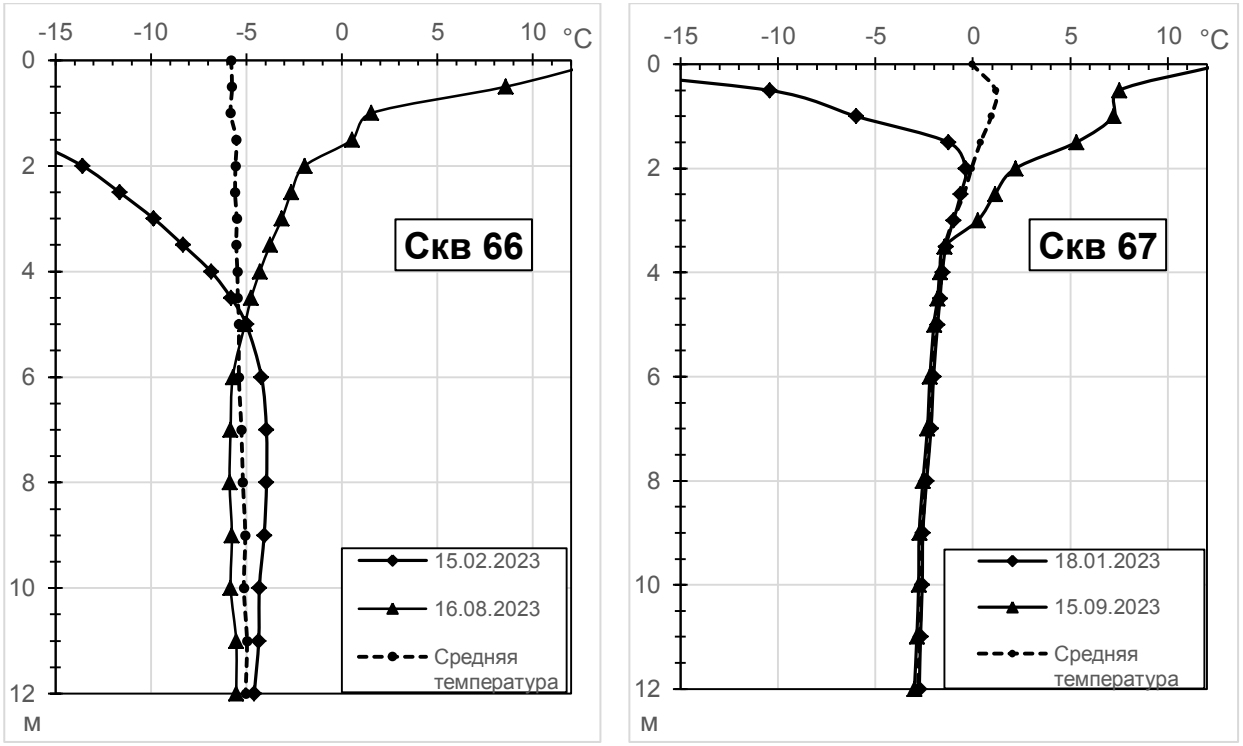



Рис. 1. Распределение температуры по глубине в скважинах 66 и 67.

Мониторинговые наблюдения на здании центра охраны материнства и детства с открытым проветриваемы подпольем высотой от 1,2 до 2,5 м так же показало, что самые низкие температуры формируются в центральной и северо-восточной части комплексов зданий, куда затруднено попадание прямых солнечных лучей (рис. 2).

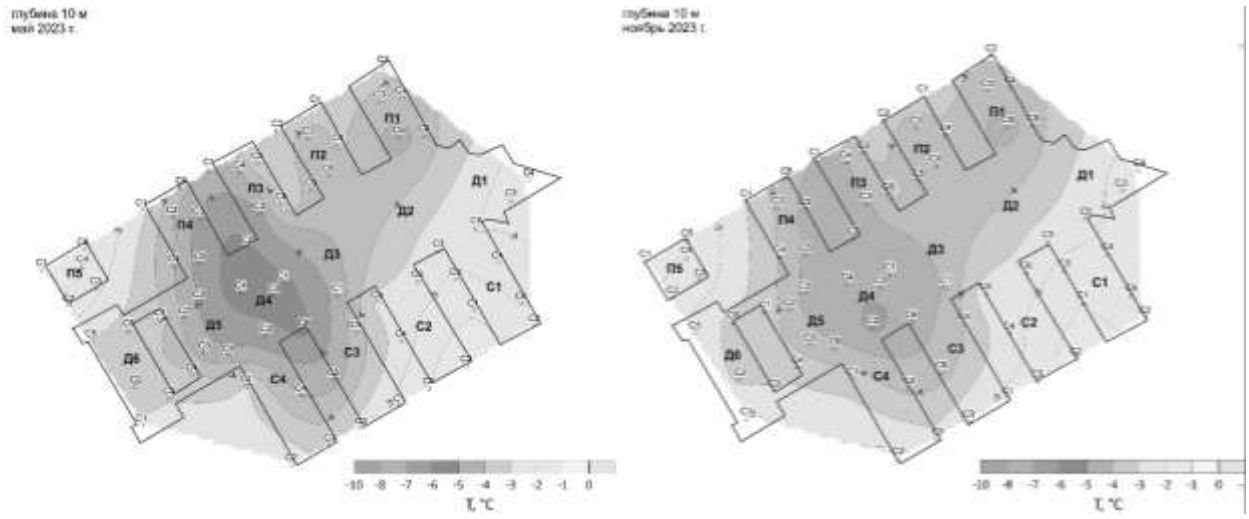


Рис. 2. Распределение температуры грунта в основании здания центра охраны материнства и детства «РБ№1-НЦМ» на глубине 10 м на май и ноябрь 2023 г.

Но самыми сильными по воздействию являются техногенные факторы. По степени воздействия на мерзлые грунты самым сильным являются аварийные утечки из коммуникаций. Даже при краткосрочном воздействии горячей воды на грунты, слагающие основания зданий, происходит изменение их состояния с мёрзлого на талое, что приводит к снижению несущей способности грунтов. Авторы неоднократно наблюдали за последствиями такого воздействия.

В результате проведения геотермического мониторинга территории Якутской ТЭЦ выявлено аномальное повышение температуры грунтов в скважине №37-2 расположенной рядом со зданием оперативно-диспетчерской службы. При обнаружении 13 марта в интервале 8,5–10,0 м температура достигала значений +40,9…+42,0°С (рис. 3). В результате сформировался крупный талик. При

повторных измерениях 21, 29 марта и 5 апреля наблюдалось её слабое снижение до 38,3°С. Последующее понижение температуры в этом интервале связано скорее всего с её уменьшением в системе отопления. В августе деятельный слой оттаял до 2,4 м, а температура в талике понизилась до +20,2°С. К 20 ноября слой сезонного оттаивания полностью промерз, а температура нижележащей толщи убавилась до +17,1°С. Можно сделать вывод о том, что поступление тепла в грунты основания прекратилось, но восстановление температурного режима идёт очень медленно.

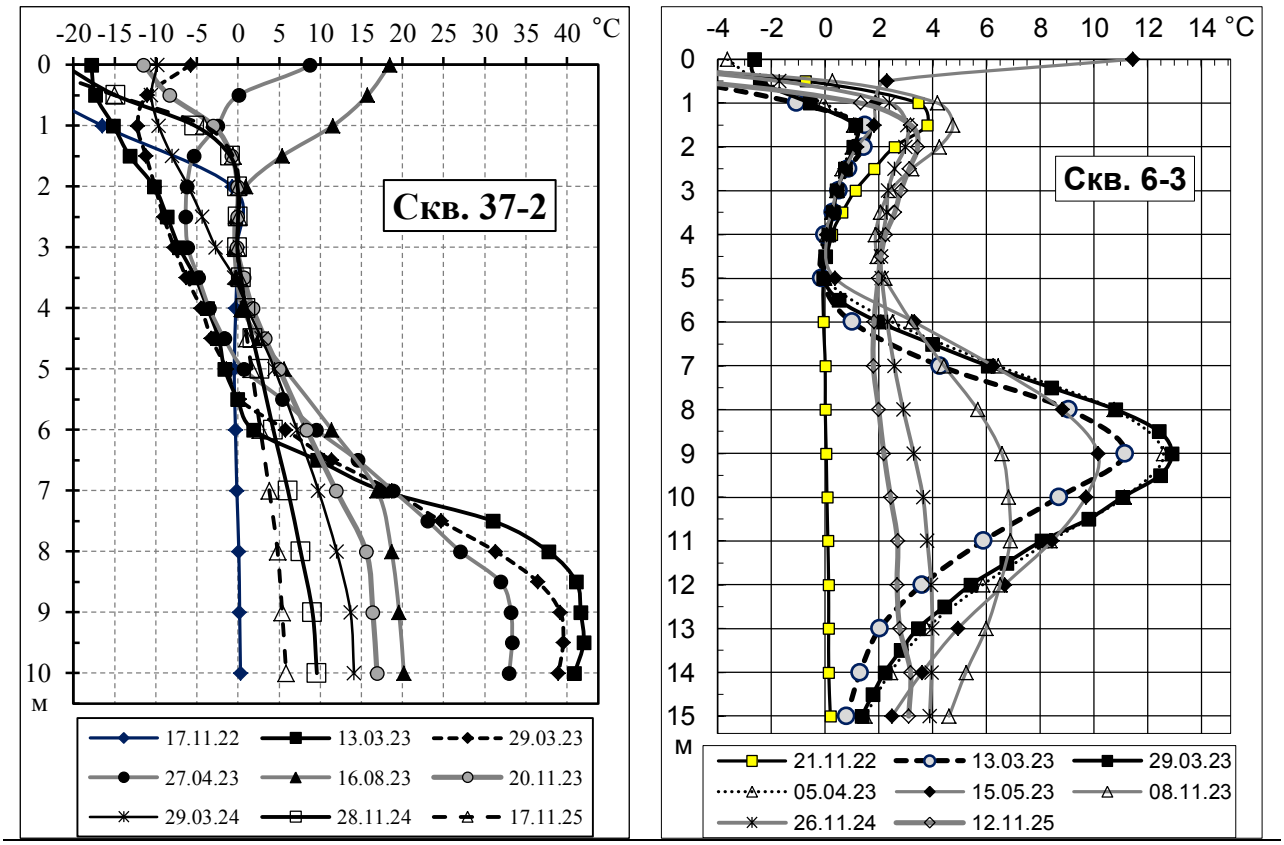



Рис. 3. Распределение температуры по глубине в скважинах 37-2 и 6-3.

Повышение температуры грунтов в данном районе возможно только за счёт конвективного теплопереноса. Для определения источника поступления тепла 29.03.2023 г. были отобраны пробы воды из скважины №37-2, системы отопления и водоёма у ЯТЭЦ.

Анализ показал, что вода из скважины №37-2 (хлоридно-гидрокарбонатная кальциево-натриевая, минерализация 0,374 мг/л) не является конденсатом из-за повышенной минерализации. Низкое содержание азотистых соединений также делает маловероятным её поступление из канализации. Наиболее вероятной причиной являются утечки из систем отопления, а обогащение пробы ионами магния и кальция объясняется взаимодействием тёплых вод с вмещающими грунтами.

Сформировавшийся талик протянулся на 40 метров до западной стены Объединённо-вспомогательного комплекса. В скважине 6-3 на глубине 9,0 м в марте 2023 г. температура поднялась с +11,2°С до +12,9°С. Позже в интервале 8–11 м началось понижение температуры, однако ниже 12 м прогрев продолжался, увеличивая глубину талика. В ноябре 2023 г. был зафиксирован новый тепловой импульс: температура на глубинах 9–12 м вновь поднялась до +6,5...+6,9°С, что свидетельствует о продолжающемся поступлении тепла во втором полугодии.

В 2024–2025 гг. температурные значения постепенно выровнялись и снизились до +1,3...+3,2°С. Тем не менее, из-за накопленного в массиве тепла зимнее проникновение холода существенно сократилось: в феврале 2026 г. глубина сезонного промерзания в этой зоне составила всего 1,2 м.

В условиях города Якутска большинство коммуникаций, закопанных в грунты приводит к растеплению последних с образованием просадок. Не надо иметь карты прокладки труб под дорогами, они хорошо обнаруживаются при визуальном обследовании по деформациям и провалам в асфальте.

Для борьбы с последствиями утечек с 1970-х годов в Якутске активно используют установку сезоннодействующих охлаждающих установок (СОУ). СОУ хорошо зарекомендовали себя для охлаждения мерзлых грунтов, однако в случае движения горячей воды в грунте они не справляются.

Строительство зданий на свайном фундаменте с проветриваемым подпольем за счет затенения летом и отсутствия снега зимой приводит к значительному снижению температуры грунтов оснований и позволяет успешно противостоять глобальным климатическим изменениям. Современные здания имеют достаточно хороший теплоизолированный ростверк благодаря чему теплопотери сравнительно малы, чтобы оказывать значимый эффект на грунты основания.

Наиболее хорошо себя зарекомендовали высокие подпольные пространства. Коммуникации, располагающиеся в подпольях, часто выходят из строя, в низком подполье к ним ограничен доступ, часто аварии вообще остаются не замеченными. Высокое, открытое подполье позволяет оперативно реагировать на аварийные ситуации и имеет возможности для доступа техники и оборудования для ремонта. Хороший доступ под здание позволяет использовать данное пространство для автомобильных стоянок.

Развитие технологии каркасно-монолитного строительства позволяет без существенных затрат увеличивать высоту проветриваемых подполий. Помимо новых архитектурных форм, высокие подпольные пространства позволят называть наш город не «городом на курьих ножках, с кишками наружу», а «городом, стремящимся в небо».

***Литература***

1 Справочник по климату СССР. Вып. 24, Якутская АССР. Ч. III .Ветер. / Отв. ред. С.А. Изюменко. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1967. 270 с.

2 Балобаев В.Т. Геотермия мёрзлой зоны литосферы севера Азии. – Новосибирск: Наука, 1991. – 193 с.

3 Спектор В.Б., Спектор В.В., Бакулина Н.Т. и др. Выступ юрских отложений на днище долины р. Лена // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467, № 2. С. 196-199.

## ПРОЯВЛЕНИЕ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСТРОВАХ ОНЕКОТАН И ШУМШУ (КУРИЛЬСКАЯ ГРЯДА)

***Н.А. Задорожная***
*Институт географии РАН, г. Москва*

**Введение.** Острова Онекотан и Шумшу относятся к Большой Курильской гряде. Среди опасных природных явлений на островах выделяются землетрясения, цунами и тайфуны, извержения вулканов (на Онекотане), а также обвалы, оползни, ураганы, штормовые нагоны [1].

Курильские острова ранее подробно изучались вулканологами и геологами, но до настоящего момента практически отсутствовали опубликованные материалы по развитию криогенных процессов и явлений на данных территориях. Благодаря экспедициям Русского Географического Общества «Восточный Бастион – Курильская гряда», состоявшихся в июле-августе 2024-2025 гг., были впервые собраны ценные данные о формировании криогенного рельефа на этих островах.

Возможность развития геокриологических процессов на изученных территориях обусловлена в значительной степени географическим положением и климатическими особенностями региона. Острова Онекотан и Шумшу относятся к Северным Курильским островам, которые находятся под влиянием барических систем, формирующихся над холодными водами северной части Тихого океана, Охотского моря и холодного Курильского течения. Климат холодный, имеет субарктические черты, характеризуется высокой влажностью воздуха и повышенным ветровым режимом, а также суровой снежной зимой и влажным прохладным летом. Юго-восточные и южные течения с Тихого океана обуславливают большую повторяемость туманов (до 160 дней в год). На северных островах Курильской гряды отмечается самое низкое значение летней температуры воздуха (средняя температура августа +10 °С) в Северном полушарии на соответствующих широтах. Годовая сумма осадков колеблется от 500-600 мм до 1100-1700 мм, треть из них выпадает в холодный период. Острова Онекотан и Шумшу по физико-географическим условиям приравниваются к районам Крайнего Севера, поэтому считаются неблагоприятными для проживания и ведения сельского хозяйства.

**Районы исследования.** На острове Онекотан находятся два действующих вулкана, расположенных в кальдерах (вулкан Креницына и Немо). Для Онекотана отмечена нечеткая высотная поясность, но в верхнем поясе можно выделить тундровые и луговые комплексы, а на скалистых склонах большой крутизны развиты горно-тундровые сообщества. Остров Шумшу – самый северный и самый низкий из островов Курильской гряды, отделённый от полуострова Камчатки Первым

Курильским проливом. Рельеф равнинный, что уникально для Курильских островов, вулканов нет. В целом, на острове представлены пологонаклонные поверхности с развитием луговой, кустарничковой и кустарниковой растительности. Суровый климат способствует произрастанию на островах достаточно угнетенной (низкорослой) растительности, особенно много шикши, голубики, мхов и лишайников, что характерно для тундровых сообществ. На обоих островах они распространены на открытых участках, подверженных сильному ветровому переносу и частым продолжительным туманам, что благоприятно для широкого распространения криогенных форм рельефа и развития современных геокриологических процессов.

Представленные материалы по геокриологическим условиям рассматриваемых островов имеют огромную ценность в связи с труднодоступностью и малой изученностью этих регионов. Важную роль в развитии криогенных процессов играет геологическое строение и палеогеография островов.

Остров Онекотан сложен комплексом олигоцен-четвертичных вулканогенных и вулканогенно-обломочных пород. В верхних частях разрезов в долинах рек и в береговых обнажениях можно выделить пролювиальные и аллювиальные отложения, горизонты тефры. При изучении почвенных разрезов отмечалось несколько отчетливо читаемых слоев пеплов, маркирующих известные извержения на Онекотане и соседних островах. Гранулометрический состав отложений в шурфах представлен преобладанием пылеватых песков с включениями гравия, дресвы, гальки, щебня. Это обусловлено переносом и перемешиванием материала за счет различных геологических (вулканизм, землетрясения, трансгрессии и регрессии моря) и геоморфологических (денудация, склоновые процессы, эрозия, криогенное выветривание, экзарация и др.) процессов.

Ведущими природными процессами, формирующими современный облик рельефа и ландшафтов, являются: современный вулканизм, склоновые процессы, формирование и таяние большого количества снежников, перенос материала дождевыми потоками, криогенные процессы, влияние тайфунов и активный ветровой перенос между Охотским морем и Тихим океаном, продолжительные туманы. На Онекотане представлена сложная геоморфологическая структура. Большая часть территории острова изрезана мелкими и крупными речными долинами, распространен овражно-балочный рельеф, а также на открытых участках с сильными частыми ветрами развит бугристо-западинный рельеф, на склонах развита солифлюкция.

Остров Шумшу представляет собой территорию с повсеместно выраженными сильными антропогенными изменениями. На открытых тундровых участках с сильными ветрами и частыми туманами широкое распространение имеют криогенные формы рельефа, на склонах развита солифлюкция. Среди ведущих природных процессов, формирующих современный облик рельефа и ландшафтов, стоит отметить: ветровой перенос между Охотским морем и Тихим океаном через территорию острова, продолжительные туманы, влияние цунами, геокриологические и флювиальные процессы. Вдобавок территория острова изрезана речными долинами, распространен овражно-балочный рельеф, существует множество заболоченных участков и мелких, крупных озер различной формы. Среди мерзлотных форм рельефа повсеместно площадное распространение имеют: кочковато-бугристый рельеф, выраженный в виде полей и полос пучения (туфуров), пятна-медальоны, структурные грунты.

Остров в значительной степени сложен четвертичными отложениями, перекрывающими более древние образования, в почвенных профилях встречаются горизонты пепла. Для шурфов, исследованных на острове Шумшу, характерно переувлажнение почв, пылеватый гранулометрический состав, наличие подстилающих скальных пород.

Совокупность всех перечисленных климатических, геологических, геоморфологических и ландшафтных условий обеспечила на островах благоприятную обстановку для возникновения криогенных процессов в деятельном слое. В результате сезонного промерзания и протаивания мелкодисперсных переувлажненных пород возникают морозное пучение и криотурбации.

**Проявление криогенных процессов.** В результате полевых исследований было выявлено, что, несмотря на положение островов вне классической области многолетней мерзлоты, на обширных пологих и наклонных поверхностях складываются условия для проявления криогенных процессов и явлений. Наиболее распространёнными являются поля пучения (туфуры), пятна-медальоны и солифлюкция. Сильнее всего они выражены вдоль дорог или троп, на наветренных склонах, открытых продуваемых пологонаклонных поверхностях, часто переувлажненных. Это указывает на уникальность локальных условий, способствующих криогенезу в результате сезонного промерзания и оттаивания.

На острове Онекотан между горных массивов широко распространены открытые пологонаклонные территории, которые подвержены сильным ветровым переносам с Охотского моря

и Тихого океана, там практически отсутствует кустарниковая растительность. На таких участках и хорошо продуваемых склонах тундровая или тундроподобная растительность маркирует развитие геокриологических процессов. Активное проявление криогенных форм рельефа, таких как пятна-медальоны и поля пучения, максимально выражено от западной части острова до центральной, где преобладают холодные потоки воздуха с Охотского побережья.

На острове Шумшу сильное влияние на всю территорию острова оказывают ветровые потоки с Охотского моря и Тихого океана, способствуя развитию криогенных процессов на большей части территории. В дополнение к схожим с о. Онекотаном геокриологическим явлениям, здесь встречаются озера, предположительно образовавшиеся в результате термокарста, который в прошлом развивался на данной территории. Большие площади острова сильно заболочены и заозерены, что также может быть признаком существования многолетнемерзлых пород в предыдущие климатические этапы.

Вдоль всех дорог, существующих на острове Шумшу, выявлены криогенные процессы. При удалении от нарушенных участков степень их проявления снижается, что говорит о непосредственном влиянии дорожной сети на формирование рельефа острова. Речь идет о нарушении водного режима поверхности, тепловом воздействии, изменении стока поверхностных вод, перераспределении грунтов, изменении снегонакопления на поверхности, непосредственно влияющего на температурно-влажностный режим пород.

В результате сочетания рельефа, довольно суровых климатических и местных геологических особенностей островов на пологонаклонных поверхностях, не закрытых от ветра хребтами, возникают локальные условия для существования скудного растительного покрова, скопления большого количества влаги в приповерхностных слоях пород, сдувания снежного покрова, а также малого поступления солнечного света из-за частых продолжительных туманов. Все эти факторы приводят к глубокому и быстрому промерзанию пород, которое влечет за собой неравномерный переход влаги в мерзлое состояние, увеличивая объем отложений за счет морозного пучения. Процессы влаго- и массопереноса в породах во время промерзания могут сильно различаться в зависимости от микрорельефа и особенностей растительного покрова, который может задерживать снег, оказывающий отепляющее влияние.

Размер бугров пучения в пределах островов варьируется от более мелких (до 1 метра в диаметре, около двадцати сантиметров в высоту) до более крупных (более 1,5 метров в диаметре, до 1 метра в высоту). Скопления бугров образуют туфуровые поля (или площади пучения), на крутых склонах они сливаются в полосы пучения. Бугры на туфуровых полях в большей степени расположены упорядоченно, образуя параллельные ряды или сетчатый (полигональный) рисунок.

Туфуры в разных регионах могут быть как унаследованными древними формами рельефа, так и образовываться в нынешнее время. Существование многолетнемерзлых пород в позднечетвертичные холодные геологические эпохи могло координально изменять рельеф местности, что может иметь отражение и в современных ландшафтах. Довольно часто туфуры наследуют реликтовые формы, так как при промерзании-протаивании в понижениях и на буграх промерзание и миграция влаги происходят в разное время и с разной скоростью, а современные процессы просто усиливаются на уже подверженной криогенезу территории. Наиболее вероятно, что наблюдаемое в наше время проявление мерзлотных форм рельефа связано с совокупностью процессов, в том числе с образованием морозобойных трещин и формированием полигональной сети в прошлые холодные периоды, а также современным площадным развитием миграционных бугров пучения.

Туфуровые поля могут возникать вне условий вечной мерзлоты при глубоком сезонном промерзании увлажненных пород, невысоких среднегодовых температурах воздуха и сдуваемом сильными зимними ветрами снежном покрове. Все эти условия соблюдаются на островах в местах распространения упоминаемого криогенного рельефа, соответственно, развитие процессов может быть современным. Наиболее часто описываемый механизм образования туфуров вне зоны ММП заключается в начальном промерзании микроповышений, при котором увеличивается разность температур между лишенными снега повышениями и заснеженными понижениями, происходит миграция влаги к фронту промерзания, а затем и перераспределение минеральных частиц, тем самым с каждым годом микроповышение будет увеличиваться [2].

В пределах распространения криогенного рельефа были выкопаны шурфы. Наряду с описанием, производился отбор образцов на гранулометрический состав, а также измерялась температура и влажность пород. В шурфах, исследованных на обоих островах в районе распространения пятен-медальонов и бугристо-западинного рельефа, наблюдаются отчетливые признаки криотурбаций до глубины примерно 90 см, особенно в верхних 70 см. Это обусловлено чередованием промерзания-

протаивания и активным влаго- и массопереносом внутри почвенных горизонтов. Можно проследить выдавливание мелкодисперсного материала на поверхность по цвету пород, изменение мощности горизонтов, отметить субвертикальные поднятия почвенных слоев под периферияими бугров пучения, а также заметить выпучивание крупнообломочного материала из нижних горизонтов вверх. Характер изменений почвенных горизонтов зависит от степени выраженности мерзлотных форм рельефа на поверхности, что связано с интенсивностью проявления процессов.

Криогенные процессы имеют широкое распространение на островах в следствие неоднородности гранулометрического состава и высокой влажности пород. Образование пятен-медальонов может происходить весной, при колебаниях температур, когда снизу еще сохраняется сезонно-мерзлый слой, а сверху недавно протаявший горизонт снова начинает промерзать при резком понижении температуры воздуха, создавая в талой центральной зоне полигональной структуры высокое криостатическое давление, приводящее к выдавливанию мелкодисперсного разжиженного субстрата на поверхность по ослабленным зонам. В деятельном слое из-за пучения может происходить морозная сортировка отложений, поэтому на поверхности пятен-медальонов можно наблюдать вытеснение крупнообломочного материала, связанное с выпучиванием каменных обломков за счет их более раннего промерзания и их приподнятия из-за образования ледяных линз под ними.

Формирование пятен-медальонов на островах – современный процесс, так как пятна незадернованы, а значит он будет только усиливаться из-за наличия большого количества ослабленных зон, способствующих развитию криогенных процессов и явлений в условиях сезонного промерзания пород. На островах отмечаются незадернованные глинистые пятна-медальоны с малым количеством камней и пятна-медальоны с большим количеством крупнообломочного материала на поверхности.

По результатам визуального обследования проявлений криогенного рельефа на островах и анализа космических снимков, по которым было произведено дешифрирование, были построены схематические карты распространения криогенных процессов на островах Онекотан и Шумшу. За счет плохого качества снимков допускается, что в действительности современное развитие геокриологических явлений имеет большее распространение.

На основе построенных карт были посчитаны приблизительные площади с криогенным рельефом. Для острова Онекотан она равна 86 км$^2$, что составляет 20,2 % от территории, то есть доля острова с признаками криогенных процессов составляет примерно 1/5. Суммарно площадь острова Шумшу, покрытая мерзлотным рельефом, составляет приблизительно 237,1 км$^2$, то есть, около 2/3 территории. Эти площади наиболее подвержены негативным последствиям изменения ландшафтов, например, заболачиванию в случае изменения температурно-влажностного режима (активного использования дорожной колеи или строительства инженерных сооружений), по сравнению с участками без развития криогенных процессов.

Для безопасного размещения инженерных объектов (туристических, гражданских или военных) рекомендуется избегать участков с активными склоновыми и криогенными процессами, чтобы предотвратить нежелательные конструктивные разрушения, такие как образование трещин, просадки зданий, выпучивание свай и др. При планировании строительства рекомендуется обязательно проводить комплекс инженерных изысканий.

**Выводы.** На острове Онекотан и Шумшу были впервые исследованы криогенные формы рельефа, поэтому полученные в ходе экспедиций данные представляют особую ценность. Оба острова отличаются от других островов Курильской гряды широким распространением геокриологических процессов и явлений, несмотря на отсутствие многолетнемерзлых толщ.

На открытых, хорошо продуваемых участках острова Онекотан, особенно со стороны Охотского моря, наблюдается широкое распространение бугристо-западинного рельефа и пятен-медальонов за счет процессов промерзания-протаивания в сезонно-мерзлом слое в результате совокупности природных локальных условий. На некоторых горных склонах отмечалось развитие солифлюкции.

Весь остров Шумшу представляет собой открытую, хорошо продуваемую местность. Сильный ветровой перенос создает суровые географические условия, неблагоприятные для произрастания высокой лесной растительности, которая бы предотвращала промерзание почвы. Поэтому большая его часть (особенно северная половина острова) характеризуется активным проявлением криогенных форм рельефа и геокриологических процессов. Холодные потоки воздуха с Охотского побережья и Тихого океана способствуют формированию на субгоризонтальных участках и пологих склонах полей пучения, с дальнейшим образованием пятнистых тундр (пятен-медальонов), а на более крутых склонах холмов образованию несортированных склонов и криогенных ступеней.

На основе построенных схематических карт распространения криогенных форм рельефа было посчитано, что площадь, занимаемая ими, на острове Онекотан составляет приблизительно 1/5 территории, а на острове Шумшу около 2/3 территории. В данный момент на участках с проявлением криогенных процессов наблюдается усугубление негативных последствий за счет антропогенного воздействия в виде нарушения почвенно-растительного покрова и поверхностного переувлажнения грунтов. В связи с этим, для безопасного размещения инженерных объектов рекомендуется избегать участков с активными склоновыми и мерзлотными процессами.

*Работа подготовлена в рамках Государственного задания Института географии РАН (тема № FMWS-2024-0010). Выражается благодарность Русскому Географическому Обществу за предоставленную возможность участия в экспедициях «Восточный Бастион – Курильская гряда» в 2024 и 2025 гг., во время которых были собраны полевые материалы.*

***Литература***

1 Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс] Режим доступа: https://bigenc.ru/c/kuril-skie-ostrova-2d6703?ysclid=m1bumlmc79920721865 (дата посещения 5.04.2025).

2 Горбунов А.П., Северский Э.В., Титков С.Н. Туфуры гор и равнин Казахстана // Криосфера Земли. – 1999. – Т. III. – №1. – С. 23-30.

## ОПЫТ ПРЕПОДАВАНИЯ ДИСЦИПЛИН ПО ГЕОЭКОЛОГИИ КРИОЛИТОЗОНЫ НА ГЕОГРАФИЧЕСКОМ ФАКУЛЬТЕТЕ МГУ

***Л.И. Зотова, М.А. Викулина***

*Географический факультет, Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

Методологические аспекты геоэкологических исследований в криолитозоне на географическом факультете МГУ представлены в двух учебных курсах - «Геоэкология криолитозоны» (8 семестр бакалавриата) и «Мерзлотно-экологическая оценка состояния геосистем равнин и гор криолитозоны (3 семестр магистратуры). Обе дисциплины рассматривают фундаментальные и прикладные аспекты изменения мерзлых пород и криогенных ландшафтов в связи с антропогенной деятельностью [1].

Обучение проходит в форме лекций-презентаций, семинаров, опросов, дискуссий и докладов по практическим заданиям с обсуждением, в которых делаются акценты на географическую составляющую. Поэтому в своих докладах по тестовым заданиям студенты широко используют мерзлотные и ландшафтные карты из атласов и монографий. Особое внимание уделяется анализу карты «Мерзлотно-ландшафтная дифференциация криолитозоны России» [2] и широко известной, опубликованной во многих экологических атласах «Карты активизации криогенных процессов при антропогенных воздействиях для равнинных и горных территорий РФ» [3], по которой рассматривается интенсивность проявления экзогенных процессов, их разнообразие, география.

В курсах излагаются **методы исследований**, среди которых особое внимание уделено трем: методу ландшафтной индикации, методу ландшафтно-структурного анализа, а также методу балльных экспертных оценок, который широко используется в геоэкологических исследованиях для сравнительной характеристики объектов. Прием выведения итоговой оценки в «центах качества» [2] вызывает особый интерес у студентов.

Особенностью преподавания предметов по геоэкологии криолитозоны стало то, что основные характеристики мерзлых пород, необходимые при оценочных геоэкологических исследованиях - площадь, температура и криогенное строение пород, сезонное протаивание и промерзание, криогенные процессы, рассматриваются под «экологическим углом зрения». Так как их зональные и региональные изменения часто разнонаправленно регулируют экологическую ситуацию. Приводится кадастр наиболее опасных криогенных процессов летнего и зимнего ряда, которые следует изучать в первую очередь. Рассматриваются принципы ранжирования криогенных процессов по степени экологической опасности.

Как известно, экологическая составляющая большинства геокриологических исследований заключается в оценке проявления экзогенных геологических процессов, что целесообразно рассматривать с позиций ландшафтного подхода, в основе которого лежит понятие об устойчивости ландшафтов к нарушениям. Это ключевое понятие геоэкологии криолитозоны, под

которым понимается способность противостоять техногенной активизации криогенных процессов, которые могут привести к необратимому ухудшению экологической обстановки и недопустимым деформациям инженерных сооружений, наряду со способностью к самовосстановлению [2].

На примере криолитозоны Западной Сибири студенты знакомятся с пошаговой процедурой оценки **устойчивости геосистем криолитозоны к антропогенным нагрузкам механического характера**, основанной на анализе влияния ведущих природных факторов на их устойчивость под действием нагрузок, приводящих к активизации криогенных процессов. Оценка состоит из нескольких этапов.

– Отбор ведущих природных факторов, оказывающих влияние на устойчивость ландшафта к нагрузкам. Например, для ландшафтов Западной Сибири такими факторами будут расчлененность рельефа, состав и температура грунтов, глубина сезонного протаивания – промерзания и увеличение ее после нарушений, а также восстанавливаемость растительности.

– Построение таблицы и ранжирования всех выбранных факторов по степени их влияния на устойчивость ландшафтов.

– Присвоение каждому ландшафту соответствующего экспертного балла по каждому фактору. Интегральное влияние всех показателей на устойчивость ландшафта оценивается суммой баллов. Далее проводится их ранжирование по четырем группам устойчивости.

Именно по этой методике была составлена «Карта устойчивости ландшафтов криолитозоны Западной Сибири» масштаба 1:4 000 000 [4]. Подобные карты могут быть названы картами риска освоения, картами экологической опасности и пр. Главное, что такой тип карт отражает важнейшую геоэкологическую особенность – потенциальную устойчивость ландшафтов криолитозоны к антропогенным нагрузкам.

Выбор факторов не унифицирован. Так, при оценке литокриогенного состояния геосистем для инженерных целей в первую очередь, выбирается ряд традиционных универсальных факторов, влияющих напрямую на потенциальную активизацию нежелательных криогенных процессов, связанных с фазовыми переходами воды. Это льдистость и температура мерзлых пород, глубина сезонного протаивания или промерзания, рельеф, теплоизоляционные свойства растительности и скорость ее самовосстановления.

Поясним некоторые из них.

- *Температура горных пород* в верхней части до глубины, соответствующей слою годовых теплооборотов (10–15 м) и *льдистость*, определяют интенсивность оттаивания пород. Чем ниже температура и меньше льдистость мерзлых пород – тем меньше риск возникновения неблагоприятных криогенных процессов, в то же время, на талых породах их интенсивность также затухает.
- *Нарушение растительности* является универсальным типом изменения теплообмена на поверхности и в этом смысле чаще всего является «спусковым курком» для активизации криогенных процессов. Ее роль двояка: в естественных условиях она является одним из ведущих стабилизаторов мерзлотных условий, выполняя теплоизолирующие и закрепляющие функции (протекторная роль растительности). После техногенного нарушения скорость восстановления растительного покрова влияет на затухание мерзлотных процессов. Растительность в пределах одного и того же ландшафта на разных этапах развития мерзлотного процесса может играть различную роль. Теплоизоляционные (протекторные) свойства напочвенного покрова обусловливают сохранность температурных условий мерзлых пород. Чем больше проективное покрытие, высота растительных сообществ и мощность торфа, тем опаснее её уничтожение [5]. Защитные свойства напочвенного покрова косвенно коррелируют со снегозадерживающей способностью растительных сообществ: чем больше густота растительного покрова – тем выше снегоемкость ландшафта, а значит в случае сведения растительности вероятность активизации опасных процессов резко увеличится [2]. Этот параметр в основном оценивается в крупномасштабных исследованиях.
- От *скорости самовосстановления растительности после нарушения* зависит насколько быстро ландшафт вернется в фоновое состояние. На этот параметр влияет множества факторов, таких как тип растительности (видовое разнообразие, высота растений, степень проективного покрытия), характер увлажнения, скорость ветра, количество тепла (экспозиция) и др. В обзорно-региональных масштабах этот фактор можно заменить биопродуктивностью. Чем меньше потенциал восстановления, тем больше риск активизации криогенных процессов.

Способы выведения интегральной оценки устойчивости зависят от таксономического ранга геосистем [2]. Практика показала, что для целей сравнительного анализа устойчивости геосистем

региональной размерности допустимо применять качественную оценку и даже оперировать простым сложением покомпонентных баллов. В крупномасштабных исследованиях целесообразно использовать многофакторный корреляционный анализ оценочных критериев, который, во-первых, позволяет оценивать значимость того или иного фактора и, во-вторых, приближает качественную оценку к количественной. Во всех случаях традиционно используют экспертные баллы, которые либо просто складывают, либо выводят среднее арифметическое (реже – среднее геометрическое), либо используют расчетно-статистические методы.

Традиционно в геоэкологических оценках используют **экспертные баллы** для сравнительной характеристики объектов. Достоинство балльных оценок – возможность сравнительного сопоставления количественных и качественных характеристик, возможность формального выделения опасных объектов при наличии самой общей информации. К недостаткам следует отнести то, у баллов отсутствует размерность, что затрудняет общую количественную оценку. В наших курсах мы используем понятие «цент качества» по Ю.Г. Симонову [6] и предлагаем использовать шкалу центов – масштабную линейку для определения межбалльных расстояний, градуирование которой по рубежам качественных изменений обычно проводится на основании оценок экспертов [2; 7].

Чтобы показать логику совмещения порядковой и интервальной шкал, студентам предлагается ключевое задание, в котором необходимо:

– выбрать 3–5 факторов, влияющих на опасность / риск / устойчивость / вероятность проявления опасного криогенного или нивально-гляциального процесса;

– сделать графический рисунок шкал, выбранных на фоне нижней центовой шкалы;

– ранжировать (объекты, территории, ландшафты) по трем степеням опасности / риску / устойчивости / вероятности проявления;

– составить таблицу с центовой оценкой по каждому фактору и с общим коэффициентом (среднеарифметическим / среднегеометрическим);

– сделать два вывода по левой и правой части рисунка с устными пояснениями по выбору факторов.

В качестве примера рассмотрим одно из выполненных заданий с результатом выбора шкалы балльных расстояний для определения гипотетической оценки устойчивости морских берегов, сложенных мерзлыми породами, к термоабразии, которая в данном случае основана на сопоставлении трех факторов, таких как льдистость отложений, безледный период моря и высота волн. Их значения распределяются с использованием пофакторных шкал для каждой из трех степеней устойчивости берегов (рис.1).

Рис.1. Факторы устойчивости морских берегов к термоабразии на фоне центовой шкалы

Льдистость отложений является одним из ключевых факторов, так как определяет подверженность берега тепловым воздействиям. В том числе, льдистость влияет на высоту берега при вытаивании льда. Безледный период моря определяет временной период воздействия теплового и механического воздействия моря на берег, а высота волн - вклад механической и тепловой (для льдистых пород) энергии в термоабразию. Значению каждого показателя присваивается соответствующее количество центов. В результате рассчитывается среднее геометрическое полученных значений, которое можно назвать коэффициентом опасности (табл.1). Таким образом, из рисунка 1 и таблицы 1 следует, что наибольшая устойчивость

термоабразионных берегов возможна при малом льдосодержании пород, малой продолжительности безледного периода, небольшой высоте волн.

Таблица 1

Ранжирование факторов, определяющих устойчивости морских берегов к термоабразии

| Степень значимости фактора | Льдистость, центы | Безледный период моря, центы | Высота волн, центы | Коэффициент устойчивости к термоабразии, центы | Устойчивость морских берегов к термоабразии |
|---|---|---|---|---|---|
| Низкая (1) | 15 | 12 | 12 | 13 | Высокая |
| Средняя (2) | 45 | 50 | 43 | 46 | Средняя |
| Высокая (3) | 80 | 85 | 80 | 81,7 | Низкая |

Аналогичным способом можно оценить: темп деградации вечной мерзлоты; степень устойчивости ледников; возможность прорыва ледниковых озер и образования селей; вероятность активизации опасных процессов; степень дигрессии оленьих пастбищ и многое другое. Студентам метод понятен по причине наглядной и лаконичной формы представления результатов и вызывает живой интерес.

Большое внимание уделено методическим подходам к оценке антропогенного воздействия на ландшафты криолитозоны, формированию **кризисных геоэкологических ситуаций**. Задачами их освоения являются ознакомление с понятиями, принципами и методами оценок геоэкологической опасности техногенного освоения в зависимости от особенностей мерзлотных и физико-географических условий, специфики хозяйственного использования территории, а также разработка природоохранных мероприятий для выработки грамотной стратегии природопользования.

В учебных курсах рассматриваются природные предпосылки и антропогенные факторы возникновения и развития геоэкологических ситуаций разной стадии кризисности. Матричная модель их оценки и ГИС-картографирования основана на сопоставлении степени устойчивости геосистем и категорий интенсивности антропогенной нагрузки. Причем, нагрузка учитывает не только степень линейно-площадной нарушенности в зонах влияния газонефтепромысловых объектов, но и степень дигрессии пастбищ вследствие перевыпаса.

Демонстрируются интересные примеры кризисных геоэкологических ситуаций в разных масштабах. На региональном уровне – это алмазоносные трубки в Якутии, добыча нефти из битуминозных песков и сланцевых залежей, золотодобыча на Кумторе и россыпного золота в долинах рек Колымы и др. На локальном уровне - факельные площадки, многониточные трубопроводы, шламовые амбары при нефтедобыче в Западной Сибири, пруды-отстойники Норильского комбината и др.

Методология проведения **оценки активизации криогенных процессов при антропогенных воздействиях** основана на ранжировании прогнозных оценок в баллах, сведенных в целый ряд таблиц. Как то: оценки скоростей их развития и затухания, количества и спектра процессов на одной территории, оценки степени безопасности работы инженерных объектов, наряду с рекультивационными, мелиоративными и инженерными мероприятиями, направленными на защиту от негативных последствий [5]. На примере мелкомасштабной «Карты активизации криогенных процессов в пределах РФ [3] рассматривается их география.

Итоговое задание для бакалавров направлено на изучение **зонально-секторных закономерностей криолитозоны РФ**. Студентам предлагается выбрать одно сочетание региона и природной зоны, для которого следует определить: мерзлотные характеристики, изначально устойчивые и неустойчивые ландшафты, перечень потенциальных криогенных процессов и предложить основные природоохранные мероприятия для сохранения текущей экологической ситуации для доминирующих ландшафтов (запретительные, мелиоративные, рекультивационные, инженерно-технологические, ресурсосберегающие).

В результате освоения дисциплин по геоэкологическим проблемам криолитозоны студенты овладевают методами назначения экспертных оценок при решении типовых профессиональных задач в разных масштабах исследований при различных типах хозяйственной деятельности.

Опыт преподавания геоэкологических дисциплин для студентов географов позволяет сделать следующие выводы:

1. В практике изучения, оценки и картографирования ландшафтов в области вечной мерзлоты первостепенное значение имеет геосистемный подход, основанный на тесной взаимосвязи многолетнемерзлых пород с другими компонентами природной среды.

2. В целях совершенствования экспертных оценок в геоэкологических исследованиях следует устанавливать единую размерность пофакторных баллов, используя интервальную шкалу в «центах качества».

***Литература***

1 Зотова Л. И., Викулина М.А. Научно-методические аспекты преподавания учебных курсов по геоэкологическим проблемам равнинных и горных территорий в криолитозоне // Географическая среда и живые системы. – 2024. – № 3 – С. 123-148.

2 Тумель, Н. В. Геоэкология криолитозоны: учебник для вузов / Н. В. Тумель, Л. И. Зотова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2025. — 180 с.

3 Экологический атлас России. – Спб: Изд-во ЗАО «Карта», 2002. – С. 50-54.

4 Шполянская Н. А., Зотова Л. И. Карта устойчивости ландшафтов криолитозоны Западной Сибири // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 1994. – № 1. – С. 56-66.

5 Tumel N. V., Zotova L. I. Diagnostics and Mapping of Geoecological Situations in the Permafrost Zone of Russia. Geosciences. – 2019. – V. 9. – Iss. 8. – Art. 353. – P. 1-31.

6 Симонов Ю. Г. Балльные оценки в прикладных географических исследованиях и пути их совершенствования // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 1997. – № 4. – С. 7-10.

7 Зотова Л.И., Викулина М.А. Оценка и картографирование устойчивости северных геосистем к активизации опасных криогенных процессов // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2025. – Т. 31. – № 1 – С. 26-49.

## ТЕХНОЛОГИЯ МОНТАЖА ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ПОСРЕДСТВОМ УКРУПНИТЕЛЬНОЙ СБОРКИ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПОГРУЖЕНИЯ ПОД СУЩЕСТВУЮЩИМИ ЗДАНИЯМИ И СООРУЖЕНИЯМИ В ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ПОДПОЛЬЯХ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ ПО ВЫСОТЕ ПРОСТРАНСТВ

***А.Ю. Кандаков[1], Ю.П. Штефанов[2], И.Ф. Прокопенко[2], А.И. Синицкий[3]***

*[1] ИП Кандаков А.Ю., г. Кирово-Чепецк*

*[2] ООО «Ньюфрост», г. Протвино*

*[3] Научный центр изучения Арктики, г. Салехард*

***Введение.***

Актуальность разработки методов монтажа термостабилизаторов грунтов под существующими зданиями и сооружениями обусловлена изменениями состояния многолетнемерзлых грунтов (далее – ММГ) оснований, их деградации в силу различных факторов, что создаёт критические риски для устойчивости инфраструктуры арктических регионов. Деградация верхней кромки ММГ приводит к необратимым деформациям оснований зданий и сооружений, ставя под угрозу их эксплуатационную надёжность и безопасность. Это требует безотлагательных инженерных решений, способных предотвратить дальнейшее разрушение без необходимости капитального вмешательства в существующие конструкции. Сохранение стабильности фундаментов в криолитозоне становится приоритетной задачей, особенно в контексте интенсивного освоения северных территорий и возрастающей нагрузки на существующую инфраструктуру. Применение инновационных подходов к термостабилизации позволяет не только минимизировать экономические потери от деформаций, но и способствует устойчивому развитию строительства в условиях изменяющегося климата. Таким образом, практические исследования, посвящённые данной проблематике, приобретают особую значимость.

Целью данного доклада является обоснование практического применения технологически реализуемого решения по установке охлаждающих устройств (далее - СОУ) в вентилируемых подпольях под существующими зданиями и сооружениями на ММГ. Достижение этой цели осуществляется через комплекс последовательных задач, направленных на всестороннее изучение проблемы. В рамках данного доклада не описывается технология буровых работ в условиях ограниченных по высоте пространств, которая является темой отдельного доклада. При этом важно отметить, что на сегодняшний день граничным условием применения данной технологии является высота мачты модульного гидрофицированного бурового станка, сконструированного на базе буровой установки СБГ-ПМ "Стерх" производства ООО "Современные буровые технологии" специалистами ИП Кандаков А.Ю. которая составляет всего 1,5 метра.

***Методы монтажа термостабилизаторов в подпольях, существующих задний и сооружений.***

Технической проблемой выступает невозможность монтажа традиционных охлаждающих систем в стеснённых условиях вентилируемых подполий существующих зданий, где высота пространства не позволяет произвести погружение термостабилизаторов.

На сегодняшний день существуют следующие технические решения:

1) Установка гибких термостабилизаторов

Варианты исполнения гибких термостабилизаторов:

а) Гибкий аллюминиевый термостабилизатор. (пример: производства ООО НПП "Специнжиниринг" СПМГ (AL))

б) Термостабилизатор с испарительной частью из гибкого металлорукава (пример: производства ООО "Ньюфрост" НФ-ХХна)

в) Термостабилизатор гибкий со вставками из гибкого металлорукава с длиной частей ограниченных гибкими вставками исходя из высоты подполья. (пример: производства ООО "Ньюфрост" НФ-ХХна)

Недостатки данных решений: вариант а) - сложность сварки алюминия, отсюда большое количество бракованных изделий, вариант б) и в) - необходимость применения обсадной трубы для гибких металлорукавов является обязательным условием для их монтажа, отсюда существенное удорожание стоимости работ в целом, а также снижение надёжности.

Также повсеместно применяемое решение при необходимости установки охлаждающих устройств в подпольях существующих зданий - установка наклонных термостабилизаторов грунта по периметру здания с углами наклона от вертикали 5°- 30° с длиной испарителя, необходимой для охлаждения грунта основания, прилегающего к оконечной части сваи. Недостаток данного решения - невозможен в случае больших углов бурения, сложен в реализации на неустойчивых грунтах, охлаждение грунта происходит не по всей поверхности сваи, а только в одной части.

***Предлагаемое решение.***

В настоящее время реализовано и подтвердило свою эффективность решение выполненное совместным участием завода изготовителя охлаждающих устройств ООО "Ньюфрост" и предприятием специализирующимся на монтаже систем температурной стабилизации грунтов и установке элементов геотехнического мониторинга ИП Кандаков А.Ю. Метод монтажа охлаждающих устройств заключается в последовательной укрупнительной сборке испарительной части термостабилизаторов непосредственно при погружении их в скважины. Поэтапная сборка элементов охлаждающих устройств производится из наборных элементов с длиной, рассчитанной в зависимости от высоты подполья в месте установки термостабилизатора. Корпус термостабилизатора – труба нержавеющая 38 мм, стенка 2 мм, сталь AISI 304, конденсатор выполнен из алюминия методом накатки. Последующая технология вакуумирования, испытания на прочность и плотность, заправки хладагентом выполняется по инструкции ООО "Ньюфрост". Такой метод монтажа исключает недостатки существующих решений: работоспособность подтверждена в 100% случаев, при устойчивых стенках скважин позволяет исключать применение обсадной трубы, что значительно снижает стоимость затрат, установка производится максимально близко к боковой поверхности сваи, что способствует восстановлению температурного режима и существенно увеличивает несущую способность сваи в отличии от решений с наклонной установкой под внутренние ряды свай.

Укрупнительная сборка заключается в аргонодуговой сварке вертикальных трубных частей испарителей в процессе погружения в скважину. Необходимая оснастка для производства работ разработана специалистами ООО "Ньюфрост" и включает следующие основные элементы: поворотный "стол" с цанговым зажимом для фиксации погружённой части испарителя с электроприводом и возможностью регулировки скорости вращения, режимами старт-стоп, центраторы специальной конструкции быстросъёмные, фиксация горелки, сварочное оборудование.

***Оценка эффективности предложенного способа монтажа термостабилизаторов на основании реализованных проектов.***

Объекты, на которых реализован данный метод установки: 1) ЯНАО, Приуральский р-н, с. Аксарка, Детский сад на 120 мест - СОУ НФ-10на 82 шт. работы выполнены в апреле 2021г. 2) ЯНАО, Приуральский р-н, с. Аксарка, жилой дом, ул. Тундровая, 1, СОУ НФ-11,2 286 шт. работы выполнены в сентябре 2024 г. 3) ЯНАО, Приуральский р-н, с. Катравож, здание жилого дома, ул. Новая, 1 СОУ НФ-7,5 наЭ 112 шт. гибридного типа с возможностью подключения холодильных машин, работы выполнены в июле 2025 г. Решение по установке СОУ на данных объектах было принято проектной документацией ООО "ГТС" г. Тюмень в силу растепления многолетнемерзлых грунтов по причинам комплекса выше озвученных факторов, что сопровождалось деформациями

конструктивных элементов, носило незатухающий характер и могло привести к аварийному состоянию зданий.

Рис. 1. Пример выполнения работ по монтажу СОУ с последовательной сборкой в процессе погружения в скважину и заправкой хладагентом, с. Аксарка, сентябрь-октябрь 2024 год.

Вместе с этим, на всех вышеуказанных инженерных объектах в разные годы, но преимущественно в начале зимнего сезона, была выполнена тепловизионная диагностика систем и устройств температурной стабилизации грунтов [9]. В последствии, на основе в том числе и этих работ, были разработаны методические рекомендации по тепловизионной диагностике систем и устройств температурной стабилизации грунтов [10], которые прошли апробацию в текущий зимний сезон. По результатам полученных тепловых инфракрасных изображений (термограмм) отмечается, что практически 100% сезонно-действующих охлаждающих устройств (далее – СОУ) признаны работоспособными (рис. 2).

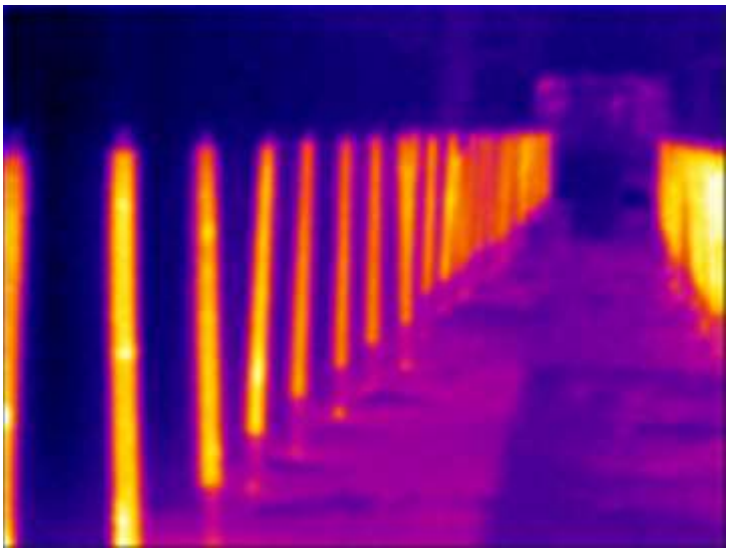


Рис. 2. Тепловое инфракрасное изображение (термограмма) сезонно-действующих охлаждающих устройств на объекте обследования, с. Аксарка, февраль 2025 год.

На всех объектах в подпольях зданий выполнен монтаж термометрических скважин по технологии аналогичной монтажу СОУ из сборных комплектов. На основании полученных реперных замеров термометрических показаний наблюдалась деградация многолетнемерзлых грунтов, положительные и около нулевые показания. В первый зимний сезон результаты термометрии показали отсутствие положительных температур на всех глубинах. Дальнейшие наблюдения установили, что динамика охлаждения грунтов продолжается и показания соответствуют расчётным значениям. Необходимо

отметить, что в комплексе с работами по установке СОУ выполнены мероприятия по водоотведению грунтовых и талых вод из-под пятна застройки (проложены водоотводные лотки, подпорные стенки, восстановлена бетонная конвертовка под зданием и отмостка, в некоторых случаях выполнено утепление пеноплексом основания под конвертовку и отмостку)

***Заключение.***

Предложенная технология монтажа сезонно-действующих охлаждающих устройств с использованием укрупнительной сборки термостабилизаторов в процессе их погружения в скважины в ограниченных по высоте вентилируемых подпольях доказана как технологически осуществимая и целесообразная. Анализ факторов, влияющих на растепление многолетнемерзлых грунтов, приводит к необходимости создания дополнительных мероприятий по термостабилизации в т.ч. установке сезонно-действующих охлаждающих устройств под зданием, для стабилизации внутренних рядов свай и внешних если это необходимо в связи с назначением здания или, например для сохранения архитектурной композиции исторического фонда. При этом данные термостабилизаторы могут устанавливаться взамен вышедших из строя ранее запроектированных, а также устанавливаться впервые как решение по дополнительной термостабилизации на основании современных прогнозных теплотехнических расчётов.

Проблема с СОУ, вышедшими из строя, в том числе на объектах добычи и транспорта газа и нефти, стоит особенно остро. Большое количество термостабилизаторов расположенные на таких позициях как, например, газоперекачивающие агрегаты (ГПА), установки охлаждения газа (АВО-газа), и пр. находятся в нерабочем или ограниченно рабочем состоянии. При этом возникают риски безопасной эксплуатации дорогостоящего, технически сложного и опасного оборудования. Опыт ремонтно-восстановительных работ термостабилизаторов СОУ показал, что во многих случаях, где выход из строя термостабилизатора связан с разгерметизацией, восстановление СОУ экономически не оправдано, поскольку требует дорогостоящих мероприятий и установка новых, является наиболее экономически обоснованным решением. Но существующие и предлагаемые до сегодняшнего дня решения по установке термостабилизаторов в подпольях существующих зданий имеют ряд существенных недостатков, связанных с надёжностью конструктива, дороговизной изготовления и монтажа. Представленное решение опробовано на реальных объектах и показало обоснованное преимущество, в т.ч. экономическое. Это позволяет предотвратить дальнейшую деградацию мерзлоты, стабилизировать фундаменты и продлить срок службы существующих зданий и сооружений. Инновационность подхода заключается в его применимости к уже эксплуатируемым объектам, минимизируя необходимость в дорогостоящих и трудоёмких капитальных реконструкциях.

Важно также понимать, что эффективное применение систем и устройств температурной стабилизации грунтов на инженерных объектах, возможно только при соблюдении мероприятий по отводу поверхностных вод с селитебных территорий и промышленных площадок. В противном случае, всё что было и будет «наморожено» зимой на объектах инфраструктуры, в результате отепляющего эффекта водоподтопления, в летний период будет нивелировано.

Для этого рекомендуется руководствоваться принятой нормативной документацией. Согласно пункту 6.2.6 СП 104.13330.2016, при проектировании инженерной защиты в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов необходимо соблюдать следующие основные требования:

- при размещении средств инженерной защиты на мерзлых основаниях, особенно при наличии в них сильнольдистых грунтов и погребенных льдов, не допускается нарушение растительного покрова; вертикальную планировку следует осуществлять только подсыпками. Не допускается сосредоточенный сброс поверхностных вод в пониженные места, приводящий к нарушению естественного гидротермического режима водотоков и режима подземных вод;
- в зоне раздела талых и мерзлых грунтов следует учитывать возможность развития криогенных процессов (пучение при промерзании, термокарст при оттаивании, развитие наледей с формированием напорных вод с большими давлениями и т.п.).

Часто, на зданиях и сооружениях, построенных на ММГ отмечается полное отсутствие водосборных сооружений на крыше (водосточные системы, водоотводы), т.е. нарушено требование СП 118.13330.2022, п 8.3., что до пяти этажей включительно - следует предусматривать организованный (внутренний, наружный, комбинированный) водосток. Рекомендуется также придерживаться требований, которые прописаны в СП 17.13330.2017, в главе 9 «Водоотвод с кровли и снегозадержание».

Таким образом, обеспечение безаварийной эксплуатации проветриваемого подполья и стабильного напряженно-деформированного состояния конструкций зданий и сооружений на крайнем Севере, помимо применения систем и устройств температурной стабилизации грунтов,

возможно только при неукоснительном выполнении требований, прописанных в СП 497.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила эксплуатации».

***Литература***

1 Баясан Р.М., Голубин С.И. Технология и технические средства термостабилизации мерзлых грунтов оснований магистральных и промысловых трубопроводов в криолитозоне // Инженерные изыскания. — 2012. — №7. — С. 64–68.

2 Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В. и др. К вопросу о необходимости выработки целостной системы мер по предупреждению деформаций зданий и сооружений в криолитозоне в условиях меняющегося климата // Арктика: экология и экономика. — 2024. — №4. — С. 605–616.

3 Горелик Я.Б., Хабитов А.Х. Об эффективности применения термостабилизаторов при строительстве на многолетнемерзлых грунтах // Вестник тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. — 2019. — №3. — С. 25–46.

4 Горелик Я.Б., Хабитов А.Х. Эффективность поверхностного охлаждения мерзлых грунтов в связи с механизмом формирования температурной сдвижки // Криосфера земли. — 2021. — №2. — С. 24–37.

5 Мельников В.П., Ишков А.А., Аникин Г.В. Современные методы активной термостабилизации мерзлых грунтов: российские разработки, исследования и перспективы // Криосфера Земли. — 2024. — №5. — С. 21–37.

6 Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов // Криосфера Земли. — 2021. — №6. — С. 3–15.

7 Паздерин Д.С Динамика теплового состояния многолетнемерзлых грунтов в основании заглубленного трубопровода с применением охлаждающих устройств (термостабилизаторов): диссертация (25.00.08 - инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение). — Тюмень, Институт криосферы Земли СО РАН, 2017.

8 Шеин А.Н., Башкова А.А. Статистические характеристики данных температурного мониторинга грунтовых оснований фундаментов зданий города Салехарда за 2018–2023 годы как основа для автоматизации процесса первичной обработки данных // Вестник ЗабГУ. — 2024. — №3. — С. 58–69.

9 Синицкий А.И., Плесовских К.А., Пушкарев В.Е. Тепловизионная диагностика сезоннодействующих охлаждающих устройств // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2024. №1. (122). С.21-36.

10 Разработка положений методических рекомендаций по тепловизионной диагностике систем и устройств температурной стабилизации грунтов / ООО «НИИ ПТЭС», Москва, 2024, 43 с.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЛЕДНИКОВЫХ И ПОСТЛЕДНИКОВЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА И МЕХАНИЗМ СОХРАНЕНИЯ ПЛАСТОВЫХ ЛЬДОВ В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ КАНАДСКОЙ АРКТИКИ (МОРЕ БОФОРТА)

***А. И. Кашдан[1], В. С. Шейнкман[2]***

*[1] Политехнический институт, г. Монреаль, Канада*

*[2] Институт криосферы Земли, ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, г. Тюмень*

Западный сектор Канадской Арктики, включающий острова Гершеля, Ричардса, Пуллен (Норт-Хед) и залив Ливерпуль [5], характеризуется уникальным сочетанием реликтовых пластовых льдов и хорошо выраженных моренных комплексов, приуроченных к линии налегания древнего ледника на акваторию моря Бофорта. Возраст пластовых льдов соответствует MIS 2–4 (морские изотопные стадии 2–4). Моренные комплексы, идентифицируемые [3] как клинья зоны налегания в области перехода ледника на ледниковый шельф, отчётливо прослеживаются на шельфе моря Бофорта. Традиционные представления о ледниковой эрозии опираются на модель «теплого» ложа, где наличие талой воды в подошве ледника снижает эффективное напряжение и инициирует интенсивное базальное скольжение. В таких условиях ледник неизбежно должен был «срезать» или деформировать кровлю мёрзлых пород, нарушая целостность реликтовых залежей льда. Однако факты сохранения пластовых подземных льдов в западном секторе Канадской Арктики диктуют иную физику процесса: 1). Адгезионный контакт: В отличие от моделей [4], авторы полагают, что ледниковый покров в этом регионе находился в «холодном» термическом режиме. В этом случае

ледник оказывается жестко приморожен к мёрзлому субстрату. Основной градиент скоростей при движении смещается из зоны контакта «лед–грунт» во внутренние слои самого ледяного массива. Таким образом, пластовые льды оказываются защищены от сдвиговых деформаций, так как ложе остается неподвижным относительно подошвы ледника. 2). Демпфирующая роль мерзлой морены: Высокая гидравлическая проводимость («песчанистая морена», ~65% песка) и кулоновская прочность подстилающих осадков (тилла) предотвращают возникновение избыточного давления. Даже при достижении критических нагрузок деформация локализуется в приповерхностном слое морены, не затрагивая глубокозалегающие ледяные тела. 3). Локальность гляциотектоники: Свидетельства «надвинутой морены», описанные Рэмптоном [7], согласно нашим представлениям [1], являются не общим правилом, а исключением. Такие структуры формируются лишь на локальных участках, где специфическая геометрия ложа или локальные термические аномалии приводили к кратковременному нарушению условий примерзания.

Цель данной работы — численно оценить условия формирования приледниковых форм рельефа и выявить механизмы, обеспечивающие сохранность древних пластовых льдов в районе моря Бофорта. Для её достижения разработана численная модель, включающая три взаимосвязанных функциональных блока, которые обеспечивают комплексный анализ динамики системы «ледник — мёрзлое ложе»:

Первый блок (динамический) учитывает регуляризованный закон базального скольжения с ограничением по напряжению сдвига (предел Кулона) [7]. Данный подход позволяет избежать сингулярностей при скоростях, близких к нулевым, обеспечивая устойчивость численного решения. Кулоновский предел задаёт пороговое значение напряжения сдвига, которое способен выдержать подлёдный субстрат до перехода в режим пластической деформации. Это позволяет корректно моделировать механическое взаимодействие подошвы ледника с мёрзлым ложем, исключая нефизичную эрозию нижележащих пластовых льдов.

Второй блок (геоморфологический) основан на уравнении Экснера [2], описывающем баланс наносов и позволяющем рассчитывать изменение высотных отметок поверхности в результате аккумуляции и эрозии осадков. Для моделирования краевых моренных образований данное уравнение используется в сопряжении с законом транспорта осадочного материала. Это дает возможность воспроизводить процессы формирования и постледниковой переработки моренных валов в различных временных масштабах.

Третий блок (термический) представляет собой модель теплопереноса в подлёдной толще на основе метода энтальпии. Данный подход позволяет описывать миграцию границы фазового перехода «лед–вода» без её явного выделения (сквозной счет). Использование энтальпийной формулировки обеспечивает корректный учет скрытой теплоты фазовых превращений как в пористой среде морены, так и в массивах подземных льдов, что является необходимым условием для оценки термической стабильности реликтовых криогенных образований.

Особое внимание уделено фазе перехода ледника к температурному режиму у точки плавления. Лабораторные испытания [8] показывают, что полное насыщение подстилающего тилла водой и достижение установившегося напряжения сдвига происходят постепенно. Это обосновывает применение в модели метода энтальпии и закона скольжения с ограничением по напряжению сдвига (предел Кулона). Данные подходы позволяют корректно описать переходный период от состояния примерзания к активному движению, во время которого происходит наиболее интенсивная аккумуляция моренных клиньев при сохранении структурной целостности нижележащих мёрзлых толщ и пластовых льдов. Полученные результаты позволяют выдвинуть гипотезу о механизме сохранения древних пластовых льдов в западной Арктике, основанном на формировании режима «холодного тонкого ледника» с маломощной деформируемой зоной (<0,5 м). В рамках данного режима нижний холодный ледниковый лед выполняет функцию защитного слоя, аккумулирующего сдвиговые деформации, что обеспечивает сохранение нижележащего грунтового льда в упругом состоянии. Для верификации гипотезы требуется проведение буровых работ в абляционных приледниковых зонах с последующим отбором кернов по всему разрезу подземного и подледникового льда и измерениями микросейсмической анизотропии в приповерхностном слое для оценки распределения деформаций.

Режим «холодного» маломощного ледника, приморожденного к ложу, рассматривается как ключевой механизм сохранения древних пластовых льдов. В условиях, когда базальная температура остается ниже точки плавления, движение реализуется не через классическое скольжение, а за счёт внутренней деформации придонных слоёв льда и тонкой зоны пластичного мерзлого субстрата. Предложенная параметризация базального скольжения, учитывающая регуляризацию переходной

зоны (в том числе за счёт включения крупнообломочного материала морены в подошве), позволяет численно воспроизвести наблюдаемую последовательность формирования клиньев в зоне налегания Модель демонстрирует саморегуляцию этого процесса без привлечения внешних триггеров, таких как тектонические подвижки или резкие климатические колебания.

Перспективы дальнейших исследований. Дальнейшие исследования будут направлены на детальный анализ влияния локальных литологических факторов, включая гранулометрический состав морен, на сохранность реликтовых льдов. Запланировано тестирование четырех ключевых сценариев взаимодействия на установке кольцевого сдвига [8]:

1. Чистый глетчерный лёд по тиллу (мягкое ложе): изучение условий, при которых деформация локализуется в подстилающей несвязной осадочной породе.
2. Чистый глетчерный лёд по скальному основанию (твёрдое ложе): анализ зависимости сопротивления сдвигу от морфологии неровностей и наличия каверн на поверхности коренных пород.
3. Глетчерный лёд с обломочными включениями по тиллу: исследование влияния «промерзающей каймы» (frozen fringe) на изменение механических свойств контактной зоны.
4. Глетчерный лёд с обломочными включениями по скальному основанию: оценка дополнительного сопротивления, возникающего за счёт трения крупных обломков о скальный субстрат.

*Работа выполнена при поддержке финансирования в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2026-0027), выполняемого Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН.*

***Литература***

1 Кашдан А.И., Шейнкман В.С. Остров Гершель (Канадская Арктика) – проблема происхождения с позиций палеокриологии // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2025. Выпуск 12, стр. 87-94. дои: 10.24412/2687-1092-2025-12-87-94

2 Потапов И.И., Снигур К.С. О решении уравнения Экснера для дна, имеющего сложную морфологию // Компьютерные исследования и моделирование. – 2019. – Т. 11. – № 3. – С. 449-461.

3 Batchelor C.L., Dowdeswell J.A. & Pietras J.T. Variable history of Quaternary ice-sheet advance across the Beaufort Sea margin, Arctic Ocean // Geology. – 2013. https://doi.org/10.1130/G33669.1. ISSN 0091-7613.

4 Bennett M.R. & Glasser N.F. Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms // Wiley-Blackwell. – 2nd ed. – 2009. https://www.wiley.com/en-us/Glacial+Geology:+Ice+Sheets+and+Landforms,+2nd+Edition-p-9781119966692. ISBN 978-1-119-96669-2.

5 Murton J.B., Waller R.I., Hart J.K., Whiteman C.A., Pollard W.H., Clark I.D. Stratigraphy and glaciotectonic structures of permafrost deformed beneath the northwest margin of the Laurentide ice sheet, Tuktoyaktuk Coastlands, Canada // J. of Glaciology. – 2004. – V. 50(170) – P. 399-412

6 Rampton V.N. Quaternary geology of the Tuktoyaktuk coastlands, Northwest Territories // Geological Survey of Canada. Memoir 423. – 1988. 98 p. https://doi:10.4095/126937.

7 Schlegel R., Zoet L.K., Booth A.D., Smith A.M., Clark R.A. & Brisbourne A.M. Subglacial landscape formation and sediment discharge: relating basal conditions to bedform dimensions and properties at Rutford Ice Stream, West Antarctica // Boreas. – 2025. https://doi.org/10.1111/bor.70002. ISSN 0300-9483.

8 Zoet L.K., Iverson N.R. A slip law for glaciers on deformable beds. Science. – 2020. – V. 368(6486), – P. 76–78. https://doi.org/10.1126/science.aaz1183.

## ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УНИКАЛЬНОГО РЕСУРСА ПРИРОДНОГО ХОЛОДА СЕВЕРО-ВОСТОКА ЕВРАЗИЙСКОГО СЕКТОРА КРИОЛИТОЗОНЫ В ЦЕЛЯХ СОХРАНЕНИЯ БИОРАЗНООБРАЗИЯ В ГЛОБАЛЬНОЙ ПОВЕСТКЕ

***Б.М.Кершенгольц [1,3], М.Н.Железняк [2,3], И.М. Охлопков [1,3], М.М.Шашурин [1,3], В.А.Куваев [2], И.Б.Харламов [3], Т.В.Устинова [3]***

[1] *Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск*

[2] *Институт мерзлотоведения им.П.И.Мельникова СО РАН*

[3] *Акционерное общество «Природный холод Якутии»*

Якутия – регион с самым холодным климатом в обитаемой части планеты Земля и с самой устойчивой многолетней мерзлотой.

На решение задачи использования уникального холодового ресурса Северо-Востока Евразии в интересах сохранения биоразнообразия, а также обеспечения экологической и продовольственной безопасности России и других стран направлен проект мирового уровня: «Криохранилище семян дикоросов и культурных растений в толще многолетнемерзлых пород с использованием только природного холода Якутии»

Проведенные с 1978 года в ИБПК СО РАН и в ИМЗ СО РАН исследования показали, что **за почти 50 лет хранения** семян растений на глубине 9-12 метров в толще многолетнемерзлых пород в Центральной Якутии, при температуре –9 ÷ –11$^{o}$C с использованием только природного зимнего холода, без пересевов, **генетическая целостность, физиологические и посевные свойства** семян (всхожесть, выживаемость) **сохраняются на 80-85%** [1-4]. Технология запатентована ИБПК СО РАН [5].

Такие отрицательные температуры создаются за счёт запасания зимнего атмосферного холода для охлаждения многолетнемерзлых пород, прилегающих к штольне криохранилища, в целях создания в штольне регулируемых круглогодично стабильных отрицательных температур (рис. 1). Технология разработана сотрудниками ИМЗ СО РАН под руководством Г.П.Кузьмина. [6].

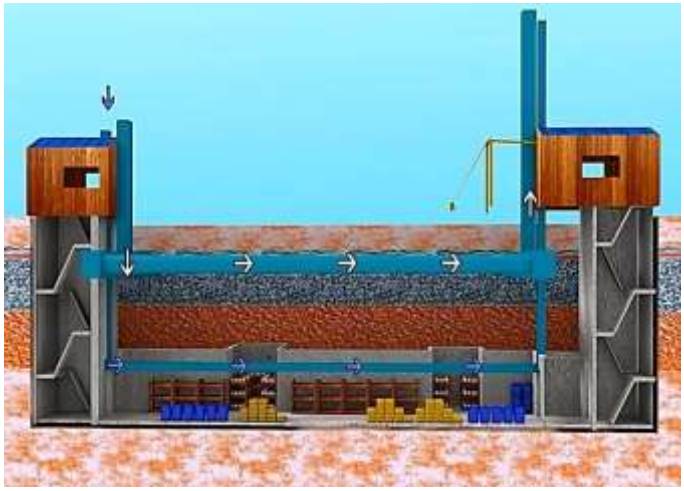


Рис. 1. Схема запасания зимнего атмосферного холода для охлаждения многолетнемерзлых пород, прилегающих к штольне криохранилища, в целях создания в штольне регулируемых круглогодично стабильных отрицательных температур

По международным нормативам хранение считается успешным, если семена сохраняют свои качества не менее, чем на 60% хотя бы за 10-15 лет хранения. Такие круглогодично стабильные низкие температуры создаются за счёт запасания зимнего холода. Поэтому, такой способ хранения семян растений является не только эффективным, но и полностью ЭНЕРГОБЕЗЗАТРАТНЫМ (в отличие от Всемирного хранилища семян на Шпицбергене), автономным, защищенным от любых природных и техногенных катаклизмов и аварий на дневной поверхности, включая изменения климата и чрезвычайные ситуации. При этом в значительной степени снижаются и трудозатраты, так как отпадает необходимость в пересевах каждые 10-20 лет! Причём 100 %-ую жизнеспособность и сохранность генетического аппарата показали семена уже пяти дочерних поколений (рис. 2).

В специальном эксперименте было показано, что при более низких температурах (-13 ÷ -20$^{o}$C) сохранность генетического аппарата семян существенно снижается (рис. 3) в результате того, что внутриклеточная вода переходит в другое льдообразное состояние и разрушает внутриклеточные структуры [7].

По-видимому, именно по этой причине, семена, хранящиеся при температурах -18 ÷ -20$^{o}$C в мировых семенных хранилищах, включая национальное семенное хранилище России, приходится пересевать через каждые 10-20 лет.

Подтверждением высочайшей эффективности сохранности семян растений в мерзлоте явились находки археологов семян дикоросов в районе Средней Колымы, которые пролежали в мерзлоте при температуре минус 7$^{0}$C около 30 тысяч лет, сохранив при этом свою жизнеспособность! Из них были получены регенерированные растения, которые после стадий цветения и плодоношения дали жизнеспособные дочерние семена [8].

Рис. 2. На примере семян бобовых (фасоль, горох), сохраняемых криохранилище в толще многолетнемерзлых пород, более 40-48 лет показана 100 %-я жизнеспособность и сохранность генетического аппарата показали семен уже пяти дочерних поколений.

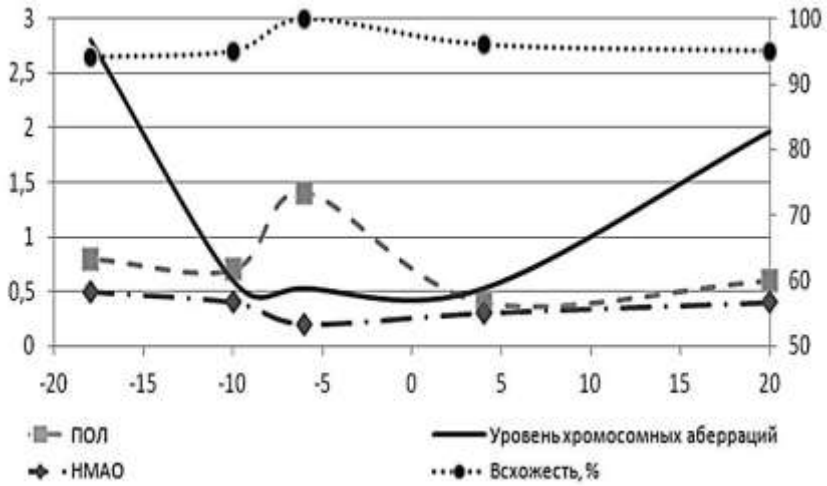



Рис. 3. Изменение цитологических, физиологических и биохимических параметров проростков лука, семена которого хранились при различных температурах. (значения уровня хромосомных аберраций и перекисного окисления липидов (ПОЛ), содержание низкомолекулярных антиоксидантом (НМАО) рассчитаны в относительных единицах относительно контроля – соответствующих параметров, зарегистрированных перед закладкой семян на хранение весной 2009 года)

Первая очередь криохранилища емкостью до 100 тысяч образцов хранения открыта в 2012 г. в Центральной Якутии (рис. 4).

Рис. 4. Криохранилище семян растений в толще многолетнемерзлых пород в Центральной Якутии

В 2014 году разработано финансово-экономическое обоснование строительства «Криохранилища семян растений в толще многолетнемерзлых пород с использованием только природного холода»

емкостью до 1 млн партий образцов семян, которое составляет по ценам начала 2026 года около 1700 млн.рублей (рис. 5).

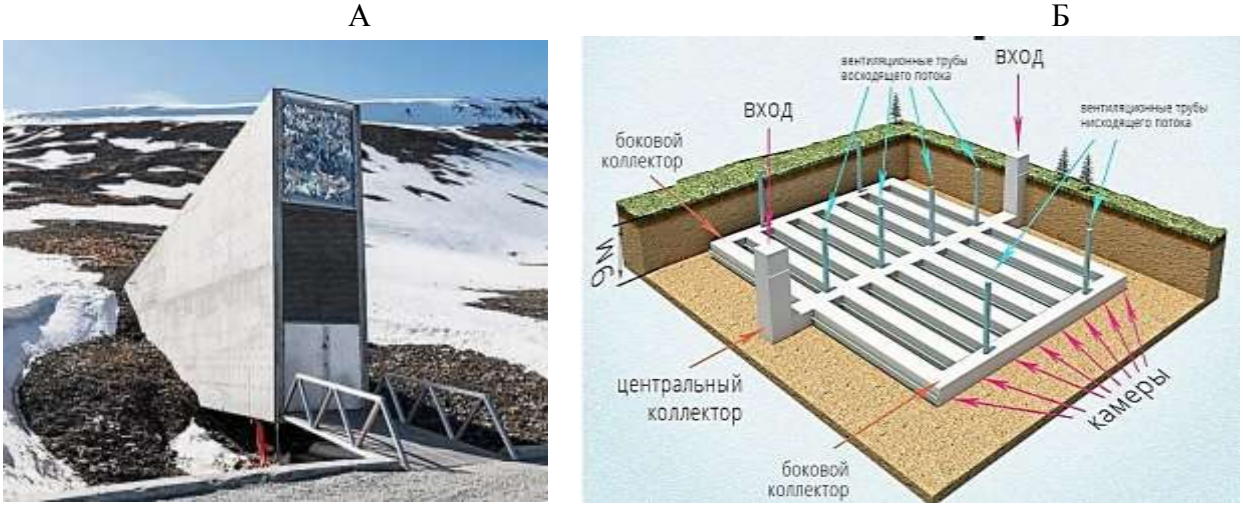



Рис. 5. Хранилище «Ссудного дня» на Шпицбергене, в котором начиная с 2016 года наблюдаются протечки (А) и подземная конструкция хранилища в Центральной Якутии (Б)

Следует подчеркнуть, что в экспериментальном подземном криохранилище семян растений в толще многолетнемерзлых пород (г. Якутск), впервые в мировой практике хранятся семена не только сельскохозяйственных видов растений, но и редких, исчезающих видов растений, а также дикоросов перспективных для использования в работах по обеспечению экологической безопасности России, например при проведении рекультивации нарушенных ландшафтов и др., в интересах сохранения биоразнообразия естественных ландшафтов различных регионов России и стран мира. Разработаны методические рекомендации по сбору и подготовке семян дикоросов к долговременному хранению в криохранилище.

В эксперименте, который продолжается уже 18 лет, на примере семян *H. minor* и *F. Komarovii*, показано при хранении в стандартных лабораторных условиях лабораторных условиях они сохраняют высокую всхожесть в течение 3 лет, то в условиях подземного криохранилища в течение 16-18 лет и не собираются её снижать (рис. 6) [9], эксперимент продолжается.

Таким образом, хранение семян дикоросов, редких и исчезающих видов растений в криохранилище открывает возможности кардинального продления их жизнеспособности, расширяя перспективы мероприятий по сохранению их *in situ* и *ex situ.*

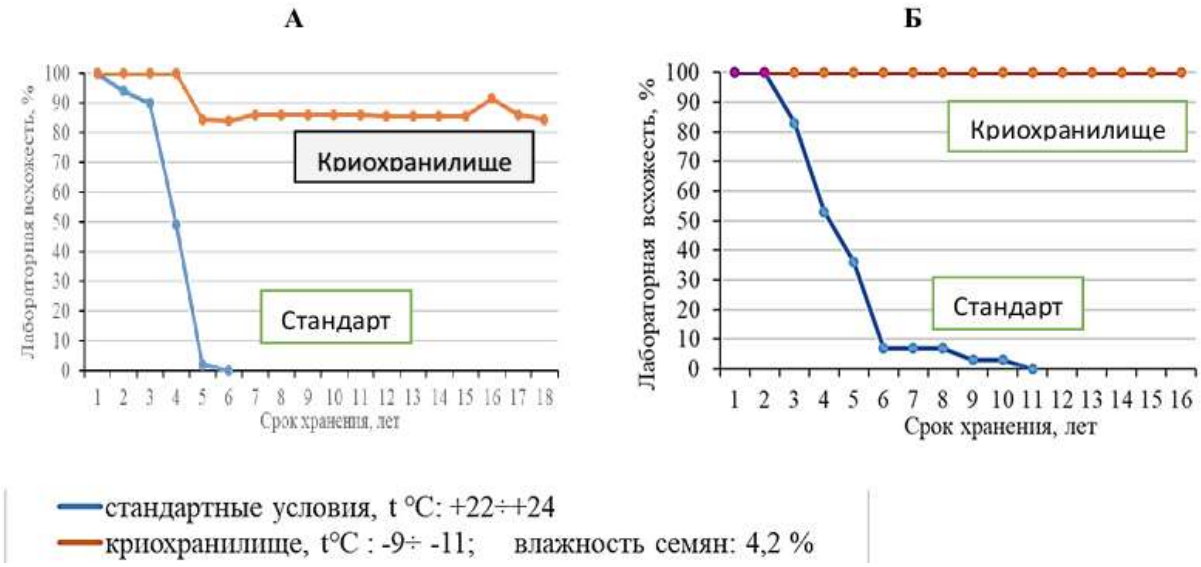



Рис. 6. Сравнительная динамика лабораторной всхожести семян: *H. minor* (А) и *F. komarovii* (Б) при хранении в стандартных условиях и криохранилище.

Для развития вектора международного сотрудничества, продвижения отечественных передовых технологий, расширения спектров размещения объектов хранения и в качестве проекта импортоопережения по отношению к Всемирному хранилищу семян на Шпицбергене в Норвегии, в 2025 году создана научно-экспериментальная Акционерная компания «Природный холод Якутии», основные акционеры-учредители которой ИБПК СО РАН и ИМЗ СО РАН. В приоритетах на 2026-2028 годы запланировано налаживание тесного взаимодействия с зарубежными странами и региональными экономическими становыми объединениями, в первую очередь ЕАЭС, ШОС и АСЕАН, включая систематизацию и институциализацию работ по размещению объектов длительного хранения партий семян дикоросов, культурных растений и их диких предшественников, а также совместные научнопрактические исследования с профильными научными институтами стран-участников в части интродукции и селекции растений. Такая работа представляется принципиально важным элементом для комплексного сохранения биоразнообразия и биоресурсов, включая селекционные материалы, обеспечения экологической и продовольственной безопасности в глобальной повестке.

***Литература***


1. Гончаров Н.П., Шумный В.К. От сохранения генетических коллекций к созданию национальной системы хранения генофондов растений в вечной мерзлоте // Вестник ВОГиС. 2008. Том 12. № 4. С. 509 – 523.
2. Кершенгольц Б.М., Иванов Б.И., Десяткин Р.В., Ремигайло П.А., Федоров И.А., Чжан Р.В. Использование естественного холода многолетнемерзлых пород для длительного хранения генетических ресурсов // Вестник ВОГиС. 2008. Том 12. № 4. С. 524–533.
3. B.M.Kershengolts, I.F.Zhimulev, N.P.Goncharov, R.V.Zhang, G.V.Filippova, A.A.Shein, I.A.Prokopiev Preservation of the Gene Pool of Plants under Permafrost Conditions: State, Advantages, and Prospects // Russian Journal of Genetics: Applied Research, 2013, Vol. 3, No. 1, pp. 35–39.
4. Гончаров Н.П. Создание, использование признаковых и генетических коллекций растений и проблемы их долгосрочного сохранения В сб. «Криохранение семян: итоги и перспективы». – Ин-т биологических проблем криолитозоны СО РАН, Ин-т молекулярной и клеточной биологии СО РАН. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2014. – С.17-33.
5. Кершенгольц Б.М., Журавская А.Н., Иванов Б.И. и др. Способ многолетнего хранения семян растений с использованием естественного холода толщи вечномерзлых горных пород // Патент РФ №2391810 от 20.06.2010. – приоритет от 30.01.2008
6. Кузьмин Г.П., Панин В.Н. Способ охлаждения подземных сооружений в массиве многолетнемерзлых горных пород и устройство для его осуществления // Патент РФ №262191 от 08.06.2017. – приоритет от 13.02.2015.
7. Прокопьев И.А., Филиппова Г.В., Шеин АА. Влияние различных температур на и состава газовых сред при кратковременном хранении семян лука-батуна в условиях многолетней мерзлоты на физиологические и цитологические харапктеристики их проростков // В сб. «Криохранение семян: итоги и перспективы». – Ин-т биологических проблем криолитозоны СО РАН, Ин-т молекулярной и клеточной биологии СО РАН. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2014. – С.74-80.
8. S.Yashinaa, S. Gubinb, S. Maksimovichb, A. Yashinaa, E. Gakhovaa, D. Gilichinskyb Regeneration of whole fertile plants from 30,000-y-old fruit tissue buried in Siberian permafrost // PNAS, published online before print February 21, 2012. https://doi.org/10.1073/pnas.1118386109
9. Андросова Д.Н., Данилова Н.С. Методические рекомендации по сбору и подготовке семян дикорастущих растений к долговременному хранению в криохранилище // Якутск: 2024. – 32 с.


## РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ПОРОД ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ


***И.А. Комаров, К.А. Никитин***

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва*


Выполнение прогноза температурного режима для многолетнемерзлых пород существенно усложняется при наличии легкорастворимых солей по разрезу, особенно в слое годовых теплооборотов, в зоне заложения свайных фундаментов многих инженерных объектов. Засоленные мерзлые грунты являются основанием для большинства промышленных объектов добычи,

транспортировки, подготовки и переработки углеводородов на полуострове Ямал. Инженерные сооружения на засоленных грунтах предъявляют особые требования к изысканиям, проектированию, строительству и эксплуатации подобных объектов [1]. В условиях наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений, особенно температуры воздуха, увеличивается количество и интенсивность деформаций строительных конструкций, повышаются затраты на поддержание проектного состояния инженерных объектов в части оснований и фундаментов [2-4].

На основе многолетних региональных инженерно-геологических исследований показано, что содержание и состав солей в породах связаны с геологической историей территорий в плейстоцен-голоцене, фациальными условиями осадконакопления, дифференцированием солей по разрезу в течение многочисленных циклов промерзания-оттаивания молодых осадков [5-7]. В тоже время химический состав поровой влаги не является постоянной величиной, так как в диапазоне температуры ниже 0 °С происходят физико-химические реакции по преобразованию состава и изменению концентрации растворенных газов, минеральных и органических веществ. Совокупность подобных процессов водно-ионного преобразования химических систем при формировании-таянии льда принято обозначать «криогенным метаморфизмом» [8], при описании которого мы имеем в виду процессы, происходящие в поровой влаге и приводящие к изменению свойств засоленных пород.

Существующие методы прогноза температуры многолетнемерзлых пород, реализованные в нормативно-технической документации, не учитывают специфики криогенного метаморфизма и связанных с ним преобразований свойств грунтов [9]. В связи с этим целью работы являлась разработка и применение методики для прогноза температурного режима засоленных мерзлых пород полуострова Ямал с учетом процессов криогенного метаморфизма в слое годовых теплооборотов.

Разработанная методика предполагает совместное применение методов термодинамического и математического моделирования для исследования закономерностей фазовых и химических преобразований в поровом растворе в ходе промерзания-оттаивания и далее использование полученных результатов для расчета температурных полей в мерзлых породах. Указанный подход позволяет выявить основные особенности формирования и динамики свойств засоленных пород с учетом физико-химических реакций в поровом растворе. Количественный учет наблюдаемых и ожидаемых климатических изменений реализуется в математической модели путем изменения значений коэффициента теплообмена на верхней границе расчетной области.

Методика имеет существенный задел к ее применению и развитию для целей инженерной практики. Так как наличие легкорастворимых солей по разрезу является одной из основных проблем при проектировании оснований, фундаментов и инженерной защиты в криолитозоне, количественная оценка фазовых и химических изменений в поровых растворах при промерзании-оттаивании может уточнить результаты прогнозных теплотехнических расчетов для засоленных грунтов в целях разработки технических решений. Данная проблема является актуальной не только для вновь возводимых объектов капитального строительства, но и для уже эксплуатирующихся объектов. Разработка и внедрение инновационных технических решений для обеспечения I принципа использования засоленных мерзлых грунтов в качестве оснований на фоне направленного потепления климата должно быть основано на научно-методических разработках, учитывающих специфику подобных грунтов.

С применением методов термодинамического моделирования на первом этапе выполнено исследование водно-ионных преобразований в поровых растворах. Прогноз изменений водно-ионных систем в ходе промерзания-оттаивания сводится к количественному расчету фазового и химического состава растворов в определенном пространственно-временном диапазоне с учетом термобарических условий протекания реакций [10]. Расчет равновесного химического состава выполнен в термодинамической модели «Freezbrine», являющейся продолжением и усовершенствованием модели «Frezchem», разработанной в лаборатории CRREL (США) [11]. Программа предназначена для расчетов химического равновесия между льдом, солями и электролитами на основе методов статистической термодинамики Питцера К.С. [12-14].

Для использования результатов термодинамического моделирования поровых растворов для прогноза свойств пород используется методика, реализованная в СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» и основанная на экспресс-методах оценки теплофизических свойств с учетом химического поведения растворов полиионного состава при отрицательной температуре [15-16]. Так как в процессе криогенного метаморфизма в поровом растворе происходят физико-химические реакции, изменяется концентрация основных химических элементов, то ряд теплофизических и водно-физических свойств пород также претерпевает изменения.

На завершающем этапе решалась краевая задача теплопроводности в мерзлых породах с учетом фазовых переходов. Математическое моделирование выполнено в программе «QFrost», использующей явную схему решения с регуляризацией, энтальпийную формулировку и метод балансов [17]. Расчет выполнен двумя независимыми подходами. В первом случае использованы свойства пород, определенные на основе результатов термодинамического моделирования и изменяющиеся в ходе расчетов. Во втором случае применялись постоянные значения этих свойств. По разнице значений среднегодовой температуры пород на подошве слоя годовых теплооборотов, полученной разными подходами, оценивается погрешность вычислений, проведенных без учета процессов криогенного метаморфизма.

Неучет засоленности пород и их свойств на период геокриологического прогноза (до 2050 г.) приводит к погрешности вычислений температуры пород до 20 % для мерзлотно-грунтовых условий полуострова Ямал на фоне ожидаемых изменений температуры воздуха с темпом до 0,2-0,4 °С/10 лет [18]. Значения среднегодовой температуры мерзлых пород, полученные при постоянных теплообменных характеристиках, оказываются заниженными по сравнению с результатами задачи с изменяющимися во времени характеристиками. Таким образом, применение комплексной методики с учетом термодинамического и математического видов моделирования в ходе геокриологического прогноза позволяет сократить возможную погрешность в оценках будущего термического состояния засоленных мерзлых пород полуострова Ямал в условиях ожидаемых климатических изменений.

***Литература***


1 Аксенов В.И. Засоленные мерзлые грунты Арктического побережья как основание сооружений. – М.: Все о мире строительства, 2008. – 351 с.

2 Алексеев А.Г., Брушков А.В., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Жданеев О.В., Заболотник П.С., Окунев С.Н., Осокин А.Б., Остарков Н.А., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Скворцов А.Г., Федоров Р.Ю., Фролов К.Н., Хрусталев Л.Н., Царев А.М. Обеспечение устойчивости зданий и сооружений в сложных геокриологических условиях // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2025. – № 4. – С. 19-25.

3 Гребенец В.И., Кизяков А.И., Маслаков А.А., Сократов С.А., Стрелецкая И.Д., Толманов В.А., Юров Ф.Д. Влияние опасных криогенных процессов на инфраструктуру городов в Арктике // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2022. – № 2. – С. 25-36.

4 Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Остарков Н.А., Фалалеева А.А., Шелков Я.Ю. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2021. – № 1. – С. 14-31.

5 Брушков А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 330 с.

6 Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. – М.: ГЕОС. – 246 с.

7 Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Полуостров Ямал (инженерно-геологический очерк). – М.: Издательство МГУ, 1975. – 278 с.

8 Иванов А.В. Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих и талых вод. – Хабаровск: Дальнаука, 1998 – 163 с.

9 СП 25.13330.2020. СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах (с Изменениями N 1, 2). – М.: Минстрой России, 2020. – 104 с.

10 Комаров И.А., Кияшко Н.В., Мироненко М.В., Никитин К.А., Латыпова А.Э. Криогенный метаморфизм засоленных многолетнемерзлых пород и криопэгов п-ова Ямал // Инженерная геология. – 2024. – Т. XIX, № 1. – С. 46-59.

11 Mironenko M.V., Grant S.A., Marion G.M., Farren R.E. FREZCHEM2 A Chemical Thermodynamic Model for Electrolyte Solutions at Subzero Temperatures // Cold Regions Research and Engineering Laboratory. – 1997. – Technical reports 97-5. – P. 40.

12 Мироненко М.В., Поляков В.Б. Об алгоритме расчета равновесного состава водно-солевых систем на основе модели Питцера // Геохимия. – 2009. – № 10. – С. 1103-1107.

13 Marion G.M., Mironenko M.V., Roberts M.W. FREZCHEM: a geochemical model for cold aqueous solutions // Computers and Geosciences. – 2009. – Vol. 36, Iss. 1. – P. 10-15.

14 Pitzer K.S. A thermodynamic model for aqueous solutions of liquid-like density // Rev. Mineralogy. – 1987. – Vol. 17. – P. 97-142.

15 Комаров И.А., Мироненко М.В., Кияшко Н.В. Совершенствование нормативной базы по расчетной оценке теплофизических свойств засоленных пород и криопэгов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2012, № 2. – С. 25-30.

16 Комаров И.А., Мироненко М.В., Никитин К.А., Кияшко Н.В. Методика прогноза температурного и водно-ионного режима засоленных мерзлых пород п-ова Ямал, с учетом глобального изменения климата: учебное пособие. – М.: Директ-медиа, 2024. – 160 с.

17 Песоцкий Д.Г. QFrost – программа для моделирования теплофизических процессов в грунтах. Свидетельство о гос. рег. пр. для ЭВМ № 2016614404, 22.04.2016 г.

18 Никитин К.А., Комаров И.А., Мироненко М.В., Кияшко Н.В. Влияние засоленности на прогнозные оценки температуры мерзлых пород на примере полуострова Ямал // Арктика и Антарктика – 2024. – № 3. – С. 30-45.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КРИОГЕННОГО МЕТАМОРФИЗМА КРИОПЭГОВ МОРСКОГО И КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ТИПА ЗАСОЛЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

***И.А. Комаров[1], А.А. Шиманов[2], Т.А. Киреева[1], Н.А. Павлова[3] , Н.В. Кияшко[1]***

*[1] ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

[2]Государственное природоохранное бюджетное учреждение «Мосэкомониторинг»

*[3]ФГБУН институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова, г . Якутск*

Исследование направлено на решение одной из фундаментальных проблем геокриологии – выявление закономерностей криогенного метаморфизма криопэгов и подземных вод морского и континентального типов засоления. Свойства засоленных мерзлых грунтов значительно отличаются от незасолённых, что создаёт дополнительные риски для устойчивости грунтовых оснований инженерных сооружений запроектированных или функционирующих, в первую очередь, по первому принципу строительства. При воздействии минерализованных вод на мерзлый грунт происходит растворение содержащегося в нем льда, вследствие чего существенно уменьшается его несущая способность. Большую опасность для свайных фундаментов представляют криопэги, линзы высокоминерализованных рассолов, наличие которых приводит к существенной потере этой способности, а также. повышенной коррозии металлов подземных коммуникаций. Засоленные грунты морского типа засоления распространены в арктических регионах, таких как полуостров Ямал, полуостров Гыдан, Аляска, архипелаг Шпицберген. Континентальный тип засоления распространен в регионах: Центральная Якутия, Забайкалье, Монголия . …Изучение химического состава криопэгов п-ова Ямал, показало, что изменение химического состава растворов при промораживании происходит по закономерностям, схожим с концентрированием поверхностных и грунтовых вод при испарении. Анализ содержания ионов в исследованных криопэгах полуострова Ямал выявил прогрессивное накопление ионов $Mg^{2+}$, $Na^{+}$ и $Cl^{-}$ при возрастании минерализации. Ионы $Ca^{2+}$, $HCO_3^{-}$ и $SO_4^{2-}$ не накапливаются в криопэгах высокой минерализации (>35 г/л), что связано с образованием кальцита, гипса и ангидрита. Большая часть (93% коллекции) криопэгов рассматриваемой территории образовалась при концентрировании исходной воды морского генезиса, о чем свидетельствует прогрессивное накопление магния в рассолах с образование рассолов хлоридно-натриево-магниевого состава. Ряд образцов (7% коллекции) криопэгов лайд полуострова Ямал и пойм сформировались при концентрировании инфильтрационных поверхностных вод, о чем свидетельствует пониженное содержание в рассолах магния относительно океанической воды и формирование результирующих хлоридно-натриевых растворов аналогичной минерализации. В одном случае генезис исходных вод криопэгов лайд полуострова Ямал предполагается как смешанный инфильтрационно-морской, о чем свидетельствует образование сульфатно-хлоридно-натриевого раствора с относительным содержанием магния, аналогичным содержанию в морской воде. …Анализ изменения содержания ионов в изученных подземных соленых водах в диапазоне минерализации 0,0-80,0 г/л показал, что в условиях города Якутска при криогенном концентрировании накапливаются ионы: $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $Na^{+}$, $SO_4^{2-}$, $Cl^{-}$, $NO_3$. Очень сильная корреляция между концентрацией иона и общей минерализацией раствора прослеживается у ионов $Na^{+}$, $SO_4^{2-}$, $Cl^{-}$. Для ионов $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$ и $NO_3$ наблюдается сильная корреляция. Ионы $Fe^{2+}$, $HCO_3^{-}$, $CO_3^{2-}$ не накапливаются при криогенном концентрировании. Концентрирование криопэгов Якутска происходит как минимум по двум сценариям: с образованием растворов хлоридно-натриевого и хлоридно-магниевого состава. Химический состав криопэгов зависит от состава твердых

растворимых солей грунтов. Максимальная минерализация криопэгов может достигается в июле-августе, что связано с особенностями температурного режима многолетне- и сезонномерзлых грунтов Изучение химического состава криопэгов на территории г. Якутска подтвердило, что закономерности концентрирования основных компонентов минерализации при замораживании схожи с закономерностями испарительного концентрирования. ….В работе показано, что содержание иона $Mg^{2+}$ в криопэгах морского типа засоления является диагностическим признаком, позволяющим уточнить их генезис (морская вода или смешение морской и пресной воды), а также, что при криогенном концентрировании криопэгов континентального типа засоления в растворе накапливаются ионы $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $Na^{+}$, $SO_4^{2-}$, $Cl^{-}$, $NO_3$ и выдвинута гипотеза о возможности формирования растворов хлоридно-нитратного состава. …Впервые описан механизм формирования природных сульфатно-магниевых вод золоторудных месторождений Магаданской области. Фактором резкого повышения сульфатности подземных вод районов разработки золоторудного месторождения в Магаданской области является окисление сульфидов металлов, выполняющих золотоносные жилы. Источником иона магния в растворе является растворяемый минерал анкерит. Фактором формирования минерализованных растворов, с резким преобладание сульфата магния, является криогенное концентрирование вод исходного сульфатно-кальциево-магниевого состава. Смешение минерализованных сульфатно-магниевых и инфильтрационных вод гидрокарбонатно-кальциевого состава приводит к современному минералообразованию с преобладанием в составе гипса.

***Литература***


1.Алексеев С.В. Криогидрологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: ГЕО, 2009, 314 с.

2.Анисимова Н.П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981, 153 с

3.Анисимова Н.П., Кузнецов С.Н. Природные условия формирования антропогенных криопэгов в районе Якутска / / Природные условия осваиваемых регионов Сибири. Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1987. С. 55-65.

4.Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. 189 с.

5.Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А. Криопэги // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал.Т.1 Криосфера Харасавейского газоконденсатного месторождения. С.-Петербург: «Недра», -2006, С. 230-235.

6.Волков Н. Г., Комаров И. А., Мироненко М. В., Фотиев С. М., 2005. Методики оценки температуры формирования ионно-солевого состава криопэгов. Криосфера Земли, Том. 9, № 4. с. 54–61.

7.Иванов А.В. Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих и талых вод. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988, 163 с.

8.Кияшко Н.В., Комаров И.А. О некоторых закономерностях криогенного метаморфизма криопэгов п-ова Ямал. Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами», Томск, 2012.с.451–454.

9.Комаров И.А., Кияшко Н.В., Мироненко М.В., Никитин К.А., Латыпова А.Э. Криогенный метаморфизм засоленных многолетнемерзлых пород и криопэгов п-ова Ямал. // Инженерная геология, -2024, Том XIX, № 1, с. 46–59, https://doi.org/10.25296/1993-5056- 2024-19-1-46-59.

10.Макаров В.Н., Шепелев В.В., Шац М.М., Железняк М.Н. Геоэкологические проблемы осваиваемых территорий Якутии // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2000 г. №4-5, с.30-34.

11.Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложнеий центрального Ямала // Криосфера Земли. -2002. -Т. 6. №3. -С. 15–24.

12.Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. -1999. -Т. 3, № 2. -С. 40–65.

13.Шепелев В.В., Железняк М.Н. Основные особенности взаимодействия подземных вод и мерзлых пород // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. -2023, Т.28, №4, С. 533-539.

14.Шиманов А.А., Комаров И.А. Оценка тепловых эффектов при замерзании минерализованных растворов // Инженерная геология. -2019, том 14, №3, с. 68-76.

15.Шиманов А.А., Комаров И.А., Киреева Т.А. Особенности изменения химического состава криопэгов полуострова Ямал в процессе криогенного концентрирования //Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), 2019. № 6. С. 73-80.

16.Shimanov A.A., Komarov I.A. Estimation of the Corrosion Activity of Cryopegs on the Example of Soil Conditions of the Yamal Peninsula // Soil Mechanics and Foundation Engineering. -2020. -Vol. 57. -No. 5. - Pp. 429-434.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ СРЕДНЕЙ ГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ГОРИЗОНТОВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В РАЗНЫХ РЕГИОНАХ ЯКУТИИ

***П.Я. Константинов***
*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

Тепловое состояние верхних горизонтов горных пород, в том числе многолетнемерзлых пород (ММП), является производным результатом взаимодействия комплекса внешних и внутриземных факторов, среди которых основными являются: приход и расход солнечной энергии, температурные условия приземной атмосферы, режим атмосферного увлажнения, рельеф земной поверхности, естественные наземные покровы (растительный и снежный), физические и теплофизические свойства грунтов в слое годовых теплооборотов. В разных регионах эти факторы могут различаться в той или иной степени, поэтому различия термических условий ММП в криолитозоне имеют как широтный, так и секторный характер. По этой же причине в разных регионах криолитозоны реакция термических условий ММП на коротко- и длиннопериодные климатические изменения будет неодинаковой. Но даже в одном и том же регионе физические и теплофизические свойства грунтов, растительный и снежный покровы могут существенно различаться от места к месту, которые в общем можно назвать ландшафтными различиями. Из-за таких различий тренды температуры ММП будут неодинаковыми в разных ландшафтах одного региона. Но при этом средние значения трендов для региона могут отличаться от таковых для другого региона.

В данной работе приводится сравнение современных трендов средней годовой температуры приповерхностых горизонтов ММП ($t_{спг}$), залегающих под подошвой сезонно-талого слоя и относящихся к верхней части слоя годовых теплооборотов. В зависимости от дисперсности отложений для тундровой зоны это глубины 0,5-1,5 м, а для среднетаежной зоны Якутии – 2-3 м от земной поверхности. Данные по современным трендам $t_{спг}$ получены по результатам наблюдений на мониторинговых участках Лаборатории криогенных ландшафтов Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН за период 2013-2024 гг. для трех регионов Якутии, из которых один относится к центральному сектору субарктической зоны, а два других – западному и восточному секторам среднетаежной зоны. Термометрические скважины оборудованы в зональных доминантных типах ландшафтов. Для субарктической зоны это горнотундровые и равнинные тундровые ландшафты, а для среднетаежной зоны – бореальные хвойные леса. Среди последних исследованы как сохранившиеся массивы коренных лесов, так и смешанные древостои разного бонитета в местах, подвергшихся ранее пожарам и вырубкам.

Наблюдения в центральном секторе субарктической зоны проводятся в районе пос. Тикси и охватывают горнотундровые ландшафты невысоких каменных гряд и тундровые ландшафты межгорных долин и оснований пологих склонов [1]. Наблюдения проводятся в термометрических скважинах различной глубины с использованием японских температурных логгеров DATAMARK и TR-52, а также логгеров EClerk-M-2Pt-HP российского производства. Для предотвращения влияния воздушной конвекции стволы скважин после установки проводных датчиков целиком засыпались грунтом или трансформаторным маслом.

Наблюдения в западном секторе среднетаежной зоны охватывают районы среднего и верхнего течения р. Вилюя, относящихся к западной части Центральноякутской равнины и юго-восточной части Вилюйского плато. В ландшафтном отношении исследования ведутся в различных вариациях лиственничных лесов. Наблюдения проводятся в термометрических скважинах без обсадных труб с полной грунтовой засыпкой проводных датчиков. Для записи температуры используются температурные логгеры HOBO U12-008 производства США.

Наблюдения в центральном секторе среднетаежной зоны проводятся на участках лево- и правобережья р. Лены около г. Якутска. В ландшафтном отношении исследованиями охвачены коренные лиственничные и сосновые леса, а также вторичные леса смешанного березово-лиственничного состава. Наблюдения проводятся в термометрических скважинах без обсадных труб с полной грунтовой засыпкой проводных датчиков. Для температурных измерений используются температурные логгеры HOBO U12-008, TR-52 и EClerk-M-2Pt-HP.

В таблице приведены тренды температуры воздуха и средней годовой температуры приповерхностых горизонтов ММП для трех регионов Якутии за период 2013-2024 гг. Для ММП дается диапазон трендов для разных ландшафтных условий в каждом регионе. Графики средних значений трендов $t_{спг}$ показаны на рисунке.

Таблица 1

Тренды средней годовой температуры воздуха и приповерхностных горизонтов ММП в разных регионах Якутии за период 2013-2024 гг., °С/год

| Физическая среда | Субарктическая зона | | Среднетаежная зона | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Центральный сектор | | Западный сектор | | Центральный сектор | |
| | Диапазон | Средн. | Диапазон | Средн. | Диапазон | Средн. |
| Воздух | | 0,097 | | 0.106 | | 0,049 |
| ММП | 0,059...0,167 | 0,114 | 0,049...0,110 | 0,084 | -0,028...0,058 | 0,011 |

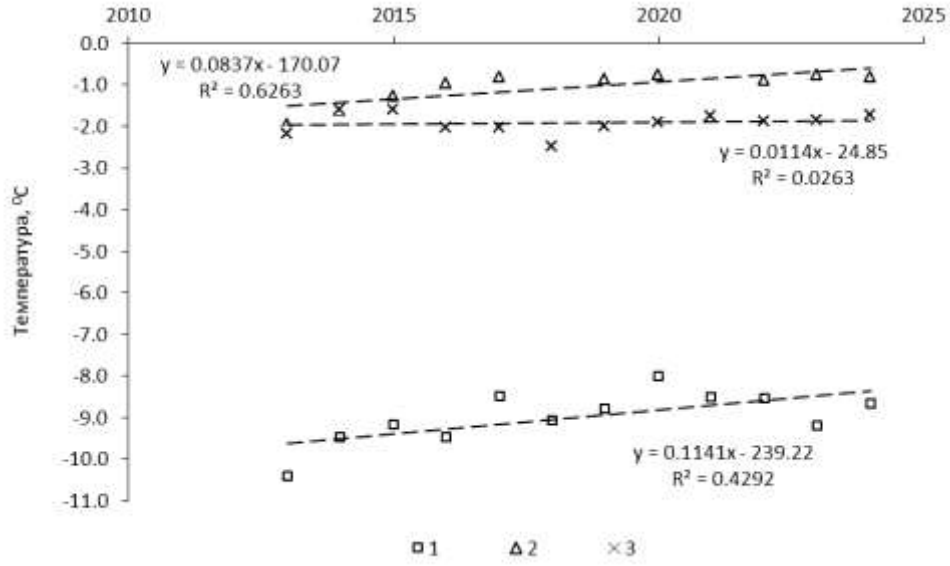



Рисунок 1. Средние тренды средней годовой температуры приповерхностных горизонтов ММП в разных регионах Якутии за период 2013-2024 гг.
1-цетральный сектор субарктической зоны; 2-западный сектор среднетаежной зоны; 3- центральный сектор среднетаежной зоны.

Как видно из данных таблицы за период 2013-2024 гг. наибольший тренд повышения средней годовой температуры воздуха отмечен в западном секторе среднетаежной зоны, который немного больше такового в центральном секторе субарктической зоны. Но при этом наибольший средний тренд средней годовой температуры приповерхностых горизонтов ММП зафиксирован в центральном секторе субарктической зоны. Наименьшие различия между трендами средней годовой температуры воздуха и трендами $t_{спг}$ оказались в субарктической зоне. По сравнению с таежными районами Западной и Центральной Якутии в районе пос. Тикси из-за сильных ветров формируется достаточно плотный снежный покров, обладающий намного меньшей теплозащитной способностью. В этих условиях основным фактором межгодовой измечивости средней годовой температуры ММП выступает температура воздуха [2], поэтому их тренды близки по своим значениям.

В среднетаежной зоне Якутии формируется очень рыхлый снеговой покров с большой теплоизоляционной способностью, поэтому межгодовые вариации его высоты в начальный период зимы, когда грунты теряют основную часть накопленного тепла за летний период, сильно сказываются на $t_{спг}$. В этой зоне Якутии примерно одна зима из пяти в первые два месяца зимы (октябрь и ноябрь) оказывается малоснежной, что приводит к переохлаждению грунтов и формированию низких значений $t_{спг}$. За счет этого в условиях продолжающегося общего потепления на территории Средней Сибири в среднетаежной зоне Якутии тренды $t_{спг}$ оказываются меньше трендов средней годовой температуры воздуха. Исключительная роль снежного покрова в формировании температурного режима ММП в слое годовых теплооборотов для среднетаежных районов Якутии экспериментально подтверждена многими исследованиями [3-7]. Большую роль в

формировании $t_{спг}$ играет и почвенная влажность. Теоретически обосновано, что теплоизоляционная способность снежного покрова при равных значениях его высоты сильнее в годы больших значений почвенной влажности в период зимнего промерзания сезонно-талого слоя, чем в годы ее меньших значений в тот же период [8, 9]. Наиболее ярко это проявляется в более засушливом центральном секторе среднетаежной зоны Якутии, где значения почвенной влажности перед началом зимнего периода в отдельные годы могут отличаться в несколько раз. Поэтому в этом секторе наблюдается максимальная разница между значениями трендов средней годовой температуры воздуха и $t_{спг}$. Как видно из данных таблицы в центральном секторе среднетаежной зоны Якутии за рассматриваемый период в отдельных лесных ландшафтах зафиксированы даже отрицательные тренды $t_{спг}$.

Таким образом, проведенными исследованиями выявлена существенная разница современных трендов средней годовой температуры приповерхностых горизонтов ММП в разных регионах Якутии. Заметный средний тренд $t_{спг}$ (0,114 °С/год) зафиксирован в центральном секторе субарктической зоны. Несколько меньший средний тренд $t_{спг}$ (0,084 °С/год) наблюдаются в западном секторе среднетаежной зоны Якутии. Минимальный средний тренд $t_{спг}$ (0,011 °С/год) имеет место в центральном секторе среднетаежной зоны Якутии, где в отдельных лесных ландшафтах отмечены даже отрицательные тренды $t_{спг}$.

***Литература***


1 Константинов П.Я., Федоров А.Н., Башарин Н.И. Результаты температурного мониторинга многолетнемерзлых пород около пос. Тикси (арктическая Якутия) [Электронный ресурс] / Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14 - 17 июня 2022 г. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. С. 246-250. – Режим доступа: https://bookonlime.ru/node/44945 – doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130.

2 Konstantinov P., Basharin N., Fedorov A., Iijima Y., Andreeva V., Semenov V., Vasiliev N. Impact of Climate Change on the Ground Thermal Regime in the Lower Lena Region, Arctic Central Siberia // Land. – 2023. – 12. – 19. https://doi.org/10.3390/land12010019

3 Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. – Якутск: Якутское кн. изд-во, 1975. – 302 с.

4 Павлов А.В., Вотякова Н.И., Шипицина Л.И. Анализ многолетних изменений параметров теплового режима сезоннопротаивающих грунтов / Мерзлые грунты при инженерных воздействиях. – Новосибирск: Наука, 1984. – С.46-52.

5 Скрябин П.Н., Варламов С.П., Скачков Ю.Б. Межгодовая изменчивость теплового режима грунтов района Якутска. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. – 144 с.

6 Варламов, С. П., Скачков, Ю.Б., Скрябин П.Н. Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2021. – 156 с.

7 Константинов П.Я. Динамика средней годовой температуры верхних горизонтов многолетнемерзлых пород в зональных ландшафтах средней тайги около г. Якутска за период 1998-2023 гг. / География и краеведение в Якутии и регионах России: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 85-летию со дня рождения Г.Н. Максимова, Якутск, 22–23 марта 2024 года. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2024. – С.82-86.

8 Кудрявцев В.А. Влияние снежного покрова на сезонное промерзание и оттаивание и температурный режим почвы / Мерзлотные исследования. – М.: Изд-во Моск.ун-та. – 1967. – Вып. VII. – С. 21-26.

9 Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. – Новосибирск: Наука, 1991. – 194 с.


## ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА СЕВЕРЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ


***Е.С. Коренкова[1], Л.В. Емельянова[1], В.З. Хилимонюк[1], С.Н. Булдович[1], И.А. Агапкин[2]***

*[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.*

*[2]Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия.*


**Введение.** Снежный покров является одним из важнейших факторов, определяющих температурный режим горных пород. Его влияние на температуру пород определяется мощностью и плотностью снежного покрова. Из двух характеристик снежного покрова наиболее значимый

параметр – плотность, определяющий коэффициент теплопроводности снега, характеризующий теплоизоляционные свойства снежного покрова.

Данные мониторинга Росгидромета и крупнейших зарубежных климатических центров подтверждают, что глобальное потепление, начавшееся в 1970-е годы, продолжается и в настоящее время. В докладе Европейского союза по наблюдению за Землёй утверждается, что 2024 год стал самым тёплым за историю наблюдений с 1967 г. впервые превысив среднегодовую температуру воздуха на 1,5 °С по сравнению с доиндустриальным периодом [1]. При этом на территории России теплеет в 2,5 раза быстрее, чем на Земном шаре в целом (+0,51$^{o}$С/10 лет против +0,20$^{o}$С/10 лет). [2].

Актуальность работы обусловлена тем, что в условиях современного изменения климата особенно важно проследить пространственную и временную изменчивость снежного покрова. Изменения его мощности, плотности и продолжительности залегания могут существенно влиять на состояние многолетнемёрзлых пород и геокриологические условия территории. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: собрать и систематизировать материалы по снежному покрову, сопоставить архивные и современные данные, выявить основные пространственные различия и оценить изменения во времени.

**Краткая характеристика района исследований.** Для анализа был выбран север Красноярского края как наиболее перспективный для освоения. Характер снежного покрова в данном регионе определяется следующими факторами: географическим положением (находится в высоких широтах, за Полярным кругом), геоморфологическими особенностями (горы Бырранга, Северо-Сибирская низменность, плато Путорана и т. д.) и суровым климатом (близость холодных северных морей и Ледовитого океана) (рис. 1) [3].

Рис. 1. Схематическая географическая карта севера Красноярского края [3]

О суровости климата севера Красноярского края можно судить на основании районирования территории по климатическим условиям, выполненного С.И. Заболотником [4] по результатам наблюдений за температурой воздуха на всех метеостанциях России (рис. 2). Результаты районирования позволяют отнести большую часть изучаемого региона к зоне с экстремальными климатическими условиями (5 баллов: средние многолетние суммы среднесуточных значений температуры воздуха ниже нуля – от -5001°С до -6250°С) и незначительную часть – к зоне в 4 балла (рис. 2). Однако в настоящее время отмечается значительный рост среднегодовой температуры воздуха в данном регионе, так, например, на полуострове Таймыр – +1.4 °С/10 лет за 1976–2025 гг. [2]

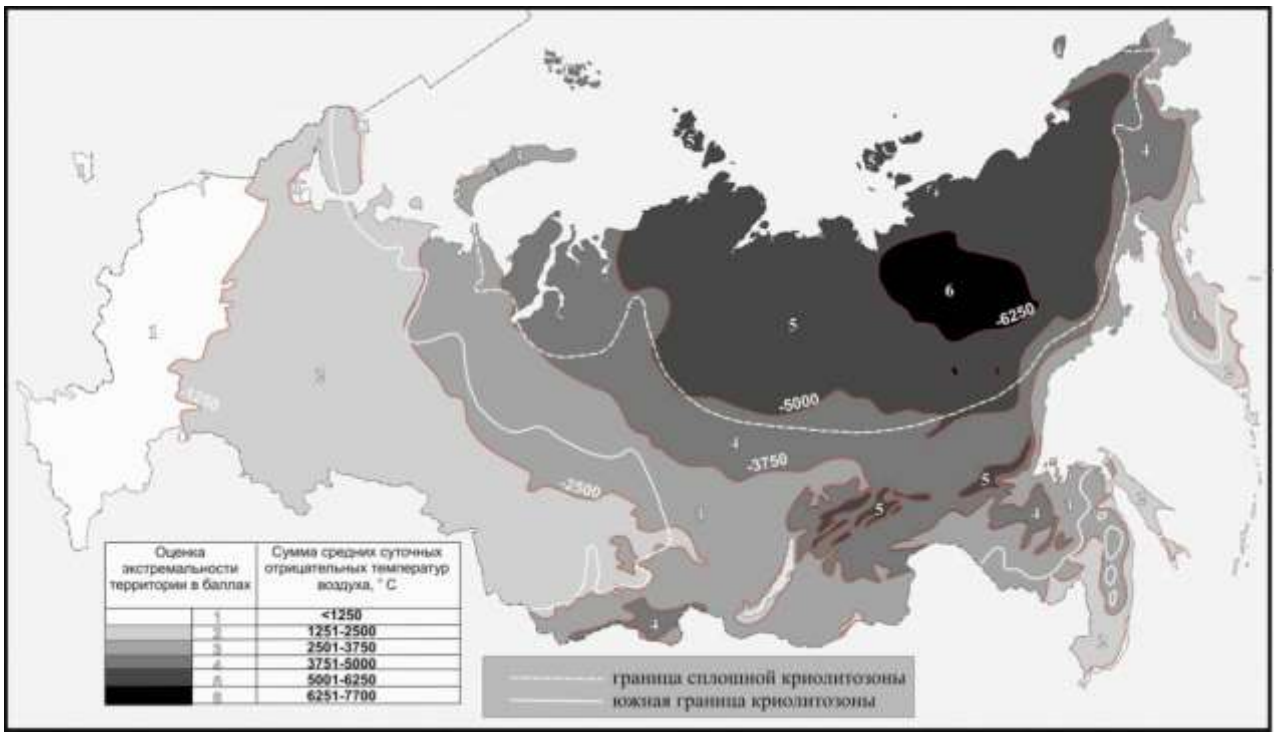



Рис. 2. Районирование территории Российской Федерации по суровости климатических условий (уменьшенная карта масштаба 1: 5 000 000) [4]

**Материалы и методы исследования.**

В основу работы положены текстовые и картографические материалы по снежному покрову севера Красноярского края, собранные из открытых литературных, нормативных, фондовых источников, а также из электронных ресурсов за период с 1892 г. по настоящее время. Использованные материалы позволяют проследить пространственные особенности распределения снежного покрова и его изменение во времени.

**Мощность и продолжительность залегания снежного покрова.** Г.Д. Рихтер в 1945 г. выделил 7 зон [5]. В качестве основного источника для характеристики распределения снежного покрова использовались летописи Главной геофизической обсерватории за период с 1892 по 1916 гг. В основу районирования были положены два основных признака: максимальная среднедекадная мощность (высота) снежного покрова и продолжительность многоснежного периода (более 30 см). Большая часть севера Красноярского края по классификации Г.Д. Рихтера (рис. 3) относится к VI Арктической зоне, а меньшая его часть (южная) – на западе к I зоне (Обь-Енисейский район), на востоке – ко II зоне (Средне-Сибирский район). VI зона характеризуется максимальной мощностью снега от 20 до 50 см и периодом залегания снежного покрова в течение 10–11 месяцев (300–330 дней), за исключением северо-западных частей зоны, где снег наблюдался круглый год, а на востоке – круглый год отсутствовал. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что уже в ранних обобщающих работах север Красноярского края рассматривался как территория с выраженной арктической спецификой снегонакопления.

По данным климатических и справочных материалов, на севере Красноярского края среднее значение наибольшей высоты снежного покрова за зиму изменяется от 40 до 80 см, а продолжительность его залегания в основном составляет 200–280 дней, возрастая в северном направлении [6, 7]. Эти данные отражают выраженную пространственную неоднородность снежного покрова в пределах региона. В последние годы стали доступны детализированные климатические данные глобальных реанализов. Современные климатические данные показывают, что в начале зимы на северо-западе региона высота снежного покрова достигает 20–40 см, тогда как вблизи побережья Карского моря она обычно не превышает 10 см [8]. При этом на северо-востоке, в пределах Таймыра, отмечается уменьшение высоты снега в декабре, что, вероятно, связано со снижением зимних осадков [9].

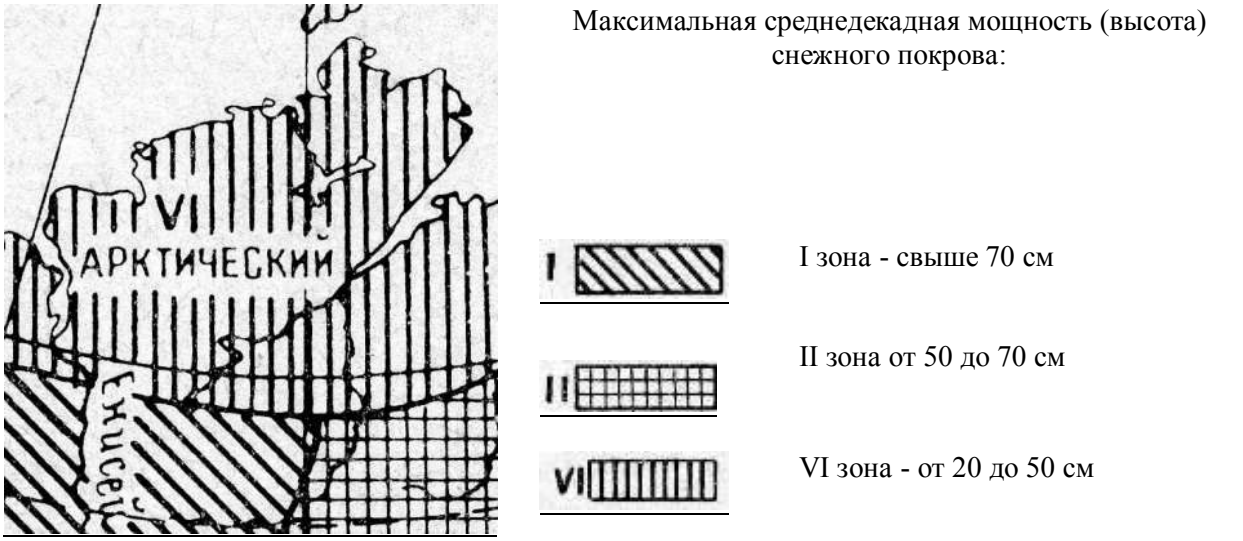



Рис. 3. Фрагмент схематической карты районирования высоты снежного покрова СССР [5]

**Плотность снежного покрова.** Долговременные ряды данных по плотности снежного покрова на севере Красноярского края ограничены. По результатам снегомерных наблюдений на метеостанциях Таймырского полуострова средняя плотность снега к концу зимы составляет 0.24–0.27 г/см³, а в отдельных районах достигает 0.30 г/см³ [10, 11]. Для центральных районов Таймыра также отмечено увеличение плотности снега от января к марту, что может быть связано с ростом доли влажного снега в условиях повышения зимних температур воздуха [11].

**Современные данные наблюдений.** Анализ современных наблюдений показал заметную межгодовую изменчивость характеристик снежного покрова. Так, к концу зимы 2022/23 г. на большей части севера Красноярского края высота снега достигала 40–60 см, тогда как в предшествующий период в тех же районах она была существенно меньше. Вероятной причиной этого стали более интенсивные снегопады в начале зимнего сезона.

**Сравнение характеристик снежного покрова 1990 г. и современных данных.** Для выявления долговременных изменений были сопоставлены данные маршрутной снегомерной съёмки 1990 г. от метеостанции Норильск с аналогичными наблюдениями 2019–2025 гг. [2, 12]. Сравнение показало, что в последние годы в этом районе наблюдается увеличение как высоты снежного покрова, так и его плотности по сравнению с данными 1990 г. Это указывает на изменение характеристик снежного покрова в современных климатических условиях.

**Заключение.** Таким образом, проведённый анализ показал, что снежный покров севера Красноярского края отличается выраженной пространственной и временной изменчивостью. На равнинных участках, в том числе в районе Норильска, мощность снежного покрова значительно выше, чем вблизи арктического побережья, а продолжительность его залегания возрастает в северном направлении. В начале XXI века отмечается уменьшение снегового запаса, однако сопоставление данных маршрутных наблюдений 1990 г. и 2019–2025 гг. показывает увеличение среднемесячной и средней за зиму высоты снега, а также рост его плотности. Полученные результаты могут быть использованы для геокриологического прогноза и решения прикладных задач на территории севера Красноярского края.

***Литература***

1 Global Climate Highlights 2024 – Электронный ресурс / Copernicus Climate Change Service. – European Commission, 2025. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024 / Дата обращения: 2024-12-23.

2 Росгидромет. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2025 год. – М.: Росгидромет, 2026.–132 с. – [Электронный ресурс].. Режим доступа: https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2026/RF_Climate_report_2025.pdf / Дата обращения: 2026-03-15.

3 Каталог векторных карт – [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.sharada.ru/katalog/maps/regions/sibirskij-fed-okrug/krasnojarskij-kraj-geograficheskaja-karta / Дата обращения: 2025-03-10.

4 Заболотник, С. И. Районирование территории РФ по суровости климатических условий / С. И. Заболотник // Материалы Третьей конференции геокриологов России. – 2005. – Т 3. – Часть 6 – С. 101-108.

5 Рихтер, Г.Д. Роль снежного покрова в физико-географическом процессе //Труды института географии.– М.-Л.: АН СССР, 1948. – Вып. 40. – 171 с.

6 Борисов, А.А. Климатография Советского Союза. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1970. – 312 с.

**7** Научно-прикладной справочник по климату СССР. Красноярский край, Тувинская АССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 623 с.

8 Агроэкологический атлас России и сопредельных стран – [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.agroatlas.ru/ru/content/Climatic_maps/Snow/Snow_12/index.html //Дата обращения: 2023-04-12.

9 Ежегодные доклады об особенностях климата РФ – [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.igce.ru/climatechange/reports // Дата обращения: 2025-03-15.

10 Осокин, Н. И., Сосновский А.В. Пространственная и временная изменчивость снежного покрова // Лёд и снег. – 2014. – № 4. – С. 72-80.

11 Осокин Н. И., Сосновский А. В., Чернов Р. А., Накалов П. Р.. Термическое сопротивление снежного покрова и его изменчивость // Криосфера Земли.– 2014. – Т. 18. – № 4. – С. 70-77.

12 Балобаев, В. Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии – Новосибирск: Наука, 1991. – 193 с.

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ТИПИЧНОЙ ТУНДРЫ В РАЙОНЕ МАРРЕСАЛЯ (П-ОВ ЯМАЛ) И ИХ СВЯЗЬ С ДЕГРАДАЦИЕЙ МЕРЗЛОТЫ

***С.Г. Корниенко***

*Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва*

Общие выводы о влиянии потепления климата на состояние мерзлоты не могут в полной мере характеризовать ее изменения на региональном и локальном уровне, поскольку направленность и темпы этих изменений зависят от многих факторов, в том числе от неоднородностей рельефа, типов ландшафта, типов растительности, геокриологических условий, состава и влажности почвы. В этой связи, важной задачей является изучение роли и степени влияния тех или иных факторов на процесс трансформации криогенных ландшафтов. Принимая во внимание возможность использования свойств поверхности как индикаторов трансформации мерзлоты, проводятся исследования по выявлению связей между геокриологическими условиями, состоянием растительности и влажностью почвы тундровых зон [1–6]. Учитывая существенную неоднородность тундровых ландшафтов, значительные масштабы территорий, а также необходимость обновления информации о состоянии поверхности, для районов Арктики и Субарктики актуальными остаются разработка и адаптация методов дистанционного зондирования Земли для анализа изменений растительности и влажности почвы.

Настоящее исследование проводилось на участках типичной субарктической тундры в районе полярной станции Марресаля на западном побережье полуострова Ямал с использованием данных со спутников Landsat. Цели настоящего исследования включали характеристику, обусловленных потеплением климата изменений свойств напочвенного растительного покрова (НРП) и влажности почвы разных типов ландшафта на разных геоморфологических уровнях, а также характеристику возможной связи геокриологических условий с многолетними изменениями свойств НРП и влажности почвы.

Исследование проводилось на двух участках различной площади. Первый участок площадью 3×3 км (рис. 1 А) включал территорию геокриологического стационара, на которую ранее была составлена карта типов ландшафта [7] в ранге урочищ. На второй участок площадью 7×7 км, охватывающий первый участок, на основе цифровой модели рельефа (Arctic DEM) была составлена карта геоморфологических уровней (рис. 1В) [8]. За исключением песчаных раздувов во всех ландшафтах с поверхности присутствует торфяной слой. В зависимости от типа ландшафта глубина сезонно-талого слоя (СТС) варьирует от 0,4 до 2,2 м. Более низкие значения глубины СТС характерны для ландшафтов с более высокой влажностью пород [7]. Растительный покров представлен лишайниково-моховыми, кустарничково-моховыми, травяно-моховыми фитоценозами мощностью от 2 до 15 см с присутствием кустарников ивы высотой до 0,4 м [7,9]. В настоящем

исследовании из всех типов ландшафта рассматривались только пять (9,3,8,2,6, рис. 1А), для которых в работе [9] приведены значения многолетних трендов изменения глубины СТС.

За последние 50 лет темпы повышения среднегодовой и средней летней температуры воздуха по данным станции Марресаля составляют около 0,078 и 0,063 °С в год, соответственно [9]. Сам район Марресаля относится к биоклиматической подзоне Западной Сибири с наиболее высоким темпом потепления вечной мерзлоты, который составляет 0,056 °С в год. В районе не отмечены признаки антропогенного или стихийного воздействия на ландшафт, поэтому любые изменения состояния его поверхности и мерзлоты здесь связаны только с изменением климата.

В работе использовались 43 снимка со спутников Landsat 5,7,8,9 со съемками в июле-августе в период с 1985 по 2024 годы. Анализ изменений состояния поверхности проводился на основе вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), характеризующего содержание зеленой фитомассы в НРП, индекса NDWI (Normalized Difference Water Index) для оценки влажности на поверхности НРП, а также температурно-вегетационного индекса WI (Wet Index), характеризующего влажность НРП и почвы в его корневой зоне [10,11]. Маскирование водных поверхностей проводилось на основе водного индекса MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) [11]. Для минимизации различий, связанных с разной спектральной чувствительностью радиометров спутников Landsat проводилась кросс-калибровка значений индексов NDVI и NDWI [11]. Индексы NDVI, NDWI и MNDWI имеют безразмерные значения в диапазоне от -1 до 1, а значения индекса WI меняются от 0 до 1, что соответствует минимальной и максимальной влажности поверхности.

На первом этапе анализировались средние за все годы космической съемки значения индексов NDVI, NDWI и WI, а также тренды их изменения за период с 1985 по 2024 год на большом участке в границах различных геоморфологических уровней (рис.1В, пойма реки Марре-Яха, объединенная с лайдой, I-II, III и IV террасы). На втором этапе аналогичный анализ проводился на малом участке (рис. 1А) по зонам в границах каждого из пяти типов ландшафта (9,3,8,2,6) на каждом геоморфологическом уровне (пойма, I-II террасы, III терраса). Поскольку торфяные болота (тип 9) приурочены только к пойме, а остальные типы ландшафта (3,8,2,6) встречаются на I-II и III террасах, для второго этапа работ было выбрано 9 зон анализа. Границы доверительных интервалов уравнений регрессии и статистическая значимость трендов изменения средних значений индексов определялись на основе t-статистики Стьюдента с уровнями порога значимости α (0,1; 0,05; 0,01).

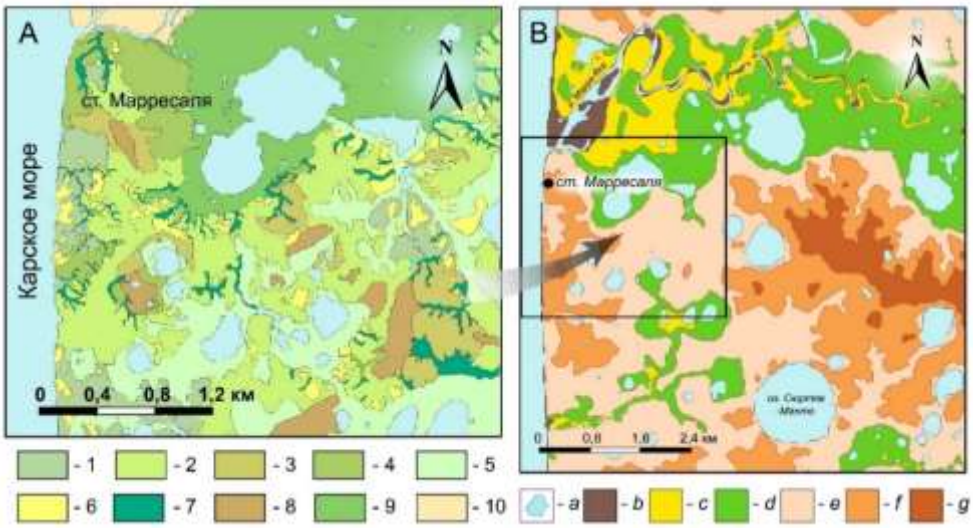



Рис. 1. Карта типов ландшафта (А) [7] и карта геоморфологических уровней (В) района Марресаля. Типы ландшафта: 1 – увлажненная тундра; 2 – дренированная тундра; 3 – полигональная тундра; 4 – насыщенная влагой тундра; 5 – озерные котловины; 6 – песчаные раздувы; 7 – водотоки и овраги; 8 – торфяники; 9 – торфяные болота; 10 – песчаные отмели. Геоморфологические уровни: a – водные поверхности; b – затапливаемые отмели; c – лайда; d – пойма; e – I-II террасы; f – III терраса; g – IV терраса

По результатам исследований первого этапа [11] были построены диаграммы средних за все годы комической съемки значений индексов NDVI, NDWI и WI для каждого геоморфологического уровня (рис. 2). Аномально высокие значения всех индексов отмечаются в пойме, также отмечается устойчивое снижение значений WI от поймы к IV террасе, что типично для зависимости влажности

поверхности от высоты рельефа [10] и подтверждает информативность WI как индикатора влажности почвы.

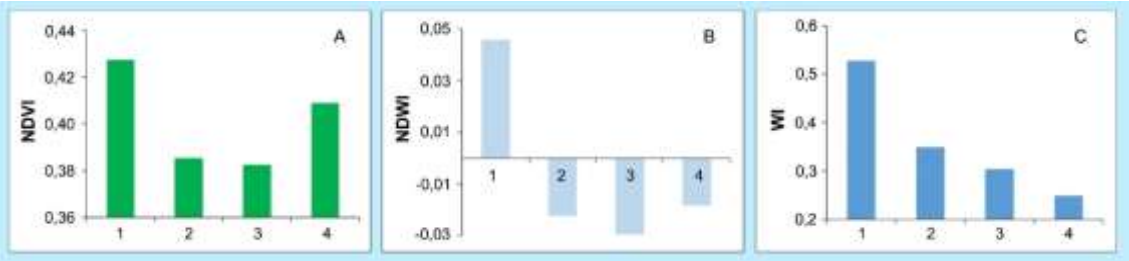



Рис. 2. Диаграммы средних значений индексов NDVI (A), NDWI (B) и WI (C) для различных геоморфологических уровней. 1– Пойма; 2 – I-II террасы; 3 – III терраса; 4 – IV терраса

Иная картина наблюдается с темпами изменения индексов за весь период наблюдений в зависимости от высотных отметок. В табл. 1 приведены значения коэффициентов (β) наклона многолетних трендов, характеризующие темпы изменения средних значений индексов в зависимости от геоморфологического уровня, а также значения доверительной вероятности (p) трендов. Оранжевым цветом в табл. 1 обозначены незначимые ($p > 0,1$) тренды. Значимые тренды обозначены желтым ($p < 0,1$), зеленым ($p < 0,05$) и синим цветом ($p < 0,01$). Из табл.1 видно, что все коэффициенты β положительные, а общая тенденция заключается в постепенном увеличении значений β и уровней значимости по мере повышения геоморфологических уровней. Если связывать значения индексов с состоянием поверхности, то следует, что потепление климата практически не влияет на изменение зеленой фитомассы НРП и влажности почвы в пойме, но приводит к более активному росту растительности и повышению влажности НРП и почвы на более высоких геоморфологических уровнях, особенно на IV террасе.

Таблица 1

Статистические характеристики многолетних трендов изменения средних значений индексов NDVI, NDWI и WI на разных геоморфологических уровнях

| Геоморфологический уровень (перепад высот, м) | NDVI | | NDWI | | WI | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | β | p | β | p | β | p |
| Пойма (0-5) | 0,0002 | > 0,1 | 0,0001 | > 0,1 | 0,0002 | > 0,1 |
| I-II террасы (15-20) | 0,0012 | < 0,05 | 0,0011 | < 0,1 | 0,0005 | > 0,1 |
| III терраса (22-30) | 0,0013 | < 0,05 | 0,0015 | < 0,05 | 0,0009 | < 0,1 |
| IV терраса (31-42) | 0,0018 | < 0,01 | 0,0024 | < 0,01 | 0,0017 | < 0,05 |

На втором этапе анализировались многолетние тренды изменения индексов NDVI, NDWI и WI для каждого из пяти типов ландшафта (9,3,8,2,6, рис. 1B) в пойме, на I-II террасах и на III террасе. Согласно описаниям [7,9] этих типов ландшафта, к наиболее влажным относятся торфяные болота (тип 9), полигональная тундра (тип 3) и торфяники (тип 8), а дренированная тундра (тип 2) и песчаные раздувы (тип 6) отнесены к наиболее сухим ландшафтам. Следует отметить особенность песчаных раздувов (тип 6), которые только частично покрыты растительностью, что, безусловно, отражается на значениях индексов и трендах их изменения. В табл. 2 приведены коэффициенты наклона (β) и уровни значимости (p) трендов изменения средних значений индексов для анализируемых типов ландшафта на разных геоморфологических уровнях. В данном случае в табл. 2 незначимые ($p > 0,05$) тренды обозначены оранжевым цветом. Значимые тренды обозначены желтым ($p < 0,05$) и зеленым ($p < 0,01$) цветом.

Для торфяных болот (тип 9) в пойме (табл. 2) отмечается снижение средних значений индексов (по коэффициенту β), причем для NDVI и WI незначимое ($p > 0,05$). Для остальных типов ландшафта (3,8,2,6) отмечается существенная разница в трендах на разных геоморфологических уровнях. В границах I-II террас по индексам NDVI и NDWI отмечается значимый рост по всем типам ландшафта кроме песчаных раздувов (тип 6) по индексу NDWI, а по индексу WI тренды разнонаправленные и незначимые для всех типов ландшафта. Аналогичные построения для четырех типов ландшафта (3,8,2,6), приуроченных к III террасе показали общую тенденцию повышения темпов роста индексов (по коэффициенту β), однако для NDVI и NDWI на песчаных раздувах (тип 6) тренды роста

незначительные и незначимые. Для корректного сопоставления темпов изменения индексов NDVI, NDWI и WI рассчитывались нормированные на динамический диапазон коэффициенты $\beta_N = \beta/N$, где N – диапазон изменения индексов [11]. На рис. 3 приведены диаграммы средних за все годы космической съемки значений индексов NDVI, NDWI и WI (A, D, C) для каждого типа ландшафта и геоморфологического уровня, а также нормированные коэффициенты $\beta_N$ (NDVI), $\beta_N$ (NDWI), $\beta_N$ (WI) (B, D, F), характеризующие направленность и темпы изменения индексов. За исключением песчаных раздувов (тип 6) по усредненным значениям индекса NDVI все типы ландшафта на террасах сопоставимы между собой с некоторым превышением значений по ландшафтам, находящимся на III террасе (рис. 3A). Аномально низкие значения NDVI на песчаных раздувах (тип 6) объясняются редкой растительностью и присутствием (в пикселе) открытых песков с аномально низкими значениями индекса NDVI. Относительно других типов ландшафта на террасах на песчаных раздувах (тип 6) отмечается более высокие средние значения индекса WI, что связано с более высокой тепловой инерцией открытого грунта участков с разреженным НРП (рис. 3C).

Таблица 2

Статистические характеристики многолетних трендов изменения средних значений индексов NDVI, NDWI и WI для разных типов ландшафта и разных геоморфологических уровней

| Геоморфологический уровень | Тип ландшафта (рис. 1A) | NDVI | | NDWI | | WI | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | β | p | β | p | β | p |
| Пойма | Торфяные болота (9) | -0,0002 | > 0,05 | -0,0018 | < 0,05 | -0,0006 | > 0,05 |
| I-II терраса | Полигональная тундра (3) | 0,0015 | < 0,01 | 0,0017 | < 0,01 | -0,0001 | > 0,05 |
| | Торфяники (8) | 0,0012 | < 0,05 | 0,0020 | < 0,05 | 0,0009 | > 0,05 |
| | Дренированная тундра (2) | 0,0014 | < 0,01 | 0,0015 | < 0,05 | -0,00005 | > 0,05 |
| | Песчаные раздувы (6) | 0,0014 | < 0,05 | -0,00006 | > 0,05 | -0,00004 | > 0,05 |
| III терраса | Полигональная тундра (3) | 0,0018 | < 0,01 | 0,0026 | < 0,01 | 0,0036 | < 0,05 |
| | Торфяники (8) | 0,0015 | < 0,05 | 0,0029 | < 0,01 | 0,0024 | < 0,05 |
| | Дренированная тундра (2) | 0,0016 | < 0,01 | 0,0019 | < 0,01 | 0,0027 | < 0,05 |
| | Песчаные раздувы (6) | 0,0006 | > 0,05 | 0,0005 | > 0,05 | 0.0036 | < 0,05 |

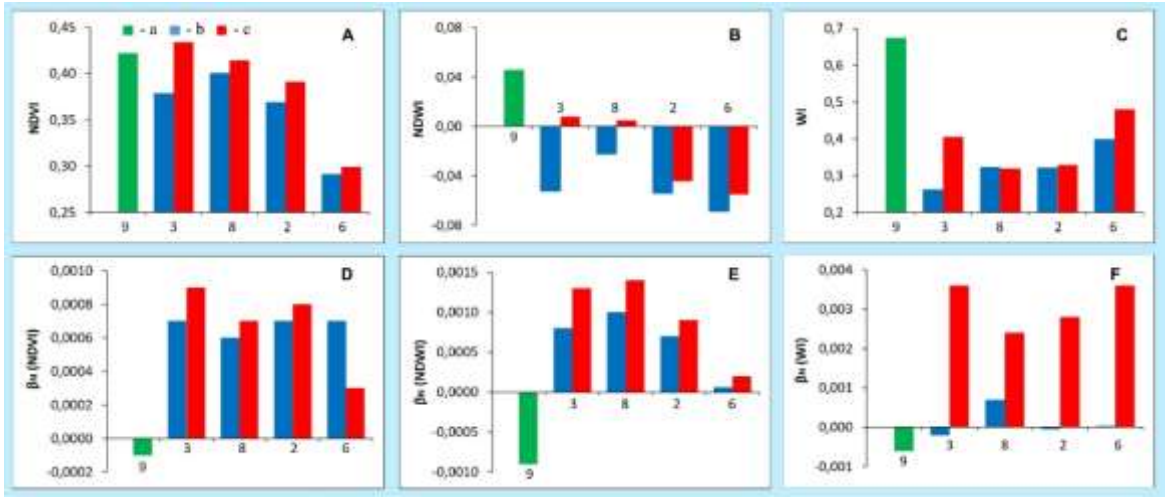



Рис. 3. Диаграммы средних значений индексов NDVI, NDWI, WI (A, B, C) и коэффициентов $\beta_N$ (NDVI), $\beta_N$ (NDWI), $\beta_N$ (WI) (D, E, F) для типов ландшафта 9, 3, 8, 2, 6; a – пойма; b – I-II террасы; c – III терраса

Различия многолетних трендов изменения средних значений индексов (по коэффициенту $\beta_N$) наиболее существенно отмечаются между торфяными болотами (тип 9) в пойме и остальными типами ландшафта на террасах (рис. 3D, E, F). Для одних и тех же типов ландшафта (3,8,2,6) тренды индекса влажности почвы WI на I-II террасе близки к нулю, в то время как на III террасе они имеют аномально высокие положительные значения коэффициента $\beta_N$ (рис. 3F). За исключением песчаных раздувов (тип 6), различия коэффициентов $\beta_N$ между другими типами ландшафта, в основном меньше, чем различия между коэффициентами $\beta_N$ для каждого типа ландшафта, расположенного на разных террасах. Особенно явно это проявляется по трендам индекса WI (рис. 3F). Отсюда можно

предположить, что при потеплении климата типы ландшафта не столь существенно влияют на темпы и направленность изменений НРП и влажности почвы по сравнению с влиянием высоты рельефа.

На песчаных раздувах III террасы повышение NDVI и NDWI незначительно и незначимое (табл. 2, рис. 3D, E), что объясняется влиянием доли (в пикселе) открытых грунтов. В то же время здесь отмечается предельно высокие и значимые темпы роста индекса WI, соизмеримые с темпами роста этого индекса на других ландшафтах III террасы (табл.2, рис. 3F). Отсюда можно предположить, что при потепление климата оттаивание грунтов верхнего горизонта приводит к повышению влажности почвы независимо от растительного покрова. Многолетнее повышение влажности почвы (по индексу WI) на ландшафтах III террасы (рис. 3F) не может объясняться увеличением количества атмосферных осадков, поскольку на соседних участках I-II террасы и в пойме не наблюдается аналогичный рост индекса WI. Существенные темпы роста влажности на III террасе также не могут объясняться более высокой активностью роста НРП, поскольку темпы роста индексов NDVI и NDWI на песчаных раздувах III террасы незначимы и в разы ниже, чем на других ландшафтах этой террасы (рис. 3D, E). Таким образом можно предположить, что столь существенная разница в направленности и темпах изменения индекса влажности почвы WI в пойме, на I-II и III террасах, в том числе для одних и тех же типов ландшафта, обусловлена различиями их геокриологических условий.

В районе Марресаля болотные ландшафты в пойме характеризуются относительно высокой влажностью и льдистостью грунтов, а также незначительным изменением глубины СТС, что объясняется проседанием поверхности при оттаивании, а также увеличением высоты мохового покрова [9]. Дренированные ландшафты, как правило, приуроченные к более высоким элементам рельефа, характеризуются низкой льдистостью грунтов и существенным увеличением глубины СТС при оттаивании [9]. Сопоставление многолетних тенденций изменения СТС в районе Марресаля с тенденциями изменения индекса WI свидетельствует о принципиальной возможности его использования в качестве индикатора изменения глубины СТС для подобных типов ландшафта. Высокие темпы роста индекса WI характерны для дренированных ландшафтов с высокими темпами увеличения глубины СТС, а низкие или отрицательные темпы изменения WI наблюдаются на более влажных ландшафтах с незначительным изменением глубины СТС. Тренды роста индексов NDVI и NDWI также могут рассматриваться как индикаторы увеличения глубины СТС, но только в случае значимого повышения влажности почвы.

Рост влажности почвы и зеленой фитомассы НРП при деградации мерзлых грунтов и увеличении глубины СТС ранее уже отмечался в работах [2-6]. В данном исследовании впервые рассматривается возможность изучения подобных процессов на основе комплексного анализа трендов изменения индексов NDVI, NDWI и WI, что существенно расширяет спектр решаемых задач мониторинга и картографического моделирования состояния поверхности криогенных ландшафтов тундровой зоны.

Полученные результаты позволяет сделать следующие основные выводы:

1. В районе Марресаля (п-ов Ямал) в связи с потеплением климата по индексам NDVI, NDWI и WI отмечаются существенные различия в темпах и направленности изменений свойств НРП и влажности почвы. По трендам индексов отмечается общая тенденция увеличения темпов роста зеленой фитомассы НРП и влажности почвы по мере повышения геоморфологических уровней.
2. Тип ландшафта не оказывает сопоставимого с высотой рельефа влияния на изменение состояния НРП и влажности почвы.
3. Высокий и значимый темп роста индекса WI на песчаных раздувах III террасы может свидетельствовать о первичности процесса повышения влажности почвы в результате оттаивания грунтов и связанного с ним усиления роста растительности.
4. Сопоставление трендов изменения индексов NDVI, NDWI и WI с результатами геокриологических наблюдений in situ на участках различных типов ландшафта указывает на принципиальную возможность использования этих индексов в качестве индикаторов изменения глубины СТС для районов с аналогичными ландшафтными, геоморфологическими и геокриологическими условиями.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения ресурсов углеводородов шельфа и сопредельной суши арктических и субарктических регионов России в условиях меняющегося климата, № 125020501403-7».

***Литература***

1 Beamish A., Raynolds M.K., Epstein H., Frost G.V., Macander M.J., Bergstedt H., Bartsch A., Kruse S., Miles V., Tanis C.M., Heim B., Fuchs M., Chabrillat S., Shevtsova I., Verdonen M., Wagner J. Recent

trends and remaining challenges for optical remote sensing of Arctic tundra vegetation: A review and outlook // Remote Sens. Environ. – 2020. – Vol. 246, No. 4. 111872.

2 Heijmans M.M.P.D., Magnusson R.I., Lara M.J., Frost G.V., Myers-Smith I.H., van Huissteden J., Jorgenson M.T., Fedorov A.N., Epstein H.E., Lawrence D.M., Limpens J. Tundra vegetation change and impacts on permafrost // Nature Reviews Earth & Environ. – 2022. – Vol. 3, No. 1. P. 68–84.

3 Park H., Walsh J., Fedorov A.N., Sherstiukov A.B., Iijima Y., Ohata T. The influence of climate and hydrological variables on opposite anomaly in active-layer thickness between Eurasian and North American watersheds // The Cryosphere – 2013. – Vol.7, P. 631–645.

4 Liu Y., Wu X., Wu T., Hu G., Zou D., Qiao Y., Wei X., Fan X., Yan X. Climate warming controls vegetation growth with increasing importance of permafrost degradation in the Northern hemisphere during 1982–2022 // Remote Sensing – 2025. – Vol. 17, No. 1. 104.

5 Yang Y., Wang X., Wang T. Permafrost degradation induces the abrupt changes of vegetation NDVI in the Northern Hemisphere // Earth's Future – 2024. – Vol. 12, e2023EF004309.

6 Iijima Y., Fedorov A.N., Park H., Suzuki K., Yabuki H., Maximov T.C., Ohata T. Abrupt increases in soil temperatures following increased precipitation in a permafrost region, central Lena River basin, Russia // Permafrost and Periglacial Processes – 2010. – Vol. 21, P. 30–41.

7 Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskaya I.D., Zadorozhnaya N.A., Kuznetsova A.O., Kanevskiy M.Z., Semenov P.B. Methane content and emission in the permafrost landscapes of western Yamal, Russian Arctic // Geosciences – 2020. – Vol.10, No.10. 412.

8 Дубровин В.А., Крицук Л.Н. Результаты изучения температурного режима мерзлой толщи района Марре-Сале на полуострове Ямал // Инженерная геология. – 2010. – №3. – С. 68–74.

9 Васильев А.А., Облогов Г.Е., Широков Р.С. Долговременный мониторинг глубины сезонного протаивания пород в типичных тундрах западного Ямала // Криосфера Земли. – 2023. – Т. XXVII. – №4. – С.3–13.

10 Корниенко С.Г., Елсаков В.В. Оценка информативности температурно-вегетационного индекса как индикатора влажности напочвенного растительного покрова тундровой зоны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т.21. – №3. – С. 155–170.

11 Kornienko S.G. Recent trends in changes of phytocenotic properties and moisture content of ground vegetation cover in the tundra zone on the western coast of the Yamal peninsula // Remote Sensing Applications: Society and Environment – 2025. – Vol. 40, 101813.

## ИЗ ОПЫТА ИСКУСТВЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА ТЕРРИТОРИИ ЯКУТИИ

***Т.А.Корнилов, Н.П.Ефимов***

*Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова, г. Якутск*

На территории Якутии за последние десятилетия отмечено устойчивое повышение среднегодовой температуры воздуха. В Якутске показатели среднегодовой температуры в период с 1966 по 1979 год составляли −10,3 °С, а в 1979–1989 годах — уже −8,5 °С [1]. По результатам длительного геотермического мониторинга, проведённого Институтом мерзлотоведения РАН, зафиксирована тенденция роста температуры грунта на глубине 10 метров: на лугу — на 0,4 °С за 10 лет, в лесной зоне — на 0,2 °С за тот же период. Колебания среднегодовой температуры грунта в многолетнем аспекте оцениваются в пределах 1,1 °С. За последние 24 года глубина сезонного промерзания грунта на лугу колебалась от 1,82 до 1,90 м, в лесной зоне — от 1,77 до 1,90 м [2]. С учётом различных сценариев климатических изменений, несущая способность свайных фундаментов в арктических районах Якутии к середине XXI века может снизиться на 2–8 % [3]. В связи с этим всё большее значение приобретают инженерные технологии термостабилизации и поддержания грунтов основания в мерзлом состоянии.

Годовой объём ввода в эксплуатацию многоквартирных домов (МКД) на территории Республики Саха (Якутия) в среднем составляет 300 тыс. кв. м. За последние десятилетия наблюдается тенденция к увеличению средней этажности строящихся объектов — она достигает 16 этажей. В условиях проектирования и возведения многоэтажных зданий в г. Якутске наибольшее распространение получили монолитные железобетонные каркасы на свайных фундаментах. Из-за ограниченности площадей в пределах поймы реки Туймаада и дефицита свободных территорий участки застройки всё чаще характеризуются высокотемпературными и засолёнными грунтами, а порой — наличием грунтовых вод. В климатических условиях Якутии строительный сезон короткий — он длится с

апреля по октябрь. При долевом строительстве сроки ввода МКД в эксплуатацию жёстко регламентируются банками. В таких условиях принудительное замораживание грунтов основания с использованием хладоагрегатов становится обязательным и востребованным у застройщиков. Искусственное охлаждение грунтов с помощью холодильных установок обеспечивает независимость от погодных условий и применимо в районах с наиболее сложными инженерно-геологическими и климатическими особенностями для формирования мерзлого массива грунтов [4]. В докладе представлены результаты натурных измерений температурного режима грунтов основания зданий при искусственном замораживании с применением холодильной установки.

**Многоквартирный дом в квартале 13 г.Якутска**

Одно из зданий высотой 16 этажей с размерами в плане 88,8 м × 16,5 м возводится на южной части г.Якутска. В качестве основания используются свайные кусты из 4, 6 и 8 свай марки СМ 12-40-85, заложенные на глубину 10,5 м. По результатам геологических исследований площадка представлена коричневыми и серыми пылеватыми песками на глубине до 1–2 м, черными и коричневыми супесями — на глубине 3 м, а ниже — песками средней крупности, начиная с 4 м. На первом участке, где проводилась искусственная заморозка грунтов, верхний слой до глубины 3,8–4,3 м находился в талом, пластичном, влажном и насыщенном водой состоянии, а ниже — в твердомерзлом виде с проявлением слоистой и массивной криогенной структуры. В августе 2023 года, когда проводились инженерно-геологические изыскания, отмечалась высокая температура: на глубине 10 м — от –0,98 до –1,06 °С, на глубине 15 м — от –1,35 до –1,25 °С. Глубина слоя сезонного оттаивания в данном районе составляет 3,1 м. Температура начала замерзания для пылеватых песков варьируется в пределах –0,37…–0,3 °С, для супесей — –0,44…–0,40 °С, для песков средней крупности — –0,27…–0,17 °С в зависимости от концентрации порового раствора.

Для искусственного замораживания грунтов основания объекта применён чиллер марки JBA-319LC (Китай). В качестве замораживающих труб (ЗТ) использованы уже установленные вместе со сваями подземные испарители сезонно-охлаждающих устройств (СОУ) из стальных труб диаметром 57 мм с толщиной стенок 3,5–4 мм, расположенные на глубине 10,5 м. Общее количество СОУ на участке — 135 шт., из них на рассматриваемом участке к чиллеру подключено 99 ЗТ. Для организации циркуляции хладагента внутри трубного контура установлена резиновая вставка диаметром 20 мм, по которой от чиллера подаётся хладагент низкой температуры (рис.1). Хладагент циркулирует в пространстве между трубой подачи и замораживающей трубой (конструкция «труба в трубе»), передавая холод грунту основания.

а. б.

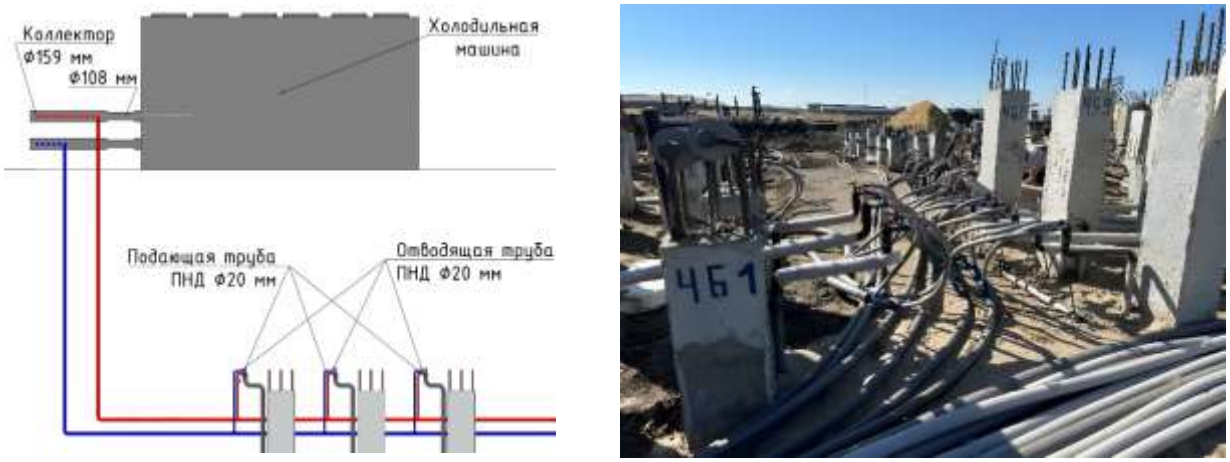



Рис.1. Система замораживания с помощью чиллера: а – принципиальная схема; б – общий вид

Для проведения натурных наблюдений использованы существующие 6 температурных трубок и установлены дополнительно 5 температурных трубок (ТТ) на различных расстояниях от ЗТ сваи №380, имеющей с одной стороны свободное пространство.

Замораживание грунтов на объекте проводилась поэтапно. Первый этап, проходивший с 04.06 по 19.06.2024 года, был пробным и позволил охладить грунты на глубине от 2 метров и ниже. К его завершению температура в грунтах на глубине 10 м составляла: на расстоянии 0,43 м от ЗТ — −5,25 ºС; 0,84 м — −3,55 ºС; 1,45 м — −2,89 ºС; 1,87 м — −2,47 ºС; 2,34 м — −2,29 ºС (рис.2). После отключения чиллера грунты начали быстро оттаивать, что потребовало повторного запуска

оборудования и одновременной изоляции поверхности участка опилками толщиной около 165 мм.

Второй этап замораживания проводился с 26.06 по 01.07.2024 года. На рис.3 представлены графики изменения температуры грунта во времени в зависимости от удалённости от ЗТ. Процесс охлаждения грунтов напрямую зависит от расстояния до замораживающего источника. На значительном удалении от ЗТ охлаждение грунта по глубине происходит по мере промерзания прилегающего к ЗТ массива. В результате максимальная стадия промерзания по глубине наступает с временным сдвигом относительно момента запуска чиллера. Интенсивность охлаждения грунтов определяется их начальной температурой и глубиной залегания. На глубине 10 м скорость охлаждения почти вдвое превышает таковую на глубине 4 м. К завершению второго этапа замораживания температура грунтов на глубине 10 м составляла: на расстоянии 0,43 м от ЗТ — −5,11 ºС; 0,84 м — −4,21 ºС; 1,45 м — −3,71 ºС; 1,87 м — −3,45 ºС; 2,34 м — −3,21 ºС (рис.3).

а. б.

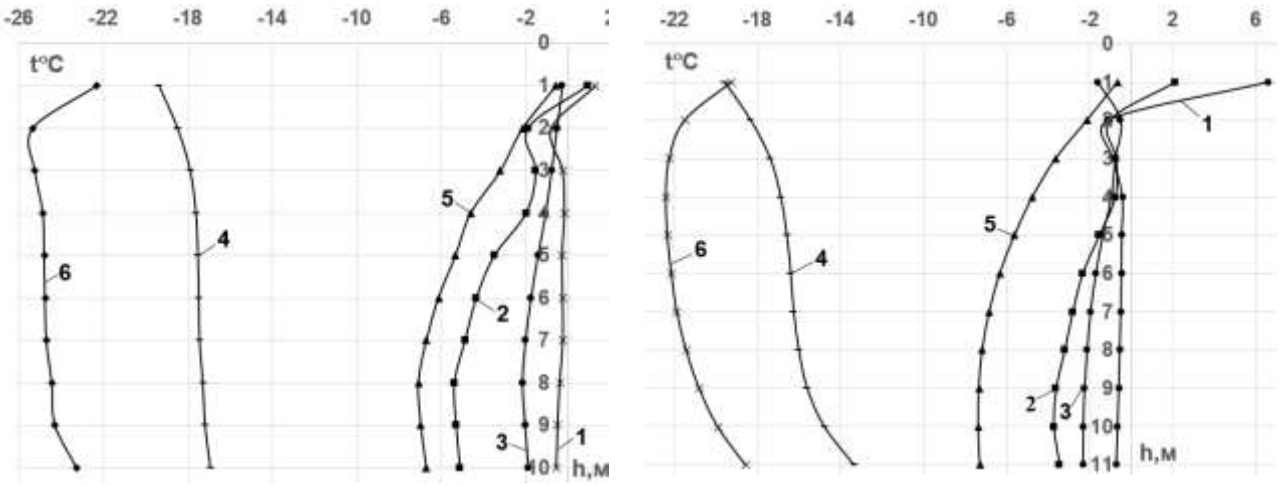



Рис.2. Графики температуры грунтов по данным ТТ на расстояниях от ЗТ 0,43 м (а) и 0,84 м (б): 1- 04.06.24 г.; 2 – 01.07.24 г.; 3 – 15.11.24 г.; 4 – 11.03.25 г.; 5 – 29.10.25 г.; 6 – 04.03.26 г.

Благодаря проведённой поверхностной изоляции участка наблюдается ощутимое замедление естественного оттаивания грунта. После отключения чиллера (01.07.2024) в течение 15–20 дней рост температуры грунта происходит по криволинейному закону, а затем — пропорционально времени. К концу октября 2024 года по данным температурных трубок глубина сезонного оттаивания на данном участке составила от 1,95 до 2,58 метра, что значительно ниже расчётного значения. К моменту максимального оттаивания грунтов в середине октября 2024 года на глубине 10 м зафиксированы следующие показатели: на расстоянии 0,43 м от ЗТ — −1,86 ºС; 0,84 м — −2,31 ºС; 1,45 м — −2,29 ºС; 1,87 м — −2,26 ºС; 2,34 м — −2,21 ºС (рис.3).

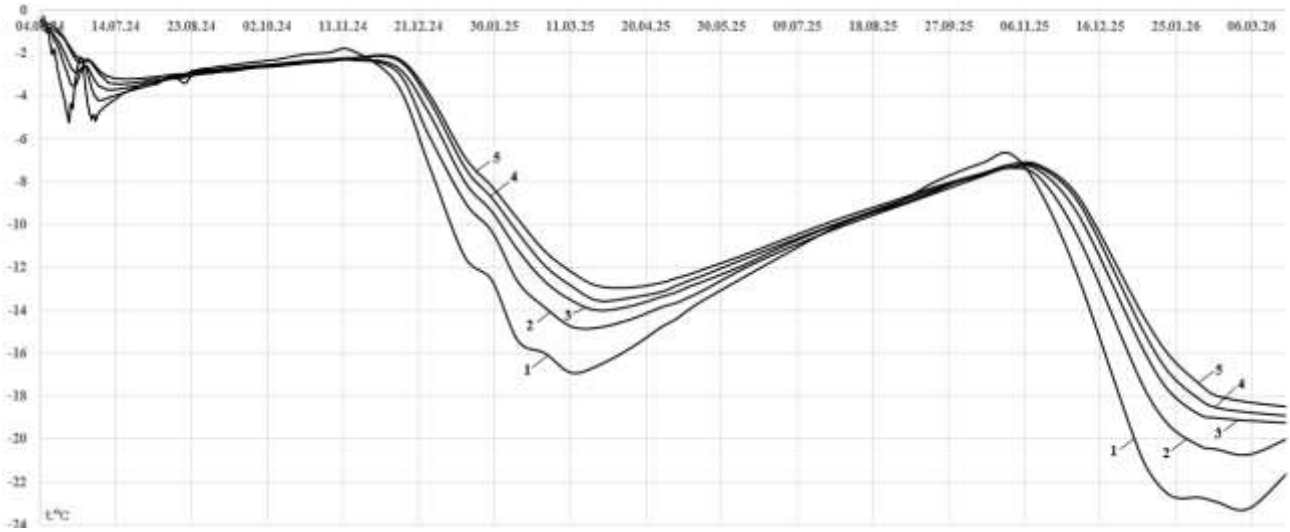


Рис.3. Графики изменения температуры грунта на глубине 10 м на разных расстояниях от ЗТ: 1 – 0,43 м; 2 – 0,84 м; 3 – 1,45 м; 4 – 1,87 м; 5 – 2,34 м

В конце ноября 2024 года система охлаждения была заправлена хладагентом. Дальнейшие полевые наблюдения подтвердили высокую эффективность функционирования системы, состоящего из множества СОУ. В период декабря–февраля, при среднемесячных температурах воздуха от −29,4 ºС до −32,4 ºС, интенсивно происходит замерзание верхних слоёв грунта основания на глубине 1–4 м, при этом скорость охлаждения значительно превосходит таковую в более глубоких горизонтах. К середине марта, когда наступает пик промерзания грунтов, разница в температурных показателях между верхними и нижними слоями достигает максимума — в верхних зонах она оказывается значительно ниже. В середине марта 2025 года, в момент максимального промерзания на глубине 10 м, зафиксированы следующие значения: на расстоянии 0,43 м от ЗТ — −16,92 ºС; 0,84 м — −14,76 ºС; 1,45 м — −13,52 ºС; 1,87 м — −12,86 ºС; 2,34 м — −12,21 ºС (рис.3).

В тёплый период 2025 года интенсивность оттаивания грунта оказалась значительно выше, чем в предыдущем году, что обусловлено отсутствием поверхностной теплоизоляции. Тем не менее, глубокое замораживание значительного объёма грунта до низких температур обеспечило сохранение мерзлого состояния с запасом. Температура грунтов в конце октября оказалась значительно ниже, чем в предыдущем году (рис.2) и на глубине 10 м составляла: на расстоянии 0,43 м от ЗТ — −6,69 ºС; 0,84 м — −7,35 ºС; 1,45 м — −7,31 ºС; 1,87 м — −7,32 ºС; 2,34 м — −7,19 ºС (рис.3). При этом глубина сезонного оттаивания на данном участке установлена от 0,8 до 1,23 м.

В осенний период 2025 года система охлаждения грунтов (СОУ) начала работать в середине ноября. Из-за низкой начальной температуры грунта его охлаждение происходило более интенсивно по сравнению с началом первого цикла работы СОУ в 2024/2025 годах (рис.3). После окончания второго цикла функционирования системы охлаждения в зимний период 2025/2026 годов зафиксировано заметное понижение температурных показателей грунта. По итогам измерений на глубине 10 м получены следующие значения: на расстоянии 0,43 м от ЗТ — −23,27 ºС; 0,84 м — −20,74 ºС; 1,45 м — −19,15 ºС; 1,87 м — −18,74 ºС; 2,34 м — −18,31 ºС (рис.3). Сезонные колебания температур на этой глубине в указанных точках соответственно составили: 16,58 °С; 13,39 °С; 11,84 °С; 11,42 °С и 11,11°С.

**Многоквартирный дом в г.Мирный**

Одноподъездное здание размерами 24,8 × 25,6 м возводится на окраине г. Мирный на участке с небольшим уклоном, прилегающем к оврагу с одной стороны. Высотность — 16 этажей. В качестве фундаментов используются сборные железобетонные сваи по РМ 2-77, ГОСТ 19804-2012 марки СМ 12-40-85, а также железобетонные сваи индивидуального изготовления, устанавливаемые на глубину от 10,42 до 15,95 м. По результатам изысканий установлено: верхний слой инженерно-геологического разреза на глубине 1,0–1,7 м представлен насыпным щебенистым грунтом, маловлажным; на глубине 2–2,4 м залегает лёгкий твёрдый суглинок дресвяный; на глубине 8,4–9,1 м — влажный щебенистый грунт; с 8,4–9,1 до 12,5–13,8 м — лёгкий твёрдый суглинок дресвяный; ниже 12,5–13,8 м — щебенистый грунт с суглинистым заполнителем, нелетучий. Подземные воды вскрыты в 5 скважинах на глубине 8,2–8,5 м и на момент бурения напор отсутствовал. Нижняя граница водоносного горизонта ограничена кровлей мерзлых грунтов. Глубина талых зон, согласно данным изысканий, составляет 12,8–13,8 м. Тем не менее, организация, проводившая инженерно-геологические изыскания, рекомендовала проектирование объекта по I принципу согласно СП 25.13330.2020 с сохранением грунтов в мерзлом состоянии, а также разработан проект термостабилизации грунтов.

Для повышения несущей способности свайного фундамента в период строительства проведено искусственное охлаждение грунтов основания здания в летний период с 28.06 по 17.07.2025 года. К системе охлаждения чиллера подключено 93 единиц ЗТ, осуществлялись регулярные замеры температуры грунта. С момента запуска чиллера выполнена укладка теплоизоляции поверхности грунта мешками с опилками толщиной не менее 200 мм. Температурная трубка ТТ-2 размещена на расстоянии 0,48 м от ЗТ, остальные — на равном удалении — 1,13 м от ЗТ (рис. 4).

Чиллер на объекте функционировал поэтапно с перерывом 12.07.2025 года. В завершение работы чиллера минимальная температура была зафиксирована на участке размещения термопары ТТ-2, находящейся на расстоянии 0,48 м от замораживающей трубки (ЗТ). Именно здесь сконцентрировано наибольшее количество замораживающих элементов. На глубине 10 м температура грунта достигла −5,0 ºС. По показаниям остальных ТТ температура грунтов на глубине 10 м и удалённости 1,13 м от ЗТ достигла значений от −0,3 ºС до −0,9 ºС (табл.1). После отключения чиллера начался активный процесс оттаивания грунта. К началу декабря 2025 года температуры на глубине 10 м по полученным данным составили: ТТ2 — −0,04 ºС; ТТ1 — −0,23 ºС; ТТ3 — −0,12 ºС; ТТ4 — −0,42 ºС; ТТ5 — −0,14 ºС (рис.5). Наиболее критичная ситуация зафиксирована на участке с ТТ2 или осью А,5. Согласно

результатам инженерно-геологических изысканий, грунты здесь осенью 2024 года находились в талом состоянии до глубины 13,8 м, а грунтовые воды обнаружены на уровне 8,4 м.

а. б.

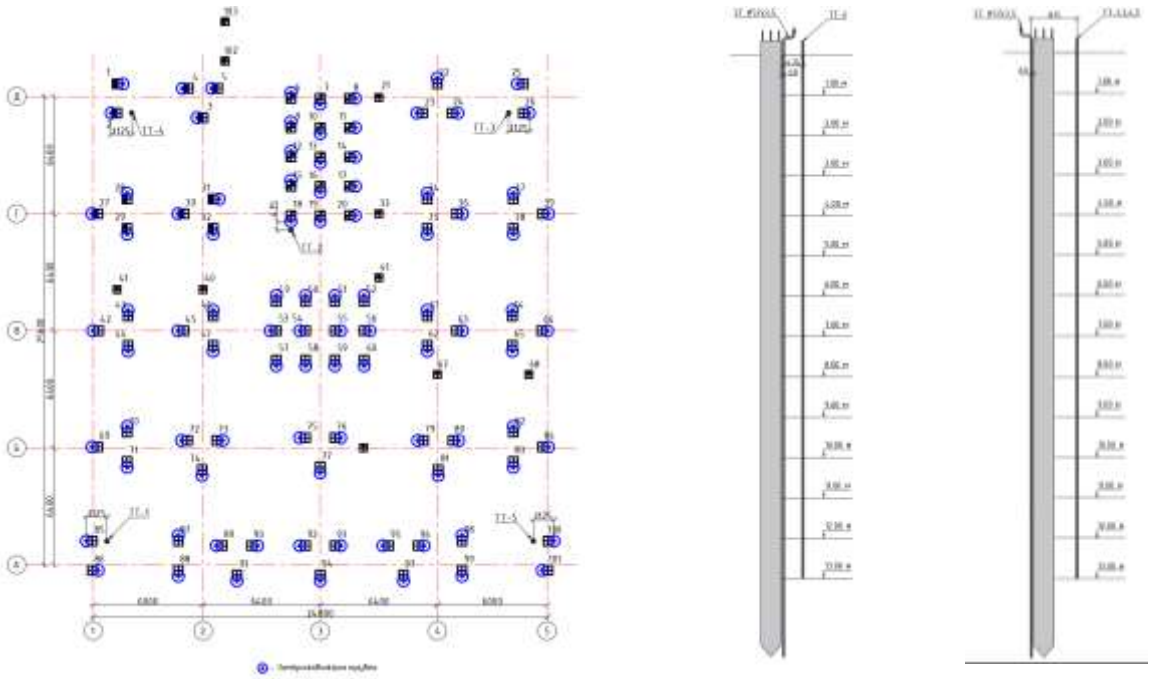


Рис.4. Схема участка замораживания грунтов (а) и разрезы с ЗТ и температурными трубками

Таблица 1

Температура грунтов в период замораживания

| №ТТ | Расстоян-ие от ЗТ, м | Дата | Глубина, м | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| | | | Температура грунта, °С | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0,475 | 28.06.2025 | -2,24 | -2,97 | -2,78 | -2,03 | -2,22 | -2,3 | -2,2 | -1,84 | -1,95 | -2,3 | -1,76 | -2,9 | -0,54 |
| | | 16.07.2025 | -4,67 | -5,49 | -5,08 | -5,01 | -4,95 | -4,9 | -4,89 | -4,7 | -5,17 | -5 | -5 | -6 | -2,2 |
| | | Снижение на | **2,43** | **2,52** | **2,3** | **2,98** | **2,73** | **2,67** | **2,69** | **2,86** | **3,22** | **2,74** | **3,24** | **3,09** | **1,66** |
| 1 | 1,125 | 28.06.2025 | 2,53 | -0,14 | -0,21 | -0,08 | -0,08 | 0 | -0,06 | -0,06 | -0,02 | 0 | -0,13 | -0,1 | -0,23 |
| | | 16.07.2025 | 1,95 | -0,98 | -1,4 | -1,07 | -0,8 | -0,8 | -0,82 | -0,48 | -0,69 | -0,8 | -1,17 | -1,6 | -1,36 |
| | | Снижение на | **0,58** | **0,84** | **1,19** | **0,99** | **0,72** | **0,76** | **0,76** | **0,42** | **0,67** | **0,78** | **1,04** | **1,47** | **1,13** |
| 3 | | 28.06.2025 | 4,6 | 0,01 | -0,44 | -0,4 | -0,17 | -0,1 | -0,04 | -0,1 | 0 | -0,1 | 0,01 | 0,01 | -0,08 |
| | | 16.07.2025 | 2,93 | -0,36 | -1,51 | -1,42 | -0,92 | -0,7 | -0,59 | -0,63 | -0,65 | -0,5 | -0,52 | -0,2 | -0,71 |
| | | Снижение на | **1,67** | **0,37** | **1,07** | **1,02** | **0,75** | **0,57** | **0,55** | **0,53** | **0,65** | **0,42** | **0,53** | **0,18** | **0,63** |
| 4 | | 28.06.2025 | -0,23 | -0,04 | -0,06 | -0,14 | -0,04 | 0,07 | 0,01 | -0,04 | -0,06 | -0,1 | -0,17 | -0,2 | -0,33 |
| | | 15.07.2025 | -0,76 | -0,54 | -0,38 | -0,38 | -0,36 | -0,4 | -0,42 | -0,44 | -0,38 | -0,9 | -1,39 | -1,7 | -1,43 |
| | | Снижение на | **0,53** | **0,5** | **0,32** | **0,24** | **0,32** | **0,45** | **0,43** | **0,4** | **0,32** | **0,86** | **1,22** | **1,45** | **1,1** |
| 5 | | 28.06.2025 | 9,10 | 2,78 | 0,12 | 0,07 | 0,26 | 0,58 | 0,73 | 0,81 | 0,79 | 0,77 | 0,66 | 0,58 | 0,28 |
| | | 16.07.2025 | 5,86 | 0,91 | -0,27 | -0,21 | -0,4 | -0,3 | -0,25 | -0,27 | -0,27 | -0,3 | -0,25 | -0,2 | -0,04 |
| | | Снижение на | **3,24** | **1,87** | **0,39** | **0,28** | **0,66** | **0,83** | **0,98** | **1,08** | **1,06** | **1,02** | **0,91** | **0,75** | **0,32** |

СОУ начали свою работу в начале декабря 2025 года. В конце зимнего сезона зафиксированы следующие показатели температур: ТТ2 — −11,48 ºС; ТТ1 — −2,73 ºС; ТТ3 — −2,73 ºС; ТТ4 — −2,87 ºС; ТТ5 — −1,87 ºС (рис.5). Следует отметить, что максимальные значения температуры грунта зафиксированы на участке осей А,5.

а. б.

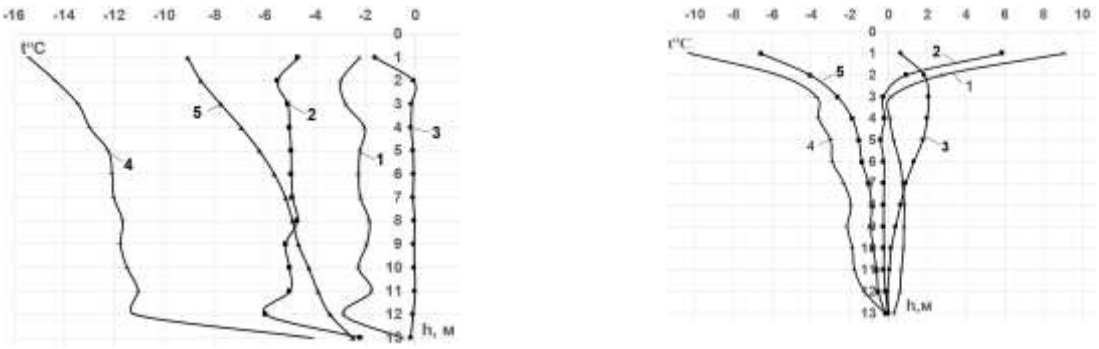



Рис.5. Графики температуры грунтов по данным ТТ2 и ТТ5 на расстояниях от ЗТ 0,48 м (а) и 1,13 м (б): 1-28.06.2025 г.; 2 – 16.07.2025 г.; 3 – 04.12.2025 г.; 4 – 02.03.2026 г.; 5 – 05.04.2026 г.

***Литература***

1 Ананичева М. Д., Литвиненко Т. В., Филиппова В. В. Изменение климата в Республике Саха (Якутия) и его влияние на население: инструментальные измерения и наблюдения местных жителей // Географическая среда и живые системы. - 2021. - № 3. - С. 6–21. DOI: 10.18384/2712-7621-2021-3-6-21.

2 Varlamov, S.P., Skachkov,Y.B., Skryabin, P.N. Long-Term Variability in Ground Thermal State in Central Yakutia's Tuymaada Valley // Land. – 2021. - 10(11):1231. https://doi.org/10.3390/land10111231.

3 Фалалеева А.А., Шелков Я.Ю., Чеверев В.Г., Брушков А.В. Оценка изменения несущей способности мерзлых грунтов при возможном изменении температуры и оттаивании вечной мерзлоты в Арктической зоне Российской Федерации в середине XXI века // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. - 2023. - № 5. - С.105–116.

4 Лаврик А.Ю., Буслаев Г.В., Двойников М.В., Сериков В.А. Термостабилизация грунта с помощью абсорбционных холодильных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.- 2022.- № 10.- С. 477-482.

## КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРИЧИН АВАРИИ НА ПРИМЕРЕ ОДНОГО ИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В СЕВЕРНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

***М.В. Королев***
*Институт прикладной механики РАН, г. Москва.*

Определение технических причин аварий сооружений в криолитозоне часто представляет собой сложную комплексную задачу, требующую междисциплинарного подхода, поскольку сооружение и основание представляет собой единую систему, элементы которой подвергаются различным внешним воздействиям и внутренним изменениям [1]. В данной работе приводится пример таких комплексных исследований.

На одной из северных горно-обогатительной фабрик 20 февраля 2021 г произошло обрушение здания пункта перегрузки руды, разрушение ангара склада готовой продукции, транспортных галерей и подъемной башни. Перед аварией в транспортных галереях активизировалось раскрытие трещин. Комплекс сооружений было решено вывести из эксплуатации и провести противоаварийные ремонтные работы. Однако в процессе проведения противоаварийных работ комплекс сооружений внезапно обрушился (рис.1)

Внешний вид комплекс до аварии и схема сооружений представлены на рис. 2.

Комплекс сооружений был построен в 1948 г., эксплуатировался в суровых условиях и имел к моменту аварии существенный физический износ. Уже при первом осмотре, поскольку сооружение стояло на склоне, появилось предположение, что авария, возможно, связана с негативными склоновыми процессами и смещением фундамента опор, потерей их устойчивости и последующим прогрессирующим разрушением всего комплекса. Однако для точного установления причин аварий потребовалось проведение комплекса исследований.

а) б)

Рис. 1 Фото с места аварии: а) – разрушение склада готовой продукции; б) – разрушенная подъемная башня и транспортная галерея

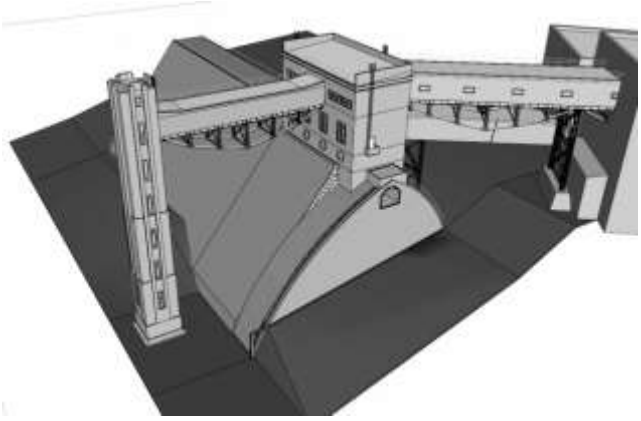
а) б) 

Рис. 2. а) – Фото комплекса сооружений; б) – схема комплекса сооружений

**На первом этапе** исследований необходимо было разобраться в конструкции комплекса сооружений и как взаимодействуют между собой все его отдельные объекты: узел перегрузки, склад готовой продукции, транспортные галереи и подъемная башня. Для этого по архивным чертежам была составлена 3D модель всего объекта и проведена серия численных расчетов в пространственной постановке (рис.3).

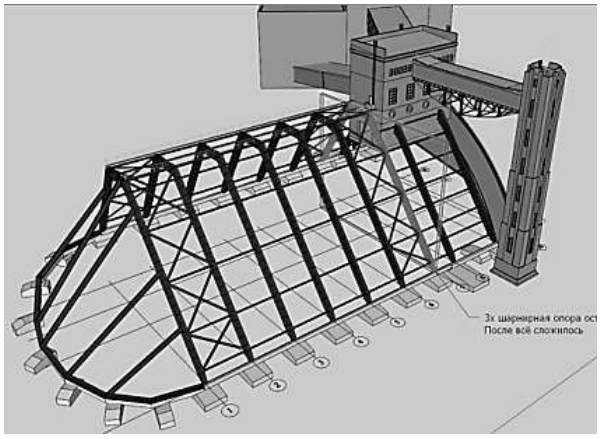
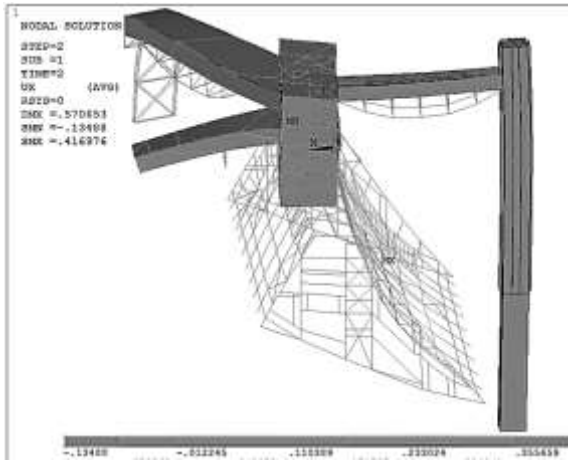
а)  б) 

Рис. 3. а) - 3D модель объекта, пространственная схема; б) - пример численных расчетов

Проведенные многочисленные расчеты всего комплекса сооружений в МКЭ в программном комплексе ANSYS и его строительном модуле ANSYS /CiviFEM и отдельных элементов на различные случаи и сочетания нагрузок показали, что конструкции находились практически в предельном состоянии. При незначительном смещении опор (которые были зафиксированы) в конструкциях возникали значительные напряжения, которые могли привести к разрушению.

**На втором этапе** исследований, когда были установлены усилия, перемещения и изгибающие моменты, возникающие в элементах конструкции при различных возможных сочетаниях нагрузок и возможных смещений, необходимо было разобраться в кинематической схеме обрушения, то есть установить, какой элемент конструкции первым вышел из строя и спровоцировал прогрессирующее обрушение остальных элементов. Для этого при разборке обрушившихся конструкций тщательно исследовался каждый элемент, определялся характер разрушения (изгиб, скручивание, разрыв, разрыв сварных швов, скол и т.д.) (рис.4.). Из конструкций были отобраны для испытаний образцы металла.

В процессе этих исследований было установлено, что конструкции, даже в пределах одной фермы собраны из пяти разных марок высокоуглеродистой стали, причем не приспособленных для работы при низких отрицательных температурах и обладающих повышенной хрупкостью и низкой ударной вязкостью. Это объясняется тем, что 60% сталелитейных заводов в годы войны были разрушены и в стране, которая восстанавливала народное хозяйство, ощущался огромный дефицит металла. Характер разрушений элементов конструкций позволил установить кинематику разрушения.

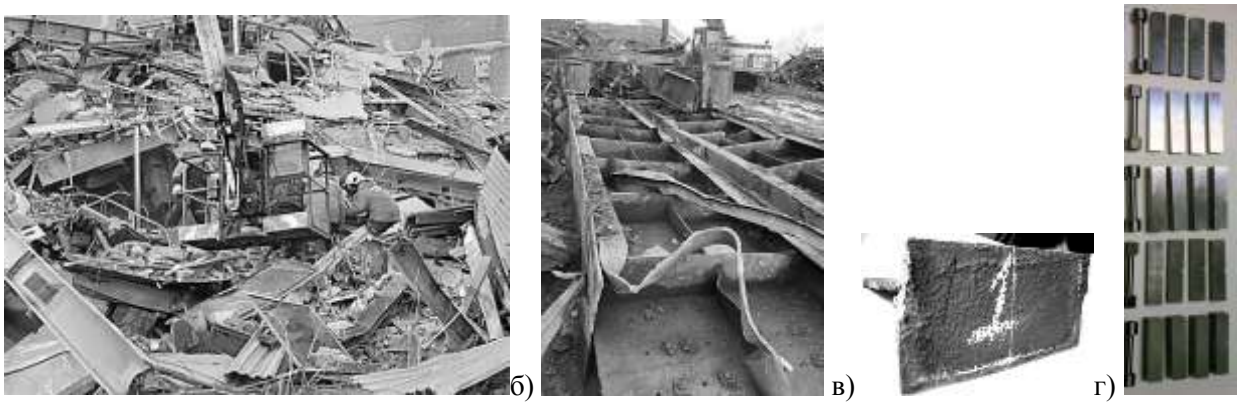


Рис. 4. а) - Процесс разборки конструкций; б) - исследование видов разрушения (изгиб, скручивание, разрыв, разрыв сварных швов, скол и т.д.); в) – пробы металла из конструкций; г) -образцы металла для испытаний

**На третьем этапе** исследований для уточнения кинематического механизма обрушения были проанализированы результаты геодезических наблюдений по ширине раскрытия трещин в конструкциях и по реперам и составлена схема и форма смещения конструктивных элементов (Рис. 5).

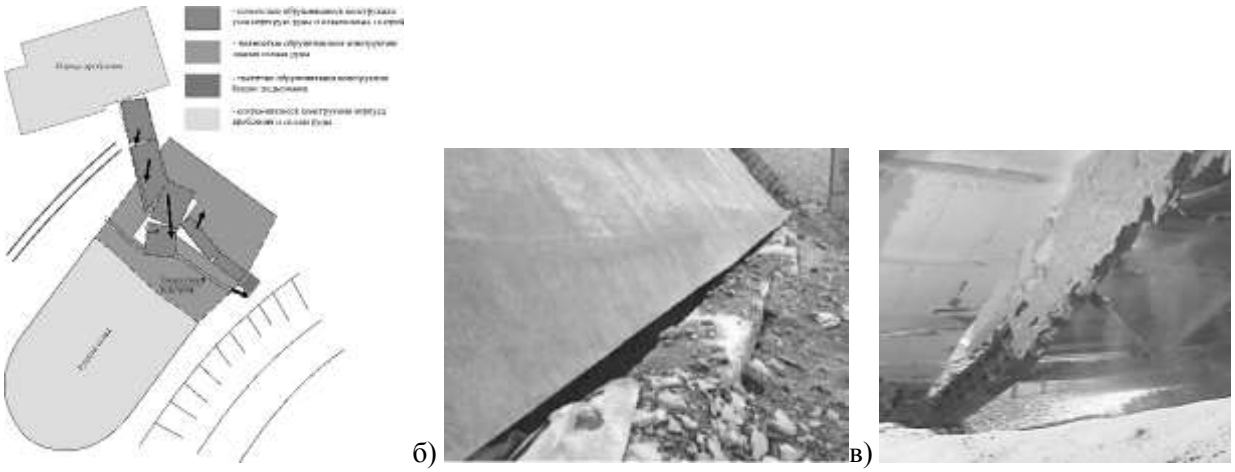


Рис. 5 а) - Схема развития деформаций конструкций; б) – смещение фундамента; в) – потеря устойчивости искривленной опоры узла перегрузки

С большой вероятностью потеря устойчивости опорной стойки вызвало последовательное прогрессирующее обрушение всей конструкции. Характер деформаций элементов конструкции, которые исследовались при разборке сооружения, подтвердил кинематическую картину разрушения.

Однако оставались пока невыясненные вопросы, в частности:

Почему сооружение просуществовало почти 75 лет и вдруг зимой начало испытывать недопустимые деформации, которые достаточно быстро привели к полному обрушению объекта. Связано ли это с деградацией мерзлоты? Не было ли перед аварией каких либо дополнительных воздействий? Не произошли ли локальные подвижки самого склона, на котором стояло сооружение? Если это связано с подвижками склона, то почему они произошли зимой? Обычно нарушение устойчивости откосов происходит весной или летом, при оттаивании грунтов. Это потребовало проведения дополнительных инженерно-геологических исследований и проведения расчетов устойчивости склона на участке сооружения.

**Четвертый этап.** Уточнение инженерно-геологических условий показали, что за годы эксплуатации существенная верхняя часть склона перешла в талое состояние. Кроме того была обнаружена в зоне сооружения прослойка из талого суглинка, механические свойства которого ранее не исследовались. В процессе бурения в зимний период было установлено, что верхняя часть массива до глубины порядка 3 метров находится в мерзлом состоянии, а далее находится большой по глубине талик из насыпных и трещиноватых скальных грунтов по которому фильтруют напорные воды (рис. 6).

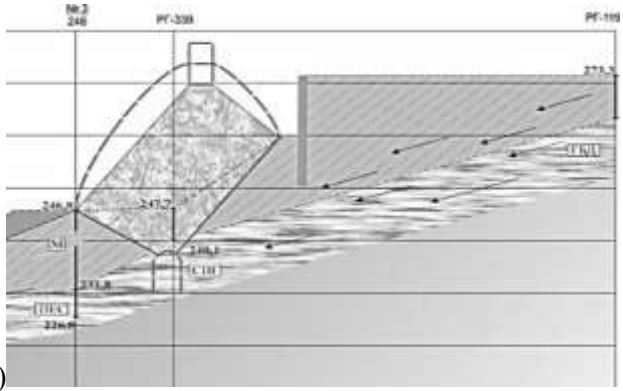
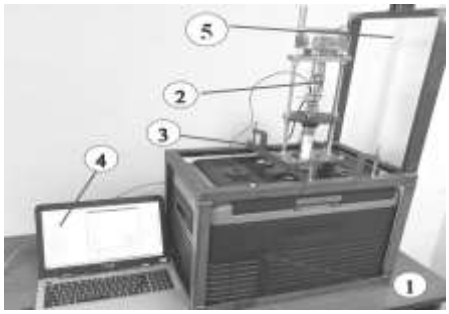
а)  б)

Рис.6. а) Упрощенная схема инженерно-геологического разреза; б) – фото прослоя суглинка

**На пятом этапе** были проведены специальные дополнительные геомеханические исследования, для чего были использованы методики ИПРИМ РАН, позволяющие определить механические характеристики грунтов при разных значениях температур и в процессе оттаивания, в ходе одного опыта [2]. Были проведены серии полевых сдвиговых испытаний целиков, проведена телеметрия скважин, исследование кернов и используя численно- аналитический метод ИПРИМ РАН по характеру и ширине раскрытия трещин и расчетным путем были уточнены механические характеристики трещиноватых скальных грунтов (рис. 7.)

а) 

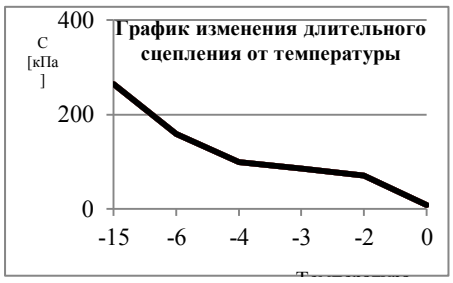
б)
в) 


Рис. 7. а)- фото прибора шарового штампа: 1 – мини климатическая камера; 2 – винтовой редуктор для создания нагрузки с динамометром; 3 – подвижной шток; 4 - компьютер для автоматической регистрации измерений; 5 – опорная рама; фото прибора в процессе полевых испытаний и результаты испытаний; б) – результаты испытаний

**На шестом этапе** исследований по уточненным данным была проведена серия расчетов устойчивости склона. Анализ устойчивости выполнялся по двух системам, которые концептуально различны: классические методы потери устойчивости (Феллениус, Бишоп, Джанбу и т.д.) и метод из результатов конечно-элементного анализа. Результаты серии многочисленных расчетов показали, что участки склона, вблизи сооружения потенциально неустойчивы.

**На седьмом этапе** исследований было установлено, что деформации конструкций периодически, примерно раз в неделю, активизировались, но затем почти полностью затухали. Было установлено, что примерно раз в неделю в горнодобывающем карьере, расположенном в двух километрах производят взрывные работы. При сопоставлении графика взрывов и активизации деформации сооружения по времени точно совпадают (рис.8).

**На восьмом этапе** исследований изучались негативные склоновые процессы. Был установлен ранее неизвестный механизм снижения устойчивости склона в зимнее время. Зимой склон промерзает на 3- 3,5 метра, образуя водонепроницаемый экран. Под ним по талику, в трещиноватых скальных грунтах фильтруют грунтовые воды с верха склона, не имея выхода на поверхность. Соответственно, под водонепроницаемым экраном постепенно растет гидростатическое давление, снижающее местную устойчивость склона. К концу зимнего периода это давление становится максимальным. При взрывах в карьере возникает дополнительное гидродинамическое давление. Этот процесс был дополнительно изучен в лотке в лабораторных условиях, что подтвердило данный специфический механизм потери местной устойчивости склона (рис.9.).

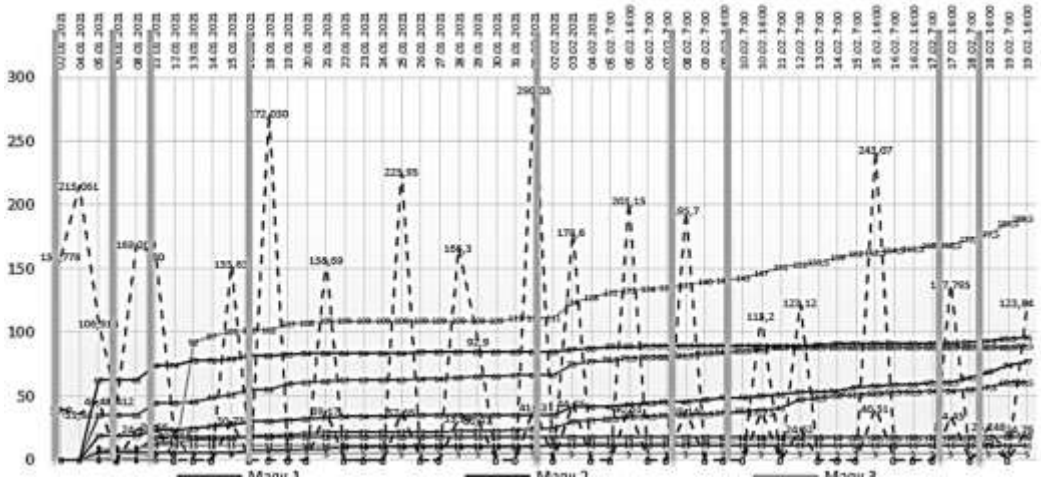
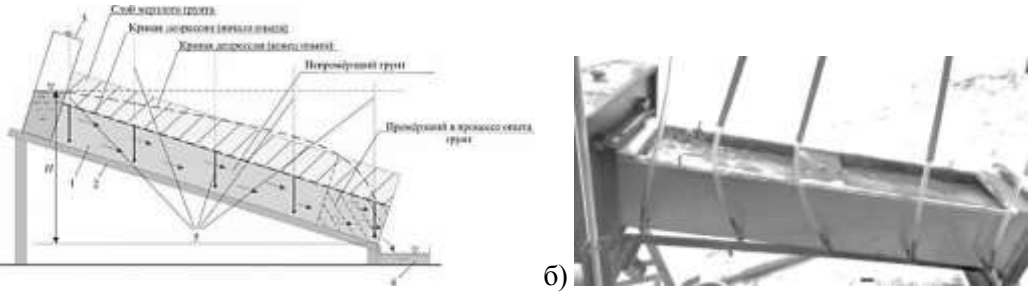



Рис. 8. Сопоставление перемещения реперов со взрывами в карьере

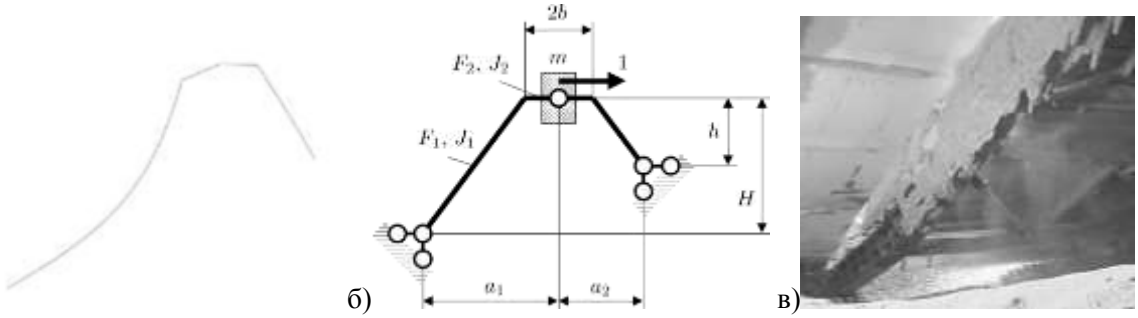



а) б)

Рис. 9 а) - схема грунтового лотка для изучения гидростатического давления при фильтрации воды под грунтовым мерзлым экраном; б) – фото лотка

**На девятом этапе** исследований были проведены расчеты динамической устойчивости сооружения и на допустимое расстояние от источника взрыва до сооружения. Расчёт периода главного колебания сооружения и определение сейсмических нагрузок определяется расчётной схемой сооружения. В процессе расчетов динамической устойчивости здания были определены главные формы колебаний конструкции и определены частоты и амплитуды колебаний (рис. 10).

Как известно, чем выше расположен центр масс сооружения, тем амплитуды горизонтальных колебаний от сейсмических воздействий больше. Узел перегрузки – достаточно массивное кирпичное сооружение, которое опиралось на относительно «тонкие» высокие опоры. Поэтому при взрывах в карьере сооружение раскачивалось. Две транспортные галереи, расположенные под углом, в определенном направлении сдерживали колебания, поэтому узел перегрузки мог раскачиваться только в определенном направлении, передавая основную нагрузку на одну (ранее упомянутую) опору, которая постепенно изгибалась, фундамент опоры постепенно от взрыва к взрыву перемещался, что, в конечном счете, и привело к прогрессирующему обрушению сооружения.




а) б) в)

Рис. 10. Форма главного колебания несущих трёхшарнирных рам узла перегруза (а); динамическая расчетная схема узла перегрузки руды с одной степенью свободы (б) и характерная форма искривления опоры (в)

Таким образом, в результате проведенного комплекса исследований была установлена вся совокупность технических причин аварии. Это позволило объективно установить весомость каждой из причин и установить степень ответственности должностных лиц, причастных к аварии, а также дать рекомендации по обследованию и дальнейшей эксплуатации подобных объектов.

***Литература***

1. Королев М.В., Егоров В.Н., Власов А.Н., Знаменский В.В., Куцевич О.И., Икрамова А.Е. Примеры и причины аварий сооружений. Вопросы оценки и обеспечения качества строительных объектов, надежной работы оснований и фундаментов в условиях меняющихся природных и техногенных воздействий. М. ИПРИМ РАН, ГБУ ЦЭИИС, НИУ МГСУ. ООО «Сам Полиграфист», 2020. – 221 с., илл.

2. Королев М.В. Системные инновации в методах исследования механических свойств грунтов /М.В. Королев. М-во образования и науки Рос. Федерации. ФГБУН Институт прикладной механики Российской академии наук.- М. ФГБУН ИПРИМ РАН: ООО «Сам Полиграфист», 2018. – 376 с., илл.

3. Остякова А.В., Королев М.В. Оценка влияния гидростатического давления в таликах многолетнемерзлых грунтов на устойчивость природных и искусственных склонов. Журнал «Фундаменты» № 4 (10) 2022 г., с 8 – 13.

## ИЗМЕНЕНИЕ ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ОТТАИВАНИЯ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕТРАНСПОРТА В РАЙОНАХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

***О.В. Крайнева***

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск*

В соответствие с 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» предприятия нефтегазотранспорта реализуют на своих объектах программу комплексного производственного экологического мониторинга (ЭМ). Программы мониторинга разрабатываются индивидуально под проект и включают в себя как обязательные показатели качества природной среды, так и дополнительные, позволяющие отследить происходящие в окружающей среде изменения под воздействием производственной деятельности и спланировать мероприятия по управлению нежелательными изменениями.

В статье представлены результаты экологического мониторинга с объектом контроля – сезонно-талый слой (СТС) в районе прохождения трассы межпромыслового нефтепровода Ардалинского нефтепромысла. Нефтепромысел и трубопровод расположены в Ненецком автономном округе в районе распространения многолетней мерзлоты.

Ежегодное проведение экологического мониторинга позволило выявить нежелательные криогенные процессы и принять меры по управлению ими. Программа ЭМ на Ардалинском нефтепромысле представлена обширным перечнем показателей (рис.1) [1]. В докладе будут рассмотрены лишь отдельные показатели и объекты мониторинга для анализа активности СТС (глубина оттаивания и показатели качества надмерзлотных грунтовых вод).

Мониторинг СТС на рассматриваемом объекте проводился с 1995 года и в ходе его выполнения были выявлены следующие закономерности. Сезонное оттаивание почвы начинается сразу после

схода снега и завершается к концу августа. В октябре вновь происходит ее замерзание. Глубина СТС варьируется от 0,4 до 2,8 метров.

Для анализа изменений мощности СТС и состава водной вытяжки почв были приняты результаты мониторинга Ардалинского нефтепромысла, проводимых в период с 1995 по 2014 годы. Выборка составила 28 точек по средним показателям. Динамика изменения СТС по годам для отдельных точек мониторинга показала, что наблюдается увеличение глубины сезонного оттаивания (рис.2), усредненные значение приведены на рис. 3. За период наблюдений, была выявлена тенденция к увеличению мощности СТС. Увеличение глубины СТС оказывает влияние на состояние многолетнемерзлых пород [2], приводит к смыканию макропор и провоцирует просадку грунта, который является фундаментом опасных производственных объектов нефтегазовой отрасли, а оттаявшая вода подтягивается к мерзлому фронту, насыщая его, в результате чего объем льда возрастает и происходит морозное пучение. Изменения СТС могут оказывать влияние на режим надмерзлотных вод, что в свою очередь приводит к деградации многолетней мерзлоты.

Также, на основании результатов 29 наблюдений было установлено, что концентрация ионообменного натрия в водной вытяжке почв сезонно-талого слоя в зоне распространения массивной и островной многолетней мерзлоты связана с глубиной сезонного оттаивания. В 78% случаев для меньшей мощности СТС наблюдалось повышенное содержания ионообменного натрия, а в точках замера, где концентрация ионообменного натрия была пониженная – наблюдалось более глубокое оттаивание СТС. Таким образом, по катионному составу [3] можно косвенно прогнозировать глубину сезонного оттаивания.

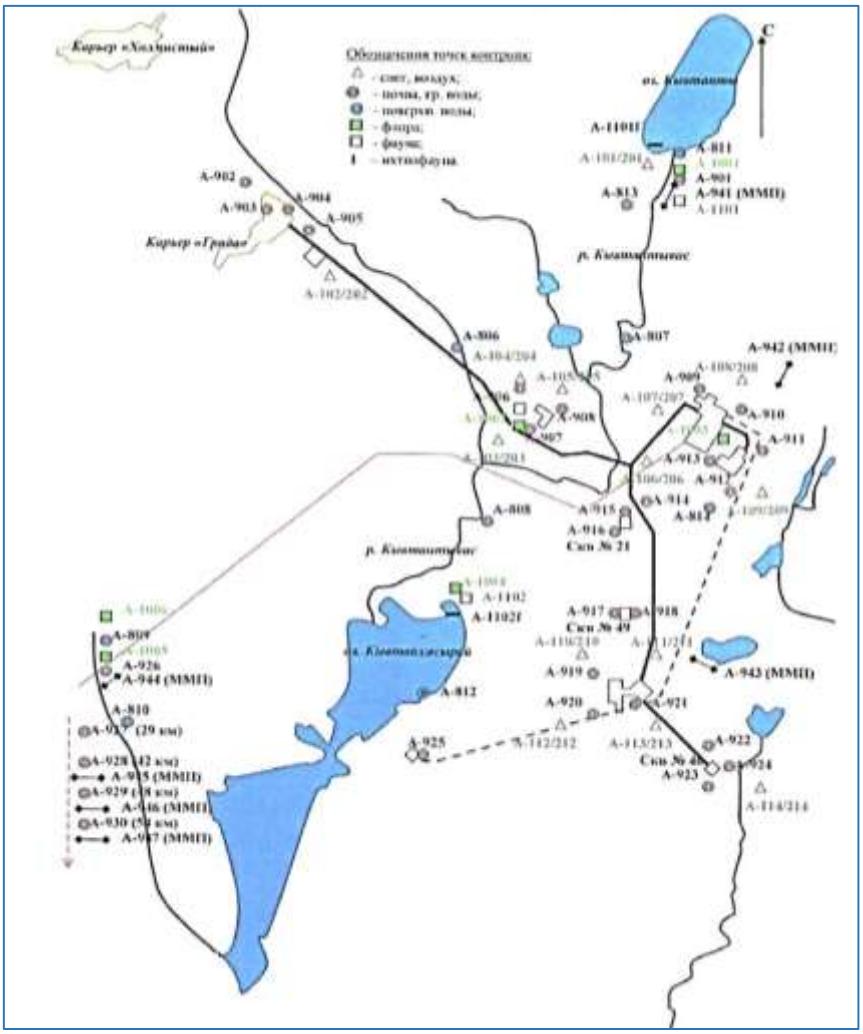



Рис.1. Точки отбора проб и контроля показателей ЭМ [1]

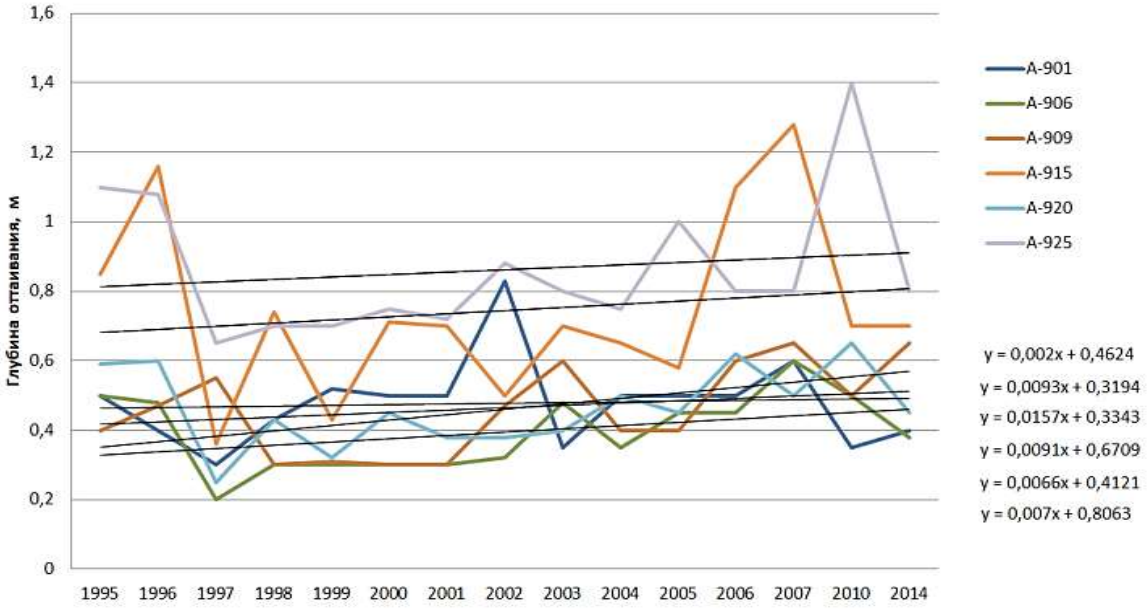



Рис. 2. Изменение глубины СТС 1995-2013 (по отдельным точкам мониторинга)

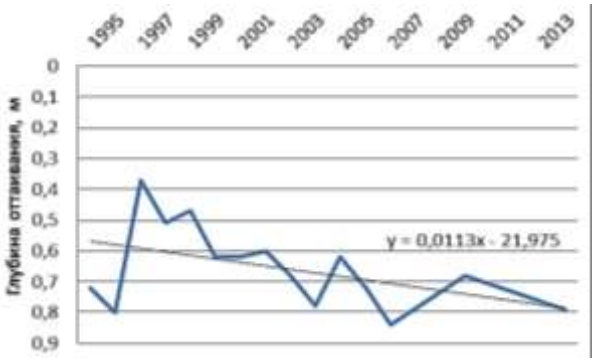



Рис. 3. Средние значения глубины СТС 1995-2013 (по 26 пунктам наблюдения)

Полученные результаты свидетельствуют о постепенном повышении температуры ММП в районе расположения Ардалинского нефтепромысла. Кроме вероятного антропогенного влияния и потепления климата, подобные тепловые аномалии могут быть связаны с подземными водами, которые, будучи весьма подвижными и обладая высокой теплоемкостью, принимают активное участие в выносе глубинного тепла и в его перераспределении [10].

Состав программы мониторинга и выбор объектов контроля очень важен для выявления не только антропогенного влияния на компоненты природной среды промышленными объектами, но также и выявления геохимических и геокриологических особенностей конкретного региона. И даже при стабильности результатов на протяжении десятилетий, продолжение наблюдений является исключительно важным вкладом в изучение территорий и маркером обеспечения экологической и промышленной безопасности опасных производственных объектов нефтегазового комплекса.

***Литература***

1. Губайдуллин, М.Г. Методы защиты верхней части геологической среды на основе локального мониторинга при эксплуатации нефтяных месторождений Европейского Севера России: монография / М.Г. Губайдуллин, Н.А. Макарский, Б.Х. Хамидов; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. – Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. – 168.

2. Крайнева О.В., Губайдуллин М.Г., Калашников А.В., Абакумов В.П. Изменение температурного режима многолетнемерзлых пород в районе Ардалинского месторождения //НТЖ «Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе». М. 2021. №4(301). С.43-49.

3. Общее мерзлотоведение под ред. Мельникова П.И., Толстихина Н.И. Наука, Новосибирск. 1974, 291 с.

# ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД ВОДЫ В ЛЕД КАК РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ТЕПЛА ДЛЯ ПАССИВНОГО ОТОПЛЕНИЯ

***В.А. Куваев, Г.П. Кузьмин***
*ИМЗ СО РАН им. П.И. Мельникова, г. Якутск*

В работе показана возможность использования теплоты фазового перехода при кристаллизации воды для отопления нежилых помещений до высоких отрицательных температур близкие к 0 ˚С (от 0 до -7 ˚С)[1]. Удельная теплоемкость воды при кристаллизации составляет 334кДж/кг. При замерзании 1 литра воды выделяется количество тепла эквивалентное сжиганию примерно 0,04 кг дров или 8л природного газа. Однако в отличие от ископаемого топлива, данный источник является возобновляемым, бесплатным и экологически нейтральным. Актуальность работы обусловлена: ростом тарифов на традиционные энергоносители; энергоснабжение объектов без централизованных сетей; использование сезонного аккумулирования тепла. Цель работы – определение необходимого количества воды в теплоносителе и площадь теплообменной поверхности теплоносителя в зависимости от климатических параметров, конструкции здания и режима эксплуатации.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработана теплотехническая модель теплопотерь помещения.
2. Установлена связь между теплопотерями и необходимым количеством воды.
3. Экспериментально определено количество воды, потраченное на испарение, сублимацию.
4. Проведены длительные натурные испытания в климатических условиях г. Якутска.
5. Определена температура внутри помещения при различном количестве основной и дополнительной воды[2-4].

Методика исследований: теплотехнический расчет теплопотерь, расчет необходимого количества воды и теплообменной поверхности, и экспериментальное наблюдение за температурных режимом внутри помещения, температурой наружного воздуха, объемом образующегося льда, объемом незамёрзшей воды, испарением воды, сублимацией льда и другими параметрами.

Ограничения и область применения. Данная технология подходит только для нежилых помещений, где допустима высокая отрицательная температура, таких как, складские помещения, гаражи, мастерские, хранилища определённых видов продуктов, прогулочные помещения, катки и др. Для жилых целей подходит только в качестве буфера, «помещение внутри помещения» с дополнительным источником тепла.

В результате проведенных исследований получены следующие результаты. Теплотехническим расчетом определены основные и дополнительные потери тепла из помещения в окружающую среду. Диапазон изменения температур наружного воздуха из года в год приводит к разным потерям тепла из помещения при прочих равных условиях и соответственно к различному количеству воды для отопления сооружения. Максимальная средняя температура воздуха за зимний период (с октября по апрель) была выше средней температуры наружного воздуха за тот же период в 17 раз (рис. 1). Чтобы предотвратить полное замерзание воды в аккумуляторах тепла, в связи с изменениями температуры наружного воздуха и стабилизации температуры внутри помещения, а также с учетом испарения воды и сублимации льда, необходимо порядка 20-30 % дополнительного объема воды от основного. Основной объем воды необходимый для отопления помещения определяется теплотехническим расчетом потерь тепла из помещения. Из расчета толщины нарастающего слоя льда за зимний период, определены минимальные размеры аккумуляторов тепла.

Заключение – длительными испытаниями опытного объекта выявлена возможность практического применения технологии отопления нежилых помещений теплотой фазовых переходов воды до высоких отрицательных температур близкие к 0˚С. Использование данной технологии возможна на большей части России и мира. При этом является экологически чистым, безопасным, возобновляемым, с большим КПД, дешевым источником энергии для обогрева помещений. В сравнении с помещениями с традиционными источниками тепла, данная технология отличается большими капитальными затратами на этапе строительства (дополнительные площади на аккумуляторы тепла, гораздо основательное теплоизолирование помещения) и минимальными затратами в ходе эксплуатации (освещение, доливка испарившейся воды)

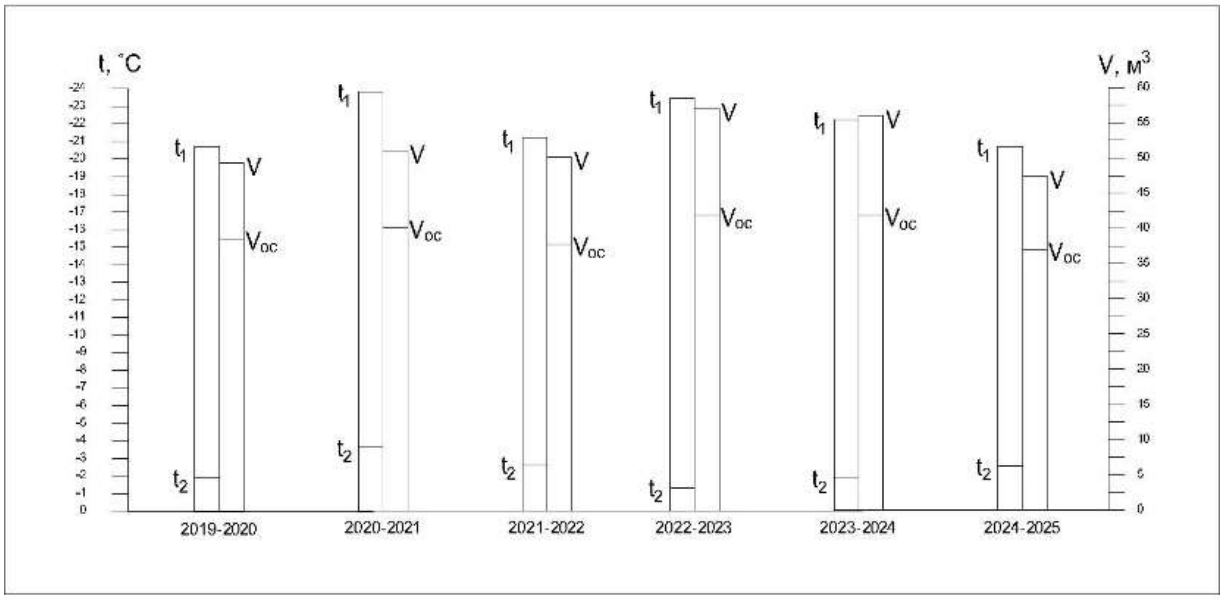



Рисунок 1. Гистограмма температур наружного воздуха и внутри помещения и объемы воды в аккумуляторах в различные годы испытания опытного объекта
$t_1$ и $t_2$– средние зимние температуры воздуха снаружи и внутри помещения; V=Voc+Vвс – суммарное количество воды; Voc и Vвс –основное и вспомогательное количества воды.

***Литература***

1. Кузьмин Г.П. Новые технологии использования теплоты фазовых переходов воды // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 5–2. С. 217–221. [12, с. 35–36]

2. Кузьмин Г.П., Куваев В.А. Вода как аккумулятор солнечной энергии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 9. С. 80–84.

3. Кузьмин Г.П., Куваев В.А. Результаты испытания устройства для управления температурным режимом помещений теплотой фазового перехода воды // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 8. – С. 127-132;

4. Кузьмин, Г. П., Куваев В.А. Определение параметров устройства для обогрева помещений теплотой кристаллизации воды // Успехи современного естествознания. – 2025. – № 9. – С. 106-114. – DOI 10.17513/use.38435.

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

***С.А. Кудрявцев[1], И.И. Сахаров[2], В.Н. Парамонов[3], Х. З. Бакенов[4]***

*[1] Дальневосточный государственный университет путей сообщения. г. Хабаровск*

*[2] АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». г. Санкт-Петербург*

*[3] Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения. г. Санкт-Петербург*

*[4] Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет. г. Санкт-Петербург*

Строительство зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах Дальнего Востока и прибрежной инфраструктуры Арктики на Арктическом побережье России связано с рядом трудностей, вызванных суровыми климатическими и сложными инженерно-геокриологическими условиями, а также удалённым расположением объектов строительства от индустриальных центров с развитой промышленной базой. Особенностью их являются процессы, приводящие к деформации и потере устойчивости оснований при их постепенном потеплении. Традиционные методы и способы сокращения до минимума деградации грунтов не способствуют сохранению их состояния. Таким образом, возникает необходимость в разработке новых конструктивных решений, максимально сокращающих или ликвидирующих деформации оснований конструкций железных дорог в виду деградации состояния грунтов. Существенно усложняют строительство в этих зонах продолжительные периоды с низкими температурами и необходимость учёта влияния возможных изменений климатических условий на работу всех видов конструкций - от оснований и фундаментов

до колонн, ригелей и балок - в течение всего срока их эксплуатации. Систематические замеры температур воздуха и грунтовых оснований показывают стабильное повышение температуры, особенно интенсивное в криолитозоне России (до 2 и более градусов за 50 лет), что означает, что к середине XXI века температуры грунтов на многих территориях России будут значительно повышены, а в ряде районов я мерзлота вообще рискует прекратить существование ввиду полной ее деградации. Очевидно, что проектирование и строительство новых, а также реконструкция существующих сооружений должны вестись с учетом этих особенностей.

В зоне деградации льдистых глинистых грунтов он претерпевает существенные изменения, значительно разуплотняется и насыщается водой, сохраняя при этом слоистую текстуру свойственную глинам протерозоя в коренном залегании. Таким образом, глины, изменённые деградацией и гляодислокацией явление достаточно распространённое и с ними нужно считаться.

Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) многолетнемерзлых грунтов основания зданий и сооружений методом конечных элементов (МКЭ) с учетом реологических свойств грунтов нами принята модель Бингама- Шведова [1,2]. Реакция среды на объемные деформации упругая, с постоянным модулем объемного сжатия, а на сдвиг упруго вязкопластическая, которая подчиняется закону пластического течения, с критерием прочности Кулона. При этом вязкое сдвиговое течение принимается равнообъемным. Ссдвиговой пропорциональна деформации разности Скорость ползучести $\Delta\gamma$ между действующим и предельным напряжениями. За время $\Delta t$ прирост сдвиговой деформации составит:

$$\Delta\gamma = 1/\eta \cdot (\tau^{\text{п}} \cdot \Delta t) \quad (1)$$

Чтобы обеспечить такую деформацию элемента при неизменной его матрицы жесткости системы (МЖС) к нему необходимо приложить дополнительное касательное напряжение:

$$\Delta\tau = 1/\text{Тр}\ \Delta\tau_i \cdot \tau^{\text{п}} \quad (2)$$

Здесь $T$р - время релаксации;

$$T\text{р} = \eta/G; \quad (3)$$

$\eta$ – коэффициент вязкости; G – модуль сдвига, $\tau^{\text{п}}$ –предельное напряжение сдвига.

Направление $\Delta\tau$ может совпадать с направлением максимального касательного напряжения. Главные добавочные напряжения пересчитываются в осевые $\{\Delta\sigma\}$, далее по вектору $\{\Delta F\}$ вычисляются добавочные узловые силы. Следующее решение задачи с прежней МЖС, по новым значениям вектора сил дает ответ о состоянии области на момент времени $t_{i-1} + \Delta t_i$ и т.д.

Процедура получения упруго-вязкопластического (УВП) решения указывается подобной получению упругопластическому (УП) методом «начальных напряжений», с той лишь разницей, что здесь на очередном временном интервале фигурирует набор добавочных напряжений.

$$\{\Delta\sigma_{1,3}\} = \{\xi\tau^n - \xi\ \tau^n,\ \alpha\}^{\text{T}},$$

где $\xi \leq G\Delta t_i/\eta$ (4)

Дальнейшее использование ($\{\Delta\sigma_{1,3}\}$) одинаково. Решение будет устойчивым при $\Delta t \leq Tp$. Процедура предполагает постоянство напряженного состояния в течении интервала времени $\Delta t$. Нами принят возрастающий цикл за циклом шаг по времени. УВП решение основано на многократном повторении упругих с изменяемыми величинами узловых сил шагом по времени, матрица жесткости системы (МЖС) остается при этом постоянной. Рассмотренная процедура УВП решения реализованная нами в программе «Геомеханика CREEP», позволяет производить расчет НДС основания МКЭ с учетом реологических свойств грунтов [3].

Группа последователей таланта профессора А.Б. Фадеева (Х.З. Бакенов – руководитель, А.Ж. Жусупбеков, С.А. Кудрявцев, А.П. Артющенко) завершили работу по созданию, на основе программ, принятых в ГосФАП СССР в 1987 г. [3], обновленную на современной версии программу «Геомеханика CREEP-25», для расчета осадок и несущей способности фундаментов, устойчивости откосов и склонов с учетом деформационных, прочностных и реологических свойств многолетнемерзлых грунтов. В целях верификации программы было проведено сравнение результатов расчетов упругой и упругопластической задач с данными, полученными в программном комплексе ANSYS. Аналитические и численные расчеты показали достаточно хорошее совпадение.

Помимо климатических и геокриологических условий, проектирование и строительство на многолетнемерзлых грунтах Дальнего Востока и прибрежной инфраструктуры Арктики Российской Федерации осложняется преодолением многочисленных водных преград. Опоры эстакад в этих районах подвержены значительным ледовым нагрузкам в периоды ледостава и ледохода, что предъявляет особые требования к их прочности, устойчивости и долговечности. Существующие

нормативные методы расчета не учитывают в полной мере региональной специфики и требуют уточнения и развития.

Действующие нормативные документы по проектированию и строительству на многолетнемерзлых грунтах (СП и СНиПы, ГОСТы и ОСТы) нуждаются в существенной переработке. И учет этих усложняющих факторов, и усовершенствование конструкций с целью снижения стоимости и повышения эффективности являются важными и актуальными.

Таким образом, обоснован комплексный подход к созданию принципиально новых высокотехнологичных строительных технологий для развития транспорта Дальнего Востока и прибрежной инфраструктуры Арктики Российской Федерации, включающий эффективные конструкции фундаментов, колонн, пролетных строений, ригелей и балок, организацию транспортно-монтажного конвейера, средств роботизации и оперативных эффективных систем контроля монтажа, систем виртуального монтажа при мониторинге точности, а также разработаны методы и инструменты для определения ледовых нагрузок и воздействий на опоры предлагаемых строительных систем для Арктических регионов России.

Генеральный подход для решения этой проблемы – эстакадная железная дорога на всем ее протяжении, чьи преимущества перед насыпями – простота инженерных изысканий; простота проектирования; полная консервация мерзлоты; простота ремонта; соблюдение экологических требований; длительность безремонтной эксплуатации.

Под простотой изысканий подразумевается, что достаточным является бурение всего одной скважины под опору. Простота проектирования опоры полностью исключает трудоемкие теплофизические расчеты. Консервация мерзлоты обеспечивается отрывом мостовых пролетов от грунта и устранением теплового влияния надземной части на основание. Такой отрыв обеспечивает и простоту ремонтных работ как пролетного строения, так и фундаментов. Отдельно стоящие опоры обеспечивают экологию среды, особенно при окраске и теплоизоляции тел опор с южной стороны. Важнейшим преимуществом является и долговременная эксплуатация эстакад, обеспеченная стабильностью работы опор и средствами диагностики, в оперативном режиме передающими информацию о состоянии конструктивных элементов и температур грунта.

С учетом грандиозности поставленной задачи очевидны требования к долговечности конструкций и их материалов.

Во-первых, основным материалом для строительства сооружений и строительных систем Дальнего Востока и прибрежной инфраструктуры Арктики Российской Федерации должен стать бетон и железобетон как наиболее прочный и долговечный.

Во-вторых, это должны быть бетон и железобетон, устойчивые к экстремальным агрессивным воздействиям климатических и геокриологических условий.

В-третьих, этот бетон и железобетон, контактирующий с экстремальными агрессивными воздействиями климатических и геокриологических условий должен иметь внешний слой с существенно усиленными характеристиками.

Все это возможно благодаря инновационным активационным технологиям нового поколения, дающим возможность получения не только вариатропных бетонов с дифференциальными (различающимися по сечению) характеристиками, но и регулирования их в необходимых диапазонах.

Дальний Восток включает большое количество рек и озер, не говоря уже о континентальном шельфе Арктического побережья, что вынуждает устраивать огромное количество мостовых переходов.

Но любой мост – это не только высокая отметка низа пролетного строения для пропуска паводковых вод, что диктует высокие насыпи, и большие объемы дефицитных на Дальнего Востока и прибрежной инфраструктуры Арктики Российской Федерации инертных материалов. Кроме этого, насыпи с необходимым уплотнением требуют наличия положительных температур.

Это еще и сопротивление опор эстакад, мостовых переходов и мостов ледовому воздействию большой интенсивности, особенно в паводковый период.

Вместе с тем, в действующих нормативных документах методики расчета на такие экстремальные воздействия не отражают современного состояния дел, в особенности региональные особенности таких воздействий.

Это противоречие необходимо устранить в связи с реальной опасностью сноса опор эстакад железнодорожного пути и мостовых переходов Дальнего Востока и прибрежной инфраструктуры Арктики Российской Федерации.

Все без исключения объекты Дальнего Востока и прибрежной инфраструктуры Арктики Российской Федерации должны быть построены по принципу сохранения мерзлоты в мерзлом

состоянии на свайных фундаментах с вентилируемым подпольем и системой термостабилизации сезонно-охлаждающими устройствами СОУ, предполагающим, что грунт остается мерзлым в ходе строительства и на протяжении всего срока эксплуатации объекта.

Под ключевыми объектами должны быть установлены термостабилизаторы, поддерживающие грунт в замороженном состоянии, не давая теплу от оборудования и отопления объектов влиять на мерзлое основание.

Основные несущие конструкции должны быть построены на сваях глубокого заложения и с усиленным внешним слоем, обеспечивающих минимальные деформации, для исключения нарушения геометрии, способном привести к обрушению.

Фундаменты и опоры эстакад железнодорожного пути должны иметь повышенную стойкость к силовым и температурным воздействиям, при этом допускается наличие усиленных характеристик и параметров метров только у непосредственно контактирующих с воздействиями внешних слоев материалов: внутренние же слои, защищенные внешними, могут иметь стандартные характеристики и параметры, что может быть получено путем применения технологий активирования, в частности механического, и получения в конечном итоге вариатропных бетонов – с различающимися по сечению характеристиками и параметрами.

Пролетные строения эстакад должны быть повышенной прочности и меньшего веса, что можно использовать за счет снижения плотности бетона для увеличения пролетов со снижением количества опор. Так, нагрузка одного пролетного строения из высокопрочного легкого бетона на опоры снижается на 25-30% по сравнению с тяжелым бетоном.

К ним также относится требование иметь внешние слои с усиленными характеристиками и параметрами, что может быть получено путем применения технологий активирования, в частности электроактивации, и также получения в конечном итоге вариатропных бетонов – с различающимися по сечению характеристиками и параметрами. Именно эти и другие перспективные направления и были нами разработаны и внедрены в практике строительства и эксплуатации зданий и сооружений Дальнего Востока и прибрежной инфраструктуры Арктики Российской Федерации.

***Литература***

1 . Кудрявцев С.А., Парамонов В.Н., Сахаров И.И., Шашкин А.Г. Использование метода конечных элементов в решении задач геотехники. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2014. 162 с.

2. Бакенов Х.З., Фадеев А.Б. Расчет осадок ленточного фундамента на упруго-вязкопластичном основании. // Применение численных методов к задачам геомеханики: межвуз. сб. трудов. – М.: МИСИ, 1986. – С. 121-134.

3. Фадеев А.Б., Бакенов Х.З., Репина П.И., Кудрявцев С.А. Программа расчета напряженно-деформированного состояния массивов пород в окрестностях горных выработок и в основании фундаментов с учетом деформационных, прочностных и реологических свойств среды МКЭ «Геомеханика CREEP» / // ГосФАП СССР. М.: 1987. № 50870000320. – 87 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА НА УЧАСТКЕ ОБРАЗОВАНИЯ НАЛЕДИ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

***З.Я. Кузина, В.В. Оленченко, А.А. Заплавнова***

*Институт нефтегазовой геологи и геофизики СО РАН, Новосибирск*

Наледеобразование представляет собой серьезную проблему при эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне. На территории России наледи главным образом распространены на СевероВостоке, в Восточной Сибири (Забайкалье, Бурятия, Южная Якутия) и Горном Алтае [1-2].

Район исследования расположен в Чуйской межгорной впадине Горного Алтая, которая относится к зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП) сплошного типа, в связи с чем на ее территории широко распространены различные криогенные процессы, такие как солифлюкция, морозобойное растрескивание, термокарст, пучение, а также наледеобразование [3-4]. Кровля ММП залегает на глубинах от 6 м [5], а мощность деятельного слоя более 1,5 м [3].

Наледные процессы занимают третье место по негативному воздействию на инфраструктуру Горного Алтая, при этом максимальное их распространение (56,3%) характерно для Кош-Агачского района [4]. На участке автодороги Р256 «Чуйский тракт» км 906–907, в Кош-Агачском районе, вблизи села Тобелер (рис.1) ежегодно образуется наледь. Для выявления причин её возникновения были проведены геофизические исследования.

Согласно геологической карте, исследуемый участок сложен озерными и озерно-аллювиальными отложениями. Литологический состав толщи представлен светло-серыми и палевыми известковистыми и мергелистыми глинами, суглинками, супесями, алевритами с прослоями песков и галечников [3].

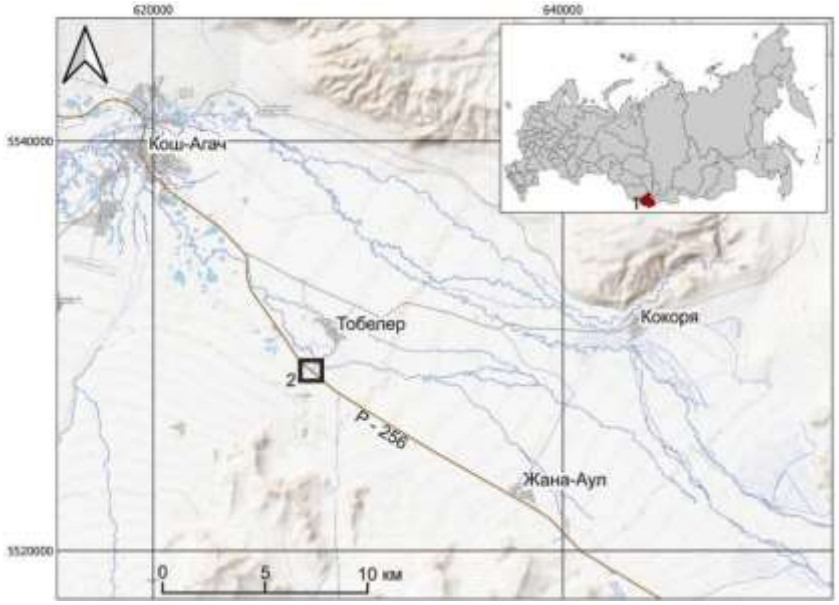



Рис. 1. Схема расположения Горного Алтая в структуре России (1) и участка (2) исследования

Предполагается, что одна из причин образования наледи — это барражный эффект от мерзлотной завесы, возникающий в процессе формирования сезонномёрзлого слоя (СМС). В таком случае глубокое промерзание под дорожным полотном препятствует фильтрации грунтовых вод и провоцирует их разгрузку с образованием наледи с нагорной стороны автодороги.

Целью геофизических исследований было определить глубину СМС под полотном дороги и на теле наледи для оценки возможности возникновения барражного эффекта.

**Характеристика объекта.** В пределах участка исследования ФАД «Чуйский тракт» представляет собой двухполосную дорогу шириной 7,5 м, высота дорожной насыпи не превышает 1,5 м. Дорога пересекает водоток, который проходит по двум водопропускным трубам.

Наледь формируется с нагорной и подгорной сторон дороги. Основным источником питания наледи является ручей, что позволяет отнести наледь к гидрогенному типу.

Основными способами борьбы с этой наледью являются земляные валы и щиты. На момент исследований водопропускные трубы были полностью заполнены льдом, а устройства их обогрева не функционировали.

**Методика исследований.** Геофизические измерения осуществлялись комплексом методов, состоящим из бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП) и георадиолокации (ГРЛ). Схема расположения профилей представлена на рис. 2.

Исследования методом БИЭП проведены с использованием аппаратурного комплекса ВЕГА, работающего на частоте 16кГц. Измерения проводились в модификации дипольно-осевого зондирования и профилирования. Длина генераторной и приемной незаземленной линии составляла 5 метров. Расстояние между центрами генераторного и измерительного диполей при многоразностном профилировании составляло 7.5, 12.5, 17.5 и 22.5 м. Сила тока в питающей линии составила 3мА. На данном участке были выполнены измерения по двум профилям (см. рис. 2).

При ГРЛ применялась аппаратура ОКО-3 с двухчастотным антенным блоком. Таким образом, данные были получены одновременно для двух антенн центральной частоты 150 и 400 МГц. В общей сложности выполнены измерения вдоль 6 профилей.

Обработка данных ГРЛ выполнена в программе GeoScan32. Граф обработки включал усиление сигнала по глубине и вычитание среднего. Пересчёт временного разреза в глубинный произведён с использованием значений относительной диэлектрической проницаемости для профилей, расположенных на теле наледи, равной 3,2; для продольных профилей, выполненных по обочинам дороги, и пересекающих ее - 4,5. По обработанным радарограммам продольных профилей L1 и L2 определялось положение предполагаемой подошвы СМС. На основе этих данных построена карта

изолиний мощности СМС. Данные многоразносного электропрофилирования и зондирований обработаны в программе Res2Dinv с построением двумерных геоэлектрических моделей.

Рис. 2. Карта расположения профилей БИЭП (красные линии) и ГРЛ (синие линии)

**Результаты исследований.** По результатам ГРЛ были построены радарограммы для каждого из профилей, в качестве примера представлен фрагмент радарограммы профиля L1 (рис. 4а) и совмещенный с ним профиль БИЭП CRT_2 (рис.4б). По радарограмме выделены три отражающие границы: подошва дорожного полотна, мощность которого не превышает 0,7 м; подошва СМС, а также литологическая граница, разделяющая пески и галечники от глинистых отложений. Слой сезонного промерзания не выдержан по мощности и изменяется от 0,4 м в СЗ части профиля до 1,8 метров. На разрезе УЭС (рис. 4б) также выделяется СМС с УЭС более 1150 Ом·м, что позволяет четко разделить горизонты на мерзлые и талые.

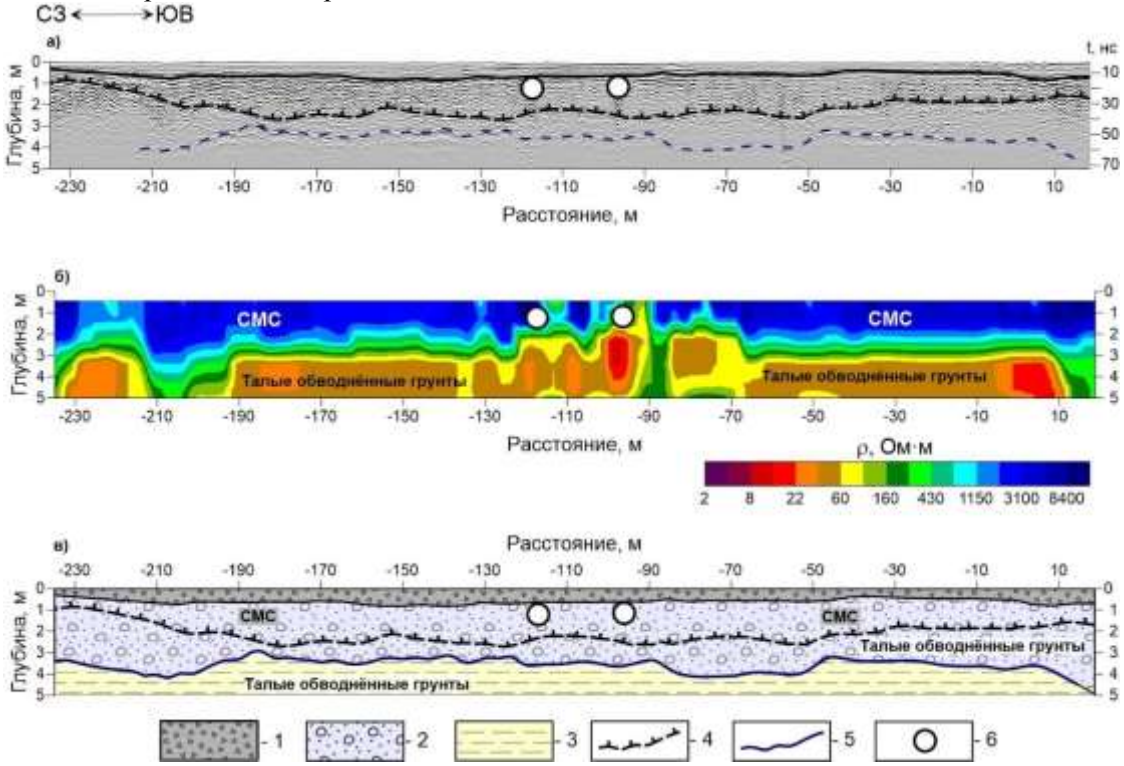



Рис.4. Фрагмент радарограммы по профилю L1 с элементами интерпретации (а); геоэлектрический разрез по профилю CRT_2 с элементами интерпретации (б); интерпретационный разрез по профилю (в).

1 - насыпные грунты, 2 - четвертичные озерные и озерно-аллювиальные отложения (пески, галечники); 3 - четвертичные озерные и озерно-аллювиальные отложения (глинистого состава); 4 - подошва СМС; 5 - литологическая граница ; 6 - водопропускные трубы

Вблизи водопропускных труб мощность СМС уменьшается (по геоэлектрическому разрезу) и в периферийных областях профиля (по радарограмме), однако полное промерзание сечения трубы и прилегающего грунта препятствует свободному пропуску вод ручья. Согласно полученному распределению УЭС, подстилающий слой ниже СМС на всём протяжении остаётся талым, что создаёт условия для повсеместной фильтрации грунтового потока под дорожным полотном. Однако мощный СМС (до 2,5 м) сам ограничивает скорость этой фильтрации. В результате часть грунтовых вод подпирается с нагорной стороны автодороги, формируя наледь, тогда как другая часть успевает профильтроваться под полотном и разгружается с низовой стороны, также способствуя наледеобразованию. По результатам совместной интерпретации двух методов электроразведки был построен обобщенный интерпретационных разрез (рис. 4в).

По обработанным радарограммам продольных профилей L1 и L2 определялось положение предполагаемой подошвы СМС. В допущении, что мощность верхнего слоя насыпных грунтов выдержана в пределах длин профилей и составляет 0,7 м, была оценена мощность СМС и построена карта изолиний (рис. 5).

Наложенная карта распределения мощности СМС на космоснимок позволяет выявить некоторую закономерность: области минимальной мощности СМС (до 1, 5 м) соотносятся с зонами разгрузки ручья, видимых на космоснимке, что указывает на активную фильтрацию вод, которая препятствует глубокому промерзанию. Участки с максимальной мощностью СМС (до 2, 5 м) приурочены к областям, где поток встречает преграду, что способствует формированию наледи с нагорной стороны дороги.

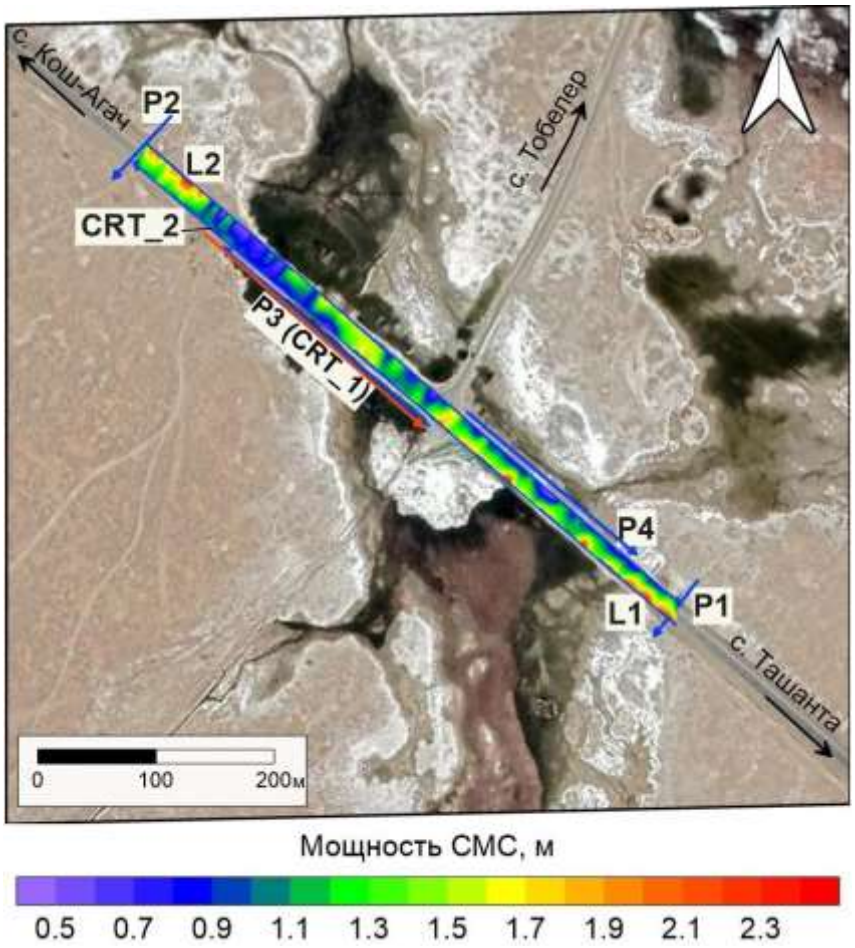



Рис.5. Распределение мощности СМС вдоль профилей L1 и L2

**Выводы.**

По данным ГРЛ в пределах участка исследования определена мощность СМС, которая варьирует от 0,4 до 2,5 м. По данным БИЭП выявлены СМС и талый подстилающий слой.

Локализация наледи контролируется мощностью СМС: при мощностях более 1,5 м преобладает барражных эффект, который влечет за собой более интенсивное наледедеобразование с нагорной стороны дороги; при малой мощности СМС доминирует активная фильтрация грунтовых вод под полотном дороги, что приводит к преобладанию наледи с низовой стороны дороги.

Кроме того, важно отметить, что существующие водопропускные трубы регулярно перемерзают и не обеспечивают пропуск всего объёма вод, что является одной из ключевых причин наледеобразования. На основе полученных геофизических данных в качестве конструктивной меры может быть рекомендовано увеличение пропускной способности водотока, за счет замены труб на большее сечение или устройства моста.

Работа выполнена в рамках исследований по теме № FWZZ-2026–0049 «Электродинамика многомасштабной геологической среды как основа наукоёмких технологий в нефтяной и рудной геологоразведке и инженерной геологии в Сибири и Арктической зоне РФ».

***Литература***

1. Руководство по проектированию искусственных сооружений автомобильных дорог на водотоках с наледями / Минавтодор РСФСР. — М.: Транспорт, 1978. — 61 с
2. Оленченко В. В., Заплавнова А. А., Медведева М. В. Строение источника гидрогеогенной наледи в Чуйской впадине (Горный Алтай) по геофизическим данным //Криосфера Земли. – 2025. – Т. 29. – №. 5. – С. 45–57
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-45 – Горно-Алтайск. Объяснительная записка / С.И. Федак, Ю.А. Туркин, А.И. Гусев, С.П. Шокальский, Г.Г. Русанов, Б.А. Борисов, Г.М. Беляев, Е.М. Леонтьева. СПб., Издво картфабрики ВСЕГЕИ, 2011, 567 с.
4 Достовалова М. С., Шитов А. В. Влияние метеорологических характеристик и геодинамической активности на режим образования гидрогенных наледей Горного Алтая // ГеоРиск, 2011, No 4, с. 36–43. 5. Мерзлотно-гидрогеологическая карта м-ба 1:200 000. Новосибирск, Отдел фондов Зап.-Сиб. геол. управления; инв. No 18195, 1977, 240 с.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ КРИОГЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ПЕСКАХ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

***А.А. Куть, Т.В. Романис, А.Е. Мельников***
*ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

Исследования, представленные в настоящей работе, посвящены комплексной оценке роли криогенеза в преобразовании песчаных отложений. Основной целью является установление механизмов и закономерностей трансформации песчаного материала при многократном промерзании-оттаивании. Повторяющиеся циклы замерзания и оттаивания воды (фазовые переходы вода-лед) выступают ключевым фактором, определяющим состав, структуру и свойства мёрзлых дисперсных пород. Исследование данных криогенных механизмов даёт возможность понять принципы трансформации минеральной основы грунтов и спрогнозировать их состояние в естественной среде и под техногенным воздействием. Эти знания критически важны как для оценки отклика криолитозоны на текущие климатические изменения, так и для реконструкции палеогеографических условий.

В России микроморфологические исследования зерен были начаты в 60-х годах XX века Г.П. Мазуровым и Е.С. Тихоновой [1]. Большой вклад в изучение этого направления далее был сделан Конищевым В.Н. и Роговым В.В. [2, 3]. Зарубежные исследователи активно включились в работу в 80-х годах XX века [4, 5]. Серию экспериментов также провели М. Дайтецель [6], Воронко Б. с соавторами [7], Дж. Лаутридоу [8], Дж. Мартон [9].

Лабораторный эксперимент был проведен с использованием установки, представляющую собой палету. В свою очередь палета состояла из 12 вертикальных параллелепипедов размером 70*70*200 мм, в которые помещались образцы. Замораживание образцов проводилось в морозильные лари. Промораживание и последующее оттаивание образцов проводилось в диапазоне температур от -25 до 25 градусов. Длительность одного цикла промерзания-оттаивания составляет от 4 до 6 суток. К настоящему времени были получены образцы, испытавшие 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 40 и 50 циклов.

Поставленный эксперимент показал следующие результаты. По сравнению с фоновыми показателями после первого цикла произошло резкое изменение отдельных микроморфологических признаков, связанных с механическим воздействием: увеличивается доля блоков расклинивания <0,010 μm (36,8%), острых хребтов и граней (84,2%), а также трещинноватость поверхности до 42,1% (рисунок 1). Сокращение набора текстурных элементов на поверхности говорит о том, что при первичном промерзании и протаивании разрушаются более «хрупкие» зерна с высокой степенью трещинноватости.

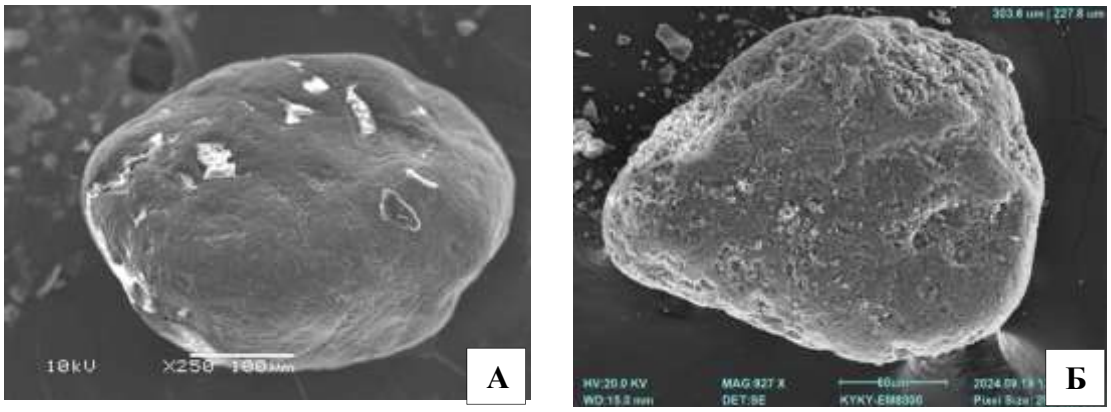



Рисунок 1. А - Зерно из фоновой пробы до начала эксперимента, Б – Зерно после 1-го цикла промерзания и протаивания

Со 2 по 5 циклы также активно проявляется механическое разрушение поверхности: увеличивается по сравнению с фоновыми показателями и первым циклом количество каверн (35%), ступенчатость поверхности (20-45%), раковистые сколы >0,010 μm (75-80%) и блоки расклинивания >0,010 μm (25-40%). Отмечается трещинноватость поверхности. Химические процессы проявляются неравномерно. Так, следы растворения на поверхности были отмечены лишь на 10% зерен, что гораздо ниже по сравнению с фоновой пробой и пробой, претерпевшей 1 цикл промерзания и оттаивания. В отличие от растворения выщелачивание, следы которого отсутствовали, начиная со 2 цикла встречается уже на 30% зернах. Важно отметить, что после 5 цикла на поверхности отмечаются новообразования кристаллов.

10 цикл по набору диагностических элементов и характеру их распределения дублирует 1 цикл. Он характеризуется преобладанием механического разрушения при умеренном химическом воздействии (рисунок 2А). Отличается максимальной угловатостью частиц, высоким содержанием свежих сколов и сбалансированным соотношением текстур механического происхождения (ориентированные лунки травления, каверны, ступенчатость, блоки расклинивания и раковистые сколы и др.). Из следов химического воздействия по аналогии с 1 циклом были отмечены следу шелушения (рис. 2Б) и растворения. Это переходная стадия от смешанного режима (5Ц) к более химически активному циклу (20Ц).

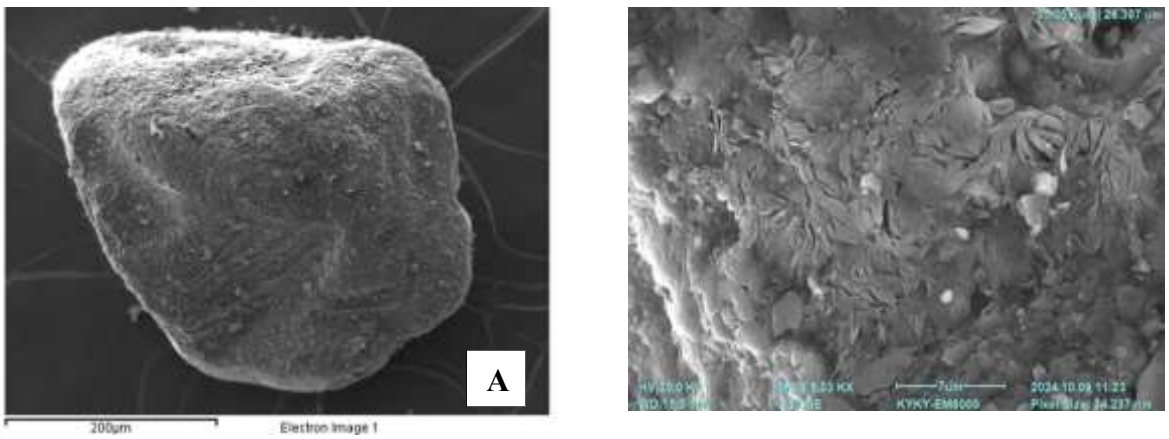



Рисунок 2. А – Зерно после 10-го цикла промерзания и протаивания, Б – Процессы шелушения на поверхности зерна

20 цикл представляет собой фазу интенсивного химического воздействия с аномально высокими показателями механического разрушения. Характеризуется максимальным развитием поверхностей выщелачивания (65,2%), кристаллизационными процессами (39,1%) и сложным расчлененным рельефом. Является поворотной точкой в последовательности циклов, где химические процессы достигают своего пика.

С 30 по 50 циклы сохраняется активная механическая трансформация поверхности зерна. Усиливается формирование лунок травления (от 18 до 24%), блюдцеобразных углублений (от 20 до 36,4%), раковистых сколов >0,010 μm (от 48 до 64%) и прямых сколов (40-44%). Наряду с механическим воздействием сохраняется химическая активность: отмечаются новообразования кристаллов (20-32%), шелушение (12-18,2%) и выщелачивание (27,3-8%). Для этой серии циклов характерно доминирование механических форм, но уже на фоне измененного рельефа, что может быть связано с накоплением усталостных повреждений и уменьшением роли химических процессов из-за изменения поверхности зерен.

Кроме того, отдельная пробы была подвергнута 65 циклам промерзания протаивания в условиях объемного промораживания. В данном случае промерзание образцов происходило значительно быстрее по сравнению с условиями промораживания, описанными выше, и без отслеживания фронта промерзания. На поверхности образцов был отмечен тот же комплекс элементов, как и в первом случае: аркообразные (5,3%), раковистые (63,2%) и прямые сколы (26,3%), блюдцеобразные углубления (10,5%), ступенчатость (21,1%). По сравнению с 50 циклом встречаемость этих элементов отличается незначительно. Необходимо отметить, что следы химического выветривания практически отсутствуют. Следы травление, кристаллы и шелушение на поверхности зерен отсутствуют. Процессы выщелачивания были отмечены лишь на 21% от всех изученных зерен, что меньше по сравнению с более медленным промораживание образцов.

Таким образом, следует отметить, что следы разрушения зерен при циклическом промерзании и протаивании присутствуют в образцах. Признаками криогенного разрушения в данном случае является увеличение содержания совершенно неокатанных зерен и степени расчлененности рельефа, а также наличие свежих сколов и расколотых частиц. Резкое увеличение доли вышеотмеченных признаков в образце после 1-го цикла по сравнению с 10-м говорит о том, что при первичном промерзании и протаивании разрушаются более «хрупкие» зерна и высокой степенью трещинноватости.

После 2 цикла сохраняется комплекс текстурных элементов, отмеченных на зернах фоновой пробы, но начиная с 5 цикла их количество заметно сокращается.

Циклы промораживания-оттаивания приводят к последовательному усложнению микрорельефа образца: от начального механического разрушения → к химическому выщелачиванию → к формированию устойчивых форм (раковины, ступени, каверны).

С увеличением циклов поверхность становится более расчлененной, но не чрезмерно – преимущественно среднерасчлененный рельеф. Это соответствует модели, когда начальное разрушение создаёт сложный рельеф, а дальнейшие циклы его "сглаживают" за счет сколов и растворения.

Наиболее интенсивные изменения происходят в интервале 5–20 циклов. После 20 цикла система стремится к стабилизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ по проекту № 23-77-10046 «Роль криогенеза в формировании микроморфологических признаков почв и отложений».

***Литература***

1 Мазуров Г.П., Тихонова Е.С. Преобразование состава и свойств грунтов при многократном замораживании, Вестн. Моск. ун-та», сер. геология, география, 1964, вып. 3, № 18. – с. 34-44.

2 Конищев В.Н., Рогов В.В. Методы криолитологических исследований. М.: Изд-во Московского ун-та, 1994. 135 с.

3 Конищев В.Н., Лебедева-Верба М.П., Рогов В.В., Сталина Е.Е. Криогенез современных и позднеплейстоценовых отложений Алтая и перигляциальных областей Европы. М.: ГЕОС, 2005. 132 с.

4 Kowalkowski A., Mycielska-Dowgiałło E. Weathering of quartz grains in the liquefied horizon of permafrost solonchaks in the arid steppe zone, Central Mongolia. CATENA, Volume 12, Issue 1, 1985. – pp. 179-190.

5 Kowalkowski A, Kocoń J. 1991. Weathering processes in Spitsbergen on the ground of the scanning electron microscope investigation. In Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych, A. Kostrzewski (ed). Geografia 50. Adam Mickiewicz University Press, Poznań: 77–104 (in Polish).

6 Dietzel M. 2005. Impact of cyclic freezing on precipitation of silica in Me-SiO2-H2O systems and geochemical implications for cryosoils and – sediments. Chemical Geol. 216: 79−88.

7 Martyna E. Górska & Barbara Woronko, 2022. "Multi-stage evolution of frost-induced microtextures on the surface of quartz grains—An experimental study," Permafrost and Periglacial Processes, John Wiley & Sons, vol. 33(4), pages 470-489, October.

8 Lautridou JP, Ozouf JC. 1982. Experimental frost shattering: 15 years of research at the Centre de Géomorphologie du CNRS. Progress in Physical Geography 6(2): 215–232.

9 Murton JB, Coutard JP, Lautridou JP, Ozou JP, Robinson DA, Williams RBG, Guillement G, Simmons P. 2000. Experimental design for a pilot study on bedrock weathering near the permafrost table. Earth Surface Processes and Landforms 25: 1281–1294.

## УРОВНИ ПАЛЕОКРИОГЕНЕЗА В АЛЛЮВИИ НИЖНЕГО ТОБОЛА И ИШИМА

***С. И. Ларин[1], Н.С.Ларина[2], Е.В.Устинова[1,3]***
*[1]Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень*
*[2]Тюменский государственный университет, Тюмень*
*[3]Тюменский индустриальный университет, Тюмень*

Территория юга Западной Сибири в плейстоцене неоднократно была ареной широкого развития многолетней мерзлоты. В сартанском криохроне южная граница криолитозоны проходила по 47°-50° с.ш, где предполагается её прерывистый и, возможно, островной характер [4,11,29].

В разрезах аллювия первой и второй надпойменных террас нижнего течения рек Тобол и Ишим, палеокриогенные образования представлены, прежде всего, грунтовыми жилами, псевдоморфозами по ледяным жилам, а также пликативными нарушениями слоистости ископаемых почв и осадков [3,6-9,14,16-17,19-27,29;и др.]. Палеокриогенные деформации локального (внутриформационного) уровня обычно имеют небольшие размеры и приурочены к отдельным литологическим пачкам или слоям. Крупные псевдоморфозы (до 3-4-5м по вертикали) часто являются важными региональными стратиграфическими реперами и отражают заметные изменения природной среды.

Изучение аллювия в долинах рек Тобол (Липовка, Упорово), Ишим (Коточиги, Быструха), Пышма (Кыштырла), отражают неоднозначное количество и возраст уровней палеокриогенеза.

Разрез 20-25-метровой правобережной второй надпойменной террасы р. Тобол у с.Липовка ($57^0$49’N,$67^0$23′E) изучали А.Г.Бер, И.А.Волков, В.С.Волкова, В.А.Зубаков, Ф.А.Каплянская, Н.В.Кинд, С.К.Кривоногов, С.А.Лаухин, Ф.Е.Максимов, В.Д.Тарноградский и другие исследователи плейстоцена Западной Сибири. Он представлен останцом палеогеновой пластовой равнины и прислоненной к нему речной террасой позднеплейстоценового возраста. В разрезе террасы выделяются речные слои, перекрытые сверху сложно построенным покровом субаэральных отложений с многочисленными следами палеокриогенеза.

Нижняя часть разреза (до 9-9,5 м), сложена слоистыми алевритами старичных фаций, которые ниже уреза воды в Тоболе, по данным бурения [19], подстилаются глинистым песком с гальками русловой фации. На речной отмели отчетливо выражена сеть мощных псевдоморфоз по ледяным жилам, которые уходят под урез воды [17]. Они имеют региональное значение [6,7, 9,19]и выявлены в верхах бугинских слоев (разрезы Красный Яр, Терехово и др.), ранних пойменных генерациях позднекаргинского времени на реках Тобол и Тавда [19]. По возрасту их соотносят с конощельским похолоданием каргинского времени.

Средняя часть разреза (5-6м) представлена слоистыми алевритами и суглинками пойменных фаций, с 5-7 маломощными гидроморфными криотурбированными ископаемыми почвами (снизу вверх: a, b, c, d, e, f, g [17]). По нашим данным, их степень выраженности и глубина (м): 12,05-12,1 (слабо выражена); 12,5-12,6 (почти не выражена); 12,8-12,9 (хорошо выражена); 13,0-13,5-13,6 (хорошо выражена); 14,9-15,0-15,3-15,4 (хорошо выражена, почва «с», пнёвый горизонт, относительная высота пней лиственницы до 0,20-0,30-0,40м, диаметр стволов до 0,1-0,15м); 16,0-16,1 (слабо выражена, границы размытые); 16,5-16,6 (неясно выражена, сизо-серо-коричневая, за счет криотурбаций изгибается волнообразно по стенке разреза). Большинством исследователей почва «с» определяется как тундровая, глеевая, оподзоленная. В её верхней части выявлена лесная подстилка из мхов, хвои, веток, шишек ели [1,8,17,28]. Горизонтальное и близкое от поверхности почвы "с"

залегание корней лиственниц пнёвого горизонта свидетельствует о высоком залегании уровня многолетней мерзлоты, близком к ее положению в современной лесотундре. Для наземных и пресноводных моллюсков из почвы "с" характерны признаки угнетенности [17]. Состав макрофлоры для времени развития этой почвы отражает северную окраину северной тайги или лесотундру [19].

Большинство палинологов [1,8,17,28] реконструируют для почвы "с", а также подстилающих и перекрывающих её слоев, растительность лесотундры, северной окраины северной тайги или северной тайги.

Верхняя пачка сложена слоистыми песками, алевритами и суглинками (10-15м) которые прежде считали подпрудно-озерно-ледниковыми [10,19], позднее высказаны предположения об их эолово-термокарстовом происхождении [2].

В верхней и средней части разреза, выявлены семь ярусов небольших сингенетических грунтовых жил, имеющих вертикальную мощность 0,2-0,6м. Они приурочены к глубинам: 5,5-6,1м, 7,1-7,7 (6.9-7.3)м, 8,7-8,9м, 10,3-10,6м,11,55-11,75м,13,7-14,1м,16,2-16,4м.

Для четырех ископаемых почв получены $^{14}$C-даты: 21400±290л.н. (ЛУ-7259), калиброванный возраст 25600±400 л.н. (12,05-12,1м); 26020±540л.н. (ЛУ-7380), калиброванный возраст 30930±510 л.н. (12,8-12,9м); 31300±800 - 30200±60 л.н. [15,18,19,34], около 32.6 тыс.л.н. [1], $^{230}$Th/U – даты по погребенной лиственнице: 39,1 + 5,7 и 40,3 ± 3,9 тыс. л. [28] (14,9 -15,0-15,3-15,4м, пнёвый горизонт, почва «с»); 30840±360 л.н. (ЛУ-7190), калиброванный возраст 35990±320 л.н.) (16,5-16,6м).

Нижний возрастной предел криотурбаций конощельского возраста возраста показывает абсолютная дата 32050±250 (СОАН-2068) л.н. [19]. Крупные псевдоморфозы в кровле нижнекаргинских слоев Тобола и Тавды соответствуют максимуму распространения мерзлоты. Вытаивание ледяных клиньев имело место около 31300 л.н. Наиболее поздние нарушения, не моложе 29 тыс.л.н. Судя по большей части $^{14}$C-дат, погребенные почвы со следами криогенного воздействия и два яруса грунтовых жил средней части разреза, соответствуют конощельскому горизонту крионарушений в прежних границах (25-55тыс.л.н.) МИС 3. В современной трактовке границ МИС 3 (29-57 тыс.л.н.) [36], верхняя часть разреза, включая верхнюю ископаемую почву ($^{14}$C-дата 21400±290 л.н. (ЛУ-7259; калиброванный возраст 25600±400 л.н.) (12,05-12,1м) и пять криогоризонтов с небольшими жилами соответствует МИС 2. На территории внеледниковой зоны Западно-Сибирской равнины обычно выделяется лишь один уровень криогенных структур сартанского времени, представленный единичными псевдоморфозами по ледяным и ледово-грунтовым жилам [4-5,20-22,25-26], поэтому такое количество уровней криогенеза, отличается от традиционных взглядов.

В верхней и средней части правого борта долины р.Барсук (правый приток р.Ишим) возле с. Коточиги в 2013,2014 и 2024г. были изучены несколько разрезов в которых выявлены два уровня криогенных структур [22,27,29]. В разрезе 1/2013 ($56^0$49'330"N,$70^0$56'860"E) верхний уровень криогенеза представлен клинообразными жилами на глубине 0,85м (0,90м)-2,85м. Ширина этих жил в основании до 0,16м. В нижней части жил с глубины 1,85м наблюдается ожелезнение ярко-охристого цвета. Нижний ярус криогенеза представлен слоем сизого с белесоватым оттенком вертикально тонкослоистого тяжелого суглинка мощностью 0,58м и клинообразной псевдоморфозой вертикальной мощностью до 3,4м которая начинается от подошвы указанного слоя и заканчивается на глубине 5,2м. Ширина псевдоморфозы составляет на глубинах 2,2м до 0,52м, 3,0м-0,3м, 4,0м-0,29м. Между верхним и нижним уровнями криогенеза находятся две погребенные почвы на глубинах 1,7-1,9-2,0м ($^{14}$C дата 20420±430 (ЛУ-7934), калиброванная дата 24350±540) и 2,1-2,2-2,3м ($^{14}$C дата 31290±1600 (ЛУ-7912), калиброванная дата 36110±1850 л.н.). В разрезе 2/2013 ($56^0$49'N,$70^0$56'E) в интервале глубин 4,3-4,5 м залегает гумусовый горизонт почвы с $^{14}$C датой 25090±1270 лет (СПбГУ-7265). Её калиброванный возраст 29680±1160 л.н.). Эта почва сильно нарушена наложенной солифюкцией (нижний уровень криогенеза). В интервале 4,08-4,3м залегает озёрный песок с обильными моллюсками, характерными для тёплого климата [27]. Выше залегают озёрные суглинки. С глубины 3,2 м до 4,08 м в разрезе наблюдаются единичные псевдоморфозы по ледово-грунтовым жилам (верхний уровень криогенеза) по характеру залегания, строению и стратиграфическому положению аналогичные псевдоморфозе разреза у с.Галишово [26].

В двух разрезах аллювия левобережной второй надпойменной террасы р. Ишим, между с.Быструха и с.Спирина (56°26′52,9″N,70°39′48,0″E; и 56°26′890″N,70°39′817″E), выявлены грунтовые жилы и маломощные погребенные почвы со следами криогенного воздействия [24].

В разрезе 3/2014а имеется до 5-6 в разной степени выраженных уровней палеокриогенеза, представленных небольшими грунтовыми клиньями и криогенными деформациями-трещинами и, по всей видимости, связанными с ними оскольчатыми прослоями. Наиболее отчетливо выражены второй, третий и пятый уровни. Верхний (первый) уровень - буровато-черные оскольчатые прослои

толщиной до 1см на глубинах 3,45-3,46м, 3,80-3,90м, 4,21-4,27м (особенно хорошо заметен), 4,38-4,39-4,40м. Прослой на глубине 4,21-4,27м разбит тонкими (шириной около 1см) вертикальными клинышками, заполненными светло-серым тонким песком, на отдельные фрагменты шириной по 15см. Второй уровень - грунтовая жила на глубине 4,9-5,8м с вертикальной мощностью до 0,8-0,9м и криогенные деформации-трещины между слоями мощностью 5-10см, нарушающие горизонтальный характер слоистости на глубине 5,2-5,8м. Третий уровень - грунтовая жила шириной вверху 8-13см на глубине 7,13-7,68м (мощность 0,55м) с ожелезнением по слегка волнистым краям. Четвертый уровень представлен мелкими заполненными коричневой супесью клиновидными образованиями с ожелезнением в интервале глубин 9,15 - 9,22м. Вертикальная мощность клиновидных образований до 5-15см, ширина в верхней части до 5см. Пятый уровень представлен хорошо выраженной клиновидной жилой на глубинах от 10,5-10,65-10,7м до 11,3м, где она «прорывает» буро-коричневый оскольчатый прослой (10,80-10,85 м). Шестой уровень - следы палеокриогенных деформаций в виде смятия и разрывов погребенной серо-коричневой почвы в интервале глубин 12,0-12,10м.

В разрезе 1/2024 выявлены два уровня палеокриогенеза. Верхний уровень представлен небольшими грунтовыми жилками на глубине 7,9м-8,0м мощностью до 10см и шириной по верху 4-5см с ожелезнением по контактам. Второй уровень представлен небольшой сингенетической грунтовой жилой шириной по верху 5-6см на глубине 12,30-13,30м. Заполнитель жилы - вышележащий слой желто-бурой супеси, перекрывающий нижележащие горизонтально-слоистые пески. Жила транзитно проходит через эти песчаные прослои, изгибаясь при их пересечении и истончаясь. В нижней трети жила имеет вид тонких ниточек-апофизов. Хронологические маркеры палеокриогенеза ОСЛ-даты 36,0±2,0 тыс.л.н. (гл.12,24-12,30м) и 29,4±1,9 тыс.л.н. (гл.7,76-7,82м).

Два уровня эпигенетических жильных криоструктур, мелких трещин и пликативных палеокриогенных деформаций, образующих полигональную сеть, вскрыты в кровле морских полиминеральных глин тавдинской свиты бартона-приабона (среднего и верхнего эоцена), а также перекрывающего их сильно ожелезненного песчано-глинистого аллювия в разрезе Кыштырлинского карьера возле пос.Винзили ($56^0$55’ N, $65^0$49’E) [20,21]. По результатам гранулометрического анализа отложений, перекрывающих морские глины, выявлена различная сортировка осадков и преобладание в них мелкой фракции. Медианный (средний) диаметр Md частиц, не показывает четко выраженного тренда по разрезу. Рассчитанные коэффициенты криогенной контрастности демонстрируют неоднократную смену этапов преобладания сезонной и островной мерзлоты. Спорово-пыльцевые спектры по профилю разреза отражают присутствие переотложенных пыльцы и спор. Выявлено преобладание ландшафтов южной тайги и подтайги в относительно теплые климатические интервалы и средней тайги во время похолоданий климата. Геохимические коэффициенты и индексы-климатические модули показывают относительно слабую степень гипергенного преобразования отложений и их формирование преимущественно в гумидных условиях.

О возрасте палеокриогенных деформаций, выявленных в основании покровных толщ, перекрывающих аллювиальные отложения [25] можно судить по следам морозобойного растрескивания и криогенным клиновидным нарушениям, обнаруженным в стенках раскопов палеолитических стоянок Шикаевка II на берегу оз.Слободчиково в пределах правобережной террасы р.Тобол и Черноозерье II на левом берегу р.Иртыш. На стоянке Шикаевка II возраст отложений с культурными остатками и мамонтовой фауной, залегающими непосредственно ниже следов мерзлотных текстур составил 13-11 тыс.л.н. [31]. По кости мамонта из этой стоянки была также получена дата 18050±95 л.н. (СОАН-2211) [13]. Судя по ребру, разорванному реликтовой клиновидной структурой, следы криогенеза носят эпигенетический характер и могут быть связаны с усилением похолодания в конце сартанского времени, в интервале 10,3-10,8 тыс.л.н. [32, 33]. Возраст культурных горизонтов стоянки Черноозерье II, деформированных поздними следами криогенеза, по $^{14}$C датам углей 14500±500 л.н. [33]. Позднее, по фрагменту кости из кровли горизонта погребенной почвы на глубине около 1,4 м была получена $^{14}$C дата 10526±44 л.н. (12490±70 кал.лет) [12,34]. Таким образом, данные палеолитических стоянок Шикаевка II и Черноозерье II, указывают на позднеледниковый возраст криогенных клиновидных структур.

В целом в разрезах аллювия рассматриваемой территории выделяются от двух до трех-четырех-пяти (иногда больше, разрез Липовка) каргинско-сартанских (МИС3 - МИС 2) уровней палеокриогенеза. Ряд уровней имеет локальный характер и выделяется только в отдельных разрезах аллювия.

Источники финансирования

Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег.№ 126022618021-5).

***Литература***

1 Арсланов Х.А., Лаухин С.А., Максимов Ф.Е., Савельева Л.А., Чернов С.Б., Тертычная Т.В., Жеребцов И.Е. Радиоуглеродная хронология и ландшафты липовско-новоселовского межстадиала Западной Сибири (по данным изучения разреза у с.Липовка) // Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований. Материалы VI Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода.- Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2009. С. 44-46.

*2 Астахов В.И.* Средний и поздний неоплейстоцен ледниковой зоны Западной Сибири: проблемы стратиграфии и палеогеографии // Бюл. комис. по изуч. четвертич. периода. 2009. № 69. С. 8-24.

3 Архипов С.А., Худяков Г.И. Об основных принципах расчленения и корреляции антропогеновых отложений Тобольского Прииртышья и Белогорского «материка» на р.Оби // Решения и труды межведомственного совещания по доработке и уточненнию стратиграфических схем Западно-Сибирской низменности.- Л.: Гостоптехиздат,1961.- С.332-351.

4 Аубекеров Б.Ж. Криогенные структуры и криолитозоны плейстоцена Казахстана// Изв. АН СССР, сер. 4, 1990. С. 102-110.

5 Аубекеров Б.Ж. Континентальные четвертичные отложения Казахстана// Автореф.докт. диссертации.Алма-Ата:Наука,1992.35с.

6 Волков И.А., Волкова В.С., Задкова И.И. Покровные лессовидные отложения и палеогеография юго-запада Западной Сибири в плиоцен-четвертичное время. Новосибирск.Наука, 1969.- 330 с.

7 Волков И.А. Палеогеографическое значение некоторых радиокарбоновых датировок на юге Западной Сибири // Геология и геофизика.-1973.-№2.-С.3-8.

*8 Волкова В.С.* Четвертичные отложения низовий Иртыша и их биостратиграфическая характеристика. Новосибирск: Наука, 1966. 174 с.

9 Волкова В.С., Николаева И.В. Палинологическая характеристика отложений второй надпойменной террасы Ишимского Прииртышья // Проблемы стратиграфии и палеогеографии плейстоцена Сибири.- Новосибирск: Наука, Сиб.отд-ние, 1982.- С.82-88.

*10 Волкова В.С., Архипов С.А., Бабушкин А.Е. и др.* Кайнозой Западной Сибири. Новосибирск: ГЕО, 2003.- 247 с.

11 Горбунов А.П., Марченко С.С., Северский Э.В., Титков С.Н. Палеогеокриологические исследования на равнинах и в горах Казахстана. // Криосфера Земли. 1998, том 2, № 2. С. 3-8.

12 Горбунова Т.А., Осинцева Н.В., Шмидт И.В., Штойбле Х. Новые данные по геоморфологии, стратиграфии и датировке стоянки Черноозерье II // Евразия в кайнозое. Стратиграфия, палеоэкология, культуры. Иркутск, Изд-во ИГУ, 2016, вып. 5, с. 153–157.

13 Деревянко А.П., Молодин В.И., Зенин В.Н., Лещинский С.В., Мащенко Е.Н. Позднепалеолитическое местонахождение Шестаково. Новосибирск, Институт археологии и этнографии СО РАН, 2003, 168 с.

14 Заррина Е.П., Каплянская Ф.А.,Краснов И.И., Миханков Ю.М.,Тарноградский В.Д. Перигляциальная формация Западно-Сибирской низменности // Материалы по четвертичной геологии и геоморфологии СССР.- М.: Гостоптехиздат, 1961.- вып.4.- С.54-104.

15 Зубаков В.А. Новейшие отложения Западно-Сибирской низменности. Л.:Наука,1972.310 с.

16 Каплянская Ф.А., Тарноградский В.Д. Плейстоценовые криогенные явления и история вечной мерзлоты в Западной Сибири // Стратиграфия, седиментология и геология четвертичного периода. М.: Наука, 1972.С.47-57.

17 Каплянская Ф.А., Тарноградский В.Д. Нижний и средний плейстоцен низовьев Иртыша Ленинград: Недра, 1974.- 160 с.

18 Кинд Н.В. Геохронология позднего антропогена по изотопным данным. М.:Наука, 1974.-255с.

19 Кривоногов С.К. Стратиграфия и палеогеография Нижнего Прииртышья в эпоху последнего оледенения (по карпологическим данным).- Новосибирск: Наука, 1988.-232с.

20Ларин С.И., Гусельников В.Л., Лаухин С.А. Криогенные структуры конца плейстоцена на юго-западе Западно-Сибирской равнины // Десятая Международная конференция по мерзлотоведению (TICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Том 5: Тюмень, Россия. Печатник, 2012.- с.172.

21Ларин С.И., Лаухин С.А., Гусельников В.Л. Следы сплошной многолетней мерзлоты конца плейстоцена на юго-западе Западно-Сибирской низменности // International Conference «Earth Cryology: XXI Century» is dedicated to David Gilicinsky, who was the heart and soul of these meetings in Pushcchino for many years. Pushcchino, Russia, September 29- October 3, 2013.- S.131-132.

22Ларин С.И., Лаухин С.А. О следах древней мерзлоты в подтаёжном Приишимье // Ресурсы и риски регионов с мерзлотой: Материалы сессии Всемирного снежного форума (Новосибирск, 17 января 2014 г.) - Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б.Сочавы СО РАН, 2014.- С.42-44.

23Ларин С.И., Ларина Н.С., Лаухин С.А., Максимов Ф.Е., Гусельников В.Л. Новые данные об изменчивости палеогеографических условий верхнего неоплейстоцена в Западной Сибири (по результатам изучения опорного разреза Липовка) // Актуальные проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена: Материалы Всероссийской конференции «Марковские чтения 2015 года».М.: Географический факультет МГУ, 2015.- 100-102с.

24 Ларин С. И., Алексеева В.А.,Ларина Н. С. Условия формирования перигляциального аллювия в долине реки Ишим // Тезисы XI Всероссийской конференции по изучению четвертичного периода (15-20 сентября 2025 г., Институт Карпинского, Санкт-Петербург) / Комиссия по изучению четвертичного периода при ОНЗ РАН, Институт Карпинского, Институт географии РАН. - СПб.: Институт Карпинского, 2025. С.91-92.

25 Ларин С.И., Алексеева В.А., Лаухин С.А., Ларина Н.С., Гусельников В.Л. Особенности формирования состава реликтовых грунтовых жил в основании покровных отложений лесостепного Притоболья // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 4, с. 5-18.

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-4(5-18)

26 Лаухин С.А., Ларин С.И., Гусельников В.Л. Первые находки следов древней мерзлоты в Курганской области // Вестник ТюмГУ, №4, 2012 (Науки о Земле). - С.104-112.

27 Лаухин С.А., Санько А.Ф., Ларин С.И., Максимов Ф.Е.. Межстадиал сартанского криохрона (МИС-2) Иртыш-Ишимского междуречья по данным фауны моллюсков// Актуальные вопросы инженерной геологии, гидрогеологии и рационального недропользования. Минск: изд. центр БГУ. 2015, с.83-85.

28 Максимов Ф.Е., Кузнецов В.Ю., Лаухин С.А., Жеребцов И.Е., Левченко С.Б., Баранова Н.Г. О возможности применения $^{230}$Th/U метода для датирования погребенных древесных остатков неоплейстоценового возраста // Бюллетень Московского об-ва испытателей природы. Отд.геол.,2012. Т.87.Вып.1.-с. 46-54.

29 Сычевская Е.К., Лаухин С.А,,Ларин С.И., Максимов Ф.Е., Санько А.Ф. Находка скелета щуки Esox cf. lucius L. в плейстоцене водораздельных отложений Ишим-Иртышского междуречья // Палеонтологический журнал, 2015, №5, с.50-54.

30Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен-голоцен. Атлас-монография. Под ред. Профессора А.А.Величко. Москва: ГЕОС, 2009.- 120с.

31 Петрин В.Т. Палеолитические памятники Западно-Сибирской равнины. Новосибирск, Наука, 1986, 142 с.

32 Цейтлин С.М. Геология палеолита Северной Азии. М., Наука, 1979, 286 с.

33 Цейтлин С.М. Геология верхнепалеолитической стоянки Черноозерье II // Позднепалеолитическая эпоха на юге Западной Сибири / В.Ф. Генинг, В.Т. Петрин; Отв. ред. В.И. Молодин. Новосибирск, Наука: Сиб. отд-ние, 1985, с. 67-71.

34 Осинцева Н.В. Гривный рельеф юга Западно-Сибирской равнины: морфология и возраст (на примере Черноозерской гривы, Саргатское Прииртышье) // Геосферные исследования, 2017, № 3, с. 26-32.

35 Фирсов Л.В., Панычев В.А., Орлова Л.А. Радиоуглеродные даты Лаборатории геохронологии Института геологии и геофизики СО АН СССР. Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 1972. № 38. С. 190-197.

36 Lisiecki L.E., Raumo M.E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed bentic d$^{18}$O records,Paleoceanography, 2005, 20, PA1003, doi:10.1029/ 2004PA001071

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ НАДМЕРЗЛОТНЫХ СУБАЭРАЛЬНЫХ ТАЛИКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ ПО ДАННЫМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

***Л.С. Лебедева, И.И. Христофоров, К.П. Данилов, Н.А. Павлова***
*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

В условиях сплошного распространения многолетнемерзлых пород формирование подземного стока, питание озер и сток малых рек в значительной степени зависят от локальных талых зон –

таликов. Для Центральной Якутии достаточно подробно изучены межмерзлотные водоносные комплексы, участки разгрузки подземных вод, термосуффозионные процессы и связанные с ними геофизические аномалии [1-4]. В то же время надмерзлотные субаэральные талики, не имеющие прямых поверхностных проявлений, до сих пор описаны лишь на отдельных ключевых участках.

По данным классических и современных исследований, развитие таликов в песчаных отложениях Центральной Якутии зависит от литологии, дренированности, растительного покрова и температурного режима верхней части геологического разреза [5-8]. Наиболее благоприятные условия складываются на хорошо дренируемых склонах и террасах, покрытых сосновыми и сосново-лиственничными лесами, где малольдистые пески, большая мощность сезонного протаивания и повышенные температуры пород способствуют сохранению талых водонасыщенных зон. При этом именно такие талики, как показали натурные наблюдения в бассейнах малых рек, могут выполнять функции круглогодичной аккумуляции и транзита пресных надмерзлотных вод [8, 9].

Цель работы – на основе георадиолокационного профилирования дать региональную количественную оценку распространения надмерзлотных субаэральных таликов в Центральной Якутии и сопоставить ее с мерзлотно-ландшафтными условиями различных частей района исследований.

**Материалы и методы**

Исследования выполнены в пределах Центральной Якутии в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Обследованы ключевые участки в окрестностях Якутска, в бассейнах малых рек Шестаковка и Мархинка, на средневысотных надпойменных террасах средней Лены, а также вдоль федеральных автодорог "Вилюй" и "Лена". Выбор участков определялся наличием песчаных четвертичных отложений, распространением сосновых и сосново-лиственничных лесов по мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия) [10] и транспортной доступностью.

Полевые работы проводились в 2017-2024 гг. Всего выполнено 130 георадиолокационных профилей общей длиной 44.96 км. Интерпретация выполнялась по совокупности признаков: заглублению отражающей границы "талое-мерзлое", изменению структуры отражений, характерной для талой и водонасыщенной толщи, наличию дифракционных эффектов от локальных водонасыщенных зон, а также по контрольным данным бурения на ряде ключевых участков. Глубина исследования достигала 29 м в зависимости от электромагнитных свойств дисперсных пород.

Для количественного сопоставления использован коэффициент таликовости K (%), рассчитанный как отношение суммарной протяженности участков, интерпретированных как надмерзлотные субаэральные талики, к длине профиля. В расчет включались талики мощностью не менее 3 м. Результаты обобщены по трем группам участков: центральной (левобережье р. Лены в окрестностях г. Якутска), западной (между р. Вилюем и г. Якутском) и юго-восточной (правобережье р. Лены).

**Результаты**

По всем профилям суммарная протяженность участков, интерпретированных как надмерзлотные субаэральные талики, составила 11787 м. Средний коэффициент таликовости для обследованных сосновых и сосново-лиственничных лесов равен 26.0%. Мощность выявленных таликов изменяется от 3.5 до 24 м.

Пространственное распределение таликов неоднородно. В центральной части района исследований коэффициент таликовости составил 15.6%, в западной - 14.6%, тогда как в восточной и южной частях он достигает 38.1%. Наиболее высокие значения характерны для правобережных песчаных массивов и террас Лены, где зафиксированы также максимальные мощности таликов. На отдельных участках выявлены протяженные талики шириной в сотни метров, состоящие из нескольких водопроводящих каналов, что согласуется с данными бурения и термометрического мониторинга на нескольких хорошо исследованных ключевых участках [8].

Таблица 1

Коэффициент таликовости по результатам георадиолокационных профилирований

| Район исследований | Количество профилей | Общая протяженность профилей, м | Протяженность таликов, м | K, % |
|---|---|---|---|---|
| Центральная часть | 40 | 12 726 | 1 988 | 15.6 |
| Западная часть | 37 | 11 020 | 1 610 | 14.6 |
| Восточная и южная часть | 53 | 21 215 | 8 089 | 38.1 |
| Всего | 130 | 44 961 | 11 687 | 26.0 |

**Обсуждение**

Полученные данные показывают, что сосновые и сосново-лиственничные леса Центральной Якутии характеризуются высоким коэффициентом таликовости, однако в масштабе региона их вклад ограничен площадью распространения этих ландшафтов. По мерзлотно-ландшафтной карте республики Саха (Якутия) они занимают около 12.5% площади Центральной Якутии [10], тогда как преобладают лиственничные леса и редколесья. Следовательно, даже при среднем K=26.0% суммарная доля надмерзлотных субаэральных таликов в масштабе региона составляет порядка 3.3%.

Это согласуется с известными особенностями температуры пород в различных ландшафтах региона. Для среднетаежных условий сплошных ММП в сосновых лесах температуры пород близки к 0...-0.5 °С, в сосново-лиственничных лесах – к -0.5...-1 °С, тогда как в лиственничных лесах они заметно ниже [10]. Песчаные отложения характеризуются самой высокой среднегодовой температурой на глубине 10 м, вплоть до положительной (+0.9 °С), а также наибольшей мощностью слоя сезонного протаивания (до 4.2 м) по сравнению с породами другого состава [11, 12]. При этом на мониторинговых участках с распространением таликов не фиксируются тенденции к повышению температуры пород за последние десятилетия [11, 12], что говорит об устойчивости этих образований в современных условиях.

Особое значение имеет юго-восточный сектор района исследований, включающий правобережные террасы Лены. Именно здесь ранее были описаны участки активных термосуффозионных процессов, межмерзлотных водоносных систем и разгрузки подземных вод [3, 4, 7, 13]. Высокие значения коэффициента таликовости в этой части региона подтверждают, что песчаные массивы Бестяхской террасы и близких к ней морфолитологических обстановок являются зонами широкого распространения надмерзлотных и межмерзлотных таликов и подземных вод различных типов.

С гидрологической точки зрения выявленные талики важны не только как локальные геофизические объекты. Они обеспечивают накопление и транзит пресных надмерзлотных вод, подпитывают межмерзлотные горизонты и могут поддерживать сток малых рек в периоды летней и зимней межени [1, 2, 8, 9]. Следовательно, региональная оценка их распространения необходима как для интерпретации современных гидрологических наблюдений, так и для прогноза изменений водного режима малых водосборов при дальнейшем потеплении климата.

**Заключение**

Георадиолокационное профилирование позволило впервые выполнить региональную количественную оценку распространения надмерзлотных субаэральных таликов в сосновых и сосново-лиственничных лесах Центральной Якутии. Средний коэффициент таликовости составил 26.2%, при этом его величина изменяется от 14.6-15.6% в центральной и западной частях до 38.6% на востоке и юге района исследований. Наиболее широкое развитие таликов приурочено к правобережным песчаным террасам Лены. Несмотря на ограниченную долю надмерзлотных субаэральных таликов в общей структуре территории, они представляют собой важный элемент криогидрогеологической системы Центральной Якутии и должны учитываться при оценке источников питания рек, озер и подземных вод.

Исследование выполнено в рамках проекта НИОКТР 126020516689-6 "Подземные воды криолитозоны, особенности их взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами".

***Литература***

1 Павлова Н.А., Колесников А.Б., Ефремов В.С., Шепелев В.В. Химический состав подземных вод межмерзлотных таликов в Центральной Якутии // Водные ресурсы. - 2016. - Т. 43. - № 2. - С. 216-227.

2 Павлова Н.А., Шепелев В.В., Галанин А.А., Ефремов В.С. Гидрохимия подземных вод надмерзлотно-межмерзлотного стока на участках их разгрузки (Центральная Якутия) // Водные ресурсы. - 2020. - Т. 47. - № 4. - С. 391-401.

3 Оленченко В.В., Гагарин Л.А., Христофоров И.И., Колесников А.Б., Ефремов В.С. Строение участка развития термосуффозионных процессов в пределах Бестяхской террасы реки Лены по геофизическим данным // Криосфера Земли. - 2017. - Т. 21. - № 5. - С. 16-26.

4 Семерня А.А., Гагарин Л.А., Бажин К.И. Мерзлотно-гидрогеологические особенности участка распространения межмерзлотного водоносного комплекса в районе источника Ерюю (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. - 2018. - Т. 22. - № 2. - С. 29-38.

5 Бойцов А.В. Условия формирования и режим склоновых таликов в Центральной Якутии // Криогидрогеологические исследования. - Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1985. - С. 44-55.

6 Пономарева О.Е. Водоносные талики в песчаных отложениях бассейна нижнего течения р. Вилюй // Криосфера Земли. - 1999. - Т. 3. - № 4. - С. 84-89.

7 Гагарин Л.А., Семерня А.А., Лебедева Л.С. Оценка термосуффозионных процессов в Центральной Якутии на примере участка Улахан-Тарын // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. - 2016. - № 3. - С. 252-262.

8 Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Данилов К.П. Надмерзлотные субаэральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. - 2019. - Т. 23. - № 1. - С. 40-50.

9 Лебедева Л.С., Шамов В.В., Христофоров И.И., Павлова Н.А., Данилов К.П. Роль надмерзлотных субаэральных водоносных таликов в питании двух малых притоков реки Лены по данным натурных наблюдений // Криосфера Земли. - 2025. - Т. 29. - № 1. - С. 37-51.

10 Fedorov A.N., Torgovkin Ya.I., Vasilyev N.F., Shestakova A.A., Konstantinov P.Yu., Basharin N.I. et al. Permafrost-Landscape Map of the Republic of Sakha (Yakutia) // Geosciences. - 2018. - Vol. 8. - No. 12. - Art. 465.

11 Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Балута В.И. Многолетняя изменчивость термического состояния верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. - 2023. - Т. 28. - № 3. - С. 398-414.

12 Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Федоров А.Н. Оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов к современному потеплению климата (на примере Центральной Якутии) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2025. – Т. 30. – №3. С. 376–391.

13 Гагарин Л.А., Оленченко В.В., Павлова Н.А. О причинах затухания термосуффозионных процессов на Бестяхской террасе р. Лены в Центральной Якутии // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. - 2023. - № 5. - С. 28-42.

## МЕХАНИЗМ ПЕРЕНОСА ВЕЩЕСТВА ПРИ РАЗВИТИИ ТЕРМОДЕНУДАЦИИ НА ЦЕНТРАЛЬНОМ ЯМАЛЕ

***О.В. Левочкина[1], Б.Г. Ваништейн[2], Ю.А. Дворников[1,3], А.О. Киль[2], М.О. Лейбман[1], П.Б. Семенов[2], А.В. Хомутов[1]***

*[1]Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия*

*[2]ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия*

*[3]Лаборатория Smart Urban Nature, РУДН, Москва, Россия*

*[4]МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

Особенности рельефа и криогенного строения пород Центрального Ямала обуславливают широкое развитие процесса термоденудации в этом районе и формирование характерных геоморфологических образований – термоцирков. Термоцирки расположены в основном по берегам озерных котловин, и в ходе своего развития вносят существенный вклад в изменение химического состава озерных вод и состава донных отложений.

Исследование развития термоцирков и их влияния на водные экосистемы проводится на Центральном Ямале в пределах научно-исследовательского стационара «Васькины Дачи». В ходе многолетних наблюдений на этом участке сотрудниками Института криосферы Земли были получены обширные данные о динамике сезонно-талого слоя и температурном режиме, скорости развития термоцирков [1,2,3], показана их связь с химическим составом озерных вод [4,5]. Однако сам механизм переноса вещества в ходе развития термоцирков остается малоизученным. Количественная оценка преобразования вещества в ходе переноса в замкнутой системе «водосбор-озеро» позволит продвинуться в понимании региональных особенностей геохимического состава пород и даст возможность идентифицировать в донных отложениях источники сноса.

С 2012 года [6] наблюдается массовая активизация процесса термоденудации на Центральном Ямале, что позволяет в настоящее время использовать развивающиеся термоцирки в качестве «природной лаборатории» для исследования механизма переноса вещества. С этой целью были выбраны несколько термоцирков, находящихся на разных стадиях развития, в пределах которых производится отбор проб донных отложений, воды, подземных льдов и вмещающих их пород. В лаборатории ВНИИОкеангеология определялся гранулометрический состав отложений,

минеральный, элементный, ионный состав, содержание органического вещества, а также химический состав вод озер и временных водотоков. Часть результатов представлена в настоящей работе.

Для анализа переноса вещества в пределах термоцирков выделяются три зоны: стенка термоцирка (источник), ложе (зона транзита) и озеро (зона аккумуляции).

В исследуемом районе в обнажениях стенок термоцирков вскрываются пластовые льды, повторно-жильные льды, льдистые многолетнемерзлые породы. В ходе их оттаивания и разрушения формируется первичный объем подвижного вещества. В пределах стенок термоцирков производилась зачистка, криолитологическое описание и послойный отбор проб.

Зона транзита (ложе термоцирков) является наиболее сложной с точки зрения количественной оценки, но именно здесь происходит первичная транспортировка вещества, его перераспределение, трансформация и концентрация. Транспортировка вещества происходит путем гравитационного (оползни, осыпи, грязевые потоки) и водного (временные водотоки) переноса. Для оценки состава переносимого вещества отбирались пробы воды из ручьев и отложений с поверхности стекающего по склону материала.

Зона аккумуляции является конечной точкой перемещения вещества в исследуемой системе. Оценка производилась путем анализа динамики химического состава озерных вод (ионный состав и содержание растворенного органического углерода) в рамках многолетнего мониторинга [5] и анализа состава донных отложений озер вблизи берега.

В ходе полевых работ 2023 г. было выбрано 4 объекта в пределах участка исследований: три термоцирка на различных стадиях развития (ТЦ-2а, ТЦ-5, Оползень), а также озеро, по берегам которого в настоящее время не развиваются криогенные процессы (Озеро 6) [7] .

В целях выявления особенностей распределения вещества в различных зонах замкнутой системы был проведен многомерный статистический анализ элементного, гранулометрического и минералогического состава для всей совокупности образцов из стенок, ложа термоцирков и донных отложений озер. В программной среде R проведен кластерный анализ методом главных компонент (Рис. 1), рассчитаны коэффициенты корреляции Спирмена, построены графики связей между концентрациями элементов: Sr, Zn, Cu, Ni, $Fe_2O_3$, MnO, Cr, V, $TiO_2$, Zr, CaO, Ba (Рис. 2).

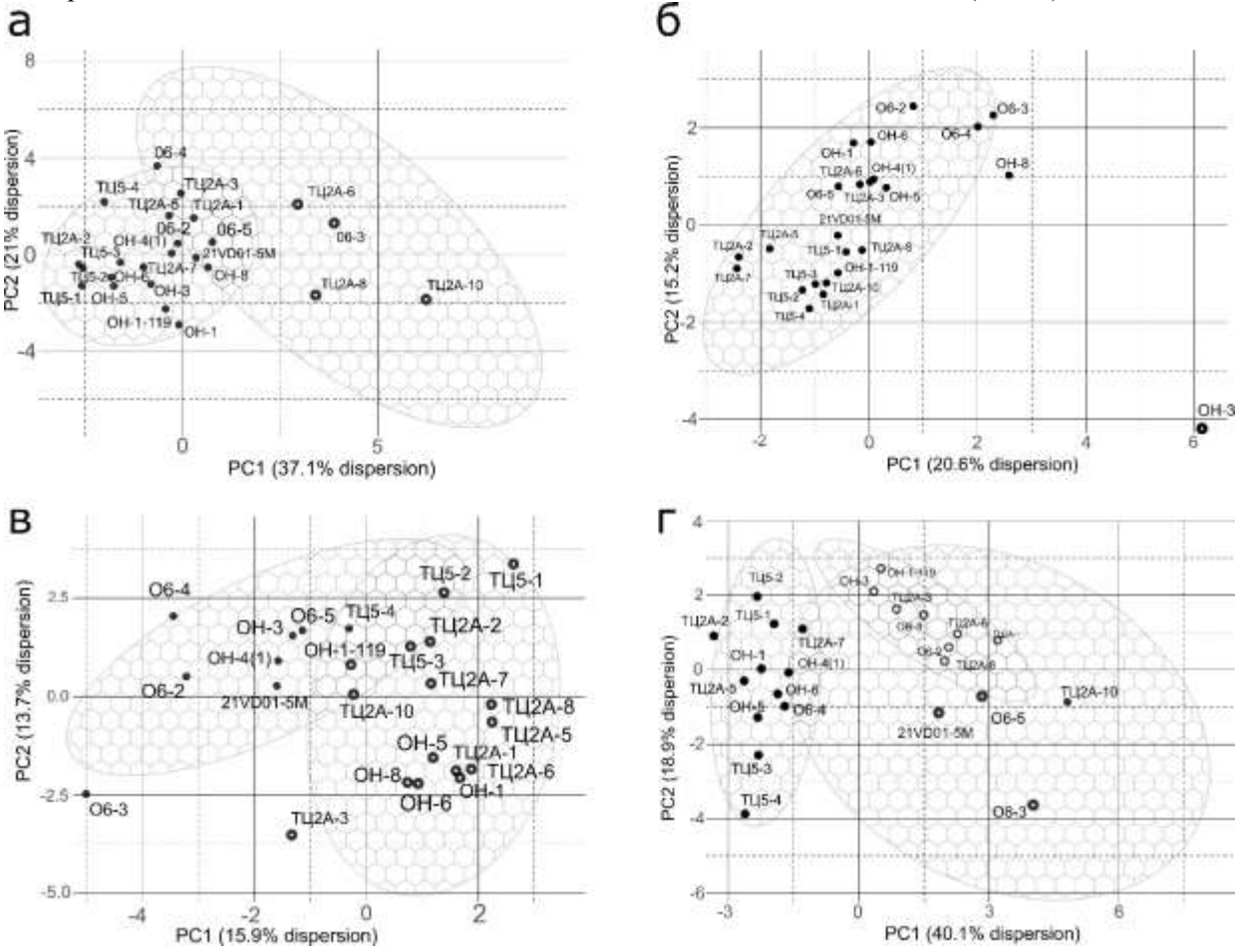



Рис. 1. Результаты кластерного анализа данных методом главных компонент:

а – гранулометрические фракции; б – минералы легкой фракции; в – минералы тяжелой фракции; г – элементный состав

Дисперсия фракционного гранулометрического состава характеризуется двумя кластерами: первый отличается преобладанием фракции 0.05-0.01 мм (40.2 %, алеврит), содержание пелита (<0.01 мм): 14.5 %, песка (>0.063 мм): 33.4 %. Он объединяет большинство образцов из стенок термоцирков, их ложа и озерных алевритов. Относительно низкая дисперсия в пределах кластера может свидетельствовать о генетической связи между структурными элементами системы. Кластер 2 характеризуется преобладанием фракции 0.16-0.10 (44.1 %, песок мелкозернистый), содержание пелита (<0.01 мм): 8.4 %, песка (>0.063 мм): 67.6 %. Он объединяет образцы поверхностных отложений тылового шва, ложа термоцирка и озерного осадка в пределах термоцирка ТЦ-2а, а также песчаные озерные отложения из озера 6, подстилающие верхний слой донных отложений (Рис. 1а), что показывает четкую связь переноса песчаного осадка от тылового шва термоцирка в озеро.

Минералогический состав легкой фракции аппроксимируется двумя кластерами с резко различной дисперсией (Рис. 1б). Почти все образцы сгруппированы в один кластер, что может свидетельствовать об отсутствии фракционирования легких минералов в процессе переотложения. Состав тяжелой минеральной фракции характеризуется двумя кластерами, при этом дисперсия закономерно изменяется от образцов из стенок и ложа термоцирка к озерным алевритам (понижается) и пескам (растет), что может говорить о слабом фракционировании тяжелых минералов в процессе транспорта и аккумуляции (Рис. 1в).

Вариабельность элементного состава представлена тремя кластерами (Рис. 1г). Первые два отчетливо различимы, характеризуются низкой дисперсией, объединяют образцы из стенок и ложа термоцирков, а также донные алевриты прибрежной части озер. Третий кластер с высокой дисперсией представляет пылевато-песчаные и песчаные прибрежные озерные осадки в пределах конуса выноса. Дисперсия элементного состава наилучшим образом выявляет генетическую связь материала-источника и поверхностных осадков зоны финальной аккумуляции.

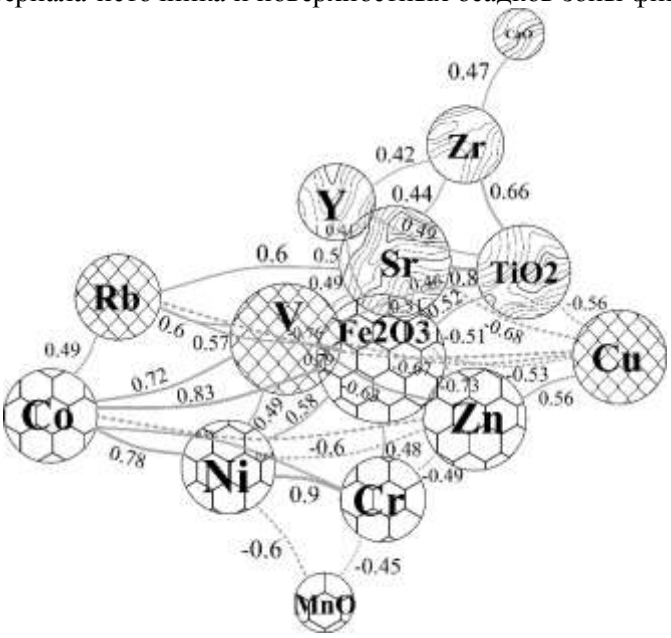



Рис. 2. График корреляционных связей Спирмена для концентраций элементов при $|\rho|>0.3$ и $p<0.05$. Кругами с тремя типами штриховок показаны три группы элементов, радиусы кругов пропорциональны числу связей. Непрерывные линии обозначают положительные, пунктирные – отрицательные связи. Числовые значения над линиями связей соответствуют коэффициентам корреляции Спирмена

С помощью корреляционных матриц и диаграмм Спирмена удалось показать тесную связь большинства элементов (Sr, $TiO_2$, Y, Zr, V, $Fe_2O_3$) с одним минеральным источником. Высокие значения положительных связей характеризуют также группу (Co, Ni, Cr и $Fe_2O_3$). Особо выделяется медь, обнаруживающая устойчивые обратные связи с первой группой элементов и слабую положительную – лишь с цинком, а также MnO. Предполагается, что Cu и Mn связаны с самостоятельным источником и могут характеризовать как морские отложения, так и поверхностное техногенное загрязнение.

Анализ геохимического состава отложений выявил региональные особенности участка исследований, в том числе повышенное содержание ряда металлов, которое ранее не выявлялось. Была произведена первичная оценка вариабельности гранулометрического, элементного и минералогического состава отложений. Статистический анализ образцов выявил закономерности распределения вещества в пределах выделенных зон переноса материала и требует дополнительных исследований.

Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 126022618021-5).

***Литература***

1 Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Губарьков А.А., Хайруллин Р.Р. Мониторинг термоденудационных процессов на полуострове Ямал полевыми и дистанционными методами //Современные проблемы географии и геологии. – 2017. – С. 190-194.

2 Хомутов А.В., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А. Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг. Проблемы Арктики и Антарктики. 2024;70(2):222-237

3 Тарасевич И.И., Кизяков А.И., Лейбман М.О., Письменюк А.А., Нестерова Н.Б., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Динамика термоденудации на Центральном Ямале за 2017-2021 гг. по данным ежегодного мониторинга // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 9, 2022, С. 253–257.

4 Дворников Ю.А., Лейбман М.О., Хайм Б., Хомутов А.В., Рёсслер С., Губарьков А.А. Термоденудация на Ямале-источник увеличения концентрации растворенного органического вещества в озерах // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21. – №. 2. – С. 33-42.

5 Факащук Н. Ю., Дворников Ю.А., Опокина О.Л., Хомутов А.В. Влияние процессов термоденудации на ионный состав малых озер Центрального Ямала // Криосфера Земли. – 2023. – Т. 27. – № 4. – С. 14-23. – DOI 10.15372/KZ20230402. – EDN QSJNXA.

6 Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факащук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 99-109.

7 Левочкина О.В., Лейбман М.О.., Тарасевич И.И. и др. Воздействие склоновых криогенных процессов на водные экосистемы Центрального Ямала // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-запада России. – 2023. – № 10. – С. 175-180. – DOI 10.24412/2687-1092-2023-10-175-180. – EDN NJKYBL.

## ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ МЕТАНА И ЕГО ОСОБЫХ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ГЛОБАЛЬНЫЙ КЛИМАТ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 20 ЛЕТ

***Ч. Ли[1], В.Г. Чеверев[1], А.В. Брушков[1], А.В. Соколов[2]***

*[1] Геологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова*

*[2] ООО «НИИИТ», Москва*

**Введение**

Изучение выбросов метана в контексте глобального изменения климата имеет особую актуальность, поскольку метан относится к наиболее мощным парниковым газам (рис. 1) [1-3]. За последние десятилетия концентрация этого газа в атмосфере устойчиво растет, что приводит к усилению парникового эффекта и ускорению глобального потепления. Потенциал метана, вызывающего потепление, примерно в 25 раз превышает аналогичный показатель углекислого газа за столетний период, поэтому даже относительно небольшие выбросы способны оказать заметное влияние на климатическую систему Земли.

В статьях авторов [4] проводится анализ природных и антропогенных источников метана, а также факторов, определяющих динамику его выбросов за последние 20 лет. Особое внимание уделяется роли сельскохозяйственной деятельности, промышленных процессов и утилизации отходов как основным источникам антропогенного происхождения. Кроме того, рассматриваются современные

подходы к снижению эмиссий метана, направленные на смягчение последствий изменения климата и достижение целей международных соглашений.

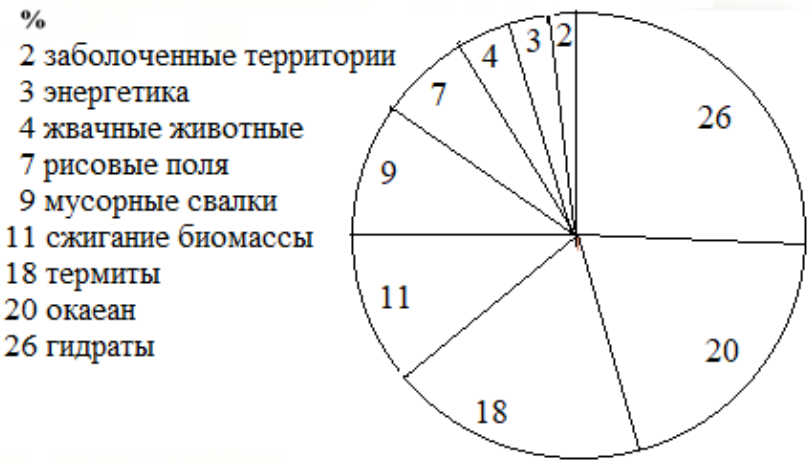



Рис. 1. Основные источники метана в атмосфере Земли в их вклад в суммарную эмиссию. (https://www.vedomosti.ru/ecology/climate/articles/2022/12/12/954783-metan-nedolgovechnii-no-kovarnii)

**Источники выбросов метана**

Выбросы метана в атмосферу формируются за счет природных и антропогенных процессов, причем соотношение между ними значительно изменилось за последние два десятилетия. К природным источникам относятся болота и влажные экосистемы, где анаэробное разложение органического вещества под действием микроорганизмов приводит к активному образованию и выделению метана. Также значительный вклад в общий баланс вносят геологические процессы, включая подводные гидраты метана, которые представляют собой стабильные соединения, способные высвобождать газ при изменении температуры или давления [5].

Основную долю в современном росте концентрации метана дают антропогенные источники, ставшие доминирующими за последние 20 лет. Наиболее значимым сектором является сельское хозяйство, где выбросы связаны с процессами пищеварения у жвачных животных и выращиванием риса на затопленных полях. Добыча, транспортировка и переработка нефти и газа сопровождаются утечками метана на всех стадиях технологического цикла. Третьим важным источником являются свалки бытовых и промышленных отходов, на которых органические вещества разлагаются без доступа кислорода, выделяя метан в атмосферу [6]. В результате за последние два десятилетия концентрация метана в атмосфере выросла примерно на 10%, что напрямую связано с увеличением антропогенной нагрузки.

**Физические и химические свойства метана и его роль в климатической системе**

Метан представляет собой простейший углеводород, бесцветный газ без запаха при нормальных условиях. Его основные физические характеристики включают температуру кипения −161,5 °C, плотность 0,656 г/л при 0 °C и атмосферном давлении, а также низкую растворимость в воде. Высокая теплоемкость метана обуславливает его способность эффективно удерживать тепло в атмосфере, что делает его активным участником радиационного баланса Земли [7].

По химическим свойствам метан является горючим газом, способным реагировать с кислородом с образованием углекислого газа и воды. В атмосфере метан сохраняет стабильность в течение примерно 12 лет, после чего разрушается в реакциях с гидроксильными радикалами. Эти реакции определяют продолжительность воздействия метана на климат и влияют на химический состав атмосферы [8]. Метан активно поглощает инфракрасное излучение, усиливая парниковый эффект; за 20-летний период он примерно в 84 раз эффективнее удерживает тепло, чем углекислый газ, что делает его критически важным для краткосрочного прогноза потепления.

Одним из важных побочных эффектов присутствия метана в атмосфере является образование тропосферного озона, который также относится к парниковым газам и усугубляет негативные климатические последствия. Таким образом, метан оказывает комплексное воздействие на климатическую систему, усиливая потепление как напрямую, так и опосредованно через формирование других парниковых веществ.

**Влияние метана на глобальный климат и экстремальные погодные явления**

Рост концентрации метана в атмосфере за последние 20 лет привел к значительному усилению парникового эффекта и повышению среднеглобальной температуры воздуха и поверхности океанов.

Это способствует таянию ледников и вечной мерзлоты, повышению уровня моря, изменению режима осадков и нарушению естественных экосистем. Многочисленные исследования подтверждают, что увеличение выбросов метана напрямую связано с ростом частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений, включая сильные наводнения, длительные засухи и мощные ураганы [9].

Климатические модели, учитывающие динамику метана и его взаимодействие с другими компонентами атмосферы, показывают, что сохранение современных тенденций выбросов приведет к дальнейшему ускорению глобального потепления. Воздействие метана сказывается не только на температурном режиме планеты, но и на качестве воздуха, поскольку образование озона негативно влияет на здоровье населения и состояние растительных и животных сообществ [10]. Все эти факторы делают снижение выбросов метана одним из приоритетов современной международной климатической политики.

**Меры по снижению выбросов метана**

Для ограничения негативного влияния метана на глобальный климат во всем мире разрабатываются и внедряются комплексные технологические и политические меры. В сельском хозяйстве применяются улучшенные методы управления навозом, использование специальных кормовых добавок, снижающих выделение метана жвачными животными, а также оптимизация технологий выращивания риса. В нефтегазовой отрасли активно внедряются системы улавливания и утилизации метана, предотвращающие его попадание в атмосферу. На свалках организуются сбор и сжигание метана с одновременным получением дополнительной энергии.

На международном уровне важную роль играют соглашения, такие как Киотский протокол и Парижское соглашение, направленные на сокращение общих выбросов парниковых газов. Национальные программы поддерживают внедрение экологичных технологий, а экономические механизмы, включая налоги на выбросы и субсидии на чистые производства, стимулируют предприятия к снижению эмиссий. Комплексное применение этих мер позволяет постепенно снижать влияние метана на глобальный климат и приближать достижение целей по ограничению потепления.

**Трансформация механизмов выбросов метана при поверхностном замерзании почвы и воды**

Для сбора данных можно использовать сенсоры для изменения концентрации метана в воде, например, газоанализатор и инверсионные камеры. Также для исследования состава воды и донных отложений можно использовать пробоотборники. Для измерения температуры воды и льда – специальные термометры. Также применяется изотопный метод при наблюдении за пространственно-временным распределением атмосферного $CH_4$ [11].

Рассмотрим детально механизм выброса $CH_4$ при поверхностном замерзании водоема осенью:

1. Начало осеннего сезона, что ведет к понижению температуры воздуха.
2. Понижение температуры воздуха ведет к постепенному понижению температуры воды.
3. Понижение температуры воды приводит к замерзанию водоема и началу процесса образования льда на поверхности водоема.
4. Ледяной барьер на поверхности водоёма приводит к ограничению газообмена между водой и атмосферой.
5. Из-за ледяного барьера происходит естественное накопление $CH_4$ в воде и в донных отложениях.
6. Смена температуры приводит к таянию льда и образованию трещин ледяного покрова на водоеме.
7. Происходит выброс $CH_4$ в атмосферу через трещины во льду.
8. Воздействие метана на атмосферу, увеличение его концентрации в атмосфере, что способствует парниковому эффекту.

Представим этот механизм в виде наглядной схемы (рис. 2).

Поскольку ранее мы выяснили, что механизм выброса $CH_4$ при поверхностном замерзании почвы является таким же, можно отнести описание и схему и к этой части экосистемы. Вода на рисунке может быть заменена на почву, под которой находятся скопления метана. В месте разлома или оттаивания льда происходит выброс $CH_4$ [12].

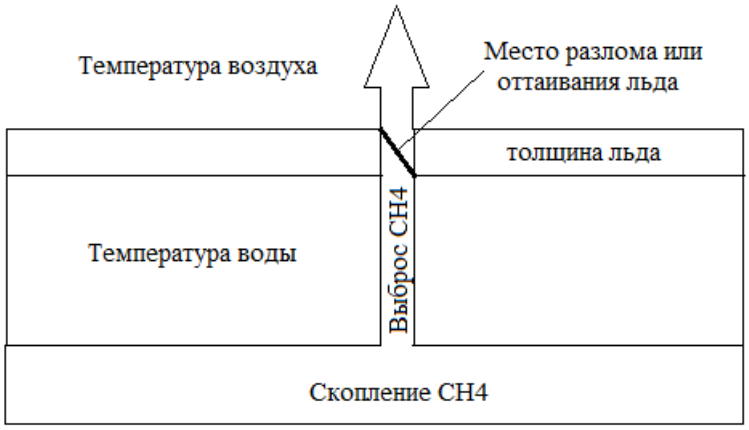



Рис. 2. - Механизм выброса метана при поверхностном замерзании водоема

**Заключение**

За последние двадцать лет метан стал одним из наиболее влиятельных факторов, определяющих динамику глобального климатического изменения. Несмотря на то, что его концентрация в атмосфере значительно ниже, чем у углекислого газа, уникальные физические и химические свойства обеспечивают метану исключительно высокий парниковый потенциал. За рассматриваемый период концентрация метана выросла на 10%, причем основным драйвером этого процесса стали антропогенные выбросы из сельского хозяйства, нефтегазовой промышленности и полигонов утилизации отходов.

Метан не только напрямую усиливает парниковый эффект, повышая температуру суши и океанов, но и способствует образованию тропосферного озона, дополнительно усугубляя процессы глобального потепления. Его воздействие проявляется в участии экстремальных погодных явлений, создающих серьезные угрозы для экосистем и человеческого общества. Климатические модели свидетельствуют, что без принятия срочных и масштабных мер тенденция к росту концентрации метана сохранится, что приведет к дальнейшему ускорению изменения климата.

Снижение выбросов метана с помощью технологических инноваций, международных соглашений и экономических стимулов является необходимым условием для достижения целей Парижского соглашения и стабилизации климатической системы. Только комплексное сокращение эмиссий метана наряду с ограничением других парниковых газов позволит замедлить темпы потепления, смягчить его негативные последствия и обеспечить устойчивое развитие человечества в долгосрочной перспективе.

В ходе исследования выявлены основные факторы, влияющие на интенсивность выбросов метана при поверхностном замерзании почвы или водной поверхности во время осенне-зимнего периода: температура, содержание органических веществ, уровень воды, тип среды, состояние микробиоты, толщина льда и уровень осадков. Показано, что низкие температуры замедляют метаногенез, а высокие - ускоряют и способствуют выбросу газа. У становлено, что факторы, влияющие на метаногенез как в почве, так и в водоемах, имеют схожее происхождение, что обусловлено их нахождением в единой экосистеме. Исследование позволило разработать методы контроля и управления метановыми выбросами при сезонном похолодании. Показана эффективность использования современного программного комплекса Solidworks для моделирования процессов метаногенеза, а также применения акустического метода и дистанционного зондирования для определения выбросов метана.

Основным итогом данного исследования является визуализация механизма метановых выбросов при замерзании, с демонстрацией сути выбросов большого количества $CH_4$, на основе данных о температуре, толщине льда, осадках, микробном содержании воды или почвы. Систематизация и анализ данных о влиянии набора этих факторов способствует глубокому пониманию механизма выброса метана в каждой конкретной экосистеме.

Полученные результаты имеют важное значение для разработки стратегий мониторинга и управления климатическими рисками, включая как стратегию уменьшения последствий (митигации), так и стратегию адаптации к новым условиям. Исследование доказывает необходимость дальнейшего изучения механизмов выбросов метана для эффективного решения глобальных экологических и климатических проблем [12].

***Литература***

1. IPCC. Global Warming of 1.5 oC. Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change (2018).

2. Hermanson L, et al. WMO global annual to decadal climate update: a prediction for 2021–25. Bull. Am. Meteorol. Soc. 2022;103:E1117–E1129. Doi: 10.1175/BAMS-D-20-0311.1. [CrossRef] [Google Scholar]

3. Masson-Delmotte, V. Et al. Climate change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press (2021).

4. Ли Ч., Чеверев В.Г., Соколов А.В. Влияние выбросов метана и его особых физических и химических свойств на глобальный климат за последние 20 лет, Процессы в геосредах, издательство ООО "Кватернион" (Москва), 2024, том 3, № 41, с. 2640-2646

5. UNEP. Global methane assessment: benefits and costs of mitigating methane emissions. UNEP (2021).

6. Oeste FD, de Richter R, Ming T, Caillol S. Climate engineering by mimicking natural dust climate control: the iron salt aerosol method. Earth Syst. Dyn. 2017;8:1–54. Doi: 10.5194/esd-8-1-2017. [CrossRef] [Google Scholar]

7. Ming T, Richter R, de, Dietrich Oeste F, Tulip R, Caillol S. A nature-based negative emissions technology able to remove atmospheric methane and other greenhouse gases. Atmos. Pollut. Res. 2021;12:101035. Doi: 10.1016/j.apr.2021.02.017. [CrossRef] [Google Scholar]

8. Wang X, et al. The role of chlorine in global tropospheric chemistry. Atmos. Chem. Phys. 2019;19:3981–4003. Doi: 10.5194/acp-19-3981-2019. [CrossRef] [Google Scholar]

9. Jackson RB, et al. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. Environ. Res. Lett. 2020;15:71002. Doi: 10.1088/1748-9326/ab9ed2. [CrossRef] [Google Scholar]

10. Nisbet EG, et al. Methane mitigation: methods to reduce emissions, on the path to the paris agreement. Rev. Geophys. 2020;58:e2019RG000675. Doi: 10.1029/2019RG000675. [CrossRef] [Google Scholar]

11. Mikhailov-Fletcher S., Tans P., Brachwiler L., Miller J., Neumann M. CH4 sources estimated from atmospheric CH4 observations and its C-13/C-12 isotope ratios: 1. Inverse modeling of source processes // Global Biogeochemical Cycles. 2004. Vol. 18. № 18.

12. Ли Ч., Брушков А.В., Чеверев В.Г., Ло Ю., Соколов А.В. Механизм выбросов метана при поверхностном замерзании осенью // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.74170 EDN: ZDFPCD URL: https://nbpublish.co/library_read_article.php?id=74170.

# ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩЕГО СЛОЯ НА ГЛУБИНУ ОТТАИВАНИЯ В ОСНОВАНИИ ДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ

***А.В. Литовко[1], А.Д. Набережный[1], П.С. Заболотник[1], Л.Г. Иванова[1], Я.Э. Бегич[2], А.Ф. Михайлов[2]***

*[1] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

*[2] ООО «ПЕНОПЛЭКС СПб»*

Создание долговечных автомобильных дорог в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов предполагает использование системных решений, в том числе и с применением эффективных утеплителей. Применяемые в настоящее время методы проектирования дорожных насыпей в зоне вечной мерзлоты сводятся к трем основным принципам проектирования. В условиях центральной Якутии, первый принцип проектирования дорожных конструкций применим на участках низкотемпературной вечной мерзлоты, сложенной сильнопросадочными и глинистыми грунтами влажностью ниже границы текучести в деятельном слое при капитальном типе дорожных одежд, а также при проявлении на территории таких мерзлотных процессов и явлений, как бугры пучения, термокарст, морозобойное растрескивание, наличие в толще погребенных льдов различного генезиса и предусматривает обеспечение поднятия верхнего горизонта вечной мерзлоты (ВГВМ) не ниже подошвы насыпи (сезонное оттаивание ниже подошвы насыпи исключается) и сохранение его на этом уровне в течение всего периода эксплуатации дороги (расчетное состояние грунтов основания

насыпи – мерзлое). Для реализации первого принципа требуется, как правило, либо сооружение высоких насыпей (3-5 м в зависимости от условий строительства), либо применение теплоизолирующих материалов [6]. Данные работы выполнялись в рамках бюджетного проекта лаборатории инженерной геокриологии и хоздоговора. В табл. 1 представлены результаты мониторинга глубины оттаивания в основании дорожной насыпи, а на рис. 1 – Поперечный профиль участка «Илбенге».

Таблица 1

Динамика глубины оттаивания в основании дорожной насыпи

| Год | Глубина оттаивания, $d_{th}$ ,м, в скважинах | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | С-1И | С-2И | С-3И | С-4И | С5И |
| 2021 | 3,5 | 3,5 | 4,0 | 3,5 | - |
| 2022 | 3,5 | 2,0 | 4,0 | 4,0 | 5,0 |
| 2023 | - | 1,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 |
| 2024 | 3,5 | 1,5 | 2,5 | 4,0 | 6,0 |
| 2025 | 3,0 | 1,5 | 2,5 | 3,0 | 5,0 |

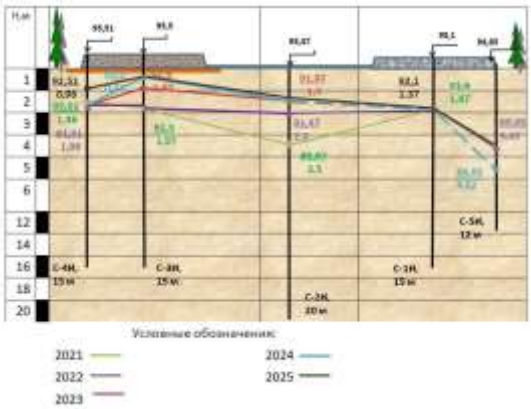



Рис. 1. Поперечный профиль участка «Илбенге»

***Литература***

1 Пархоменко Н.А., Баженов П.Е., Кузенков А.В. Исследование технологии возведения насыпи при строительстве автомобильных дорог к кусту скважин в особо сложных условиях севера // Геодезия, землеустройство и кадастры: проблемы и перспективы развития, посвященная 100-летию советской геодезии и картографии : Сборник материалов I Международной научно-практической конференции. 2019. С. 94–99.

2 Трофимов В.И. Повышение эффективности транспортного строительства в Арктических зонах // Научный вестник Арктики. 2018. № 3. С. 31–39.

3 Евтюков С.А., Медрес Е.П., Медрес Е.Е., Матюсова Е.Ю. О проблеме проектирования и расчета конструкции облегченных насыпей из пенополистирольных блоков на слабых грунтах // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 271–276.

4 Трофимов В.И. Дорожные насыпи повышенной устойчивости на высокольдистых грунтах // Научный вестник Арктики. № 4. С. 5–11.

5 Чжан А.А., Шестернев Д.М. Мероприятия по стабилизации температурного поля в основании насыпи Амуро-Якутской железной дороги // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2017. № 07(3). С. 43–53.

6 Ашпиз Е.С., Хрусталев Л.Н. Предотвращение деградации многолетнемерзлых грунтов в основании насыпей железных дорог // Криосфера Земли. 2020. № 5(24). С. 45–50. DOI:10.21782/KZ1560-7496-2020-5(45-50).

7 https://vsedlyastroiki.ru/ru/dom-dacha/teploizolyatsiya-dorojnyih-konstruktsiy/.

## МНОГОЛЕТНЯЯ МЕРЗЛОТА И СОЦИАЛЬНО – ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ЮГА ПРЕДБАЙКАЛЬЯ (БАЯНДАЕВСКИЙ РАЙОН)

***Н.В. Макарова[1], Н.Н. Воропай[1,2] , Д.В. Кобылкин[1]***
*[1]Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск*
*[2]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск*

Территория юга Предбайкалья входит в основную полосу расселения и хозяйственного освоения территории России, с относительно высокой плотностью населения. Благоприятные природные условия послужили ключевым фактором для формирования и развития хозяйственной деятельности [1]. Особенностью территории является наличие криолитозоны, относящейся к южной зоне распространения многолетнемерзлых пород, что накладывает своеобразный отпечаток на ландшафтную структуру и ведение хозяйства. Климатические тренды, направленные в сторону потепления приводят к изменению температурного режима многолетнемерзлых пород, активизации экзогенных процессов (заболачивание, термокарст, термоэрозия, полигональные формы рельефа и т.д.). Соответственно высокая антропогенная нагрузка влечет за собой изменения компонентов геосистем. Хозяйственная деятельность в регионе должна быть сопряжена с учетом необратимости изменений в криолитозоне. Регулярная распашка, прокладка инженерных коммуникаций, дорожное строительство, лесозаготовки увеличивают мощность деятельного слоя и приводят к экзогенному рельефообразованию в криолитозоне.

Предбайкалье занимает юго-восточную область Среднесибирского плоскогорья, обрамляет западное побережье о. Байкал, по топонимическим традициям получила логичное наименование. По территории Предбайкальской впадины проходят границы максимального распространения многолетней мерзлоты в позднем плейстоцене. Южная часть территории Предбайкальской впадины до истока р. Ходонца находиться в области сезонного промерзания горных пород, таликов. Многолетняя мерзлота распространена здесь небольшими островами с перелетками. На всей остальной территории Предбайкальской впадины мощность криолитозоны менее 100 м и также многолетняя мерзлота имеет островной тип распространения с таликами. Но стоит отметить, что процент территории с островным распространением многолетнемерзлых пород уменьшается при движении к северу [2]. Образование системы трещин и полигонов в рельефе приходиться на сартанское время в позднем плейстоцене за счет сильного похолодания и аридизации климата. В результате вытаивания мерзлоты в голоцене полигоны трансформировались в бугры, а трещины – в западины [3]. Климатические условия Предбайкалья обусловили широкое распространение многолетней мерзлоты, морозного выветривания, процессов оттаивания и замерзания грунтов. В районах распространения мерзлоты морозное выветривание коренных пород резко преобладает по активности и распространению над другими типами выветривания. Ему особенно благоприятствуют резкие суточные колебания температур, более позднее установление снежного покрова, чем наступление морозных погод, наличие бесснежных участков в степях. На плоских участках с многолетней мерзлотой связаны процессы полигональной дифференциации материала. В результате формируется полигональный рельеф, состоящий из многоугольников, в центре которых скапливается дёрн, а по периферии формируются бордюры из мелкообломочного материала.

С исторических времён люди выбирали для создания поселений равнинные территории, этому способствует ряд практических преимуществ: удобство строительства домов, инфраструктурных сооружений. Равнинные территории легче подлежат сельскохозяйственному освоению: развитие пашни, пастбищ. Благоприятное развитие торговли и сообщения между населенными пунктами, рентабельнее прокладывать транспортные пути на равнинных участках местности. В эпоху освоения Восточной Сибири основными транспортными путями служили реки (Лена, Витим, Ангара). Грузы с пушниной и предметами местного производства в основном перевозились на карбазах. В XVIII в. был построен Сибирский (Московский) тракт, событие поспособствовало появлению транспортных путей – ответвлений на Лену и в Кяхту. В конце XIX – начале XX в. строительство Сибирской железнодорожной магистрали положило начало переселению гонимых аграрным кризисом крестьян из Европейской части России в Предбайкалье [4].

Рис.1. Снимок с БПЛа. Полигональный рельеф. Май 2024 г.

Рис.2. Снимок с БПЛа. Полигональный рельеф. Автодорога 25Н – 056 (Качугский тракт). Октябрь 2024 г.

Для степных районов довольно типично развитие процессов термокарста. Как правило, этот процесс обостряется хозяйственной деятельностью, вызывающей изменения теплового режима почвогрунтов. Термокарст наиболее распространен у населенных пунктов, на полотне дорог. Процессы замерзания и оттаивания грунтов влияют на развитие и образование разрывов (трещин) и провалов на земной поверхности (рис.3). Таким образом, на территории юга Предбайкалья распространен бугристо – западинный рельеф.

Юг Предбайкальской впадины располагает благоприятными агроклиматическими ресурсами для развития сельского хозяйства. Основным занятием крестьян – переселенцев являлось земледелие, следовательно, они стремились заселять равнинные степные и лесостепные территории Предбайкалья, также территории вблизи железной дороги и транспортных магистралей. Как следствие, началось изменение природы лесостепной и степной зон Предбайкалья: производились вырубки лесов под сельскохозяйственные угодья на лесостепных и степных ландшафтах, посадки сельскохозяйственных культур: рожь, овес, пшеница и т.д. Унгинские (балаганские) степи Предбайкалья использовались под пастбища. Более активное вовлечение в оборот пахотных земель данного района было связано с аграрной реформой П.А. Столыпина в начале XX века и работой Переселенческого комитета. Переселенческое управление составляло достаточно подробные карты заселяемых территорий (рис.4.), в результате анализа которых прослежена динамика освоения. В

начале XX века Баяндай (Баиндай) уже являлся крупным населенным пунктом, вокруг которого была сформирована сеть Переселенческих участков: Гоголевский, Холонгой, Каменка, Кольцовский, Тургеневский, Писаревский, Шаманка, Вершинный, Уланский, Пушаковский, Анненский и др. В настоящее время большинство населенных пунктов сохраняют свои исторические названия, но их административный статус изменился: бывшие участки преобразованы в современные сёла. Основу хозяйственной деятельности населения в Переселенческий период составляло возделывание злаковых культур и скотоводство.

Рис. 3. Разрывы на поверхности грунта, трещина на поверхности грунта, просадка грунта. Май 2021 г.

С целью анализа современной экономической ситуации в Баяндаевском районе был проведен социальный опрос фермеров о способах ведения с/х и адаптации к условиям окружающей среды. Предварительно была составлена анкета, состоящая из 17 вопросов. К опросу были привлечены владельцы крупных фермерских хозяйств из сел: Ользоны, Шаманка, Половинка, Маяк. Поскольку агробизнес является главным источником дохода предпринимателей, они могут оценить

рентабельность ведения своего дела и влияние на него агроклиматических условий. Респонденты утверждают, что в период засушливого лета урожайность кормовых трав остается достаточно стабильной и связана с высоким содержанием почвенной влаги. В целом кормовые травы составляют 80 – 100% общего рациона КРС (рис.5-6). Термокарстовые озера, расположенные повсеместно вблизи пастбищ, служат водопоем в теплый период года. В районе исследования имеются проблемы с обеспечением питьевой водой, связанным с глубоким залеганием подземных вод.

В настоящее время село Баяндай сохранил статус административного центра района. В ходе полевого исследования было установлено, что специфика местной экономики, ориентирована на управленческие и административные функции. Владельцы крупных фермерских хозяйств предпочитают проживать непосредственно в местах ведения хозяйственной деятельности, а в с. Баяндай поставляют сырье для местного молокозавода.

Нужно отметить, что мерзлотно – ландшафтные исследования в пределах основной полосы расселения человека важны для охраны окружающей среды, рационального природопользования.

Рис.4. Карта Переселенческого комитета (современный Баяндаевский район), начало XX в.

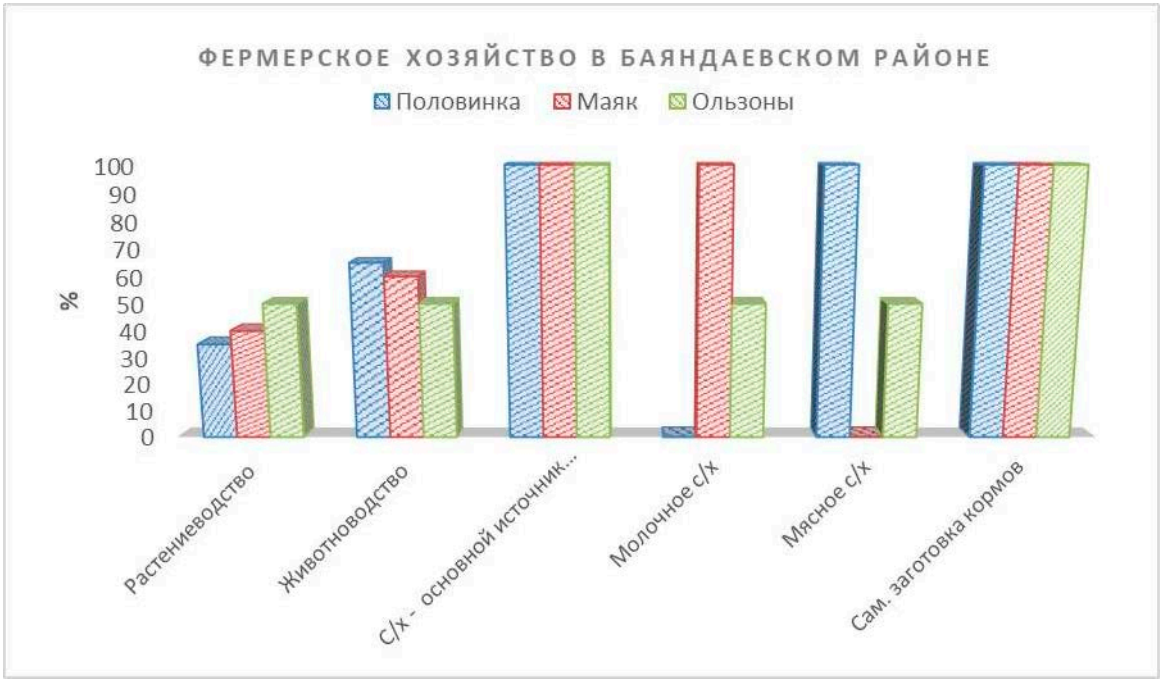



Рис. 5. Результаты опроса фермеров Баяндаевского района (с. Ользоны, с. Маяк, с. Половинка)

Рис. 6. Тюки сена. Заготовка кормов на зимний период. Октябрь 2025 г.

***Литература***

1 Гранина Н.И., Козлова А.А., Вашукевич Н.В. Функционирование почв Южного Предбайкалья в условиях антропогенеза// Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. – 2006. – № 2. – С. 22-28.

2 Байкало-Амурская железнодорожная магистраль: геокриологическая карта / В. Гогичаишвили и др. 1: 2 500 000, 25 км в 1 см. Москва: ГУГК, 1979. 1к. (2л.).

3 Козлова А. А., Макарова А.П. Почвы и почвенная микробиота естественных и освоенных ландшафтов Южного Предбайкалья, сформированных в условиях бугристо – западинного микрорельефа// Нива Поволжья. – 2009. – № 4 (13). – С. 32-36.

4 Преображенский В. С. и др. Предбайкалье и Забайкалье – Москва.: Наука, 1965. – 492 с.

## МОНИТОРИНГ ОБЪЕКТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ (ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА)

***Е.М. Макарычева, Т.И. Кузнецов, Д.В. Долгополов***

*ООО «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта» (ООО «НИИ Транснефть»), центр мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта, г. Москва.*

Общая протяженность трубопроводов ПАО «Транснефть» составляет около 70 тыс. км., из которых 45-48 тыс. эксплуатируется с советского периода. С 2000-х годов начинается активное строительство нефтепроводов в Арктической зоне и зоне распространения многолетнемерзлых пород, что требует как особых подходов к строительству, так и разработки системы комплексного мониторинга при их эксплуатации.

ООО «НИИ Транснефть» отвечает за организацию работ по геотехническому мониторингу нефтепроводов, расположенных в сложных природно-климатических условиях, а также является экспертным органом по достаточности данных для оценки текущего технического состояния объекта, его прогнозированию и разработке компенсирующих мероприятий.

Труба является самым капиталоемким фондом, около 70% ресурсов уходят именно на трубу. В связи с чем встает необходимость снижения коэффициентов запаса при эксплуатации трубопроводов. В условиях сложности природно-климатических условий и изменения спектров эксплуатационного нагружения актуальность задачи разработки и совершенствования системы мониторинга объектов трубопроводного транспорта не вызывает сомнений.

С 2011 года разработана и внедрена система мониторинга объектов магистральных нефтепроводов, расположенных в Арктической зоне и зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, в рамках которой выполняются систематические наблюдения, измерения и контроль параметров природно-технической системы.

Цель геотехнического мониторинга - обеспечение эксплуатационной надежности объектов трубопроводного транспорта, включая трубопровод, дороги, воздушные линии электропередачи, здания и сооружения, за счет своевременного выявления изменения контролируемых параметров конструкций и грунтов оснований, которые могут привести к переходу объектов в ограниченно работоспособное или аварийное состояние.

Мониторинг – является экономической категорией из чего следует необходимость стремиться к получению оптимальной, т.е. необходимой и достаточной информации для удовлетворения стоящих перед мониторингом задач, заключающихся в выявлении и отслеживании развития негативных природно-техногенных процессов и составлении прогнозных моделей требуемой точности. Эти параметры определяются исходя из производственно-экономической модели функционирования магистрального нефтепровода, в том числе, в условиях криолитозоны. Разработка проекта мониторинга включала создание наблюдательной сети мониторинга, модельных и прогнозных блоков. Перечень наблюдаемых параметров, а также частота и периодичность наблюдений выбраны с учетом их влияния на точность прогнозных моделей. Пространственное распределение пунктов наблюдательной сети мониторинга определяется принципом репрезентативности, т.е. с учетом изменчивости природных и технических условий.

В качестве критериев для расстановки пунктов наблюдательной сети мониторинга и методов обследований выступает минимизация затрат при условии обеспечения необходимой точности прогнозных моделей, получения параметров необходимых для принятия управленческих решений и поддержания безопасной эксплуатации объектов трубопроводного транспорта с учетом возможного ущерба в случае нарушения устойчивости геотехнической системы или ее участка.

В рамках совершенствования системы комплексного мониторинга объектов трубопроводного транспорта выполняется оптимизация наблюдательной сети мониторинга (корректировка сети, программ наблюдений, внедрения новых методов обследований, методик обработки и анализа данных). Корректировка наблюдательной сети мониторинга выполняется по данным одного или нескольких годовых циклов мониторинга.

Геотехнический мониторинг выполняется на базе результатов полевых наземных и дистанционных обследований (в том числе воздушных и наземных лазерных сканирований), внутритрубной диагностики и включает в себя контроль состояния оснований фундаментов, состояния многолетнемерзлых грунтов и геологических процессов, а также обследований для контроля состояния объектов, геометрии и напряженного-деформированного состояния нефтепроводов [1].

В рамках геотехнического мониторинга реализуются как периодические, так и непрерывные наблюдения. Непрерывные наблюдения применяются для быстропротекающих процессов, которые могут приводить к серьезным негативным последствиям. Соответственно, требуют экстренного реагирования. В рамках мониторинга объектов трубопроводного транспорта к ним относятся: контроль сейсмических воздействий на объекты мониторинга, контроль напряжений в стенке трубопровода в местах тектонических разломов, регистрация движения грунта по склону, контроль уровня подземных вод на склонах с оползнями.

В рамках периодического мониторинга проводятся инженерные обследования, включая геодезические, геологические и геофизические. В состав инструментальных обследований входят: определение планово-высотного положения и геометрических параметров нефтепроводов и объектов магистральных нефтепроводов (деформационные марки на более 20 000 опор нефтепроводов, а также на площадочных объектах, более 8 500 устройств определения планово-высотного положения магистрального нефтепровода подземной прокладки), измерения температуры грунтов (5 000 термометрических скважин на линейной части магистральных нефтепроводов и более 1 000 на площадочных объектах), измерения уровней грунтовых вод (более 30 гидрогеологических скважин), проверка работоспособности термостабилизаторов грунта (более 100 000 сезонно-действующих охлаждающих устройств на линейной части магистральных нефтепроводов и более 40 000 на площадочных объектах) и внутритрубный мониторинг технического состояния трубопроводов.

Для решения задач получения и использования достоверных и точных пространственных данных на всех этапах жизненных циклов объектов магистрального трубопровода организованы местные автоматизированные геодезические сети. Разработана методика по организации местной автоматизированной геодезической сети и корпоративной системы координат для обеспечения сходимости результатов периодических обследований в рамках геотехнического мониторинга [2,3].

В качестве методов дистанционных обследований применяется воздушное лазерное сканирование с аэрофотосъемкой, наземное лазерное сканирование, внедряются методы дистанционного

зондирования Земли из космоса (в том числе метода космической радиолокационной дифференциальной интерферометрии) [4,5].

Прогноз состояния природно-технической системы выполняется на основе моделей, построенных на основе уравнений математической физики. Такие модели включают уравнения описывающие физико-механические процессы, в том числе механику мерзлых грунтов, используя уравнения тепломассопереноса. Реализуются расчеты текущей и прогнозной температуры стенки магистрального трубопровода, прогнозируются ореолы оттаивания и осадки грунтов в течение всего периода эксплуатации, а также изменения планово-высотного положения и напряженно-деформированного состояния каждой секций трубопровода. В дополнение к вышеописанным моделям также применяются модели, реализованные на уравнениях математической статистики (вероятностно-статистические, регрессионные модели, методы функционального анализа и др.).

Накопленный объем геознаний по объектам магистрального трубопровода подталкивает к поиску новых средств обработки и анализа информации с учетом применения современных методов обработки и анализа больших данных для оптимизации капитальных и эксплуатационных затрат [6, 7].

В настоящее время в ООО «НИИ Транснефть» разрабатываются технические решения системы поддержки принятия решений и исследуются методы выявления и анализ факторов, приводящих к возникновению и изменению ненормативных радиусов изгиба, изменению планово-высотного положения трубопровода, а также определению причин их возникновения. Внедрение интеллектуальных методов анализа цифровой модели системы «трубопровод – окружающая среда» позволит усовершенствовать методическую основу системы принятия решений в том числе в части минимизации негативных воздействий на инфраструктурные элементы магистрального нефтепровода.

Геотехнический мониторинг будущего все больше стремится к интеграции знаний в инженерную цифровую информационную модель системы «трубопровод – окружающая среда», которая представляет из себя совокупность взаимосвязанных инженерно-геодезических, инженерно-геологических, инженерно-гидрометеорологических, инженерно-экологических данных, инженерно-геотехнических данных об объектах геотехнического мониторинга.

Каждый день разрабатываются новые методы наблюдений, включая дистанционные, внедряются системы автоматизированной обработки данных в том числе на основе методов искусственного интеллекта, роботизированные технологии, которые уже в скором времени смогут взять на себя разработку технической документации для мониторинга, вести автоматический сбор информации о функционировании системы, брать на себя отдельные операции по обработке и анализу данных, прогнозированию процессов, оптимизации наблюдательной сети и программ наблюдений.

ООО «НИИ Транснефть» активно внедряется новые технологии комплексного мониторинга объектов трубопроводного транспорта, ведутся поисковые, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в сотрудничестве с ведущими научными, научно-производственными и образовательными организациями, что позволяет обеспечивать надежную эксплуатацию трубопроводных систем в сложных природно-климатических условиях, в том числе, в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов, и позволяет оставаться в рамках актуальных трендов научно-технического прогресса.

***Литература***

1 Макарычева Е. М., Ибрагимов Э. Р., Кузнецов Т. И., Шуршин К. Ю. Применение воздушного лазерного сканирования для геотехнического мониторинга объектов магистрального трубопровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 21-31.

2 Куприянов М. С., Гасилин М.П., Макарычева Е. М., Кузнецов Т. И. Организация высокоточной координатной системы на объектах магистральных трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов – 2023. – Т. 13. – № 6. – С. 512–521.

3 Куприянов М. С., Гасилин М.П., Макарычева Е. М., Кузнецов Т. И. Организация единого координатного пространства на объектах магистральных трубопроводов // Мониторинг. Наука и технологии – 2025. – № 1 (63). – С. 15–20.

4 Долгополов Д. В., Баборыкин М. Ю., Жидиляева Е. В., Мелкий В. А. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2(52). – С. 25-34.

5 Долгополов Д. В., Кузнецов Т. И., Федотов А. Л. Применение данных дистанционного зондирования Земли для информационного обеспечения геотехнического мониторинга магистральных // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2025. – Т. 4. – С. 182-188.

6 Макарычева Е.М., Кузнецов Т.И., Половков С.А., Барышев А.И., Покровская Е.А. 3D-ГИС для сопровождения работ по геотехническому мониторингу объектов магистральных трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 10. – № 4. – С. 342-351.

7 Барышев А. И., Макарычева Е. М., Покровская Е. А., Кузнецов Т. И. Автоматизированная обработка и анализ результатов воздушного лазерного сканирования для геотехнического мониторинга // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2026. – Т. 16. – № 1. – С. 61-69.

## МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА КРИОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ АЗРФ

***Г.В. Малкова[1], А.А. Васильев[1], А.Г. Гравис[1], Д.С. Дроздов[1,2], Г.Е. Облогов[1], О.Е. Пономарева[1,2]***

*[1] Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень*

*[2] Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ), г. Москва*

Современные климатические изменения, происходящие в Российской Арктике, вызывают огромный интерес у специалистов, изучающим климат и мерзлоту, оказывают существенное влияние на геокриологическую обстановку и создают новые вызовы для объектов инфраструктуры, недропользователей и органов власти из-за экономических рисков, хозяйственных и социальных последствий [1]. Согласно данным Всемирной метеорологической организации (ВМО), начиная с 1960-х годов, каждое последующее десятилетие было теплее, чем предыдущее, а период 2011-2020 гг. оказался самым теплым десятилетием за всю историю наблюдений. Это отмечается для мира в целом, но в полной мере относится и к западному сектору АЗРФ. Среднегодовая температура воздуха, рассчитанная для десятилетий, начиная с 1980-х годов, по данным метеостанций на Европейском севере (м/с Константиновский) и севере Западной Сибири (м/с Марре-Сале, Надым, Тазовский) повышается особенно существенно в XXI веке (табл.1, А).

Таблица 1

Климатические характеристики по метеостанциям западного сектора АЗРФ
https://www.pogodaiklimat.ru/history.php

| А. Среднегодовая температура воздуха, °С | | | | |
|---|---|---|---|---|
| периоды | Константиновский | Марре-Сале | Надым | Тазовский |
| 1981-1990 гг. | -4,8 | -7,9 | -5,2 | -8,4 |
| 1991-2000 гг. | -4,3 | -7,8 | -5,2 | -8,2 |
| 2001-2010 гг. | -3,8 | -7,2 | -4,3 | -7,8 |
| 2011-2020 гг. | -2,3 | -5,2 | -3,3 | -5,7 |
| Б. Максимальная высота снега, см | | | | |
| периоды | Константиновский | Марре-Сале | Надым | Тазовский |
| 1981-1990 гг. | 65 | 23 | 87 | 26 |
| 1991-2000 гг. | 65 | 37 | 85 | 65 |
| 2001-2010 гг. | 52 | 33 | 83 | 88 |
| 2011-2020 гг. | 73 | 36 | 93 | 94 |
| В. Тренды изменения среднегодовой температуры воздуха °С/10 лет | | | | |
| периоды | Константиновский | Марре-Сале | Надым | Тазовский |
| 1961-1990 гг. | 0,15 | 0,25 | 0,41 | 0,32 |
| 1991-2020 гг. | 0,95 | 1,22 | 0,98 | 1,09 |
| 1961-2020 гг. | 0,55 | 0,62 | 0,59 | 0,65 |

Изменения климата проявляются в повышении температуры воздуха в годовом цикле и по сезонам, в изменении количества атмосферных осадков, особенно в зимний период. Увеличение

высоты снежного покрова оказывает отепляющее влияние на многолетнюю мерзлоту, но это увеличение не всегда происходит синхронно с потеплением. Только для м/с Тазовский наблюдается постепенное и существенное, более чем в три раз, возрастание максимальной высоты снега. Для других приведенных метеостанций такая тенденция не отмечена (табл.1, Б).

Тренды изменения среднегодовой температуры воздуха, рассчитанные как угловые коэффициенты уравнений регрессии за временные интервалы «базового» периода климатической нормы (1961-1990 гг.), современной климатической нормы (1991-2020 гг.) и более длительного интервала с 1961 по 2020 гг., показаны в таблице 1, В. В скорости изменения среднегодовой температуры воздуха с 1990-х годов наблюдается заметный перелом [2] - в период 1991-2020 гг. отмечается увеличение тренда среднегодовой температуры воздуха в несколько раз по сравнению с «базовым» периодом нормы, что превышает прогнозные значения «жесткого» климатического сценария климатологов на конец XXI века (табл. 1, В). За период с 1961 по 2020 гг. осредненные многолетние тренды потепления климата оказываются в два раза меньше.

Геокриологический мониторинг проводится сотрудниками ИКЗ ТюмНЦ СО РАН на специализированных площадках, стационарах и в скважинах на Европейском севере с 1980-х годов, а на севере Западной Сибири – с 1970 гг. (рис. 1). Результаты многолетнего мониторинга были опубликованы в ряде региональных работ [2; 3; 4; 5]. К сожалению, с 2022 г. ряды наблюдений прерываются из-за сокращения бюджетного финансирования на экспедиционные работы.

Рис. 1. Геокриологические стационары Института криосферы земли ТюмНЦ СО РАН

Полученные данные геокриологических наблюдений обеспечивают оценку текущего термического состояния криолитозоны и позволяют оценить отклик ММП на климатические изменения, как в пределах разных природных зон, так и в различных криогенных ландшафтах. Обобщающие данные для западного сектора Российской Арктики получены при расчете подекадных изменений среднегодовой температуры пород в скважинах для всех участков, имеющих длительные ряды наблюдений, включая 5-летний период 2021-2025 гг. (рис. 2). Происходит однонаправленный процесс повышения среднегодовой температуры ММП, но с различными скоростями, в результате чего общий диапазон изменения температуры ММП повсеместно сокращается.

Для стационара Марре-Сале характерны самые высокие темпы современного потепления климата, достигающие 1,22°С/10 лет (см. табл. 1, В). Но минимальная и слабо изменяющаяся высота снежного покрова снижает соответствующий эффект потепления в мерзлоте. Наибольшие изменения температуры ММП претерпели низкотемпературные (-5…-7°С) криогенные ландшафты типичной тундры, в настоящее время температура колеблется в интервале -3…-5°С, а состояние мерзлоты остается стабильным (рис. 2). Происходящие климатические изменения проявляется также в сокращении амплитуды колебаний температуры ММП на разных глубинах.

На Уренгойской территории наряду с высокими темпами потепления климата (1,09°С/10 лет) существенно возрастает высота снежного покрова, которая по сравнению с XX веком увеличилась в три раза (см. табл. 1, Б). Соответственно среднегодовая температура криогенных южнотундровых ландшафтов стационара Уренгой-Северный повысилась в среднем на 2°С и на большей площади составляет сейчас -1…-3°С (рис. 2).

В лесотундровых криогенных ландшафтах (стационар Уренгой-Южный) температура ММП на глубине 10 м колеблется в настоящее время от -0,01 до -1°С, а температурные различия между ландшафтами не превышают 1°С. Наблюдается расширение площадей несквозных таликов, но термическое состояние талого горизонта остается переходным (рис. 2).

На Европейском севере (стационар Болванский, южная тундра) за период мониторинга температура ММП на глубине 10 м во всех криогенных ландшафтах повысилась на 1…1.5°С и в 2025 г. изменяется в интервале 0…-2°С (рис. 2).

В отличие от южной тундры Западной Сибири на Европейском севере в понижениях рельефа и на закустаренных участках водоразделов уже начали формироваться несквозные талики. Таким образом, по мерзлотным признакам (по наличию таликов и по температуре горных пород) южнотундровые ландшафты Европейского севера более сходны с лесотундровыми ландшафтами Западной Сибири. Сказывается то, что мерзлотная обстановка больше связана с зимними климатическими условиями, а облик ландшафта – с летними.

Минимальные изменения температуры ММП в последние десятилетия происходят в северотаежных ландшафтах Западной Сибири (стационар Надымский). Криолитозона северной тайги наименее устойчива, т.к. её температура близка к 0°С, и незначительное изменение теплопотоков может вести как к деградации, так и аградации ММП (рис. 2). Мерзлота обычно встречается на буграх пучения и бугристых торфяниках. В заболоченных понижениях и на дренированных залесенных водоразделах продолжается увеличение глубины и площадей несквозных таликов.

Современные тренды изменения среднегодовой температуры ММП для всех стационаров приведены в табл. 2. Диапазон их изменения достаточно широк, но даже максимальные тренды температуры ММП отстают от темпов потепления за тот же период. Средние значения трендов $T_{ммп}$ в два-три и более раз ниже, чем тренды температуры воздуха на соответствующих метеостанциях.

Моделирование температурного режима пород при современных изменениях климата выполнено для двух опорных скважин, имеющих близкий криолитологический разрез, расположенных в разных природных зонах, но в схожих ландшафтных условиях (дренированная кустарничково-лишайниковая тундра) – скважина 1, стационар Марре-Сале (типичная тундра) и скважина 83 – стационар Болванский (южная тундра). Моделирование осуществлялось в программе «Frost 3D Термо», которая позволяет оперативно обрабатывать данные, учитывать литологические особенности и теплофизические характеристики пород в талом и мерзлом состоянии, выполнять моделирование и прогноз трехмерных полей пространственно-временного изменения температуры пород при периодических и трендовых изменениях климата. Верификация 3D-модели температурного режима пород показала хорошую сходимость результатов моделирования и непосредственных измерений температуры в скважинах за период с 2019 по 2024 год.

Прогнозные расчеты температуры ММП выполнены до 2050 года. Было задано начальное температурное распределение в двух скважинах на январь 2019 года на глубинах 0; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 7; 10 м. Климатические условия включали в себя следующие параметры: среднемесячная температура воздуха в 2019 г. и далее до 2050 г. использовался средний многолетний тренд, приведенный в табл.1, равный 0,055°С/год (м/с Константиновский, скв.83) и 0,062°С/год (м/с Марре-Сале, скв.1). Среднемесячная скорость ветра, среднемесячная высота и плотность снежного покрова изменялись до 2050 г. периодически, повторяя данные 2019 г.

При заданных климатических изменениях ожидается существенное повышение температуры ММП за тридцатилетний период (табл. 3). В скважине 1 (стационар Марре-Сале) температура на глубине 10 м повысится на 1,6°С и составит -1,0°С в 2050 г. Ярус годовых темплооборотов (ЯТГО) будет постепенно сокращаться – от 8 м в 2020 г. до 4 м в 2050 г. В 2050 г. мощность деятельного слоя увеличится на 0,5 м по сравнению с 2020 г. и составит 1,5 м.

В скважине 83 (стационар Болванский) начальная температура пород была значительно выше, чем в скважине 1 на стационаре Марре-Сале. К 2050 г. температура на глубине 10 м в скважине 83 повысится на 0,9°С и составит всего -0,3°С (табл. 3). Глубина протаивания в 2020 г. была около 1,5 м, но уже к 2030 г. увеличится до 3 м, и начнут создаваться условия для формирования мерзлоты несливающегося типа. К 2040 г кровля опустится на глубину около 5 м, а к 2050 г – около 7 м. ЯГТО

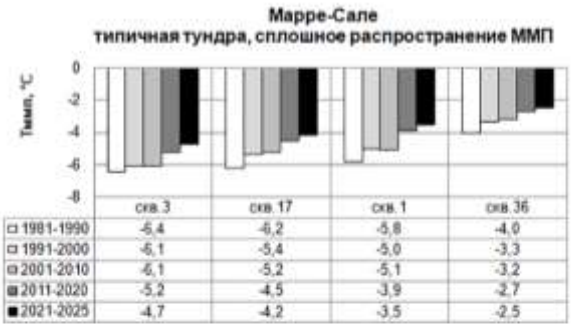
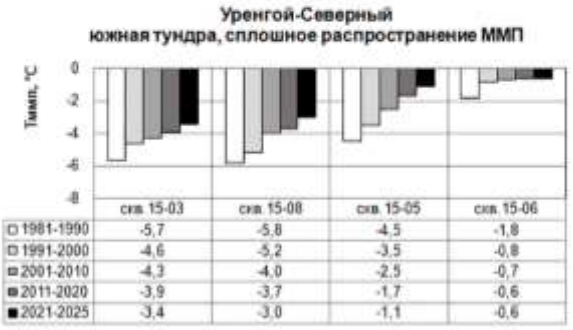
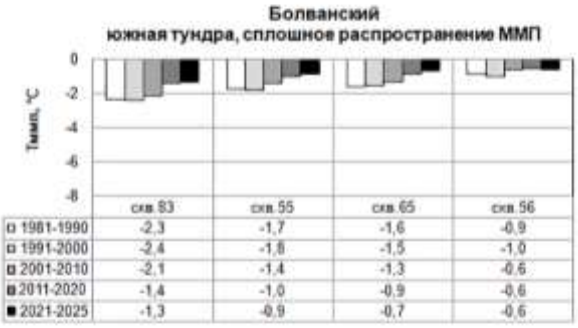
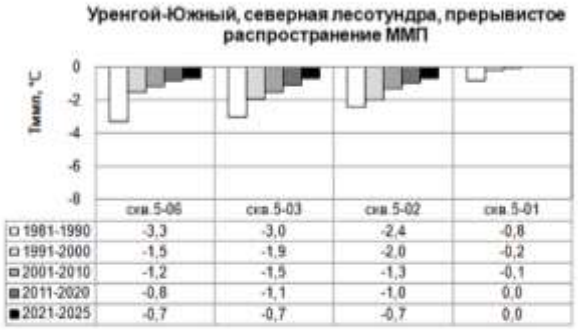
| Среднегодовая температура ММП за периоды | Ландшафтное описание участка скважины |
|---|---|
|  <br>скв.3 скв.17 скв.1 скв.36<br>1981-1990 -6,4 -6,2 -5,8 -4,0<br>1991-2000 -6,1 -5,4 -5,0 -3,3<br>2001-2010 -6,1 -5,2 -5,1 -3,2<br>2011-2020 -5,2 -4,5 -3,9 -2,7<br>2021-2025 -4,7 -4,2 -3,5 -2,5 | Скв. 3 – III морская равнина, увлажненная мохово-лишайниковая тундра<br>Скв. 17 – III морская равнина, полигональный торфяник<br>Скв. 1 – III морская равнина, дренированная кустарничково-лишайниковая тундра<br>Скв. 36 - III морская равнина, осоково-моховое болото |
|  <br>скв.15-03 скв.15-08 скв.15-05 скв.15-06<br>1981-1990 -5,7 -5,8 -4,5 -1,8<br>1991-2000 -4,6 -5,2 -3,5 -0,8<br>2001-2010 -4,3 -4,0 -2,5 -0,7<br>2011-2020 -3,9 -3,7 -1,7 -0,6<br>2021-2025 -3,4 -3,0 -1,1 -0,6 | Скв. 15-03 - IV прибрежно-морская равнина, увлажненная тундра с фрагментами торфяников<br>Скв. 15-08 - IV прибрежно-морская равнина, заболоченная мохово-лишайниковая тундра<br>Скв. 15-05 - IV прибрежно-морская равнина, дренированная лишайниковая тундра на пологом склоне<br>Скв. 15-06 - IV прибрежно-морская равнина, травяно-моховый ольшаник на склоне |
|  <br>скв.83 скв.55 скв.65 скв.56<br>1981-1990 -2,3 -1,7 -1,6 -0,9<br>1991-2000 -2,4 -1,8 -1,5 -1,0<br>2001-2010 -2,1 -1,4 -1,3 -0,6<br>2011-2020 -1,4 -1,0 -0,9 -0,6<br>2021-2025 -1,3 -0,9 -0,7 -0,6 | Скв. 83 – останец IV морской равнины, вершина холма, дренированная лишайниковая тундра<br>Скв. 55 – III морская равнина, седловина, полигональный торфяник<br>Скв. 65 - III морская равнина, пологий склон холма, увлажненная мохово-лишайниковая тундра<br>Скв. 56 - III морская равнина, останец на бровке озера, кустарничково-моховый торфяник |
|  <br>скв.5-06 скв.5-03 скв.5-02 скв.5-01<br>1981-1990 -3,3 -3,0 -2,4 -0,8<br>1991-2000 -1,5 -1,9 -2,0 -0,2<br>2001-2010 -1,2 -1,5 -1,3 -0,1<br>2011-2020 -0,8 -1,1 -1,0 0,0<br>2021-2025 -0,7 -0,7 -0,7 0,0 | Скв. 5-06 - III озерно-аллювиальная равнина, дренированная лишайниковая тундра на склоне<br>Скв. 5-03 - III озерно-аллювиальная равнина, плоский торфяник<br>Скв. 5-02 – III озерно-аллювиальная равнина, заболоченное понижение, сфагновое болото<br>Скв. 5-01 - III озерно-аллювиальная равнина, дренированное лиственничное редколесье |
| <br>скв.11-75 скв.14-72 скв.1-71 скв.23-75<br>1981-1990 -1,1 -0,3 -0,3 -0,2<br>1991-2000 -0,8 -0,2 -0,2 -0,1<br>2001-2010 -0,6 -0,2 -0,1 -0,1<br>2011-2020 -0,3 -0,2 -0,1 0,0<br>2021-2025 -0,2 -0,1 -0,1 0,0 | Скв. 11-75 – III озерно-аллювиальная равнина, гряда пучения с подростом березы и кедра<br>Скв. 14-72 - III озерно-аллювиальная равнина, плоский торфяник со сфагновыми мочажинами<br>Скв. 1-71 - III озерно-аллювиальная равнина, кедровая редина, бугор пучения<br>Скв. 23-75 - III озерно-аллювиальная равнина, ложбина стока, сфагновое болото |

Рис. 2. Среднегодовая температура ММП в различные периоды на объектах мониторинга в западном секторе АЗРФ

в скважине 83 в 2020 г. составлял 5 м, но после опускания кровли мерзлоты в 2050 г. ограничивается деятельным слоем.

Таблица 2

Тренды изменения среднегодовой температуры ММП за период 1991-2020 гг.

| Стационар | Расположение | Тренды $T_{ммп}$, °С/10 лет (мин-макс/**средн**.) |
|---|---|---|
| Марре-Сале | Западная Сибирь, типичная тундра, сплошное распространение ММП | 0,30 – 0,83 / **0,55** |
| Уренгой-Северный | Западная Сибирь, южная тундра, сплошное распространение ММП | 0,10 – 0,74 / **0,48** |
| Болванский | Европейский север, южная тундра, сплошное распространение ММП | 0,10 – 0,53 / **0,33** |
| Уренгой-Южный | Западная Сибирь, лесотундра, прерывистое распространение ММП | 0,16 – 0,51 / **0,33** |
| Надымский | Западная Сибирь, северная тайга, островное распространение ММП | 0,00 – 0,27 / **0,10** |

Таблица 3

Моделирование и прогноз температуры ММП на глубине 10 м, T°C

| Стационар, скважина | 2020 г. | 2030 г. | 2040 г. | 2050 г. |
|---|---|---|---|---|
| Марре-Сале, скв. 1 | -2,6 | -2,0 | -1,5 | -1,0 |
| Болванский, скв. 83 | -1,2 | -0,8 | -0,5 | -0,3 |

**Выводы.** Анализ текущих климатических изменений в Российской Арктике свидетельствует о существенном потеплении, уже обгоняющем общепринятые прогнозные сценарии. Климатические изменения в западном секторе Российской Арктики в современный период идут очень высокими темпами, в три раза превышающими «базовый» период климатической нормы. Отмечается увеличение годового количества атмосферных осадков и высоты снежного покрова, которое не всегда происходит синхронно с потеплением. На этом фоне происходит постепенное повышение температуры ММП, наиболее интенсивное в тундровой зоне. Средние значения трендов температуры ММП оказываются в два-три и более раз ниже, чем тренды температуры воздуха. Многолетние мониторинговые исследования на Европейском Севере и в Западной Сибири достоверно показывают повышение температуры ММП, уточняют закономерности локальной, зональной и секторальной пространственно-временно́й изменчивости геокриологических характеристик, и могут быть использованы для прогнозных оценок изменения криолитозоны на ближайшие десятилетия. Для ограниченных по площади ключевых участков, соизмеримых с размером инженерных объёктов, началось создание цифровых моделей, которые позволяют отследить изменение геокриологических условий различных криогенных ландшафтов в предшествующий период, а с его учётом сделать многовариантный прогноз на будущее. В дальнейшем планируется выполнить моделирование термического состояния различных территорий, в т.ч. с учётом ландшафтной структуры и разных видов техногенеза.

*Исследования выполнены в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (тема FWRZ-2026-0027). Благодарим компанию «Simmakers» за предоставление для некоммерческого использования полного комплекта программ Frost 3D, профессиональные инструкции и оказанные консультации.*

***Литература***

1 Брушков А. В., Д. С. Дроздов, В. А. Дубровин, Железняк М.Н., Осокин А.Б., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Малкова Г.В. Структура и параметры геокриологического мониторинга // Научный вестник Арктики. — 2022. — № 12. — С. 78–88. DOI: 10.52978/25421220_2022_12_78-88

2 Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Y., Nikitin K., Orekhov P., Ponomareva O., Romanovsky V., Sadurtdinov M., Shein A., Skvortsov A., Sudakova M., Tsarev A. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic. Energies 2022, 15, 2311. https://doi.org/10.3390/en15072311

3 Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В., Облогов Г.Е., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Стрелецкая И.Д., Стрелецкий Д.А., Устинова Е.В., Широков Р.С. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в Западном секторе Российской Арктики / Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 2. С. 15-30.

4 Малкова Г. В., Васильев А. А., Гравис А. Г., Дроздов Д. С., Коростелев Ю. В., Пономарева О. Е. Воздействие современных климатических изменений на температурный режим мерзлых толщ Российской Арктики / Материалы всероссийской конференции с междун. участием «Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне». 28-30 сентября 2020. Якутск. с. 139-142

5 Пономарева О.Е., Дроздов Д.С., Гравис А.Г., Бердников Н.М, Бочкарев Ю.Н., Устинова Е.В., Лешневская Е.Ф. Особенности деградации мерзлоты у южной границы криолитозоны (по результатам мониторинга в Западной Сибири) // Актуальные проблемы геокриологии, МГУ, 15-16 мая 2018 г., Т.1. – М.: Университетская книга, 2018, с.189-195.

## МЕТАН В ГОЛОЦЕНОВЫХ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДАХ ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ И НИЖНЕГО ПРИОБЬЯ

***Мартиросян М.О.[1], Кузякин Л.П.[1], Стрелецкая И.Д. [1], Маслаков А.А. [1], Семёнов П.Б.[2], Киль А.О.[2]***
*[1]МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
*[2]ВНИИОкеангеологии им. А.С. Грамберга, Санкт-Петербург, Россия*

***Введение.*** Полигонально-жильные льды (ПЖЛ) широко распространены на территории Российского Севера и влияют на современные криогенные процессы – морозобойное растрескивание, термоэрозию, термокарст.

Формирование полигонально-жильных льдов особенно интенсивно в периоды похолоданий, а в периоды относительных потеплений деградируют с развитием термокарста или консервируются при более благоприятных условиях [1]. Согласно большинству авторов, рост полигонально-жильных льдов обеспечивается преимущественно за счёт талых снеговых вод в весенний период. Поэтому, изотопный состав этих льдов отражает изотопный состав твёрдых зимних осадков района и косвенно связан с температурами, при которых выпадали зимние осадки [2]. Следовательно, изотопный состав полигонально-жильных льдов может быть использован в качестве палеоиндикатора для определения зимних (в т.ч. январских) температур в период формирования льдов. Воздушные включения, законсервированные в ледяных жилах, содержат разные газы. Количество углеводородных газов (в первую очередь метана) в воздушных пузырьках будет свидетельствовать о составе атмосферных газов времени формирования жил, так как метан плохо растворяется в воде. Таким образом, содержание метана так же может быть палеоиндикатором состава атмосферы в прошлом.

Для оценки содержания метана в полигонально-жильных льдах были выбраны два района для последующего сравнения и отбора проб методом HeadSpace [3]: полигональный торфяник близ г. Лабытнанги (2025 г.), обнажение «Лорино» на приморских равнинах Чукотского полуострова (2022 г.).

Формирование исследуемых полигонально-жильных льдов на Чукотке [4] и в Приобье [5] происходило в голоцене, анализ полученных данных позволяет реконструировать палеогеографические условия роста жильных льдов двух отдаленных районов, которые находятся на одной широте, и установить региональные особенности.

***Методы и район исследования.*** В 2025 году близ города Лабытнанги (Нижнее Приобье) автором была собрана и обработана коллекция образцов из полигонально-жильного льда и вмещающих отложений для оценки содержания газовых включений. Для оценки палеогеографических условий в голоцене дополнительно использовались данные по изотопному составу ледяных жил Нижнего Приобья, опубликованных Ю.Н. Чижовой с соавторами [5]. Образцы были собраны из тех же жил голоценового торфяника, где были взяты пробы для газохроматографического анализа газовых включений. Для сравнения условий формирования полигонально-жильных льдов в районе Восточной Чукотки использовались данные содержания метана и стабильных изотопов воды в образцах, отобранных Кузякиным Л.П. и Маслаковым А.А.

Жилы в полигональном торфянике близ г. Лабытнанги не превышают по высоте 2 метров и изменяются от 1 до 3 метров в ширину по верху жил, имеют вертикальную слоистость. Обработка образцов, полученных из полигонально-жильного льда и вмещающих отложений, проводилась на приборной базе ФГБУ ВНИИОкеангеологии имени И.С. Грамберга с использованием газового

хроматографа Shimadzu GC 2014. Кроме того отобранные льды были исследованы с помощью поляризационных линз для уточнения их структуры пузырьков воздуха, вмещающих газы.

***Результаты.*** В обнажении полигонально-жильного льда вблизи г. Лабытнанги отмечается увеличенное содержание метана во вмещающем жилы торфе (рис. 1). Содержание метана во вмещающих торфах составляет до 1500 ppmv, в подстилающих высокольдистых суглинках – не превышает 50 ppmv. В самом ПЖЛ содержание метана варьирует от 20 до 250 ppmv и зависит от количества включений торфа непосредственно во льду: чем больше включений – тем выше содержание метана.

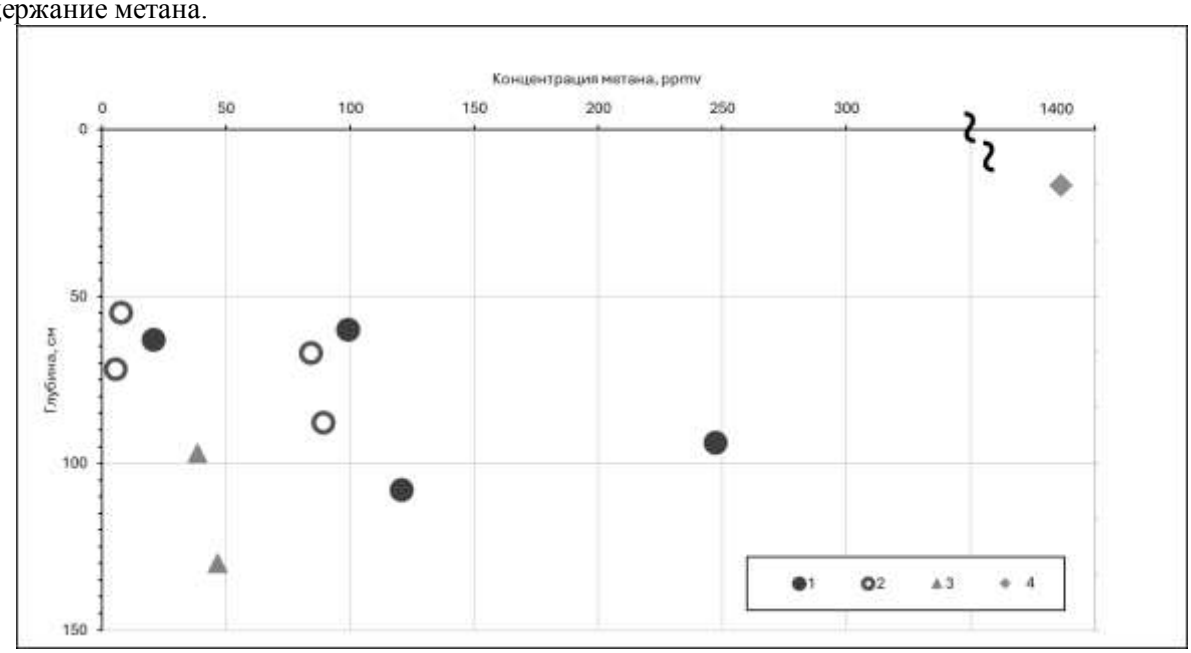



Рис. 1. Содержание метана в обнажении полигонально-жильного льда «Лабытнанги»; образцы, отобранные: в 1 – полигонально-жильном льду, 2 – термокарстово-пещерном льду, 3 – высокольдистом суглинке, 4 – торфе (чёрной волнистой линией показан разрыв горизонтальной оси).

Концентрация метана в обнажениях голоценового торфяника на Восточной Чукотке (п. Лорино) варьируется от 70 до 6447 ppmv (рис. 2). Как максимальные, так и минимальные значения содержатся в торфе. Количество метана в воздушных пузырьках в полигонально-жильном льду составляет от 167,89 до 2606 ppmv.

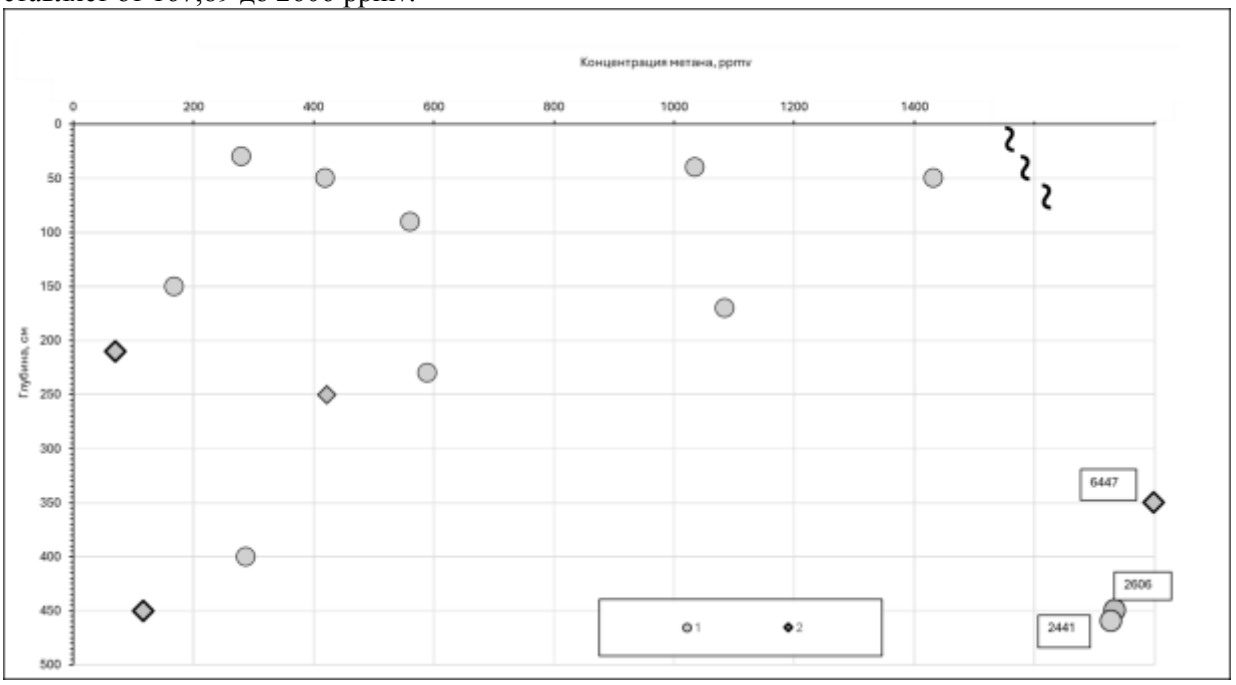



Рис. 2. Содержание метана в обнажении полигонально-жильного льда «Лорино»; образцы, отобранные: в 1 – полигонально-жильном льду, 2 – торфе (чёрной волнистой линией показан разрыв горизонтальной оси).

Концентрация метана в воздушных пузырьках полигонально-жильного льда из обнажении на побережье Восточной Чукотки (2606 ppmv) значительно превышает его количество в образцах, отобранных близ г. Лабытнанги (250 ppmv).

***Обсуждение и выводы.*** Полигонально-жильные льды Приобъе и Восточной Чукотки формировались в голоцене, но в различных палеогеографических условиях.

Формирование полигонального торфяника на поверхности третьей морской террасы в районе села Лорино на восточном побережье Чукотки началось в конце позднего дриаса и завершилось в начале голоцена при зимних температурах ниже современных [4].

При формировании повторно-жильного льда, вскрытого в обнажении полигонального торфяника вблизи г. Лабытнанги по вариации изотопного состава льда предполагается частичное оттаивание льда, связанное с подтоплением территории и последующим замерзанием свободной воды. Процессами промерзания и частичного оттаивания льда объясняется меньшее содержание метана полигонального торфяника в Приобъе.

Малая концентрация метана в жилах Нижнего Приобья объясняется последовательным оттаиванием и промерзанием верхнего слоя мерзлоты на этой территории, в следствие чего эмиссия газов в подземном льду не позволила сохраниться изначальному количеству метана, которое было при образовании жил. В то время на Восточной Чукотке полигонально-жильные были более стабильны, потому концентрация метана характеризует условия возникновения этих структур.

Рассматриваемые в этой работе полигонально-жильные льды относятся к одному возрасту – голоцену – так мы можем оценить различные условия, которые наблюдались в двух разных районах в один период времени, с помощью комплекса методов.

Исследование проведено в рамках ГЗ «Наземное и подземное оледенение в условиях современного изменения климата и техногенного воздействия».

***Литература***

1. Фотиев С.М. Современные представления об эволюции криогенной области Западной и Восточной Сибири в плейстоцене и голоцене // Криосфера Земли, 2005, т. X, № 2, с. 3–26.
2. Васильчук Ю. К. Условия формирования поздплейстоценовых и голоценовых повторно-жильных льдов Чукотки (изотопно – криолитохронологический анализ // Доклады Академии наук. — 1989. — Т. 309, № 4. — С. 920–924.
3. Alperin M.J., Reeburgh W.S. Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation // Applied Environmetal. Microbiology. 1985. V. 50. P. 940–945.
4. Буданцева Н.А., Маслаков А.А., Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Кузякин Л.П., Реконструкция среднеянварской температуры воздуха в раннем голоцене на восточном побережье Чукотки, М: Лёд и снег, №1, 2023.
5. Чижова Ю.Н., Кузякин Л.П., Васильчук Ю.К., Рогова З.М., Дунаев А.В., Изотопные характеристики ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$) повторно-жильных льдов у южной границы распространения вблизи города Лабытнанги, М: Лёд и снег, №3, 2025.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА ОСАДКИ ОТТАИВАЮЩИХ ПОРОД НА ПЛОЩАДКЕ НАУЧНОГО ПОЛИГОНА «ПРИМОРСКИЕ РАВНИНЫ ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ»

***А.А. Маслаков[1], Д.Г. Замолодчиков[2]***
*[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, кафедра криолитологии и гляциологии, Москва*
*[2]Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А.С. Исаева РАН, Москва*

**Введение**. Климатические изменения в криолитозоне приводят к повышению температуры многолетнемёрзлых пород, увеличению глубины сезонного оттаивания, усилению процессов термокарста и термоэрозии. Важнейшим индикатором таких изменений служит динамика мощности сезонноталого слоя (СТС), однако традиционные измерения мерзлотным щупом часто не фиксируют вертикальные смещения дневной поверхности (ВСДП), вызванные осадкой оттаивающих сильнольдистых пород верхних горизонтов многолетнемёрзлых пород (ММП), поскольку измерения подошвы СТС ведутся от дневной поверхности, отметки которой могут изменяться в течение летнего сезона. Это создаёт риск недооценки реальных темпов опускания кровли мерзлоты и, соответственно, ошибочной интерпретации реакции ландшафтов на наблюдаемое потепление климата высоких широт [1].

В данной работе рассматривается явление равномерной (изотропной) осадки при оттаивании многолетнемёрзлых пород, выраженной в понижения дневной поверхности без формирования термокарстовых форм рельефа. Основой исследования служат многолетние полевых наблюдения за глубиной сезонного оттаивания почвы и ВСДП на мониторинговой площадке CALM Лаврентия, расположенной в пределах научного полигона «Приморские равнины Восточной Чукотки».

Цель исследования – оценить текущие скорости опускания кровли мерзлоты и выявить природные факторы, влияющие на вертикальные движения поверхности в пределах площадки CALM «Лаврентия» на Восточной Чукотке.

**Регион исследований**. Площадка CALM Лаврентия (индекс R-27) расположена на территории полигона «Приморские равнины Восточной Чукотки», примерно в 800 м от южного берега залива Лаврентия, на пологом склоне водно-ледниковой равнины. Территория характеризуется слабым уклоном, сложена валунными суглинками, перекрытыми с поверхности торфянистым слоем мощностью до 30 см. Многолетнемёрзлые породы имеют сплошное распространение, их температура варьирует от -1..-2°C на приморских равнинах до -6°C в осевых частях горных массивов. По результатам неглубокого бурения в окрестностях площадки был обнаружен сильнольдистый переходный слой ММП мощностью 0,2-1,0 м [2]. Вокруг площадки распространены типичные тундровые комплексы: на равнинах – кочкарные тундры, в предгорьях – горные и лишайниковые тундры, а выше 200-250 м над уровнем моря – гольцовые ландшафты [3]. Природные условия района определяются субарктическим морским климатом с выраженной сезонностью теплообеспеченности и осадков. Сочетание сравнительно небольшого по мощности СТС, значительной льдистости подстилающих отложений и многолетних мониторинговых наблюдений делает этот участок подходящим для анализа многолетних трендов осадки и пучения пород.

**Методика**. Исследование основано на многолетних наблюдениях за глубиной сезонного оттаивания и вертикальными смещениями дневной поверхности за 2000-2024 гг. Мощность СТС измерялась по протоколу CALM в узлах площадки с помощью мерзлотного щупа, несколько раз в течение тёплого сезона, с точностью до 1 см, что позволило определить как межгодовые, так и вариации мощности СТС. Вертикальные колебания отметок поверхности определялись одновременно с измерением мощности СТС по высоте металлических марок, вмороженных в ММП узлах площадки CALM в 2003 г. (всего 121 марка). Высота марок измерялась рулеткой с точностью 1 мм. Для уточнения пространственного распределения отметок поверхности площадки проводились геодезические съёмки в 2006, 2012, 2018 и 2023 гг., а в 2024 г. дополнительно выполнена аэрофотосъёмка с БПЛА и построена цифровая модель местности. Климатические данные были взяты по метеостанции Уэлен (летние и зимние осадки) и по реанализу ERA5 (температура воздуха), на их основе вычислялись суммы положительных и отрицательных среднесуточных температур – индексы оттаивания DDT и промерзания DDF. Кроме того, в 2019-2020 гг. были выполнены буровые работы, позволившие охарактеризовать криолитологическое строение и льдистость верхних горизонтов ММП.

**Результаты и обсуждение**

За 2000-2024 гг. климатические условия в районе исследований демонстрировали высокую межгодовую изменчивость без статистически значимого направленного тренда за сам период наблюдений, хотя в более длинном временном масштабе (1970-2020 гг.) прослеживается устойчивое повышение среднегодовой температуры воздуха со скоростью 0,6-0,7°C / 10 лет. На фоне повышенной теплообеспеченности летних сезонов мощность СТС за мониторинговый период в целом росла, однако среднемноголетний тренд не превысил 0,5 см/год. Вместе с тем, средняя осадка поверхности за 2003-2024 гг. составляла 2,4 см/год, а суммарное опускание за 20 лет достигло 50,5 см в среднем по всей площадке Лаврентия. При этому отмечается чёткая взаимосвязь амплитуды сезонных изменений отметок поверхности от летней теплообеспеченности: в наиболее тёплые годы скорость осадки возрастала до 3,2-3,5 см/год, тогда как в прохладные сезоны снижалась до 1,4-1,9 см/год.

Криолитологические исследования керна из неглубоких скважин выявило хорошо выраженный переходный слой мерзлоты, представленный сильнольдистыми суглинками и прослоями льда. Именно этот слой является ключевым источником необратимого летнего опускания поверхности. В отличие от обычного сезонного оттаивания, протаивание переходного слоя не компенсируется зимним пучением полностью, и поэтому дневная поверхность постепенно понижается даже при колеблющейся мощности СТС. При этом вышеуказанный тренд роста мощности СТС по результатам измерений щупом был существенно меньше, что подтверждает скрытый характер процесса и недооценку скоростей опускания кровли ММП при традиционном подходе.

Пространственный анализ показал, что наибольшие значения осадки приурочены к ложбинам стока и локальным понижениям рельефа, однако в целом для сетки наблюдений статистически значимого влияния положения в рельефе, мощности органогенного слоя и средней глубины оттаивания обнаружено не было. По всей видимости, ведущую роль в дифференциации скоростей опускания поверхности на микроландшафтном уровне играют не поверхностные условия (рельеф, растительность), а криолитологические свойства переходного слоя ММП и история его формирования. Таким образом, именно криофациальное строение мерзлоты оказывается важнее современных ландшафтных параметров при объяснении вертикальных движений поверхности.

**Заключение**. Проведённое исследование показало, что на площадке CALM Лаврентия за 2004-2024 гг. наблюдается устойчивое опускание дневной поверхности, не сопровождающееся формированием выраженных отрицательных форм рельефа. Скорость осадки повышается в тёплые годы и сокращается в прохладные, а суммарное понижение поверхности за два десятилетия составляет десятки сантиметров. Показано, что при современном потеплении климата сезонная осадка может развиваться на фоне относительно стабильных межгодовых колебаний мощности СТС. При этом изменения мощности СТС, измеряемые щупом, существенно отстают от реальных вертикальных деформаций, что означает недооценку темпов понижения кровли мерзлоты. Таким образом, для корректной оценки реакции криолитозоны на потепление необходимо сочетать стандартный мониторинг СТС с измерением вертикальных движений поверхности и изучением криолитологического строения верхних горизонтов мерзлоты, что позволит точнее прогнозировать изменения криогенных ландшафтов в арктических и субарктических районах.

**Благодарности**. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-17-00010.

***Литература***

1 Маслаков А. А., Стрелецкий Д. А., Замолодчиков Д. Г. Многолетний мониторинг осадки почв и верхней толщи многолетнемерзлых пород на площадке научного полигона" Приморские равнины Восточной Чукотки" // Криосфера Земли. – 2025. – Т. 29. – №. 5. – С. 3-19.

2 Маслаков А. А., Комова Н. Н. Деградация льдистых отложений приморских равнин Восточной Чукотки при современных климатических условиях // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. – 2019. – №. 6. – С. 113-117.

3 Грищенко М. Ю., Маслаков, А. А., Григорян, А. Г., Алдошин, И. А. Вегетационный индекс NDVI как показатель динамики мерзлотных процессов и техногенеза на Чукотском полуострове //Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2026. – №. 6. – С. 103-117.

## РОЛЬ ИНСТИТУТА КРИОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В РАЗВИТИИ КРИОЛОГИИ

***В.П.Мельников[1,2], Д.С.Дроздов[1,3], А.А.Васильев[1], Г.В.Малкова[1], Я.Б.Горелик[1], М.О.Лейбман[1], Е.А. Слагода[1], Ф.М.Ривкин[1], М.Р.Садуртдинов[1], А.В.Хомутов[1], О.Л. Опокина[1], Е.А. Бабкина[1], Н.С.Молокитина[1], Г.Е.Облогов[1], А.Г.Скворцов[1], О.Е.Пономарева[1,3], В.С.Шейнкман[1], М.С.Судакова[1,2], А.Г.Гравис[1], А.М.Решетников[1], К.А.Плетнева[1], А.М.Царёв[1], Ю.В.Коростелёв[1], А.А. Новосёлов[1], М.М. Данько[1], Д.А.Абрамов[1], Н.М.Бердников[1]***

*[1]Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,, г. Тюмень*

*[2]Московский государственный университет, г. Москва*

*[3] Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва*

**Введение**. Поиск приоритетных направлений фундаментальных исследований криосферы Земли в России — это жизненно необходимое условие для развития Арктики, территорий с вечной мерзлотой и замерзающими и оттаивающими грунтами. Процессы таяния и замерзания под поверхностью и частично на поверхности Земли служат источником непрерывного образования тепла и холода, а их воздействие на нижние слои атмосферы во многом формирует климат совместно с динамикой водных образований в слоях всей атмосферы мощностью в десятки километров. Всё это создает огромную энергию вокруг земного шара, которую еще предстоит освоить. В Российской академии наук были сформированы три института: в Москве (просуществовал 22 года), в Якутске — Институт мерзлотоведения СО РАН, возраст которого — 64 года, и в Тюмени — Институт криосферы Земли, созданный в 1991 году. Парадокс в том, что численность сегодня работающих институтов составляет

чуть более 300 сотрудников, которым масштабы криогенных толщ и мультидисциплинарность задач часто оказываются не под силу.

Таким образом, сохранение и развитие всей совокупности научных направлений, представленных в Институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, является объективно необходимым условием адекватного познания криосферы как целостной геосферной оболочки. Криосфера характеризуется значительным разнообразием составляющих объектов и термодинамических, гидрогеологических, геокриологических и ландшафтных условий их существования: подземные льды различного генезиса, газовые гидраты, сезонно- и многолетнемерзлые породы, субаквальные криогенные толщи, криогенные ландшафты и полигональные торфяники. Изучение подобного разнообразия требует консолидации усилий специалистов различных дисциплин: физики, химии, геологии, геокриологии, палеогеографии, почвоведения, геоморфологии и инженерных наук. В рамках текущей деятельности Института реализуются исследования, охватывающие практически указанный спектр — от физико-химических механизмов гидратообразования и самоконсервации газовых гидратов до мониторинга криогенных склоновых процессов, термокарста, термоэрозии, а также количественной оценки влияния антропогенных нагрузок и климатических изменений на устойчивость мерзлотных оснований при проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений. Прогнозирование реакции криолитозоны на современные и ожидаемые климатические воздействия, равно как и обеспечение надежности инфраструктурных объектов в Арктической зоне, невозможно без фундаментального понимания фазовых переходов вода — лед — пар в открытых и полузакрытых системах, анализа многолетних временных рядов температурных полей мерзлых толщ, палеогеографических реконструкций условий формирования криогенных образований, а также учета биогенных и геохимических факторов. Следовательно, комплексность и междисциплинарность научных подходов в криологии представляют собой не дань моде, а фундаментальное требование самой природы криосферы. Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в настоящее время является одной из немногих научных организаций на территории Российской Федерации, где интеграция перечисленных направлений осуществляется на систематической и организационно оформленной основе.

В последние годы мы стремимся к реализации холистического подхода для решения упомянутых задач, применение которого способно получить желаемый результат — создать цельную модель криосферы Земли, что возможно лишь в тесном сотрудничестве с научными и образовательными организациями. Это даст выход в науку и практику, обеспечить научно-техническое сопровождение текущих и перспективных экономических проектов в холодных регионах.

**Мониторинг и информационно-геосистемное моделирование криолитозоны.** В основе пространственно-временной экстраполяции геокриологических данных лежит ландшафтный (геосистемный) подход, обеспечивающий иерархическое разделение природно-территориальных комплексов. На его основе созданы геокриологические карты масштаба 1:1 000 000 для группы листов западного сектора Арктики (R-42,(43) – Ямал; Q-41 – Воркута; Q-42 – Салехард; Q-43 – Новый Уренгой), а также для листов Диксон и Тикси с единой легендой, учитывающей локальную и зональную изменчивость. Разработана методика оценочных карт прочностных характеристик мерзлых грунтов (расчётные сопротивления сдвигу по поверхности смерзания) для 2020 и 2050 гг. с учётом температуры, литологии, засоления и оторфованности. Ведётся работа по листам Норильск, Игарка, Певек.

Современные темпы потепления воздуха в Российской Арктике превышают 0,1 °C/год (ранее 0,03 °C/год). Среднегодовая температура многолетнемёрзлых пород повышается примерно в 3 раза медленнее — в среднем 0,028 °C/год, с максимумом 0,07–0,08 °C/год на арктическом побережье Сибири и минимумом 0,01 °C/год в островной криолитозоне. Глубина сезонного протаивания увеличивается повсеместно; на юге криолитозоны формируются условия для смены сезонного протаивания сезонным промерзанием и отступания границы мерзлоты. Динамическая картографическая модель для южной границы Западной Сибири показывает возможное смещение на север до 150 км к 2050 г. (бассейн р. Таз), где температуры пород близки к 0 °C, а льдистость минимальна.

Сопоставление многолетних наблюдений на Европейском Севере и в Западной Сибири в однотипных ландшафтах южной тундры выявило, что тренды повышения температуры пород различаются в 2–2,5 раза — от 0,01 до 0,05 °C/год. Более суровые зимние условия за Уралом обусловливают сохранение низких температур на водоразделах, тогда как склоны активно прогреваются. Наблюдается однонаправленное повышение температуры мерзлоты с сокращением общего диапазона её изменений. На Европейском Севере к 2020–2023 гг. глубина сезонного

протаивания достигла критической величины, превысив потенциальное сезонное промерзание. В отдельных ландшафтах начали формироваться несквозные талики и толщи несливающегося типа.

В южной криолитозоне (южная тундра и лесотундра) определяющими являются прерывистое и островное распространение мерзлоты. При высоте снега более 0,75 м сливающиеся мерзлые толщи практически отсутствуют. Скорость осадки поверхности льдистых пород на плоскобугристых торфяниках достигает 37 мм/год, на крупнобугристых — 54 мм/год. Отмечена активизация термокарста, криотурбации, термоденудации (максимум в 2024–2025 гг.). Моделирование показывает, что сохранение мерзлых торфяников возможно при среднегодовой температуре воздуха не выше +1,5 °С; при сохранении современного тренда (0,76 °С/10 лет) пороговое значение будет достигнуто примерно через 50 лет. В северной тайге при мощности торфа менее 0,5 м начинается формирование мерзлоты несливающегося типа, тогда как при мощности более 1 м сезонное протаивание не достигает минеральных грунтов. Новообразование мерзлоты носит возвратно-поступательный характер, а пятна без растительного покрова служат индикаторами неустойчивого состояния многолетнемёрзлых пород.

В позднем плейстоцене (МИС-2) на севере Западной Сибири шло коэволюционное формирование низкотемпературной мерзлоты, повторно-жильных льдов и криогенных почв. Подземные льды аккумулировали огромный запас холода, что в терминальную фазу МИС-2 предохранило вмещающие породы от оттаивания. Оттаивание повторно-жильных льдов растянулось почти на 10 тыс. лет (по данным радиоуглеродного датирования), и только в середине голоцена приречная зона полностью оттаяла, что зафиксировано формированием подзолов — индикаторов талого основания. Выявленные палеопочвы в составе псевдоморфоз по повторно-жильным льдам являются новым инструментом для реконструкции криогенных систем прошлого и обоснования инженерно-геологических элементов.

Для изучения крупных бугров пучения, потенциально связанных с газовыми выбросами (воронками), отработаны сейсмические методы. Исследование трёх «классических» бугров с ледяным ядром на севере Западной Сибири показало их стабильное состояние: выявлены талые зоны малой мощности (менее 4 м), отсутствуют полости с флюидами. По скоростям упругих волн, коэффициенту анизотропии и соотношению скоростей установлено, что предпосылок к разрушению нет, однако рекомендован мониторинг одного из бугров. Разработаны алгоритмы интерпретации и визуализации ледяных тел в толще многолетнемёрзлых пород.

**Исследование субаквальных и прибрежно-морских многолетнемерзлых пород.** Важнейшими результатами исследований являются определение условий формирования и деградации субаквальной и прибрежной криолитозоны Западной Арктики. Разработан цифровой альбом опубликованных и архивных карт СММП Российской Арктики. Все карты оцифрованы и приведены в единую картографическую проекцию, описано последовательное развитие представлений об условиях формирования и картирования мерзлоты на шельфе Российской Арктики от простых экспертных оценок до разработки сложных математических моделей, учитывающих палеогеографические условия и сценарии потенциальных климатических изменений. Выполнена реконструкция палеоклиматических условий времени формирования субаквальных многолетнемерзлых пород (СММП), представлена карта среднегодовых температур воздуха Карского моря и континентального окружения в сартанское время (МИС 2). Установлено, что температура закономерно изменялась от -12 °С в юго-западной части акватории до -18 °С в ее северо-восточной части. Разработана база данных проявления и глубины залегания СММП Баренцева и Карского морей на основе интерпретации высокоразрешающих сейсмоакустических профилей и данных бурения скважин. На этой основе построена цифровая карта распространения и глубины залегания СММП на шельфе Западной Арктики. Установлено закономерное погружение кровли СММП с запада на восток с 13.3 м в Баренцевом море до 29.5 м на северо-востоке Карского моря. Оценена скорость деградации СММП в постгляциальный период, составляющая 4.2 мм/год для Баренцева моря и 2.5 мм/год для Карского моря.

Впервые сделана попытка выявить закономерности влияния динамики растительного покрова при потеплении климата на изменение сезонно-талого слоя (СТС). Обобщены результаты многолетних наблюдений за изменением температуры многолетнемерзлых пород континентального обрамления морей Западной Арктики, установлены многолетние тренды повышения среднегодовой температуры мерзлоты – от 0.02 °С/год в районе Воркуты до 0.08 °С/год на севере территории, представлена карта пространственного распределения многолетних трендов температуры мерзлоты Западной Арктики.

**Исследование криогенных процессов, образований и криотрасологии.** В рамках научного направления развивается и апробируется комплекс методов изучения криогенных процессов и их

рельефообразующей роли. Рассматриваются процессы, развивающиеся в современных условиях динамики климата, ландшафтов и антропогенеза, а также процессы и их проявления в разрезах Квартера. Решение поставленных задач базируется на комплексировании известных и новых методов исследования, включающих полевые, дистанционные и лабораторные методы, а также «полевое», концептуальное и картографическое моделирование. Основные исследования проводятся на севере Западной Сибири на научных полигонах, организованных в разные периоды исследований. Наиболее длительное время исследования проводятся на стационаре Васькины Дачи на Центральном Ямале, где наряду с мониторингом глубины сезонного протаивания и температуры пород исследуется динамика криогенных склоновых процессов и связанная с их развитием трансформация ландшафтов: растительности, геохимического фона, состава донных отложений и воды озер. Полигон Тазовский в северной части Пур-Тазовского междуречья отличается распространением полигональных торфяников с хорошо развитыми повторно-жильными льдами. На этом полигоне наряду с мониторингом глубины сезонного протаивания и температуры пород ведется исследование динамики полигонального рельефа, перерабатываемого термоэрозией, термоабразией и термокарстом. Повторно-жильные льды, обнажающиеся под воздействием термоэрозии, позволяют проводить палеогеографические реконструкции с применением методов радиоуглеродного датирования, изотопной геохимии и других палеогеографических методов. Установлено, что в северной части Пур-Тазовского междуречья на рельефообразующие процессы в голоцене влиял палеоклимат: на увалах – термоденудация, протаивание жил льда с образованием псевдоморфоз; в ложбинах – заболачивание, аккумуляция торфа, промерзание и рост ледяных жил. Помимо этого, на полигоне Тазовский исследуется влияние антропогенеза на эволюцию полигонального рельефа. Кроме того, исследования ведутся и на Гыданском полуострове, и в районе г.Салехард и в других районах севера Западной Сибири. В исследуемом районе в 2014 г. были обнаружен новый феномен – воронки газового выброса, исследованию которых также были посвящены полевые, лабораторные, дистанционные исследования. В результате изучения криогенных процессов были сформулированы концептуальные модели криогенного оползания и воронок газового выброса. Установлено необходимое условие для развития этих процессов на севере Западной Сибири – наличие подземных пластовых льдов на небольшой глубине от поверхности. Триггером обоих процессов на наш взгляд являлся тренд потепления. Для склоновых процессов этот триггер обеспечил углубление сезонного протаивания до глубины залегания кровли пластовых льдов. При этом изменился механизм смещения пород на склонах, что привело к смене преобладавших ранее криогенных оползней скольжения оползнями течения с образованием термоцирков. Обнаружение аутигенного барита в многолетнемерзлых породах палеотермоцирка доказывает возможность образования барита при отрицательных температурах в континентальных обстановках. Аутигенный барит может служить индикатором криогенного концентрирования солей и сульфатредукции цикличного промерзания-протаивания при формировании многолетнемерзлых пород и льдов. Образование воронок газового выброса связано с потеплением через диссоциацию реликтовых газовых гидратов, сформировавших специфические газовые бугры, взрыв которых привел к формированию воронок, а затем и озер на их месте. Изучение динамики полигональных торфяников на Тазовском полигоне показало связь скорости их разрушения с антропогенным воздействием, в особенности, с влиянием насыпи автодороги, определившей перераспределение стока поверхностных вод и, соответственно, усиление термоэрозии на одних участках и её затухание на других.

**Обеспечение надежности инженерных сооружений в Северных регионах.** Пути решения сформулированной в заголовке проблемы традиционно относятся к Инженерному мерзлотоведению, которое часто ассоциируется с довольно рутинным занятием, лишенным научной романтики. Однако, это не так. Инженерные проблемы Севера относятся к числу наиболее актуальных в общественном запросе и к наиболее содержательным в плане научных исследований. Обусловлено это объединением в проблеме трех областей знания: техника, геология (геокриология) и физика. Это обстоятельство порождает большое количество весьма интересных научных направлений, которые имеют главные корни в одной или в нескольких из этих областей. Для полноценного решения задач Инженерного мерзлотоведения необходимо быть достаточно компетентным в каждой из этих трех областей знания. Можно также отметить, что в основе решения прикладных задач Инженерного мерзлотоведения, как правило, лежит какая-то часть фундаментальной проблемы, которая либо недостаточно разработана, либо недостаточно адаптирована для решения прикладной задачи. Доработка фундаментальной части обычно является наиболее сложным и интересным элементом разрабатываемого приложения.

С момента создания Института криосферы Земли сотрудниками лаборатории ТМЯ при непосредственном участии автора настоящего раздела решено несколько прикладных задач, которые представляют значительный научный интерес и прикладную значимость. Охарактеризуем их здесь кратко.

1. Инъекционный механизм льдонакопления в промерзающих грунтах. Результаты этой работы важны для обоснования природы формирования наледей в некоторых случаях, а также для характеристики силового воздействия на элементы конструкций при промерзании замкнутых таликов. Работа содержит результаты как экспериментальных (лабораторных), так и теоретических исследований. Представлена 4-мя публикациями (уровня Scopus).
2. Природа сил морозного пучения и метод расчета воздействия на фундаменты. Результаты важны для понимания сегрегационного механизма льдонакопления при промерзании грунтов, природы сил пучения, а также для их количественного описания. Представлена 3-мя публикациями (уровня Scopus).
3. Механизм возникновения осевых нагрузок на крепь скважин при оттаивания мерзлых пород и способ их расчета. Результаты исследования впервые применены для объяснения причин возникновения аварийных деформаций крепи добывающих скважин в глубоких горизонтах мерзлых пород и для разработки рекомендаций по их предотвращению при проектировании конструкций крепи. Представлена 3-мя публикациями (уровня Scopus).
4. А) Исследование эффективности оребрения надземной части вертикальных термостабилизаторов для сооружений, протяженных в плане. Результаты важны для снижения капитальных затрат при строительстве сооружений. Б) Исследование эффективности поверхностного способа охлаждения грунтов основания в комбинированном сочетании систем ГЕТ и теплоизоляции. Результаты важны для повышения эффективности термостабилизации основания с применением двухфазных конвективных устройств. Представлена 3-мя публикациями (уровня Scopus)
5. Исследование влияния неглубокого водоема на температурный режим мерзлого основания насыпных сооружений. Результаты важны для разработки мероприятий по предотвращению негативного влияния водоема на мерзлые основания насыпных сооружений. Представлена 2-мя публикациями (уровня Scopus).
6. Исследование влияния излучения высокой интенсивности от действующих факелов технологического назначения при добыче углеводородов на мерзлое основание мачты факела, а также на мерзлые грунты прилегающей территории. Результаты важны для проектирования защитных мероприятий от воздействия факельного излучения, а также для обеспечения устойчивости мачты факела. Представлена 2-мя публикациями (уровня Scopus).

Помимо прочего, материалы этих исследований частично вошли в 5 нормативных документов ОАО ГАЗПРОМ по строительству на ммг. Получение новых результатов по тематике приведенных исследований продолжается и сегодня. В настоящее время приняты к рассмотрению новые интересные задачи, связанные с актуальными вопросами влияния климатических изменений на динамику температурного режима грунтов и разработку методов прогноза такого влияния.

**Исследование процессов образования, диссоциации и самоконсервации гидратов природных газов.** Коллектив Лаборатории гидратов природных газов решает фундаментальную для криологии и науки о криосфере Земли проблему – понимание и управление фазовыми переходами в многокомпонентных системах «вода – лед – газовый гидрат – газ» при отрицательных температурах. Для науки и экономики значимость таких исследований определяется необходимостью перехода к низкоуглеродной энергетике: технологии улавливания и захоронения углекислого газа в форме гидратов, а также транспортировка природного газа в твердом гидратном состоянии рассматриваются как один из возможных экологичных и безопасных альтернатив сжижению и компримированию для реализации в районах распространения многолетнемерзлых пород. Основная технологическая проблема, признаваемая мировым научным сообществом, – крайне низкая скорость образования газовых гидратов и неполная конверсия воды, что сдерживает промышленное внедрение гидратных технологий. Для России, с ее уникальной криолитозоной и стратегическими интересами в Арктике, разработка отечественных промоторов на основе доступного сельскохозяйственного сырья

(лецитины, лизин, биополимеры) имеет не только научное, но и выраженное прикладное и импортозамещающее значение. Целью работ коллектива является поиск и тестирование новых природных промоторов и ингибиторов гидратообразования, а также выявление физико-химических механизмов, управляющих этими процессами, с перспективой создания технологий хранения, транспорта и утилизации газов в криолитозоне.

В числе ключевых результатов, значимых для криосферы Земли и обладающих высоким международным приоритетом, следует отметить экспериментальное доказательство образования переохлажденной воды при диссоциации гидратов пропана при температурах ниже 270 К. Этот феномен имеет прямое отношение к механизму самоконсервации газовых гидратов – их способности сохранять газ вне термодинамических условий стабильности, что критически важно для оценки долговременного поведения гидратов в криолитозоне и для разработки технологий хранения газа в твердом состоянии при атмосферном давлении и отрицательных температурах. Другой важный результат – исследование кристаллизации льда в дисперсии «сухая вода» и ее производные (микрокапли воды, стабилизированные гидрофобными наночастицами), продемонстриовавшие высокие результаты при многократном использовании. Показано, что гидрофобные частицы выступают эффективными центрами гетерогенной нуклеации льда, а циклы замерзания-оттаивания приводят к частичной коалесценции капель, но значительная доля дисперсной фазы сохраняется.

В области поиска промоторов, что является наиболее острой мировой задачей, установлено, что растительные лецитины являются эффективными кинетическими промоторами гидратообразования метана, обеспечивая степень конверсии воды в гидрат до 97% при отсутствии термодинамического влияния и, что критически важно, обладая низкой пенообразующей способностью (кратность пены 1,2 против 14,6 у SDS). Для России, где соевый и подсолнечный лецитины производятся в больших объемах как отходы масложировой промышленности, это открывает возможность создания дешевых и экологичных технологий гидратного хранения газа.

С помощью дифференциальной сканирующей калориметрии расширены данные о кинетике фазовых переходов в порошковых криогелях поливинилового спирта (ПК ПВС) – материале, разработанном в Институте криосферы Земли для многократного синтеза гидратов. Установлено, что кристаллизация льда в частицах криогеля происходит преимущественно изолированно (симметричные пики ДСК, «микро-реакторный» механизм), в то время как образование гидрата метана имеет лавинообразный механизм роста (асимметричные пики), что объясняет высокую скорость гидратообразования. Показано также, что наиболее благоприятный температурный диапазон для образования гидрата метана в ПК ПВС должен быть выше температуры плавления льда, иначе совместное формирование льда и гидрата снижает газопоглощающую способность системы при многократных циклах – этот вывод важен для оптимизации циклических гидратных реакторов.

Все эти результаты имеют прямое значение для развития науки о криосфере Земли, поскольку они раскрывают механизмы фазовых переходов в дисперсных и замороженных системах, которые являются аналогами природных криогенных образований. Понимание гетерогенной нуклеации льда, условий образования метастабильной переохлажденной воды при диссоциации гидратов и кинетики гидратообразования в пористых средах необходимо для моделирования поведения многолетнемерзлых пород при климатических изменениях (деградация мерзлоты, эмиссия метана и $CO_2$), оценки устойчивости гидратоносных толщ при техногенных воздействиях (бурение, добыча, закачка газов) и разработки новых технологий захоронения парниковых газов в криолитозоне.

**Благодарности.** Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FWRZ-2026-0016, FWRZ-2026-0025, FWRZ-2026-0023, FWRZ-2026- 0027, FWRZ-2024-0003)

## КОМБИНИРОВАННАЯ СВАЯ С ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРОМ С ЕСТЕСТВЕННОЙ И ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ХЛАДОНОСИТЕЛЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

***И.В. Местникова[1], В.В. Местников[1], В.В. Местников[2]***
*[1] ООО «Геотехстрой», г. Якутск*
*[2] ФГАОУ ВО Северо-Восточный федеральный университет им М.К. Аммосова, г. Якутск*

В условиях криолитозоны надежность оснований и фундаментов напрямую связана с сохранением

расчетной отрицательной температуры мерзлых грунтов [1]. Потепление климата и повышение среднегодовой температуры многолетнемерзлых грунтов приводят к деградации многолетней мерзлоты, что вызывает увеличение недопустимых осадок, деформаций и рисков аварийных ситуаций [2, 3].

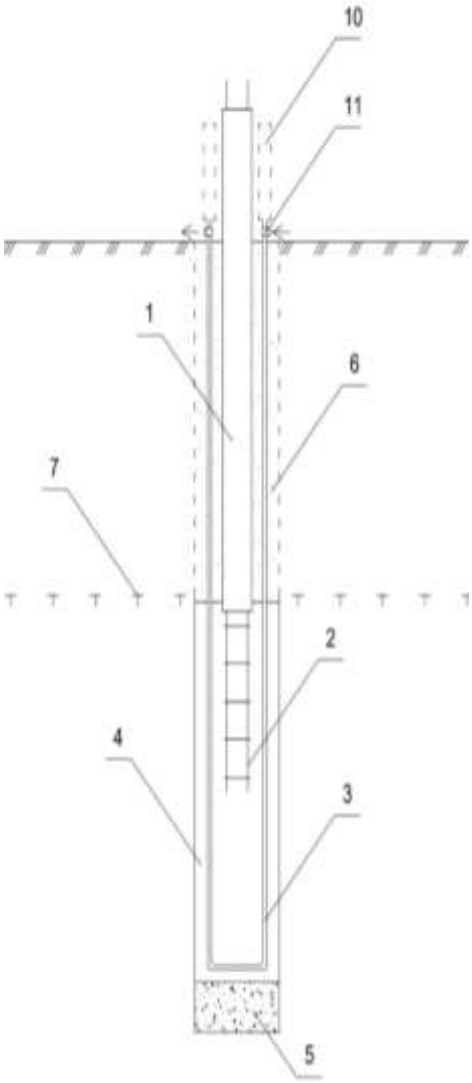



Рис.1. Комбинированная свая с U-образным термостабилизатором с естественной и принудительной циркуляцией хладоносителя

В центральной Якутии каменные здания и сооружения построены в основном на свайных фундаментах, устроенных буроопускным и буронабивным способами. Однако данные фундаменты имееют ряд существенных недостатков. Для буроопускных свай: большой объём буровых работ, высокая стоимость сваи, низкая несущая способность, выпучивание в пучинистых грунтах, длительный технологический перерыв на вмерзание сваи и др. Для буронабивных свай: большой объём буровых работ, повышенный расход материалов, отсутствие контроля качества бетона в слое сезонного оттаивания и промерзания, где железобетонные конструкции подверженя попеременному оттаиванию и промерзанию, выделение большого количества тепла при экзотермии бетона и растепление примыкающего грунтового массива, длительный технологический перерыв на восстановление температурного режима грунтов основания, необходимость электропрогрева зимой и др. [4]

Согласно таблице 6.2 СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» для железобетонных конструкций, находящихся в деятельном слое и подвергающихся попеременному оттаиванию и замерзанию в водносыщенном состоянии при температуре наружного воздуха ниже -40 $^0$C, требуется бетон класса не ниже В35, морозостойкости F400 и водонепроницаемости W10 [5]. Данное требование свода правил необходима только для конструкций, находящихся в слое сезонного оттаивания и промерзания, но на практике бетон с такими завышенными характеристиками применяется на всю длину сваи, что увеличивает её стоимость.

Для устранения вышеуказанных недостатков авторами разработаны комбинированная свая с термостабилизатором и способ её устройства [6, 7]. Комбинированная свая с U – образным термостабилизатором с естественной и принудительной циркуляцией хладоносителя с возможностью подключения к холодильным агрегатам, предусматривающая сочетание буроопускного и буронабивного способов устройства свайных фундаментов и сезоннодействующего охлаждающего устройства показана на рисунке 1. Устройство состоит из сборной железобетонной части сваи 1 с арматурными выпусками 2, которые необходимы для надежного соединения с нижней монолитной частью сваи 4. U-образная металлическая труба 3 необходима для закачки хладагента в целях восстановления температурного режима и охлаждения грунтового массива вокруг сваи. При низких отрицательных температурах наружного воздуха есть вероятность замораживания бетона на стыке сборной и монолитной части сваи, в этом случае для создания нормальных условий твердения бетона можно установить в U – образную металлическую трубу нагревательный элемент.

Перед установкой сборной части железобетонной сваи 1 на дно предварительно пробуренной скважины укладывают слой из щебня или гравия 5 для предотвращения контакта свежеуложенного бетона монолитной части сваи 4 с многолетнемерзлым грунтом под нижним концом сваи. Далее устанавливают U-образную металлическую трубу 3 и сборную железобетонную часть сваи 1 в проектное положение, закрепляют на кондукторах и бетонируют нижнюю часть сваи 4 в слое многолетнемерзлых грунтов. Ствол скважины в деятельном слое заполняют непучинистым грунтом 6. После в металлическую трубу 3 погружают нагревательный элемент и подключают к источнику тока, при этом на границе между сборной 1 и монолитной 4 частями сваи, то есть на уровне верхней

границы многолетнемерзлых грунтов 7, устанавливают термоизоляционную пробку для создания теплового контура в нижней монолитной части сваи 4.

После схватывания бетона нагревательный элемент и термоизоляционную пробку удаляют из U-образной металлической трубы 3, в верхней ее части присоединяют конденсаторный блок 10 с ниппелем для закачки хладагента с возможностью подключения к холодильным агрегатам через трехходовый кран 11 и, после закачки хладагента, свая будет представлять собой «холодную сваю» с охлаждающим устройством, что приведет к более интенсивному охлаждению примыкающего грунтового массива, уменьшению технологического перерыва на восстановление расчетных значений температуры грунтов основания и сокращению сроков строительства, а также последующему понижению температуры данных грунтов и значительному повышению ее несущей способности.

Несущая способность таких свай определяется как сумма сил смерзания по боковой поверхности и нормального давления по торцу монолитной части сваи. Повышение несущей способности свай по сравнению с традиционными буроопускными сваями достигается за счет увеличения площади бокового смерзания и площади торца в нижней монолитной части сваи, а также понижения температуры и значительного увеличения несущей способности грунтов основания в результате работы охлаждающего устройства.

Так как нижняя монолитная часть сваи работает на центральное сжатие, арматура в нем требуется только для надежного соединения верхней сборной части сваи с нижней монолитной, тем самым отпадает необходимость её армирования на всю длину, что приведет к значительному снижению расхода арматуры [8].

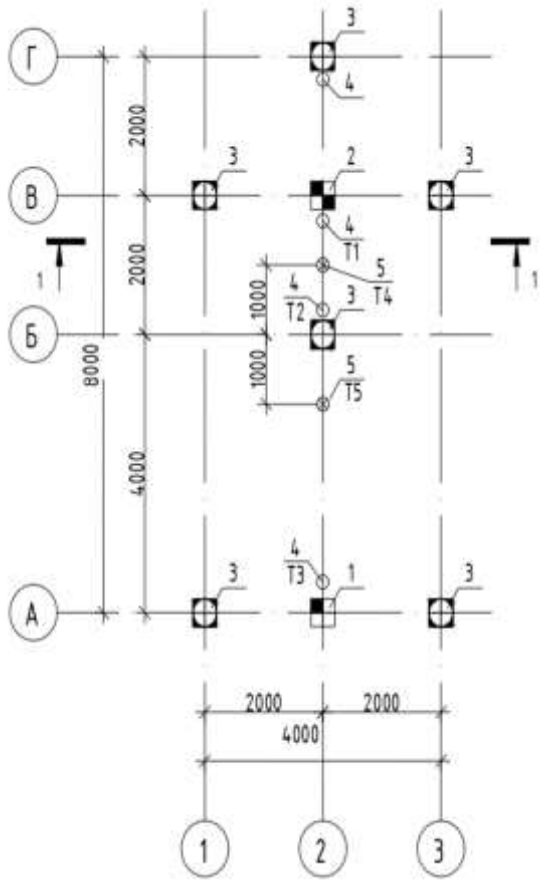



Рис. 2. Схема расположения свай: 1 – буроопускная свая СМ 8-40-85; 2 – Комбинированная свая с термостабилизатором; 3 – анкерные буронабивные сваи; 4 – термометрические трубки Т1, Т2, Т3; 5 – термометрические скважины Т4, Т5.

Натурные испытания комбинированной сваи с термостабилизатором выполнены в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по теме: «Разработка и испытание комбинированных свай с термостабилизаторами с естественной и принудительной циркуляцией хладоносителя в криолитозоне» согласно госконтракту № 32514965236 – 6/2025 от 21 июля 2025 года с ФАУ ФЦС [9].

Для проведения натурных испытаний были установлены испытуемые и анкерные сваи на опытном полигоне по адресу: городской округ Якутск, с. Хатассы, пер. Щукина, 4. Расположение свай, температурных трубок и термометрических скважин показано на рисунке 2.

Сваи установлены 02 августа 2025 г. Для комбинированной сваи глубина бурения скважины диаметром 650 мм составила 6,8 м. После бурения установлены U – образные термостабилизаторы и произведена засыпка дна скважины щебнем высотой 650 мм, которая необходима для предотвращения теплового контакта свежеуложенного бетона с грунтами основания под нижним концом сваи. Послойное трамбование щебня на дне скважины выполнено свободным сбрасыванием металлической гири весом 24 кг с высоты 7-8 м. Установка верхней сборной части комбинированной сваи показана на рисунке 3. Для предотвращения возможного загиба выпусков арматуры при подъёме сборной части сваи строповку следует выполнять в зоне, максимально приближенной к их центру тяжести. Такой способ подъёма обеспечивает равномерное распределение усилий по сечению изделия и минимизирует риск возникновения изгибающих моментов, способных привести к деформации арматурных выпусков.

Свая закрепляется в проектное положение при помощи хомутов на установленные по уровню деревянные брусья (рисунок 4). После бетонируется нижняя монолитная часть сваи в слое

Рис. 3. Установка сборной части сваи.

Рис. 4. Закрепление сборной части сваи.

многолетнемерзлых грунтов. Уплотнение бетонной смеси производится глубинным вибратором. Для повышения эффективности работы системы и снижения хладопотерь в деятельном слое на U – образных металлических трубах термостабилизатора установлены теплоизоляционные цилиндры из вспененного полиэтилена Energoflex толщиной 15 мм. В пределах деятельного слоя скважина засыпана щебнем.

Для принудительного охлаждения U-образная металлическая труба диаметром условного прохода 32 мм и толщиной стенки 2,8 мм, встроенная в комбинированную сваю, подключена через полипропиленовые трубы PPR PN 10 диаметром 40 мм к конденсаторному блоку (радиатору), находящемуся в низкотемпературной климатической камере Polaris. Моноблок CBB500YEF фирмы Technoblok обеспечивает в климатической камере температуру от -23 $^0$C до -25 $^0$C. В качестве хладагента использован водный раствор этиленгликоля с температурой кристаллизации -65 $^0$C. Циркуляция в системе производилась центробежным насосом. Все детали системы, находящиеся на открытом воздухе, тщательно утеплены. Общий вид охлаждающей системы показан на рисунке 5.

Рис. 5. Общий вид охлаждающей системы.

Натурные испытания комбинированной сваи с термостабилизатором проводились с целью оценки теплового взаимодействия конструкции сваи с примыкающим многолетнемёрзлым грунтовым массивом, а также определения её несущей способности в полевых условиях. Экспериментальная программа предусматривала устройство опытной сваи с интегрированной системой термостабилизации и контрольной буроопускной сваи. Испытательный участок был оснащён системой температурного мониторинга, включающей термометрические скважины, размещённые на различных расстояниях от оси сваи.

Контроль температуры грунтов основания осуществлялся информационно-регистрирующим комплексом ИРК «KrioLab» (зав. № 1341, свидетельство о поверке № С-М/20-08-2025/45817302) с многозональными цифровыми датчиками температур ТК 1/10/21 по ГОСТ 25358–2020 «Грунты. Метод полевого определения температуры» [10]. Измерения проводились регулярно на протяжении

всего периода наблюдений и включали регистрацию температуры грунта по глубине, а также параметров хладоносителя на входе и выходе из системы.

В процессе испытаний рассматривались два режима работы термостабилизации грунтов основания. В период положительных температур наружного воздуха движение охлажденного в климатической камере хладоносителя обеспечивалась циркуляционным насосом. В режиме естественной циркуляции – за счет разности плотности холодного и теплого хладоносителя.

Для передачи нагрузки на сваю был собран испытательный стенд с силовой установкой на 400 тс. Нагружение осуществлялось двумя параллельно соединёнными гидравлическими домкратами ДГ200-150П (усилие 200 тс каждый) с давлением, создаваемым маслостанцией МГС 700-0,8-20-Р-2. Нагрузка передавалась через металлические балки из двутавра 70Б4 (сталь 09Г2С), закреплённые на четырех анкерных буронабивных сваях диаметром 650 мм и глубиной 6,8 м. Измерение перемещений сваи производилось двумя индикаторами часового типа ИЧ-50 с ценой деления 0,01 мм. Общий вид испытательного стенда представлен на рисунке 6.

Рис. 6. Общий вид испытательного стенда

Нагружение сваи проводилось ступенями в соответствии с ГОСТ 5686–2020 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями.» [11]: первая ступень – 0,4F (80 тс), вторая – 0,2F (40 тс), последующие – по 0,1F (20 тс) до достижения контрольной нагрузки 200 тс. На каждой ступени снимались отсчёты по индикаторам: нулевой – перед нагружением, первый – сразу после приложения нагрузки, затем последовательно через 30 мин, 1, 2, 4, 8, 16 и 24 ч и далее с интервалом не более 24 ч до условной стабилизации деформации. За критерий условной стабилизации принята скорость осадки не более 0,2 мм за последние 24 ч наблюдений. Разгрузка производилась ступенями, равными удвоенным значениям ступеней нагружения, с выдержкой каждой ступени не менее 15 мин.

Результаты натурных испытаний показали, что применение комбинированных свай с термостабилизаторами с естественной и принудительной циркуляцией хладоносителя в качестве фундаментов зданий и сооружений позволят достичь значительного экономического эффекта:

– повышение качества устройства фундаментов - в деятельном слое, где происходят наибольшие разрушения фундаментных конструкций вследствие попеременного оттаивания и замораживания грунтов, устанавливается заводского изготовления (100 % контроль качества до погружения) сборная часть железобетонной сваи без раковин и трещин, что не может быть гарантировано при устройстве буронабивных свай;

– экономия на материалах - в нижней части свай, находящейся в зоне стабильных мерзлых грунтов, применение бетонов с пониженными характеристиками приведет к экономии цемента и других добавок, широкому применению местных сырьевых ресурсов, что снизит затраты на устройство свай, перевозку материалов. Исключение расчетного армирования монолитной части свай позволит достигнуть существенной экономии арматурной стали;

– экономия на транспортных расходах и эксплуатации строительных машин и механизмов – вес сборной части сваи около 1,5 т, тем самым при перевозке можно использовать бортовые автомобили с кранами-манипуляторами и ими же устанавливать сваи на стройплощадке;

– повышение несущей способности фундаментов за счет работы сил смерзания по боковой поверхности и по торцу нижней монолитной части сваи, а также существенного увеличения несущей способности грунтов основания в результате работы встроенного термостабилизатора;

– увеличение сопротивляемости силам морозного пучения (конструктивная особенность сваи с нижней массивной монолитной частью надежно анкерует ее в слое многолетнемерзлых грунтов);

– сокращение сроков строительства - применение термостабилизаторов приведет к существенному сокращению технологического перерыва на вмерзание свай и значительному сокращению сроков строительства независимо от температуры наружного воздуха;

– повышение качества бетона при зимнем бетонировании - есть возможность применения термостабилизатора в качестве нагревательного элемента для создания нормальных условий твердения бетона при низких отрицательных температурах;

– повышение надежности работы свай, включая сценарий возможного потепления климата – уширение нижней монолитной части увеличивает долю нагрузок, передаваемых торцевой частью свай, что обеспечит лучше сохранить несущую способность свай при изменении (повышении) температуры грунтов основания.

***Литература***

1 Местников В.В., Местникова И.В. Рациональные типы фундаментов для малоэтажного строительства в криолитозоне // Наука и техника в Якутии. – 2019. – №2 (37). – С. 8-11.

2 Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Aalto J, Westermann S., Romanovsky V., Nelson F., Etzelmüller B., Luoto M. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // Nature Communications. - 2018. - V. 9. 5147.

3 Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Permafrost, Infrastructure, and Climate Change: A 50-Year Study, 1950–2000 // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. – 2012. - V. 44. No. 3. P. 368–380.

4 Местникова И.В. Комбинированный способ устройства свайных фундаментов в криолитозоне // Материалы Общеуниверситетской научной конференции студентов СВФУ «АММОСОВ – 2019». Якутск, 2019. - С. 841-844.

5 СП 25.13330.2020. Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88* (с Изм. № 1, 2). – М.: Стандартинформ, 2021. – 110 с.

6 Местников В.В., Местникова И.В., Местников В.В./ Патент №2830424 Российская Федерация, МПК E02D 27/35 (2024.08) Комбинированный способ устройства свайных фундаментов в многолетнемерзлых грунтах № 2024107189; заявл. 20.03.2024, опубл. 19.11.2024

7 Местников В.В., Местникова И.В., Местников В.В./ Патент №2843420 Российская Федерация, МПК E02D 27/35 (2025.01) Сборно-монолитная свая № 2024133216; заявл. 06.11.2024, опубл. 14.07.2025

8 Местников В.В., Местникова И.В., Местников В.В. Численный анализ напряженно-деформированного состояния комбинированной сваи в многолетнемерзлых грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2023. - №3.- С. 10-14.

9 Корнилов Т.А., Местников В.В., Местникова И.В., Местников В.В. и др. Разработка и испытание комбинированных свай с термостабилизаторами с естественной и принудительной циркуляцией хладоносителя в криолитозоне [Электронный ресурс]: Отчет НИОКТР/ 2025 – Режим доступа: https://gisnauka.ru/ikrbs/detail/SE8L7SYJ6ONGQE9KDCSBSWE4 (дата посещения 10.04.2026).

10 ГОСТ 25358-2020. Грунты. Метод полевого определения температуры. – Введ. 2021-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 12 с.

11 ГОСТ 5686-2020. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. – Взамен ГОСТ 5686-2012; введ. 01.01.2021. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 58 с.

## СТРОИТЕЛЬСТВО НА НЕВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

***Ю.М. Мосенкис***

*Саморегулируемая организация Ассоциация «Межрегиональный союз проектировщиков и архитекторов Сибири» (СРО СПАС), г. Омск*

В настоящее время в России на вечномерзлых грунтах большинство зданий (около 75%) строятся по принципу I – с сохранением вечномерзлого состояния грунтов оснований на период строительства и эксплуатации зданий.

Пределы применения принципа II на оттаивающих основаниях практически ограничиваются наличием малольдистых и несжимаемых при оттаивании вечномерзлых грунтов при условии, если величина деформации оттаивающего основания не будет превышать предельно допустимую величину, нормируемую требованиями п. 3.69 СНиП II-

15-74 «Основания зданий и сооружений» для условий талых грунтов, а в случае превышения предельных величин деформаций необходимо разрабатывать специальные технические решения по приспособлению зданий к повышенным неравномерным осадкам оттаивающих оснований.

Учитывая, что в настоящее время при строительстве основной строительной системой являются здания каркасного типа, расчеты по приспособлению зданий к повышенным неравномерным осадкам оттаивающих оснований представляют собой чрезвычайно сложную инженерную задачу.

Свод правил СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» предусматривает расчет оснований и фундаментов по деформациям с учетом совместной работы оснований и сооружений по первой группе предельных состояний на воздействия, вызываемыми неравномерными осадками оттаивающего основания.

Основная проблема заключается в невозможности определения достоверного значения расчетных усилий, возникающих в элементах конструкций сооружения при неравномерных осадках оттаивающего основания, в процессе проектирования, т.к. для каркасных строительных систем, насчитывающих десятки стоек-колонн, нереально определить значения расчетных осадок оттаивающих оснований под каждой колонной, т.к. при инженерно-геологических изысканиях для площадки строительства, характеризуемой даже III категорией сложности, как правило, производится бурение скважин при соблюдении расстояния между устьями скважин в пределах 15 – 50 м.

В этой связи при расчетах принимаются разные допущения (по усмотрению расчетчика), обоснованность которых может подтвердиться только после завершения строительства в первые годы эксплуатации здания, что несет существенные риски и не гарантирует отсутствие деформаций в построенном здании с последующими многомиллионными затратами на ремонтновосстановительные работы.

Поэтому целесообразно принять концепцию проектирования – не здания приспосабливать к основаниям, а наоборот, основания приспосабливать к зданиям.

На основании вышеизложенного предлагается принцип II применять при строительстве на оттаиваемых вечномерзлых грунтах, осадка которых не превышает предельных значений согласно СП 22.13330.2016 (талые грунты), а на территориях распространения вечномерзлых грунтов с температурой выше минус 1°С с учетом фактора растепления мерзлоты является более целесообразным и экономичным способом строительства применение предпостроечного оттаивания. Предпостроечное оттаивание исключает эксплуатационные затраты и проблемы ремонтопригодности охлаждающих систем, а также является более надежным вариантом строительства.

Необходимо отметить, что кроме проблемных вопросов нового строительства проблемы обеспечения эксплуатации зданий, построенных на вечномерзлых грунтах, являются еще более сложными.

Объекты были построены ранее по первому принципу (с сохранением вечномерзлого состояния грунтов основания на весь период эксплуатации зданий на территориях с вечномерзлыми грунтами с учетом сохранения стабильности условий существования вечной мерзлоты), но в настоящее время растепление мерзлоты вызывает сомнения в сохранении ее стабильности и влечет за собой колоссальные риски. На территории Арктической зоны России расположено множество капитальных строений, включая многоэтажные жилые дома. Эти объекты рассчитаны на стабильные условия сохранения вечной мерзлоты, но сегодня они подвержены риску разрушения из-за постепенного таяния льда в почве и связанных с этим просадок грунтов основания и деформации зданий. Есть данные, свидетельствующие, что в зоне вечной мерзлоты деформировано более 40% зданий.

По оценкам экспертов, хозяйственный ущерб от деградации вечной мерзлоты уже составляет 3 трлн. рублей, а к 2050 году может составить до 7 трлн. рублей в текущих ценах.

Как сказано выше, более 75% всех зданий и сооружений в зоне вечной мерзлоты России построено и эксплуатируется с учетом сохранения мерзлого состояния грунтов оснований. Чем ниже температура вечной мерзлоты, тем больше несущая способность грунтов оснований. При деградации вечной мерзлоты и повышении температуры грунтов резко уменьшаются их прочностные характеристики.

Учитывая разные прогнозы специалистов по срокам растепления мерзлоты, следует ожидать проявление факторов фактической потери (снижения) несущей способности грунтов оснований из-за деградации вечномерзлых грунтов ориентировочно к 2050 году, то есть примерно через 25 лет.

По данным разных источников повышение температуры вечномерзлых грунтов на глубине 10 м происходит в среднем со скоростью 0,05°С/год, темпы понижения верхней границы вечномерзлых грунтов составляют 0,3 м/год.

Считается, что в результате оттаивания вечномерзлых грунтов пострадает около трети инфраструктуры в Российской Арктике. Уже сейчас для криолитозоны севера Западной Сибири наблюдается понижение несущей способности грунтов на 5-30%, например, повышение температуры вечномерзлых грунтов на 1,5°С в зоне Якутска может привезти к деформациям практически всех зданий в этом городе.

Общеизвестно, что основным техническим решением при строительстве жилых домов по первому принципу являлось устройство проветриваемого подполья высотой 0,7-1,2 м., с применением в большинстве случаев свайных фундаментов с глубиной погружения ориентировочно до 10-12 м.

В целях определения возможных вариантов сохранения эксплуатационной пригодности жилых зданий, построенных по первому принципу, предлагается определить объекты-представители, например, в г. Якутске, на которых в порядке эксперимента автором рекомендуется осуществить мероприятия, которые учитывают данные исследований, проведенных в Московском государственном строительном университете (МГСУ) (Плотников, Гурьянов, 2021), в которых рассмотрен способ сохранения грунтовых оснований многоэтажных жилых зданий в мерзлом состоянии за счет применения тепловой изоляции поверхности грунтового основания в сочетании с глубинными охлаждающими устройствами. При этом величина термического сопротивления теплоизоляции $R_0$ принималась в пределах 6÷10 м²·°С/Вт, а глубина охлаждающих устройств 6÷8 м, а так же результаты работы (Теплофизические испытания.., 2024), в которой показана возможность сохранения основания в мерзлом состоянии за счет устройства эффективной теплоизоляции с величиной приведенного сопротивления теплопередаче 10,3 м²·°С/Вт.

Вышеуказанные источники указывают на возможность строительства зданий на вечномерзлых грунтах без устройства проветриваемых подполий за счет устройства эффективной термоизоляции поверхности грунта и установки вертикальных охлаждающих устройств, расположенных по периметру здания в целях стабилизации температурного режима вечномерзлых грунтов.

Анализ расчетов зависимости периода оттаивания вечномерзлых грунтов от величины термического сопротивления при устройстве теплоизоляции конструкции пола в подвале жилого многоквартирного здания (рис. 1) (Мосенкис, 2024) показал, что, например, устройство теплоизоляции, имеющей значение $R_0$ в диапазоне 0,5÷4,5 °С/Вт, существенно влияет на скорость и глубину оттаивания. В частности, расчетное время оттаивания вечномерзлых грунтов при Ro=3,0 м$^2$ °С/Вт, для здания с подвалом шириной 12 м. (температура в подвале принималась +5 °С) до глубины 4,0 м может составлять до 37-40 лет, а до глубины 10 м. может составлять 80 лет.

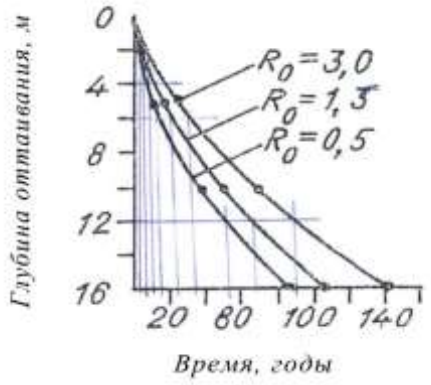



Рис. 1. Зависимость глубины оттаивания песчаных грунтов от величины термического сопротивления конструкции пола для здания с подвалом

Можно предполагать, что устройство эффективной теплоизоляции поверхности грунта с Ro=9-10 м²·°С/Вт в существующем проветриваемом подполье высотой не менее 1,0 м (рис. 2), в котором среднегодовая температура является отрицательной, может оказаться целесообразным для обеспечения эксплуатационной пригодности зданий, построенных по I принципу на вечномерзлых грунтах, возможно и без устройства глубинных охлаждающих устройств с учетом результатов наблюдений за температурным режимом вечномерзлых грунтов по зданиям объектампредставителям и учета остаточного срока эксплуатации зданий, учитывая возможное снижение темпов понижения

верхней границы вечномерзлых грунтов вследствие устройства теплоизоляции поверхности грунта в проветриваемом подполье, что может сохранить несущую способность фундаментов зданий.

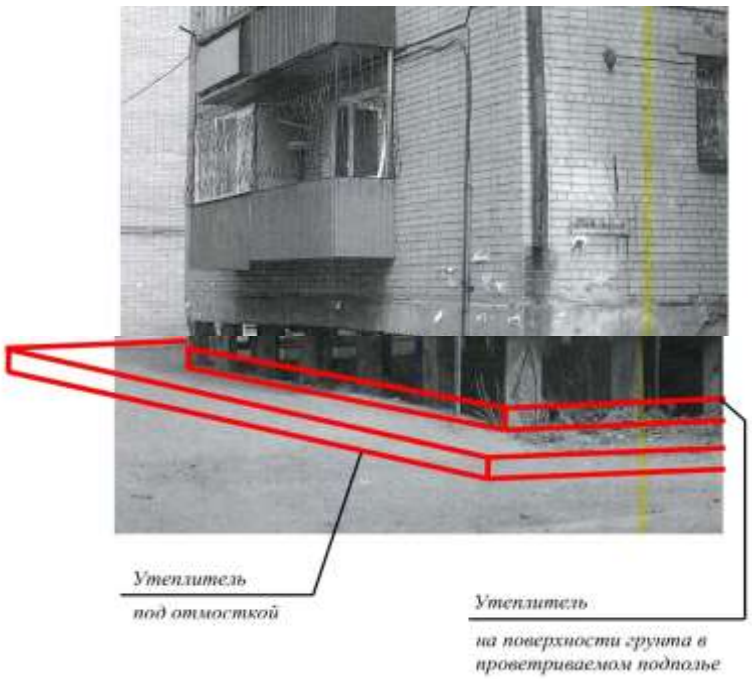



Рис. 2. Устройство теплоизоляции поверхности грунта в проветриваемом подполье и по периметру здания

Результаты наблюдений за температурным режимом вечномерзлых грунтов за период не менее трех лет на вышеуказанных объектах представителях позволят сделать предварительные выводы о назначении проектных решений, обеспечивающих эксплуатацию построенных жилых зданий с учетом применения вышеизложенных рекомендаций.

Обеспечение эксплуатационной пригодности зданий, построенных и деформирующихся из-за растепления вечномерзлых грунтов за счет применения проектных решений по усилению конструктивных элементов надземной части здания нецелесообразно ввиду большой трудоемкости и стоимости работ, а также ввиду необходимости отселения жильцов.

Ориентировочная стоимость предлагаемых работ, с учетом данных проектно- сметной документации капитального ремонта дома №32 по ул. Бауманская г. Норильск, с установкой вертикальных термостабилизаторов глубиной 10 м., устройством предлагаемой термоизоляции из эффективного утеплителя (принят экструдированный пенополистирол стоимостью около 6500 руб./м$^3$.) и устройством двух термометрических скважин может составить 25 ÷ 26 тыс. руб. на один кв.м. площади застройки на примере вышеуказанного жилого дома, а в случае отсутствия целесообразности установки вертикальных термостабилизаторов указанная стоимость может быть снижена в 3-4 раза и составить ориентировочно 6-8 тыс. руб. на 1 м$^2$.

В целом вышеуказанные стоимостные показатели в случае подтверждения обоснованности предлагаемого проектного решения позволит определить ориентировочную потребность финансовых ресурсов для сохранения эксплуатационной пригодности жилых домов, построенных по первому принципу с сохранением вечномерзлого состояния грунтов оснований с применением проветриваемых подполий.

***Литература***

1 Инженерное освоение криолитозоны Забайкалья./ А.С. Александров, И.П. Железняк, Ю.М. Мосенкис - Новосибирск, 1990.

2 Региональные технические рекомендации по проектированию и строительству зданий и сооружений на мерзлых грунтах в Забайкалье./ Научный редактор Ю.М. Мосенкис - Омск-Чита, 2007.

3 Строительство на вечномерзлых грунтах Забайкалья. Ошибки проектирования, строительства, эксплуатации зданий./ Ю.М. Мосенкис - Омск, 2024.

4 Современные методы охлаждения многолетнемерзлых грунтовых оснований многоэтажных жилых зданий./ А.А. Плотников, Г.Р. Гурьянов – Москва: Вестник МГСУ, 2021.
5 Теплофизические испытания конструкций из теплоизолирующих подушек./ С.Н.Овсянников, В.Н. Околичный, А.С. Самохвалов, В.Е. Никитин – Томск: Томский государственный архитектурностроительный университет, 2024.

## СВОЙСТВА ТОРФОВ БУГРА ПУЧЕНИЯ В РАЙОНЕ ГОРОДА САЛЕХАРД

***Р.Г. Мотенко, Ю.С. Калошина***
*МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва*

В процессе освоения территорий криолитозоны, в частности, в Западной Сибири, возникало множество трудностей, связанных с природно-климатическими особенностями территории. Антропогенное влияние способствовало активизации геокриологических процессов, таких как морозное пучение грунтов. Этот процесс оказывает значительное влияние на эксплуатацию линейных сооружений и требует особого внимания при инженерных изысканиях [1]. Несмотря на большой объём исследований, вопросы генезиса и механизмов образования бугров пучения остаются дискуссионными, что делает дальнейшее изучение данной темы актуальным.

**Цель работы:** изучить состав и свойства торфов бугра пучения в районе г. Салехард.

Участок изысканий находится на территории, административно подчинённой муниципальному образованию г. Салехард Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) (Рис.1).

Рис. 1. Местоположение участка работ (maps.google.com).
а — масштаб карты 1:5 000; б — масштаб карты 1:1 000 000.

Участок расположен в северо-западной части Западно-Сибирской низменности и представляет собой сравнительно высоко приподнятую над уровнем моря равнину Обско-Полуйского водораздела. Наиболее высокие абсолютные отметки водораздела колеблются от 60 до 93 м (Ангальский мыс), минимальные отметки составляют 2,0 м (отметка р. Оби). Климат района резко континентальный с продолжительной холодной зимой и коротким прохладным летом. Среднемноголетняя годовая температура воздуха по метеостанции г. Салехарда составляет -6,4 °С. Геологическое строение изучаемой территории соответствует морским и континентальным осадкам, формирующим мезозойско – кайнозойский осадочный чехол Западно – Сибирской платформы, мощность которого возрастает в восточном направлении. Район исследования относится к зоне преимущественно сплошного распространения ММП с редкими островами талых зон. Талики приурочены, главным образом, к руслам рек и имеют сквозной и несквозной характер.

На исследуемой территории наблюдалось в основном однослойное строение мерзлой толщи. При этом кровля многолетнемерзлых пород залегает с глубины 0,2-0, м. Мощность многолетнемерзлых

пород в пределах исследуемой территории составляет 100-300 м, температура многолетнемерзлых пород варьируется в пределе -0,5 – (- 2)°С [2].

**Объектом исследования** является бугор пучения («Бугор Зуева»), расположенный в 43 км на юго-восток от города Салехард. Территория исследования относится к ландшафтному району аллювиальной палеодолины, подрайону пологоволнистой равнины. Согласно данным аэрофотосъёмки данной местности, абсолютная высотная отметка «бугра пучения Зуева» абсолютная высотная отметка составляет 97,7 м, тогда как в распадке между буграми, где проводилось бурение термометрической скважины высота составляет 93,5 м. Абсолютные высотные отметки на исследуемом участке полигонально-жильных структур к югу от бугров пучения колеблются в пределах 93,1 – 94,5 м.

Бугор пучения высотой 4,5 м имеет размеры 7×15 м. На западном и восточном склоне бугра наблюдаются разрывы. Северный и южный склон задернованы. Вершина бугра пучения пологая. На поверхности бугра пучения наблюдаются 5-6-гранные полигоны с размерами граней около 0,5 м. У подножия бугра пучения наблюдаются трещины отрыва длиной 1 и 3 м, высотой 20 см, блоки оползают в существующий водоем. Разрез бугра пучения представлен переслаиванием верхового и низинного торфа до глубины 4,65- 4,8 м, которые подстилаются средне-верхнеплейстоценовые озерно-аллювиальными суглинками. Мощность слоя сезонного оттаивания колеблется от 0,4 до 0,5 м.

Рис.3. Поверхность исследуемого бугра пучения (фото Калошиной Ю.С.)

**Объектом экспериментальных** исследований являются пробы торфа, отобранные из термометрической скважины, пробуренной у подножия «бугра Зуева» в 2024 году, с глубин 0,65–0,85 м, 2,05–2,30 м, 3,70–3,80 м, 4,50–4,75 м. Для определения вида торфа были определена зольность, степень разложения (Ddp), содержание органического вещества (Ir), а также химические свойства образцов, в частности водородный показатель (pH). Определение зольности проводилось прокаливанием зольного остатка в тиглях при температуре (800±25) °С. Определение содержание органического вещества проводилось прокаливанием в тиглях при температуре (525±25) °С. Химические свойства образцов определялись в соответствии с ГОСТ 59540-2021. Также была определена степень разложения торфа методом мазка.

**Образец № 1** - глубина отбора 0,65-0,85 м- Содержание органического вещества ($I_r$) – 91,20 %; зольность –3,5 %; pH =4,30; степень разложения ($D_{dp}$) – 20% (слаборазложившийся). Таким образом, **торф 1 – верховой слаборазложившийся торф.**

**Образец № - 2**, глубина отбора 2,05-2,3 м - Содержание органического вещества (Ir) – 93,62 %; зольность – 5,2 %; pH = 4,62; степень разложения (Ddp) – до 20% (слаборазложившийся).Таким образом, **торф 2– верховой слаборазложившийся торф.**

**Образец № 3,** глубина отбора 3,7-3,8 м- Содержание органического вещества (Ir) – 93,7 %; зольность – 6,15%; pH =5,82; степень разложения ($D_{dp}$) – 20-30% (среднеразложившийся**).** Имеем**, торф 3 –переходный среднеразложившийся торф.**

**Образец № 4,** глубина отбора 4,50-4,75 м- Содержание органического вещества ($I_r$) – 22,7 %; зольность – 61,4%; pH =6,02; степень разложения ($D_{dp}$) – 35-55 %; получено, что **образец 4 – слабозаторфованный суглинок. Торф в составе - низинный сильноразложившийся.**

Также был определен химический анализ водной вытяжки. По полученным данным, все исследуемые торфа относятся к слабозасоленным, тип засоления - хлоридный.

**В рамках исследования использовались полевые и лабораторные методы**. Полевые работы включали бурение научно-исследовательской скважины (торфяника) с применением буровой установки УКБ 12/25 и отбор образцов торфа. В лабораторных условиях определялись теплофизические свойства *модифицированным методом регулярного режима первого рода.* Фазовый состав грунтов определялся *контактным и криоскопическим методами (в цикле оттаивания) [3].*

**Результаты**

На основании полевых данных была построена инженерно-геологическая колонка, согласно которой глубина сезонно-талого слоя - 0,4 м, а мощность торфа – 4,8 метра. Также были построены графики изменения плотности скелета грунта и объемной **влажности** грунта по глубине (рис.3 а, б).

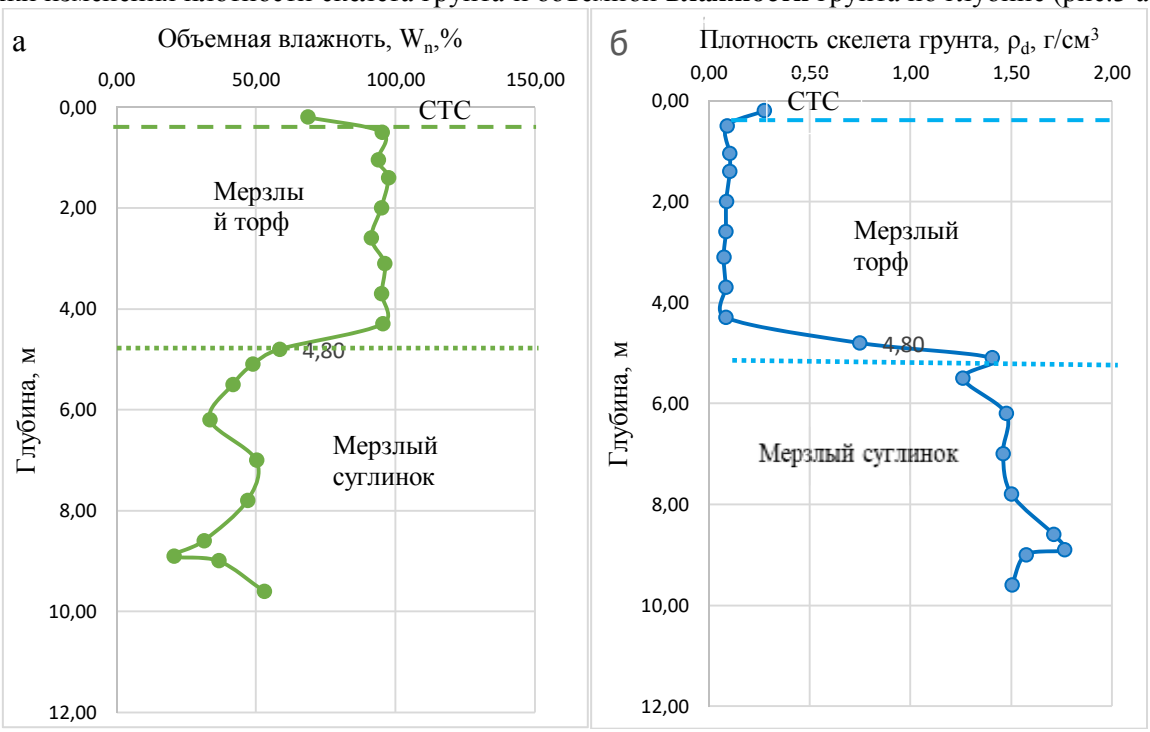



Рис. 3. Изменения по глубине в скважине: а- объемной влажности грунта и б – плотности скелета грунта

На рис. 3 а, б видно, что с глубиной объемная влажность грунта уменьшается, а плотность скелета грунта, наоборот, увеличивается, что связано с изменением дисперсности грунта. Наибольшие значения объемной влажности наблюдаются в интервале распространения мерзлого торфа (с глубины 0,4 до 4,6 м), а наибольшие значения плотности в районе распространения мерзлого суглинка.

**Закономерности изменения фазового состава влаги в исследуемых образцах**

Данные закономерности в мерзлых исследуемых торфах получены при комбинации двух методов: контактного и криоскопического в цикле оттаивания. На рис. 4 представлены зависимости содержания незамерзшей воды от температуры.

Проанализируем полученные результаты при среднегодовой температуре пород -2$^o$C. На рисунке 4 видно, что для исследуемых торфов при данной температуре получены следующие значения: $W_w$: для торфа 1 – 31,1 %, для торфа 2 – 30,0 %, для торфа 3 – 27,8 %. для торфа 4 – 10,4 %. Наибольшие изменение содержания незамерзшей воды прослеживаются в области вымерзания рыхло- и прочносвязанной воды.

Стоит отметить, что количество незамерзшей воды уменьшается от верхового торфа к слабозаторфованному суглинку, что обусловлено изменением дисперсности образцов. В исследуемых торфах различия в содержании незамерзшей воды незначительны, что связано с

близкими содержаниями в них органического вещества и, вероятно, с изменением активной удельной поверхности образцов.

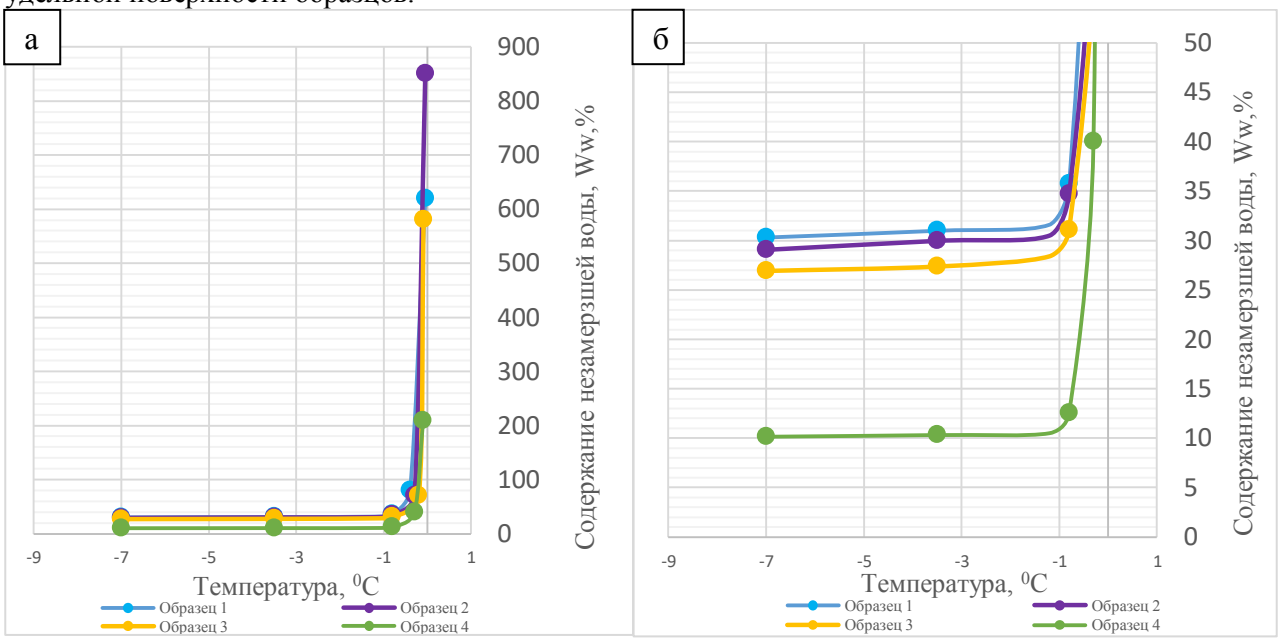



Рис. 4. Зависимости содержания незамёрзшей ($W_w$) воды от температуры (t) для образцов: а – во всем диапазоне изменения $W_w$; б – до 50 %. Образец 1 (гл. 0,65-0,85 м); образец 2 (гл. 2,05-2,3м); образец 3 (гл. 3,7-3.8 м), образец 4 (гл. 4,55-4,75м)

**Закономерности изменения теплофизических свойств изучаемых образцов**

Было исследовано 18 образцов и проведено около 100 экспериментов. Значения определялись на основе осреднения результатов 4 - 6 экспериментов для каждой точки. Исследование теплофизических характеристик образцов проводилось при их естественной влажности и плотности. Влажность образцов варьируется от 30 до 857 %, плотность скелета $\rho_d$ от 0,13 до 0,85 г/см$^3$.

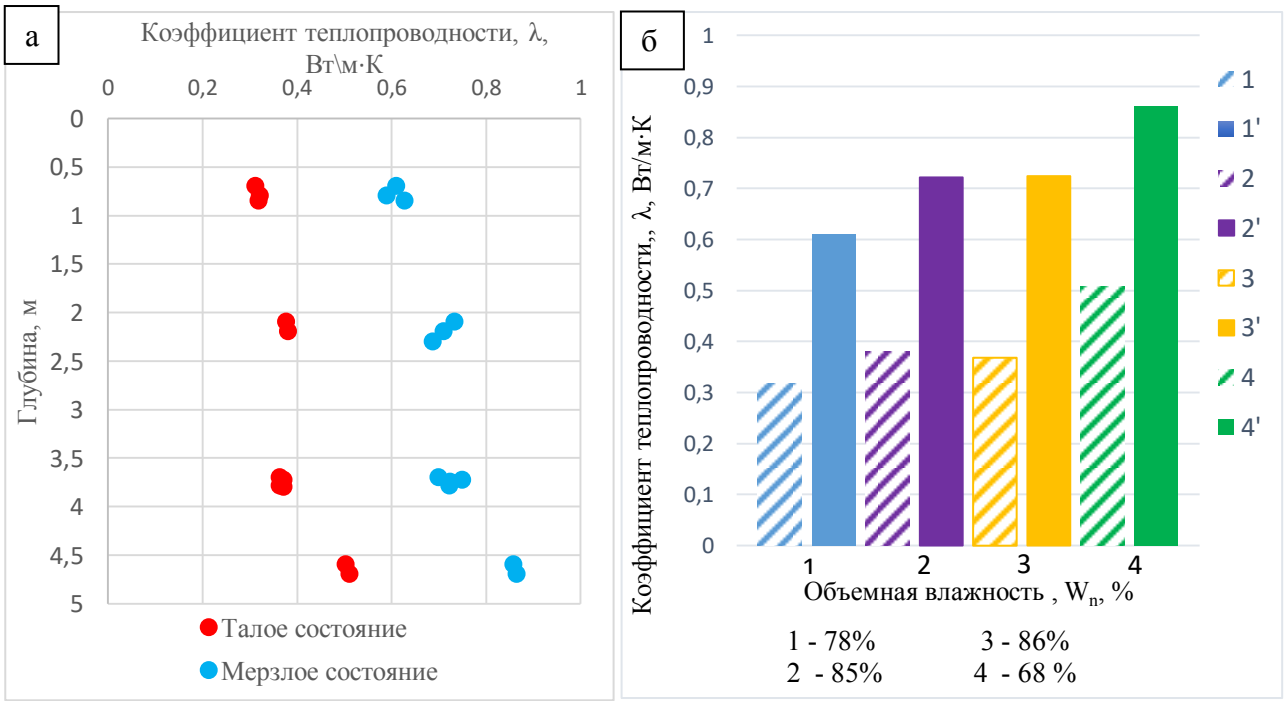



Рис.5. Изменение значений коэффициента теплопроводности образцов в талом и мерзлом состоянии по глубине (а) и зависимость коэффициента теплопроводности от объемной влажности в талом (1, 2, 3, 4) и мерзлом состоянии (1’, 2’ , 3’ , 4’) (б) (метод регулярного режима [3]): образец 1 (гл. 0,65-0,85 м); образец 2 (гл. 2,05-2,3м); образец 3 (гл. 3,7-3.8 м), образец 4 (гл. 4,55-4,75)

Из рис. 5,а видно, что значения коэффициента теплопроводности торфа увеличиваются с глубиной

как в талом, так и в мерзлом состоянии. Значения в талом состоянии у отобранных торфов изменяются в диапазоне от 0,31 до 0,50 Вт/м·К, в мерзлом - от 0,60 до 0,86 Вт/м·К. Полученная закономерность обусловлена увеличением плотности с глубиной, а также изменением дисперсности торфа (переход от верхового типа к низинному).

В целом, для торфов 1 – 3, относящихся к верховому и переходному типам, значения коэффициента теплопроводности сопоставимы и различаются преимущественно из-за различий в объемной влажности (рис. 5, б). Наибольшие отличия как в талом, так и в мерзлом состоянии наблюдаются в торфе 4 (заторфованный суглинок), что обусловлено его фазовым составом, плотностью и дисперсностью. Также стоит отметить, что торф 2 и торф 3 имеют близкие значения объемной влажности.

**Выводы**

В ходе исследования были выявлены следующие закономерности изменения физико-химических и теплофизических характеристик торфов по глубине:

а) Объемная влажность исследуемых грунтов по глубине уменьшается в диапазоне от 85 до 60 % в мерзлом состоянии, а плотность скелета грунта, $\rho_d$ в мерзлом состоянии наоборот увеличивается, что связано с изменением дисперсности грунта, так $\rho_d$ изменяется от 0,13 до 0,54 г/см3.

б) Содержание органического вещества ($I_r$) по глубине уменьшается с 93,7 до 22,7 %, а зольность образцов увеличивается от 3,5 до 61,4 %, что также связано с переходом к минеральным грунтам (к подстилающему суглинку). Изменение зольности также отражает изменение типов торфа по глубине (от верхового к низинному).

в) Содержание незамерзшей воды в исследуемых образцов уменьшается от торфов к слабозаторфованному суглинку, что обусловлено увеличением минеральных частиц в образцах и заторфованностью, которая влияет на изменение активной удельной поверхности. Количество незамерзшей воды ($W_w$) изменяется по разрезу в диапазоне от 31,1 до 10,4% (при среднегодовой температуре пород -2,0 $^0$C).

г) Коэффициент теплопроводности в сезонно-талом слое растет при увеличении объемной влажности, которая зависит от глубины отбора.

д) Коэффициент теплопроводности увеличивается от торфов к слабозаторфованному суглинку. Значения в талом состоянии варьируются от 0,31 до 0,50 Вт/м·К, а в мерзлом – от 0,60 до 0,86 Вт/м·К. Для верховых и переходных торфов (образцы 1-3) коэффициент теплопроводности имеет близкие значения как в талом, так и в мерзлом состоянии. Это связано с изменением фазового состава, объемной влажности, а также со структурой данных образцов. Наибольшие значения коэффициента теплопроводности наблюдаются для слабозаторфованного суглинка в мерзлом состоянии, что обусловлено малым содержанием незамерзшей воды и плотностью.

***Литература***

1. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемёрзлых торфяных массивов / под ред. Ю.К. Васильчука. — М.: Изд-во Московского университета, 2008. — 571 с.

2. Отчет по комплексной гидрогеологической, инженерно-геологической и геоэкологической съемке масштаба 1:50 000 листа Q-42-50-А (Салехард). Договор № 58-202-01. В 3 книгах. Книга 1 — текст (в 2 частях). Часть 1. — Екатеринбург: ОАО «Ямальская горная компания», 2004.

3. Методы геокриологических исследований / под ред. Э.Д. Ершова. — М.: Изд-во МГУ, 2004. — 512 с.

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАТОРФОВАННЫХ ГРУНТОВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ КЕРОСИНОМ

***Р. Г. Мотенко, О. Я. Лазоренко***

*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова*

Большая часть месторождений нефти и газа в России находится в криолитозоне, площадь которой составляет более 65% площади всей страны. В последние десятилетия высокие темпы развития нефтедобывающей и перерабатывающей промышленности в зоне распространения многолетне- и

сезонномерзлых пород создали острую проблему, которая заключается в загрязнении природных и природно-технических систем и объектов нефтью и нефтепродуктами [1].

Основными источниками загрязнений авиационным керосином являются авиационно-технические базы, воздушные суда спецавтотранспорт, авиаремонтные мастерские, объекты управления воздушным движением, склады ГСМ, включая авиационно-химические работы, а также загрязнения вследствие авиационно-химических работ [2].

Заболоченность в отдельных районах России превышает 90–95% территории. Всего же в стране площади массивов торфяных грунтов с мощностью торфа свыше 30 см составляют 1,39 млн км$^2$ или 8,1% территории РФ, а с мощностью торфа свыше 50 см — 975 тыс. км$^2$, или 5,7% территории [3].

В результате проливов керосина на аэродромах, главным образом военных, эксплуатируемых с начала прошлого века, возникли большие экологические проблемы, что требует незамедлительного решения и значительных экономических затрат. Десятилетиями авиационный керосин попадал в почву при хранении, транспортировании и заправке самолетов, сливах в экстренных ситуациях, при проведении визуальных предполетных анализов. [4]. Проливы возможны и на заторфованные грунты, которые распространены и районах криолитозоны.

Техногенное воздействие может приводить к изменению температурного режима пород, что может повлечь за собой изменение глубины оттаивания (промерзания) или способствовать развитию геокриологических процессов. Для составления геокриологического и эколого-геологического прогноза территории или для проектирования и эксплуатации сооружений в криолитозоне необходимы данные о теплофизических свойствах грунтов.

Известны исследования, посвященные изучению теплофизических характеристик грунтов и их взаимосвязи с уровнем заторфованности и нефтяного загрязнения [5], однако данных по влиянию загрязнения керосином на заторфованные грунты нет, именно поэтому данная тема является актуальной и представляет большой научный интерес.

Представленные на рисунках 1, 2 графики демонстрируют зависимость коэффициентов тепло- и температуропроводности заторфованных дисперсных грунтов от степени загрязнения керосином. Примечательно, что влияние керосина на заторфованные пески и глины проявляется различно.

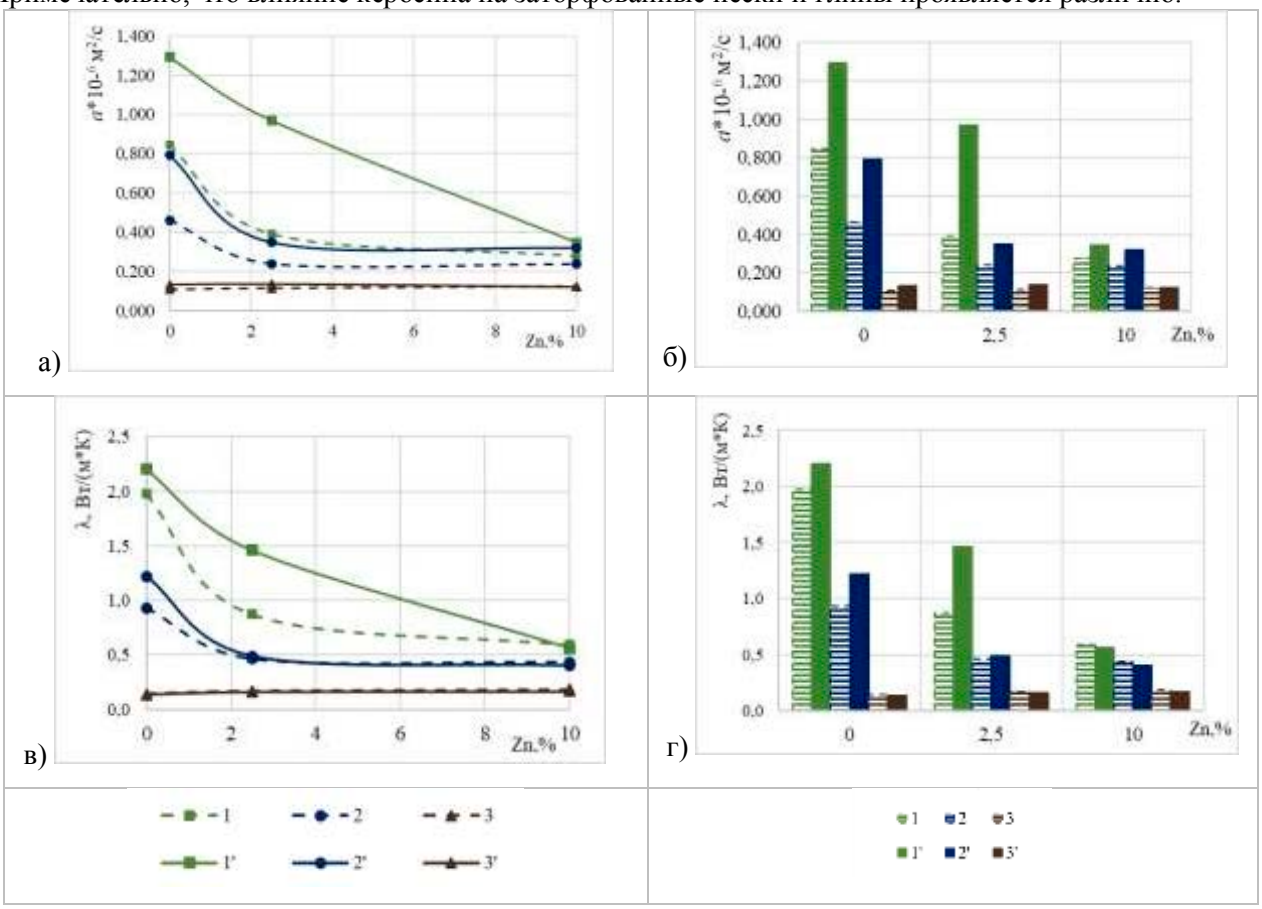



Рис. 1. Зависимости коэффициента температуропроводности (а, б) и теплопроводности (в, г) заторфованного песка от $Z_n$ в талом (1,2,3) и мёрзлом состоянии мерзлом (1',2',3') состоянии; заторфованность: 1, 1' - 0%; 2, 2' – 11%; 3, 3' – 41%

При относительно низком содержании органического вещества (Ir=11%) теплопроводность песка снижается: в талом состоянии – с 0,93 до 0,40 Вт/(м·К), а в мерзлом – с 1,22 до 0,40 Вт/(м·К). Однако, при более высокой степени заторфованности ($I_г$=41%) загрязнение керосином теплопроводность песка изменяется незначительно. Важно отметить, что эти значения достаточно близки друг к другу и находятся в пределах погрешности измерений. Это означает, что в условиях высокой заторфованности загрязнение керосином практически не оказывает влияния на теплопроводность песка.

Аналогичные изменения наблюдаются и в коэффициенте температуропроводности. При содержании торфа в грунте ($I_г$=11%) *a* снижается от 0,791 до $0{,}318 \cdot 10^{-6}$ м²/с в мерзлом состоянии и от 0,462 до $0{,}239 \cdot 10^{-6}$ м²/с в талом. Однако, при высокой степени заторфованности ($I_г$=41%) коэффициент температуропроводности практически не изменяется, оставаясь в пределах погрешности измерений.Таким образом, результаты показывают, что влияние загрязнения керосином на теплофизические свойства песка существенно зависит от содержания торфа. При низком содержании торфа ($I_г$=11%) наблюдается значительное снижение теплопроводности и температуропроводности под воздействием керосина, в то время как при высокой заторфованности ($I_г$=41%) влияние керосина становится пренебрежимо малым.

Объяснить наблюдаемые закономерности можно следующим образом. При низком содержании торфа теплофизические свойства песка в основном определяются его скелетом, и керосин, попадая в поры, нарушает тепловой контакт между минеральными частицами, значительно снижая теплопроводность и температуропроводность (рис.1). В то же время, при $I_г$=41% торф становится доминирующим компонентом грунта и, благодаря своей развитой пористой структуре, “связывает” керосин в своих порах, предотвращая его контакт с минеральным скелетом и уменьшая его влияние на теплоперенос.

Влияние загрязнения керосином на теплофизические характеристики заторфованной каолиновой глины существенно отличается от поведения заторфованных песков. При этом значения коэффициентов тепло- и температуропроводности для глины, содержащей органическое вещество ниже, чем для песчаного грунта аналогичной заторфованности (рис.2).

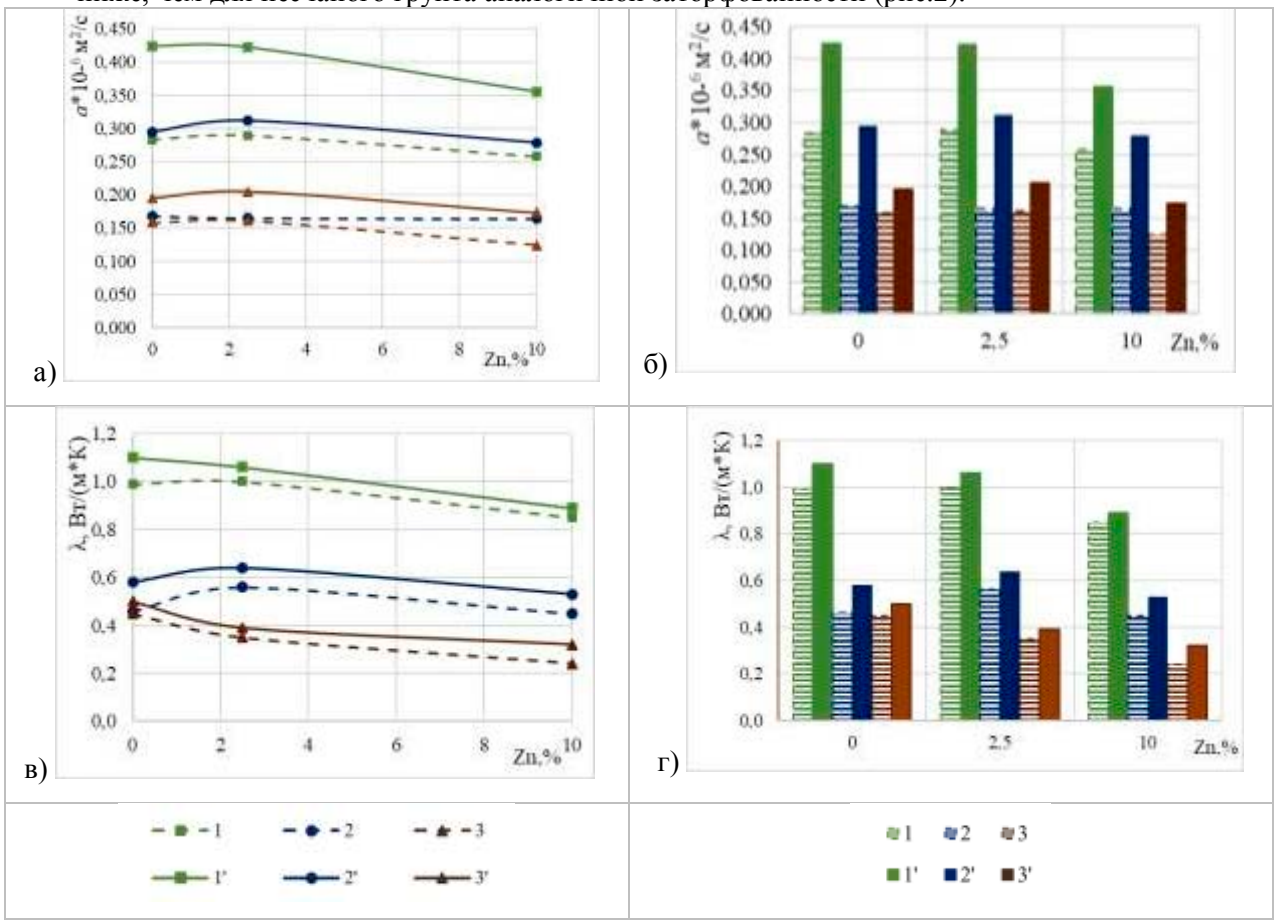



Рис. 2. Зависимости коэффициента температуропроводности (а, б) и теплопроводности (в, г) заторфованной каолиновой глины от $Z_n$ в талом (1,2,3) и мёрзлом состоянии мерзлом (1',2',3') состоянии; заторфованность: 1, 1' - 0%; 2, 2' – 11%; 3, 3' – 41%

При содержании торфа в глине ($I_г$=11%), добавление керосина оказывает следующий эффект. В мерзлом состоянии внесение 2,5% керосина приводит к увеличению теплопроводности с 0,58 до 0,63 Вт/(м·К). Дальнейшее увеличение содержания керосина до 10% вызывает снижение теплопроводности до 0,53 Вт/(м·К). В талом состоянии, при тех же условиях, внесение 2,5% керосина повышает теплопроводность от 0,46 до 0,56 Вт/(м·К), а увеличение до 10% приводит к ее снижению до 0,45 Вт/(м·К).

При $I_г$ = 41% наблюдается другая картина. В мерзлом состоянии увеличение содержания керосина приводит к последовательному снижению теплопроводности: от 0.5 до 0,32 Вт/(м·К). Аналогичная тенденция наблюдается и в талом состоянии: теплопроводность уменьшается от 0,45 до 0,24 Вт/(м·К).

Изменение коэффициента температуропроводности при загрязнении керосином демонстрирует схожую зависимость от содержания торфа. При $I_г$ = 11% в мерзлом состоянии коэффициент температуропроводности увеличивается с 0,295 до $0{,}312 \cdot 10^{-6}$ м²/с при добавлении 2,5% керосина, а затем снижается до $0{,}279 \cdot 10^{-6}$ м²/с при увеличении содержания керосина до 10%. В талом состоянии наблюдается незначительное снижение коэффициента температуропроводности с 0,168 до $0{,}165 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

При $I_г$ = 41% в мерзлом состоянии коэффициент температуропроводности также увеличивается с 0.195 до $0.205 \cdot 10^{-6}$ м²/с при добавлении 2.5% керосина, а затем снижается до $0.173 \cdot 10^{-6}$ м²/с при 10% керосина. В талом состоянии наблюдается снижение коэффициента температуропроводности с 0.158 до $0.124 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Наблюдаемые закономерности можно объяснить следующим образом. Небольшое добавление керосина (2,5%) может приводить к увеличению теплопроводности и температуропроводности за счет заполнения микроскопических пор между частицами грунта и улучшения теплового контакта. Однако, при увеличении содержания керосина до 10% начинают преобладать негативные эффекты, связанные с нарушением структуры грунта, изменением свойств поровой воды и образованием изолирующих пленок, что приводит к снижению теплофизических характеристик.

***Литература***


**1** Основы геокриологии. Ч. 6. Геокриологический прогноз и экологические проблемы в криолитозоне. / Под редакцией Э.Д. Ершова. - М.: Изд-во МГУ, 2008 - 768с.

**2** Черкасова Н. Г, Веркеев А. В. Проблема загрязнения окружающей среды при разливе авиационного топлива на территории аэродрома. Актуальные проблемы авиации и космонавтики – том 2., 2018 – с. 494-496.

**3** Королев В.А., Галкин А.Н. Особенности эколого-геологических систем массивов торфяных грунтов Белоруссии. Инженерная геология, Том XIX, № 1, 2024, с 20-40.

**4** Кочетова Ж.Ю., Кукмаченко Т.А., Базарский О.В. «Экспресс-оценка загрязнения грунтов керосином по сигналам пьезосенсора на основе многослойных углеродных нанотрубок», Вестник Московского Университета, серия 2, Химия, т 58, 2017, 28-35 с.

**5** Мотенко Р.Г., Власенко Д.В., Калошина Ю.С., 2023. Определение теплофизических свойств мерзлых, промерзающих и оттаивающих нефтезагрязненных заторфованных грунтов с помощью различных методов. Инженерная геология, Том 18, № 4, с. 64–78.


## СНЕГОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАСТРОЙКИ АРКТИЧЕСКОГО ПОСЕЛКА ТИКСИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЗДАНИЙ


***Набережный А.Д., Турантаев Е.Е., Набережный Д.Д., Самсонова В.В., Лыткин В.М.***
*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН*


В криолитозоне Российской Арктики существенное влияние на температурный режим грунтов оказывает метелевый перенос. В этом отношении, поселок Тикси, являющийся морскими воротами Якутии и оплотом Вооруженных сил РФ, располагается в климатических условиях, является представительным: количество метелевых (пурговых) дней в году здесь может достигать от 79 до 98 (рис.1) [1]. Это обусловило расположение зданий в поселке вдоль господствующего направления ветра при метелях – с юго-запада на северо-восток. К слову, в градостроительном плане, разработанном в советский период, здания должны были быть соединены перемычками для образования дворов-колодцев по примеру г. Норильска.

В метелевые дни скорость ветра может достигать 40 м/с и более, что является причиной формирования снегозаносов около зданий. Снегозаносы большой высоты (до 3-4 м и более) образуются преимущественно с подветренной стороны зданий, временных сооружений, при этом на прилегающей территории и под зданиями могут образовываться снеговые отложения высотой в среднем до 1-1,5 м (рис.2.). По мере удаления от открытых тундровых пространств, расположенных с юго-западной стороны, высота снеговых отложений на прилегающей территории уменьшается, а высота отложений под зданиями – увеличивается.

Рис 1. Схематическая карта районирования России по среднему количеству дней с метелями (в год) [1]

Рис.2. Снегозаносы в поселке Тикси

Снег убирают только на ограниченных участках близ зданий и дорогах, в связи с чем ежегодное скопление снега на одних и тех же участках приводит к менее интенсивному зимнему промерзанию грунтов. Таяние формирующихся снеговых отложений приводит к увлажнению и криогенному выветриванию фундаментных конструкций и отмосток, скоплению вод на их поверхностях, инфильтрации в основания и миграции их ниже по склону. Вышеизложенное усугубляется протечками из инженерных коммуникаций, что вкупе приводит к образованию таликов.

Фундаменты зданий опираются преимущественно на трещиноватые аргиллиты и алевролиты с льдистостью от 13-47%, оттаивание которых приводит к значительным деформациям [2]. К примеру, сваи выселенного на данный момент из эксплуатации здания на ул. Ленинской,19 претерпели просадочные деформации величиной до 20-30 см, а с подветренной стороны здания администрации района образовался талик с температурой +2,1°С на глубине 7 м.

Вышеизложенное обуславливает необходимость постоянной очистки снега с территории поселка, восстановление организованной системы ливневого водоотведения, повышение эксплуатационной надежности инженерных систем объектов тепло-, водоснабжения и водоотведения с обязательным проведением геотехнического и геокриологического мониторинга в поселке и прилегающей

территории. При проведении проектных работ для строительства новых зданий, ремонта и реконструкции существующих следует учитывать сложившиеся тренды на повышение среднегодовой температуры грунтов [3], которые в перспективе могут привести к значительному ущербу для экономики страны [4].

***Литература***

1. Национальный атлас России. Том 2. Природа. Экология. – М.: Мин. транспорта РФ. Федеральное агентство геодезии и картографии, 2007. 495 с.

2. Набережный А.Д., Самсонова В.В. и др. Результаты обследования технического состояния зданий в арктическом поселке Тикси // Криосфера Земли, 2026, №1, С.26-36.

3. Konstantinov P., Basharin N., Fedorov A. et al. Impact of Climate Change on the Ground Thermal Regime in the Lower Lena Region, Arctic Central Siberia // Land, 2023, №12 (1), p.19.

4. В.П. Мельников и др. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2021. №1. С.14-31.

## ПОЛЕВЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОБЪЕМА НАЛЕДНОГО ЛЬДА В БАССЕЙНЕ Р. ЧУЛЬМАН (ЮЖНАЯ ЯКУТИЯ)

***Е.С. Николаева, Л.А. Гагарин, Н.Е. Баишев, В.В. Огонеров***
*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

В работе представлены данные полевых измерений мощности наледей в бассейне р. Чульман (Южная Якутия) и расчета на их основе площадей и объемов наледного льда. На основе полученных результатов выполнена верификация эмпирической зависимости объема наледи от ее площади по формуле Б.Л. Соколова $V = aF^n$ . Исследования проводились на трех ключевых участках, задана сеть ледомерных профилей, построены цифровые модели рельефа и ортофотопланы на основе беспилотной аэрофотосъемки. Установлены фактические значения средней мощности и объема наледей. Выполнено сравнение фактических объемов наледного льда с расчетными по двум методикам: эмпирическим коэффициентам «a» и «n» по Б.Л. Соколову (1975) и актуализированным этим же коэффициентам по М.Л. Маркову (2017). В зависимости от морфологии наледного ложа фактический объем наледи отклоняется от расчетного по формуле Б.Л. Соколова как в меньшую (до 0,4 раза), так и в большую сторону (до 2,2 раза). Полученные результаты свидетельствуют, что разнообразие типов наледного ложа обусловливает актуальность обновления региональных поправочных коэффициентов для расчета морфометрических параметров наледей.

Существующие нормативные документы регламентируют использование формулы для оценки объема наледного льда – СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003», и базируются на эмпирических данных 1960-80-х гг., полученных Б.Л. Соколовым, О.Н. Толстихиным и др. [1, 2]. Для Чульманского водосбора Б.Л. Соколовым были предложены коэффициенты a=0,58, n=1,2 в формуле $V = aF^n$, где F – площадь наледи (тыс. м²), V – объём (тыс. м³). На основе более позднего обобщения данных о наледях эти коэффициенты были актуализированы М.Л. Марковым и др. (2017): a=0,894, n=1,118. Стоит отметить, что предложенная формула расчета объемов наледного льда с различными коэффициентами является усредненной и учитывает все многообразие морфологии наледного ложа. Однако, в конкретных геоморфологических условиях объем наледи, рассчитанный по вышеприведенной формуле, может расходиться с фактическим на порядок. В связи с активным освоением территории Южной Якутии и негативным влиянием наледей в этом регионе на различные инженерные сооружения (линейные, горнопромышленные и гражданские) оценка объемов наледного льда является актуальной задачей, т.к. в том числе на ее основе выбирается способ противоналедной защиты.

Целью настоящей работы являлась верификация поправочных коэффициентов «a» и «n» в формуле Б.Л. Соколова $V = aF^n$ на основе данных полевых измерений размеров трех выбранных наледей Чульманского речного бассейна.

Исследованы три ключевые наледи в пределахводосбора р. Чульман, различающиеся морфологией речных долин и условиями наледеобразования (табл. 1).

Во время полевых работ проводились ледомерные съемки. На каждой из трех ключевых наледных полян закладывались поперечные профили с шагом от 100 до 300 м в зависимости от ширины и длины наледной поляны. Измерение толщины льда выполнялось с помощью бурения лунок во льду термобуром.Положение лунки фиксировалось с помощью GPS-приемника. Если в точке измерения поверхность наледи была покрыта снегом, измерялась его толщина. Для получения высокодетальных пространственных данных использовалась аэрофотосъемка с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), по результатам которой построены ортофотопланы и цифровые модели рельефа (ЦМР). Камеральная обработка полевых материалов выполнена в ГИС-среде (ArcGIS Pro 3.1.0) и включала пространственную привязку точек бурения и интерполяцию поля толщины льда. Расчет фактического объема наледей выполнен в среде Google Colab (Python) и MS Excel. Верификация границ наледей на момент максимального развития (середина мая – начало июня 2018-2025 гг.) проведена по космическим снимкам Sentinel-2 с расчетом спектрального снежного индекса NDSI (Normalized Difference Snow Index), позволяющего отделить наледный лед от снежного покрова и речного льда.

Таблица 1

Характеристика ключевых участков

| Название реки | Тип долины | Площадь наледи, тыс. м² | Объём наледи, тыс. м³ | Средняя мощность наледи, м | Макс. Мощность наледи, м |
|---|---|---|---|---|---|
| Амнуннакта | Широкая, слаборасчлененная, корытообразная | 247,86 | 179,556 | 0,72 | 2,31 |
| Малый Беркакит | Ящикообразная | 51,08 | 103,316 | 2,02 | 2,60 |
| Мустах | Узкая, V-образная | 41,55 | 111,643 | 2,69 | 6,66 |

По результатам расчета морфометрических параметров наледей построены их поперечные профили. Максимальная мощность льда варьирует в широких пределах от 0,1 до 6,7 м, средняя мощность наледи находится в более узком диапазоне от 0,83 до 3,27 м (табл. 2). На рис. 1 представлен пример поперечного профиля одной наледи в долине р. Амнуннакта с указанием измеренных значений мощности.

Таблица 2

Фактическая мощность и объем наледей по данным полевых измерений

| Название рек | Средняя мощность льда, м | Максимальная мощность льда, м | Фактический объем наледи, тыс. м³ |
|---|---|---|---|
| Амнуннакта | 0,83 | 2,31 | 179,56 |
| Малый Беркакит | 1,06 | 2,6 | 103,32 |
| Мустах | 3,27 | 6,66 | 111,64 |

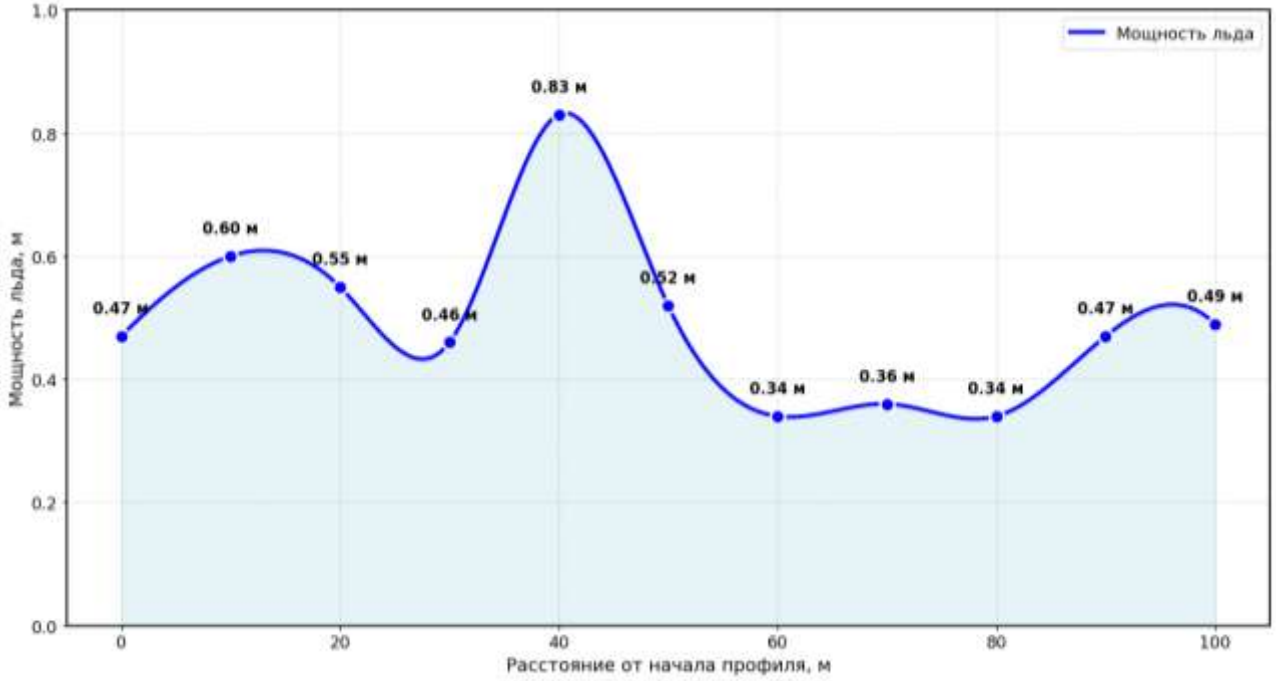



Рис. 1. Поперечный профиль наледи Амнуннакта (створ 4) по данным ледомерной съемки (апрель 2026)

Для каждой наледи выполнен расчет их объема по формуле $V = aF^n$ с коэффициентами, предложенными Б.Л. Соколовым и М.Л. Марковым для бассейна р. Чульман в Южной Якутии [1,3]. Сравнение фактических и расчетных значений приведено в табл. 3.

Анализ полученных результатов показывает, что применение универсальных формул для расчета объемов наледей, расположенных в различных по морфологии речных долинах, приводят к искажению истинных их величин. Так, в широкой долине фактические объёмы значительно ниже расчётных в 0,41–0,42 раза, а в узкой — выше в 1,93–2,20 раза. Коэффициенты «а» и «n» по М.Л. Маркову (2017) демонстрируют меньшую погрешность (рис. 2), уменьшая отклонения для средней и узкой долин с 1,59–2,20 до 1,42–1,93. Таким образом, можно представить, что при одних и тех же значениях (объемах) наледного питания в V-образной долине будет значительно накапливаться мощность наледного льда, т.к. площадь днища наледной поляны невелика, по сравнению с широкой корытообразной долиной. Примером служит наледь в долине р. Мустах, где зафиксирована средняя толщина льда в 6,66 м. В противоположность ей долина р. Амнуннакта является корытообразной, более широкой. Здесь наледные воды прежде всего растекаются по широкой пойме и занимают все низменные участки, и лишь заполнив их увеличивают мощность наледи (среднее значение 2,31 м).

Таблица 3

Сравнение фактического и расчётного объёма наледей

| | $V_{факт}$, тыс. м³ | $V_{расч}$ (Соколов, 1975), тыс. м³ | $V_{факт}/V_{расч}$ (Соколов, 1975) | $V_{расч}$ (Марков и др., 2017), тыс. м³ | $V_{факт}/V_{расч}$ (Марков и др., 2017) |
|---|---|---|---|---|---|
| Амнуннакта | 179,556 | 433,0 | 0,41 | 425,2 | 0,42 |
| Малый Беркакит | 103,316 | 65,1 | 1,59 | 72,8 | 1,42 |
| Мустах | 111,643 | 50,8 | 2,20 | 57,8 | 1,93 |

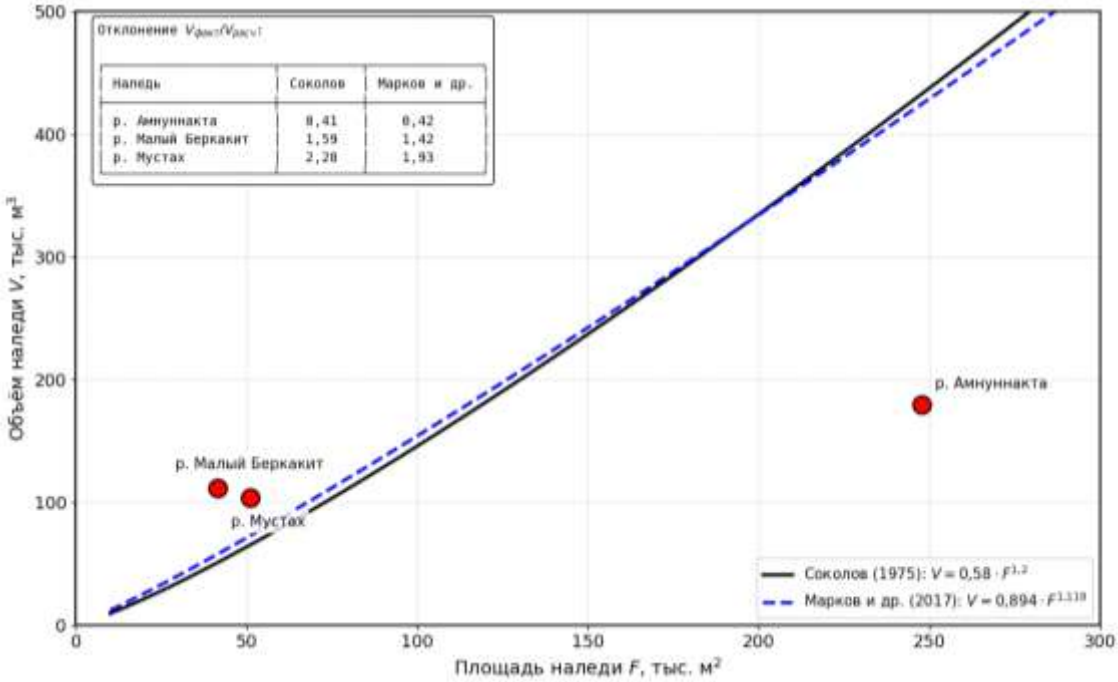



Рис. 2. Зависимость объемов исследуемых наледей от их площади для водосборного бассейна р. Чульман на фоне зависимостей $V = 0{,}58F^{1,2}$ (Соколов, 1975) и $V = 0{,}894F^{1,118}$ (Марков и др., 2017)

На рис. 2 представлен график зависимости объема исследуемых наледей от их площади в сравнении с кривыми Б.Л. Соколова (1975) и М.Л. Маркова и др. (2017). Данный рисунок наглядно показывает отклонение фактических данных от эмпирических зависимостей. Точка, соответствующая наледи в широкой долине (р. Амнуннакта), располагается ниже обеих кривых, что указывает на завышение расчетных объемов. Напротив, точки наледей в узкой (р. Мустах) и средней (р. Малый Беркакит) долинах находятся выше кривых, свидетельствуя о занижении расчетных объемов наледного льда. Таким образом, использование эмпирических зависимостей объемов наледей от их площади имеет существенные ограничения, которые необходимо учитывать при расчетах морфометрических параметров наледей. Ими являются морфология наледного ложа, а также форма наледи. Расхождение расчетных и фактических данных может достигать 2,2 раза и, вероятно, более.

Разнообразие типов речных долин обусловливает необходимость дальнейшей актуализации региональных коэффициентов в формуле Б.Л. Соколова. Будущие исследования предполагают расширение выборки наледей для построения статистически значимой регрессии с учетом морфологического разнообразия наледных полян.

Работа выполнена в рамках Базового проекта № 126020516689-6.

***Литература***

1 Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – С. 27-65.

2 Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. — Новосибирск: Наука, 1974. – С. 48-62.

3 Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В. Наледи зоны БАМ: Экспедиционные исследования //СПб.: Нестор-История. – 2016. – С. 59-70.

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ СУБАКВАЛЬНЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД КАРСКОГО МОРЯ

***Г.Е. Облогов, А.А. Васильев***

*Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень*

Исследование субаквальных многолетнемерзлых пород (СММП) на арктическом шельфе представляет как научный, так и практический интерес. В частности, условия залегания и распространения СММП крайне важны для освоения месторождений нефти и газа на шельфе и развития Северного морского пути. Другая задача, связанная с СММП, – оценка роли субаквальной

мерзлоты в формировании потоков парниковых газов и их вклад в изменение климата и природной среды Арктики. СММП Карского и Баренцева моря — это главным образом реликтовая мерзлота, которая сформировалась на суше во время понижения уровня моря в условиях наиболее холодного климата неоплейстоцена в МИС 2 и сохранилась после повышения уровня моря. Хотя некоторые исследователи выдвигают гипотезу о формировании мерзлоты в субаквальных условиях, фактических доказательств существования мерзлоты, сформированной в таких условиях, пока нет.

Основная проблема изучения СММП — острая нехватка прямых данных наблюдений. В Баренцевом и Карском морях пробурено всего несколько десятков скважин, вскрывших мерзлоту, и то преимущественно на мелководье. Для изучения и картирования СММП используется несколько подходов, которые со временем совершенствуются и предоставляют все более уточненные данные. Во-первых, накопление фактических данных бурения и сейсмоакустики, позволили опираться не только на экспертные оценки, но и на прямые наблюдения (например, СММП на карте Щербакова с соавт. [1] нанесены на основе фактических данных сейсмоакустического картирования). Совершенствуются и разрабатываются новые геофизические методы, в частности, интересный метод исследования СММП с помощью электроразведки разрабатывается А.В. Кошурниковым (МГУ) [2]. Во-вторых, применяется математическое моделирование СММП. При этом, реконструируется история формирования и эволюция СММП с учётом палеоклимата и изменений уровня моря. Несмотря на сложность (учёт геологического строения, солёности и пр.), моделирование позволяет не только картировать, но и прогнозировать будущее состояние СММП. Математическое моделирование является активно развивающимся методом картирования СММП, однако разные подходы дают различные результаты. Модели, учитывающие длительную геологическую историю или региональные особенности климата и солености, могут сталкиваться с проблемами, – из-за неполных исходных данных их оценки могут быть неточными или верными только для определённых акваторий. Комплексное моделирование распространения и мощности СММП проводиться, в частности, в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (ИВМиМГ СО РАН) [3]. Применяемые данными авторами модели позволили не только определить границы и мощность мерзлоты, но и спрогнозировать скорость её деградации (таяния сверху). Согласно прогнозу, скорость таяния увеличится с 1-2 см/год (1950-2015 гг.) до 5 см/год к 2100 году и до 10 см/год к 2300 году при максимальном сценарии потепления. Таким образом, картирование СММП эволюционировало от экспертных оценок и анализа фактических данных к созданию сложных прогностических моделей.

Для создания карты распространения и глубины залегания СММП нами был использован комплексный подход, объединяющий все доступные опубликованные и архивные данные по скважинам, вскрывшим мерзлые породы в Карском и Баренцевом морях, а также многочисленные материалы анализа данных сейсмоакустического профилирования полученных в ФГБУ ВНИИОкеангеология (г. Санкт-Петербург). Анализ материалов сейсмоакустических профилей и составление электронной базы данных на их основе был проведен в 2008-2015 гг. совместно с П.В. Рекантом (ВНИИОкеангеология). Детальное описание методики обработки сейсмических данных и выделение СММП на сейсмических разрезах описано в [4]. На рис. 1 представлена карта используемого фактического материала по распространению и глубине залегания кровли СММП Баренцева и Карского морей с обозначением сейсмоакустических профилей с наличием и отсутствием СММП, а также буровые скважины, вскрывших СММП. Всего было проанализировано около 200 тыс. пог. км доступных сейсмоакустических профилей, расположенных на глубинах моря не более 150 м.

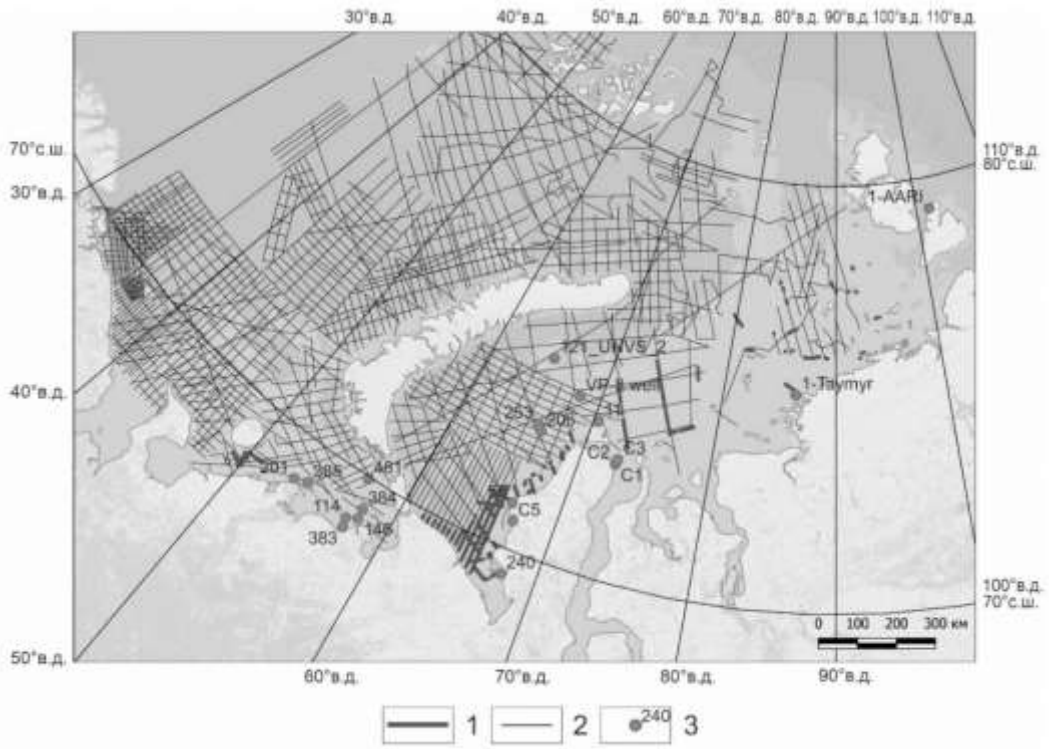



Рис. 1. Карта фактического материала распространения и глубин залегания кровли субаквальных многолетнемерзлых пород Баренцева и Карского морей. 1 – сейсмопрофили с отмеченной кровлей СММП, 2 – сейсмопрофили без СММП, 3 – буровые скважины, вскрывшие СММП

Метод сейсмоакустического профилирования основан на идентификации кровли СММП по характерному яркому сейсмическому отражению, которое возникает из-за резкого увеличения скорости звука в мёрзлой породе. Несмотря на доказанную сходимость с данными бурения, этот геофизический метод имеет ограничения. Он не позволяет обнаруживать мерзлоту на глубине более 60 метров и теряет эффективность в глинистых отложениях, где переход от талого к мёрзлому состоянию неявный и не создает четкой отражающей границы. Кроме того, присутствие в осадках свободного газа или близкое залегание коренных пород создают сильные помехи, которые могут полностью скрыть сигнал, делая обнаружение СММП невозможным.

При анализе сейсмоакустических данных были выделены территории с уверенным обнаружением СММП, где её наличие подтверждается четкими сейсмическими маркерами. Профили, на которых отсутствовали характерные отражающие сигналы, в дальнейшей работе не использовались. Вся информация, включая данные бурения, была систематизирована в ГИС-проекте, содержащем более 24.5 тыс. записей с координатами и глубиной залегания кровли СММП. Была выполнена интерполяция значений глубин залегания кровли СММП между точками фактических данных методом сплайн аппроксимации. Из-за неравномерного покрытия сейсмическими профилями, детальность итоговой карты (рис. 2), однако, сильно различается для разных участков. Наиболее детальные данные получены для юго-западной части Карского моря, напротив, северо-восточная часть представлена менее детально и с большими ограничениями. Важным подтверждением правильности применяемого подхода стало то, что маркеры границы кровли СММП не были обнаружены на глубинах моря более 114 метров. Это полностью согласуется с представлениями о формировании мерзлоты на осушенном шельфе во время последнего оледенения, когда уровень океана был на 120 метров ниже.

Установленная северная граница распространения СММП определена по самым северным подтвержденным маркерами СММП на сейсмоакустических профилях. Эта линия, однако, фиксирует только подтвержденные случаи наличия мерзлоты на глубине до 60 м от морского дна, что допускает существование более глубокозалегающей мерзлоты. В юго-западной части Карского моря, где кровля СММП прослеживается по относительно регулярной сетке сейсмоакустических профилей и поэтому наиболее детально картирована, наблюдается закономерное погружение кровли СММП по мере перемещения к внешней границе. Но далее к востоку эта закономерность не прослеживается, что

может быть объяснено ограничениями сейсмоакустических методов и недостатком фактических данных.

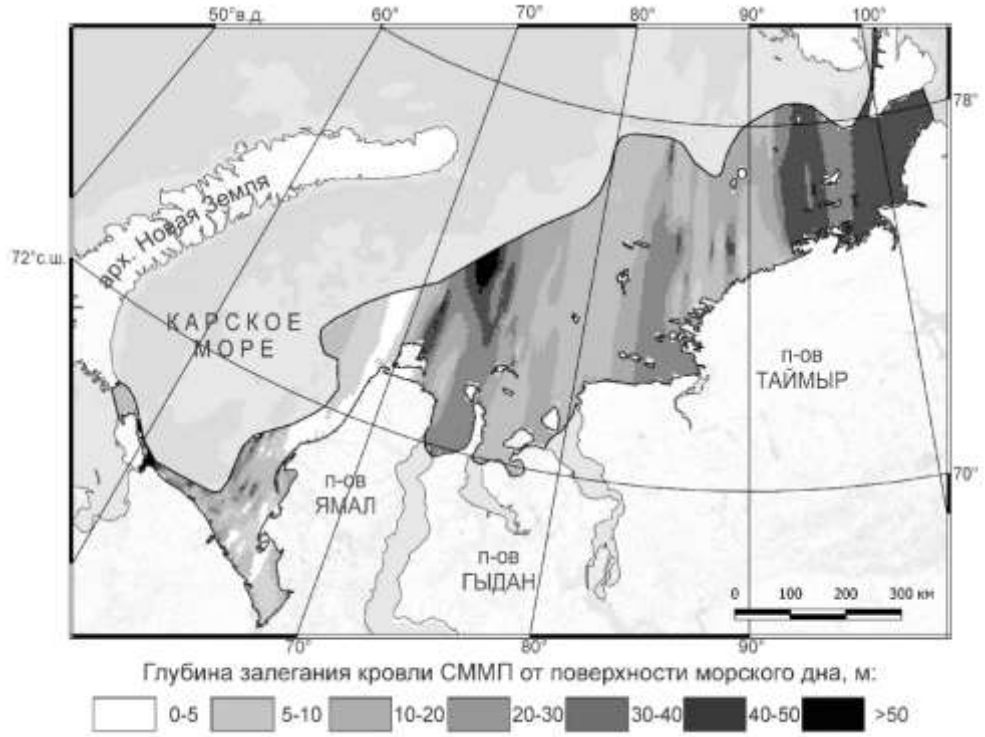



Рис. 2. Карта глубины залегания кровли субаквальных многолетнемерзлых пород Карского моря

Ранее нами была проведена работа [5] посвященная сбору, обработке и анализу подходов опубликованных и ранее неопубликованных карт СММП и составлению ГИС-альбома, включающего в себя оценочные и фактические карты СММП. Были обработаны карты для шельфа Российской Арктики, в особенности Баренцево-Карского шельфа из опубликованных данных, архивов Института криосферы Земли СО РАН, ВНИИОкеангеологии, других научных институтов, Росгеолфонда и др. В частности, в ГИС-проекте были посчитаны площади распространения СММП, которые сопоставимы с данными расчета площади СММП, представленной на рис. 2. В табл. 1 приведены данные расчетов площадей СММП Карского моря на картах разных авторов. Для примера, на рис. 3 представлено сравнение полученной границы распространения СММП Карского моря с границами распространения СММП по данным разных авторов. Так как для некоторых карт данные по распространения СММП приведены только для части Карского моря, территория Карского моря была условно разделена на западную и восточную части для возможности сравнения площадей. Границей раздела восточной и западной частей послужила условная линия, проведенная от восточной оконечности архипелага Новая Земля до п-ова Таймыр в районе п. Диксон.

Таблица 1

Площадь распространения СММП Карского моря на картах разных авторов

| Название и/или авторы карты | Площадь, км2 | | |
|---|---|---|---|
| | Общая | Западной части | Восточной части |
| Васильев, Облогов (см. рис. 2) | 344928 | 145560 | 199368 |
| Куликов, Рокос [6] | - | 103680 | - |
| Arctic Permafrost Atlas [7] | 414820 | 175110 | 239710 |
| Щербаков с соавт. [1] | 357616 | 189839 | 167777 |
| Баранов с соавт. [8] | 337136 | 170968 | 166168 |
| Гаврилов с соавт. [9] | 388914 | 143820 | 245094 |
| Кошурников [2] | 277647 | 102440 | 175207 |
| Overduin et al. [10] | 424691 | 175665 | 249026 |
| Матвеева с соавт.[11] | 464352 | 184042 | 280310 |

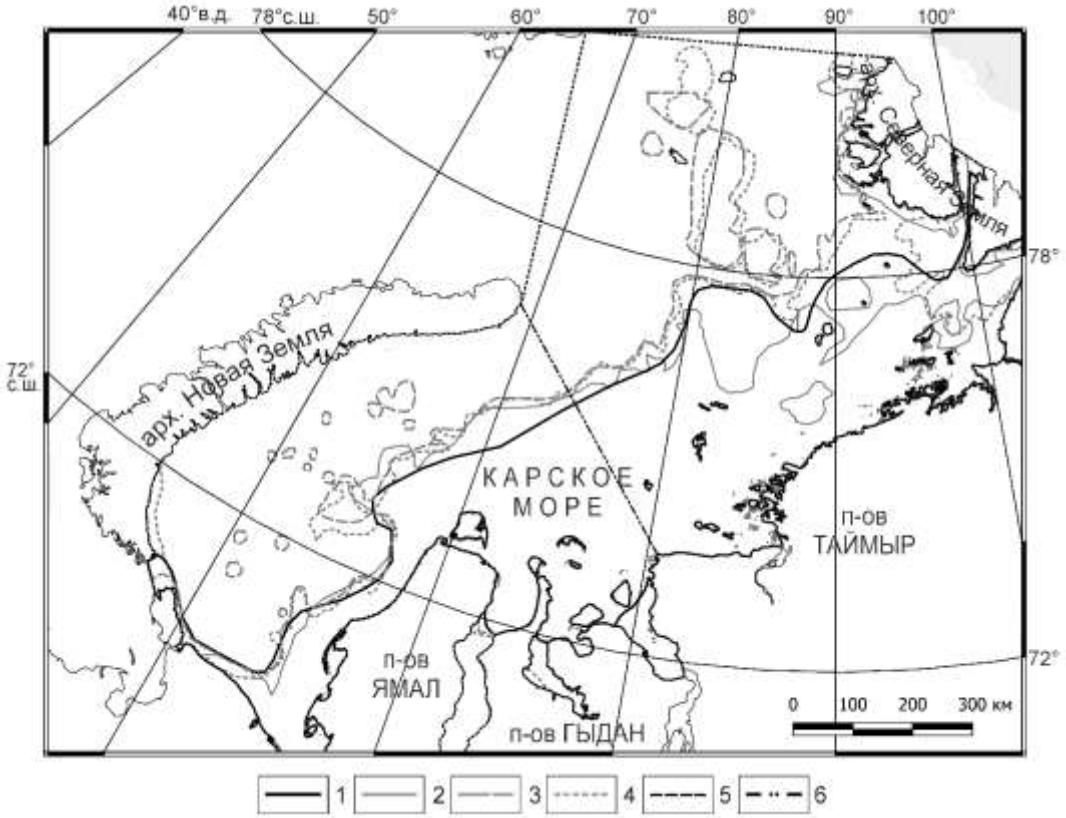



Рис. 3. Границы распространения субаквальных многолетнемерзлых пород Карского моря по данным разных авторов. 1-9 – границы распространения СММП по: 1 – авторским данным (см. рис. 2); 2 – Баранову [8]; 3 – Матвеевой с соавт. [11]; 4 – Overduin et al. [10]; 5 – граница Карского моря; 6 – условная граница западной и восточной частей Карского моря

Распространения мерзлоты на шельфе и глубина кровли СММП должны отвечать морфоструктурным элементам шельфа, поскольку мерзлота сформировалась во время его осушения. Для проверки этой гипотезы в ГИС-проекте было проведено сравнение установленной границы СММП с геоморфологической картой Карского моря по данным [12]. Анализ показал неоднозначные результаты. Хорошее совпадение границы СММП с морфоструктурой (в частности, с денудационно-тектоническим склоном) наблюдается лишь в западной части моря. Однако в северных и восточных районах эта граница пересекает различные элементы рельефа, такие как подводные долины палеорек и др., что указывает на отсутствие прямой корреляции. Такое расхождение объясняется сложным взаимодействием множества факторов, в особенности в восточной части Карского шельфа. Ключевую роль играют различия в геологическом строении и льдистости пород, разный температурный режим вод во время затопления шельфа, локальные процессы размыва или аккумуляции осадков, а также неотектонические движения. Следовательно, современное распространение СММП определяется не столько морфологией, сколько совокупностью этих геологических и океанографических условий.

Положение кровли СММП определяется и тем, как долго СММП находились под водой после затопления арктического шельфа в постгляциальную эпоху. По мере подъема уровня моря, мерзлая толща начала оттаивать сверху, поэтому, в приближении, глубина залегания кровли СММП должна быть пропорциональна времени затопления. Для проверки этой гипотезы мы сопоставили данные о глубине кровли СММП из скважин в Баренцевом и Карском морях, а также для морей Бофорта и Лаптевых (по данным [13]) с расчетным временем затопления, которое определялось по современной глубине моря и известной кривой подъема уровня Мирового океана [14]. Построенный для всех данных общий линейный тренд, проведенный через начало координат (что отражает залегание мерзлоты с поверхности на границе суши и моря), показал высокую корреляцию с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0.84$. Полученная взаимосвязь позволила оценить среднюю скорость деградации мерзлоты сверху в голоцене, которая составила 8.2 мм/год для Баренцева моря и 5.5 мм/год для Карского моря.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2026-0027).

***Литература***

1. Щербаков В.А., Иванова В.В., Слинченков В.И. и др. Геокриологическая карта окраинных морей Северного Ледовитого океана Арктической Зоны Российской Федерации масштаба 1:5000000 / Объяснительная записка. Санкт-Петербург, ФГБУ «ВНИИОкеангеология». – 2018. – 52 с.

2. Кошурников А.В. Применение комплексного геокриолого-геофизического анализа при исследовании многолетнемерзлых пород и газогидратов на шельфе морей Российской Арктики // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2020. – №3. – С. 130-138.

3. Malakhova V.V., Eliseev A.V. A Relationship between Changes of Surface Air and Sea Floor Temperatures at the Arctic Shelf from the Coupled Models Intercomparison Project, Phase 6 Data // Atmosphere. – 2023. – Vol.14. – No. 6, 1024. https://doi.org/10.3390/atmos14061024.

4. Рекант П.В., Тумской В.Е., Гусев Е.А. и др. Распространение и особенности залегания субаквальной криолиотозоны в районе банок Семеновская и Васильевская (море Лаптевых) по данным сейсмоакустического профилирования / В кн. Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики. Современное состояние и история развития. Отв. ред. Х. Кассенс, А.П. Лисицын, Й. Тиде, Е.И. Полякова, Л.А. Тимохов, И.Е. Фролов. – Москва, МГУ, 2009. – С. 332-349.

5. Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Belova N.G. Submarine Permafrost Maps Of The Russian Arctic. A Review // Geography, Environment, Sustainability. – 2025. – Vol.3, No.18. – p.112-122. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2025-3970.

6. Куликов С.Н., Рокос С.И. Выделение массивов многолетнемерзлых пород на временных сейсмоакустических разрезах мелководных районов Печорского и Карского морей // Инженерные изыскания. – 2017. – №3. – С. 34-42.

7. Westerveld L., Kurvits T., Schoolmeester T. et al. and NUNATARYUK consortium. Arctic Permafrost Atlas / O. Mulelid, H. Lantuit, F. Miesner and L. Viitanen (editors) / GRID-Arendal, Arendal, 2023. – 176 p. https://doi.org/10.61523/KPJI4549.

8. Баранов И.Я. Геокриологическая карта СССР масштаба 1:10 000 000 / Пояснительная записка. М., Знание. – 1960. – 48 с.

9. Gavrilov A., Pavlov V., Fridenberg A. et al. The current state and 125 kyr history of permafrost on the Kara Sea shelf: modeling constraints // The Cryosphere. – 2020. – №14. – p. 1857-1873. https://doi.org/10.5194/tc-14-1857-2020.

10. Overduin P.P., Schneider von Deimling T., Miesner F. et al. Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP) // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2019. – Vol. 124. – No. 6. – p. 3490-3507. https://doi.org/10.1029/2018JC014675.

11. Матвеева Т.В., Чазов А.О., Смирнов Ю.Ю. Геологическая характеристика подмерзлотного газогидратного резервуара на Притаймырском шельфе Карского моря (Восточная Арктика, Россия) // Геотектоника. – 2024. – №2. – С. 84-108.

12. Мирошников А.Ю., Бадюков Д.Д., Флинт М.В. и др. Рельеф дна Карского моря и сорбционные свойства осадков как факторы аккумуляции загрязнений // Океанология. – 2021. – Т.61. – №5. – С. 809-821. https://doi.org/10.31857/S0030157421050087.

13. Angelopoulos M., Overduin P.P., Miesner F. et al. Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost // Permafrost and Periglac. Process. – 2020. – Vol.31. – No.3. – P. 442-453. https://doi.org/10.1002/ppp.2061.

14. Gornitz V. Sea Level Change, Post-Glacial / In: Gornitz V. (eds) Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments. Encyclopedia of Earth Sciences Series, 2009. – Springer, Dordrecht. – P. 887-893. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4411-3_207.

## ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИЯХ ОБЪЕКТОВ ОБУСТРОЙСТВА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

***А.А. Осокин***

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

В последние 40–45 лет в Арктике наблюдается устойчивый тренд повышения температуры воздуха и, как следствие, многолетнемёрзлых грунтов (ММГ). Полуостров Ямал относится к регионам, где потепление проявляется наиболее интенсивно, что влечёт деградацию ММГ, переход из твёрдомерзлого состояния в пластичномерзлое и снижение их прочностных и деформационных характеристик [1, 5].

На основании обобщения материалов инженерно-геологических изысканий и данных многолетнего геотехнического мониторинга установлено, что за период с середины-конца 1980-х годов среднегодовые температуры ММГ в естественных условиях повысились: на 1–2 °С в пределах пойм крупных рек и на 3–4 °С на морских террасах [2, 3, 4, 7]. Для зданий, спроектированных без учёта тренда деградации мерзлоты, это создаёт прямую угрозу надёжности.

**Объекты исследований**

Первый объект – котельная «Сермет» на Бованенковском НГКМ (построена в 1996 г.). Здание имеет вентилируемое подполье открытого типа. Грунты – льдистые суглинки, супеси и пылеватые пески с наличием засолённости с глубины 12 м.

Второй объект – общежитие в пос. Харасавэй (построено в 1982 г.). Открытое вентилируемое подполье. Геокриологический разрез сложный: грунты от песчано-супесчаных до глинистых с высокой льдистостью (ледяные включения 40–80%), слабой и средней степенью засолённости.

Третий объект (для моделирования) – комплекс общежитий на Бованенковском месторождении (построен с 2017 г.) с проветриваемым подпольем закрытого и открытого типа. Грунты: супеси, суглинки, пески разной степени льдистости, лёд мощностью до 1,5 м, прослой торфа.

**Динамика температурного режима ММГ в основаниях**

Геотехнический мониторинг котельной «Сермет» ведётся с 1997 г. Для анализа приняты средние значения температуры за октябрь – момент максимального прогрева основания. В 1997 г. средние температуры ММГ составляли от –2,5 до –4,5 °С, к 2024 г. – от –2,5 до –3,5 °С. На рис. 1 (скважина 6) показано повышение температуры за 2009–2024 гг. на 0,3–1,5 °С.

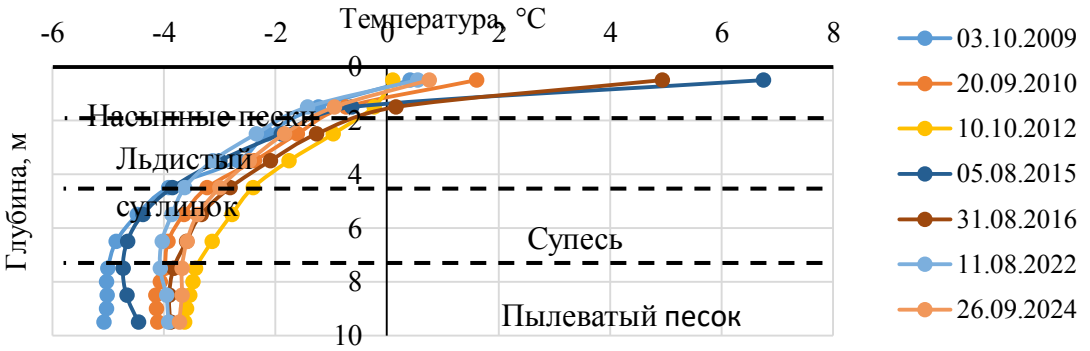



Рис.1. Результаты мониторинга температуры грунтов основания котельной «Сермет» (скважина 6) за 2009-2024 гг.

По общежитию в Харасавэе регулярные наблюдения организованы с 1998 г. За 25 лет (1998–2024 гг.) температуры ММГ на глубине 10 м повысились с –6,1…–6,4 °С до –4,4…–4,5 °С, т.е. на 1,5–1,9 °С (рис. 2, скважина 6).

**Снижение несущей способности: расчёт и результаты**

Расчёт выполнен по методике СП 25.13330.2020 (формула для несущей способности сваи $F_u = \gamma_t \cdot \gamma_c \cdot (R \cdot A + \sum R_{af,i} \cdot A_{af,i})$). Температурный коэффициент $\gamma_t$ изменялся от 1,0 (при –4,5 °С) до 0,85 (при –2,0 °С). Результаты приведены в таблицах 1 и 2.

Таким образом, снижение несущей способности составило 24–26%. Засоленность грунтов (общежитие) усилила негативный эффект: при близком повышении температуры падение прочности оказалось более интенсивным.

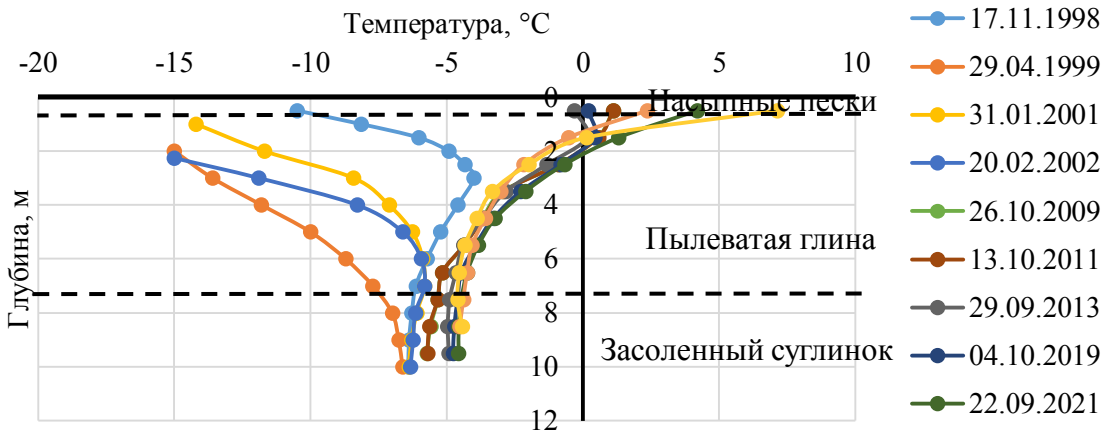



Рис.2. Результаты мониторинга температуры грунтов основания общежития в пос. Харасавэй (скважина 6) за 1998-2021 гг.

Таблица 1

Изменения средней температуры ММГ и расчётных значений несущей способности свай фундамента здания котельной «Сермет» в период с 1997 по 2023 год

| Год | Средняя T ММГ (°C) | $\gamma_t\gamma_t$ | $\gamma_c\gamma_c$ | Несущая способность, кН | Изменение, % |
|---|---|---|---|---|---|
| 1997 | –4,5 | 1 | 0,85 | 370 | Базовый |
| 2009 | –3,3 | 0,95 | 0,85 | 330 | –11 |
| 2015 | –2,7 | 0,9 | 0,8 | 290 | –22 |
| 2023 | –2,5 | 0,89 | 0,8 | 280 | –24 |

Таблица 2

Изменения средней температуры ММГ и расчётных значений несущей способности свай фундамента здания общежития в пос. Харасавэй в период с 1998 по 2023

| Год | Средняя T ММГ (°C) | $\gamma_t\gamma_t$ | $\gamma_c\gamma_c$ | Несущая способность, тс | Изменение, % |
|---|---|---|---|---|---|
| 1998 | –6,5 | 1 | 0,8 | 30 | Базовый |
| 2002 | –6,0 | 0,98 | 0,7 | 25,5 | –15 |
| 2023 | –4,5 | 0,85 | 0,7 | 22,1 | –26 |

**Последствия: деформации зданий**

Котельная «Сермет» благодаря проектным резервам сохранила устойчивость. Общежитие в Харасавэе к середине 1990-х годов начало испытывать значительные неравномерные осадки (перепад ростверка до 180–230 мм). Только после усиления дублирующим ленточным фундаментом в 2009 г. интенсивность осадок удалось снизить [1].

**Прогнозное моделирование (комплекс общежитий, 2017 г.)**

Для комплекса общежитий на Бованенковском НГКМ выполнено численное моделирование в программном комплексе «Борей 3D» на срок до 2055 г. Расчётная область – трёхмерный параллелепипед, нижние и боковые границы – нулевой тепловой поток на расстоянии ≥20 м от здания. Климатический прогноз: тренд повышения температуры воздуха 0,08 °C/год (≈ +2 °C за 25 лет) по данным метеостанции Марре-Сале. Смоделированное температурное поле на 2055 года показано на рисунке 3.

Предложены решения по термостабилизации: наружная теплоизоляция свай, теплоизоляционный экран в основании, сезонно-действующие охлаждающие устройства. Грунты используются по I принципу (сохранение мёрзлого состояния).

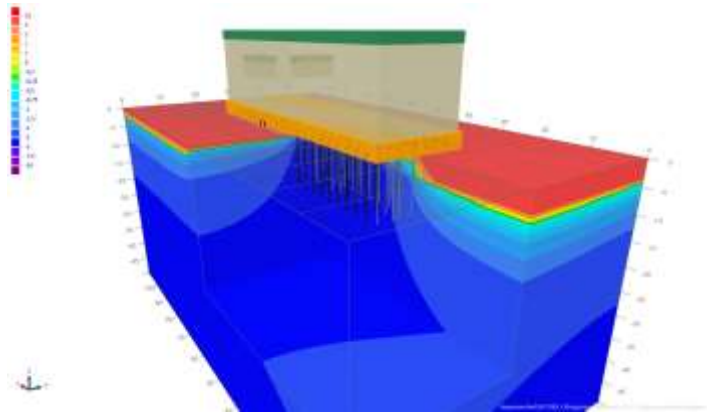


Рис.3. Трехмерное температурное поле грунтов в основании здания (на 15.09.2055)

Результат: по термометрическим скважинам на глубине 3–5 м температура к 2055 г. составляет от –2,4…–3,5 до –2,9…–3,6 °С. Верификация модели выполнена сопоставлением с данными 2017, 2023 и 2025 гг. Снижение несущей способности к 2055 г. относительно 2017 г. оценочно составляет 8%.

**Выводы**

1. За период с середины-конца 1980-х годов среднегодовые температуры ММГ на п-ове Ямал повысились на 2–4 °С. В основаниях зданий с вентилируемыми подпольями за 20–25 лет эксплуатации повышение составило до 2,0–2,5 °С.
2. Расчётные значения несущей способности свайных фундаментов снизились более чем на 20%. В засолённых грунтах снижение происходит интенсивнее при том же повышении температуры.
3. Прогнозное моделирование на 30 лет (тренд 0,08 °С/год) показало, что предложенный комплекс термостабилизации обеспечивает I принцип использования ММГ; прогнозируемое снижение несущей способности к 2055 г. – 8%.
4. В действующем СП 25.13330.2020 отсутствуют явные требования учёта многолетнего тренда потепления. Температурный коэффициент γt учитывает лишь случайные изменения температуры воздуха. Необходимо совершенствование нормативной базы.
5. При проектировании в криолитозоне рекомендуется:

- выполнять теплотехнические прогнозные расчёты с учётом региональных климатических трендов;
- предусматривать фоновые термометрические скважины вне зон техногенного воздействия;
- на объектах с высокими требованиями к надёжности применять активные системы термостабилизации с расчётом их эффективности на весь жизненный цикл.

***Литература***


1. Алексеев А.Г., Брушков А.В., Бадина С.В. и др. Обеспечение устойчивости зданий и сооружений в сложных геокриологических условиях // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2025. № 4. С. 19–25.
2. Бабкина Е.А., Хомутов А.В., Бабкин Е.М., Лейбман М.О. Мониторинг глубины протаивания и температуры многолетнемерзлых пород на севере Ямало-Ненецкого АО // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2022; 9:20–28.
3. Брушков А.В., Алексеев А.Г., Дроздов Д.С., Дубровин В.А. и др. Мониторинг вечной мерзлоты. М.: Акад. Проект, 2024. 463 с.
4. Осокин А.Б. Многолетние изменения среднегодовой температуры ММП на Севере Западной Сибири под воздействием потепления климата // Материалы конференции геокриологов России. 2011; Т.3:69–77.
5. Осокин А.Б., Меньшиков С.Н., Морозов И.С. Обеспечение надежности оснований и фундаментов объектов добычи и транспорта газа на Севере Западной Сибири в условиях потепления климата и деградации многолетнемерзлых грунтов // Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению. Салехард, 2012.
6. Спиридонова М.Н., Афанасьева А.А., Гаврильев И.М., Кононова Е.А. Влияние изменения температурного режима грунтов на несущую способность фундаментов многолетнемёрзлых грунтов основания на примере зданий г. Якутска // Universum: технические науки. 2015;6(18).

7. Georgievski G. et al. Climate extremes relevant for permafrost degradation. EGU General Assembly 2020.
8. Romanovsky V., Smith S., Kholodov A. Projections of permafrost thaw under IPCC climate scenarios // The Cryosphere. 2023; 17:345–362.

## ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ: СОДЕРЖАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДНИЯ

***Е.Н. Оспенников, С.Н. Булдович, Л.В. Емельянова, В.З. Хилимонюк***
*МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, г. Москва*

***Геокриологический мониторинг*** – это система изучения, прогноза и контроля геокриологической среды, оценки изменения мерзлотных, инженерно-геологических и гидрогеологических условий северных регионов под влиянием природных факторов и хозяйственной деятельности человека [1]. Геокриологический мониторинг, в отличие от других частных видов мониторинга, связан с необходимостью дополнительного учёта криолитологического (высокая льдистость пород, наличие залежеобразующих льдов) и термического (отрицательно температурного) факторов. В настоящее время нормативных документов, определяющих проведение геокриологического мониторинга нет, как нет и общепринятой методики выполнения таких исследований. Тем не менее, в Российской Федерации существуют документы, регламентирующие проведение экологического мониторинга. Это – Закон «Об охране окружающей среды» (от 20. 12.2001), Постановление Правительства РФ от 24.11.93 № 1229 «О создании Единой государственной системы экологического мониторинга (ЕГСЭМ). В соответствие с действующим законом «мониторинг окружающей среды (экологический мониторинг) это – комплексная система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов». В постановлении правительства устанавливаются компоненты природной среды, подлежащие изучению в системе ЕГСЭМ. Это – атмосфера, поверхностные воды, снежный и ледовых покровы, растительность и животный мир, почвы, донные осадки, горные породы, подземные воды. В соответствие с этим постановлением Государственный мониторинг геологической среды (ГМГС) является составной частью ЕГСЭМ. Очевидно, что геокриологический мониторинг в свою очередь входит в ГМГС, является его составной частью который включает систему регулярных наблюдений, оценку состояния геологической среды и прогнозирование её изменений под влиянием природных и антропогенных факторов с целью управления государственным фондом недр и государственным водным фондом (подземными водами), а также для обеспечения устойчивого и сбалансированного развития территорий и для обоснования рационального использования и охраны геологической среды. Эта система предназначена для получения информации о состоянии геологической среды на федеральном и территориальном уровнях. В случае если объектом мониторинга является не вся экосистема в целом, а только отдельные её компоненты (например, биотоп), можно говорить о частном экологическом мониторинге, одной из разновидностей которого является ***мониторинг геологической среды (литомониторинг).*** Место геокриологического мониторинга в системе экологического мониторинга и его основные направления представлены на рис. 1. Как следует из этого рисунка геокриологический мониторинг, как составная часть литомониторинга, который входит в мониторинг биотопов, является частным мониторингом экологического мониторинга. Собственно геокриологический мониторинг подразделяется на мониторинг геокриологических систем (фоновый геокриологический мониторинг), мониторинг геокриологических процессов, инженерно-геокриологический мониторинг и мониторинг эколого-геокриологический.

Целью ***мониторинга геокриологических систем и мониторинга геокриологических процессов*** являются наблюдения за изменениями геокриологической обстановки и контроль динамики геокриологических систем в связи с естественно-историческими изменениями природной среды в криолитозоне. Геокриологический мониторинг природно-технических систем Севера по своей сущности является ***инженерно-геокриологическим мониторингом***. Он призван обеспечить надёжную безаварийную эксплуатацию хозяйственных объектов и защиту окружающей их природы на основе максимально возможного сохранения исходных геокриологических условий. Задачами инженерно-геокриологического мониторинга также являются: установление причин отказов и неисправностей инженерных сооружений; научное обоснование принимаемых решений по

проведению ремонтно-восстановительных работ; разработка и совершенствование технологий строительства и проведения ремонтных работ; совершенствование организации самого мониторинга, совершенствование правил технической эксплуатации объектов при сложных инженерно-геокриологических условиях. Вопросы эколого-геокриологического мониторинга в этом докладе не рассматриваются.

***Информационная система мониторинга*** должна обеспечивать обмен данными, подготовку, сбор, хранение, обработку, анализ и рассылку информации и иметь организационное, программное, техническое, математическое, методическое, обеспечение.

***Программа наблюдений***, включающая выбор объектов мониторинга, постановку конечных целей, определение контролируемых параметров, средств и методов контроля, составляется исходя из основополагающих принципов *комплексности, стадийности, систематичности и периодичности, полигонного характера* исследований с учётом специфики изучаемых природных или природно-технических систем.

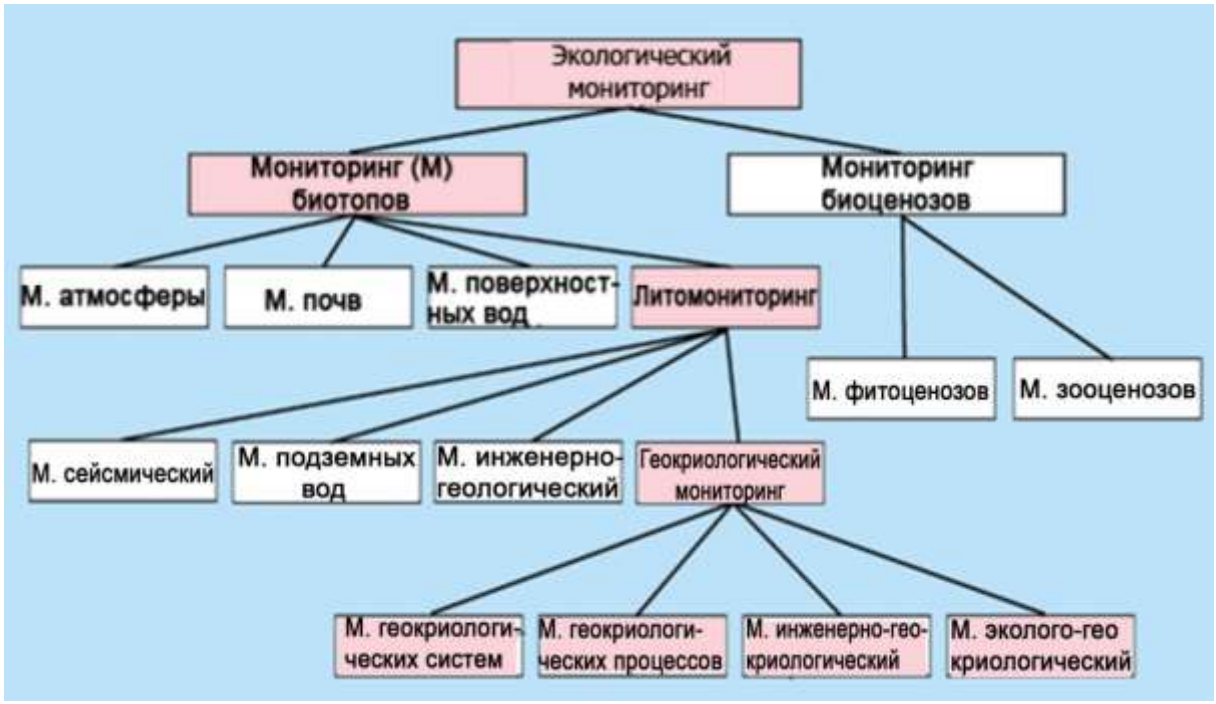



Рис. 1. Место геокриологического мониторинга в структуре системы экологического мониторинга

Различные системы *геокриологического мониторинга* отличаются, прежде всего, своей структурой, под которой понимается организация связей и отношение между подсистемами и элементами системы, а также состав этих подсистем и элементов, каждому из которых соответствуют определённые функции. Таким образом, структура определённой системы мониторинга обеспечивает её целостность и тождественность внутри себя и отличия от других систем мониторинга, а также виды проводимых исследований (таблица 1).

Таблица 1.

Виды работ и исследований при организации и проведении мониторинга геокриологических систем (фонового)

| **Объекты и виды работ при организации наблюдений на полигонах** | | |
|---|---|---|
| **Объекты исследования, виды работ** | **Методы исследований** | **Результаты исследований** |
| Рельеф | Топографическая съёмка (мензульная, тахеометрическая, GPS) съёмки | Топографические планы и карты м-ба 1:1000 – 1:5000 |
| Микроклимат | Актинометрические, градиентные метеонаблюдения | Характеристика локального климата |
| Растительный покров | Ландшафтная съёмка, маршрутные обследования | Ландшафтная карта (карта ландшафтного районирования) м-ба 1:1000 – 1:5000 |

| | | |
|---|---|---|
| Снежный покров | Снегомерная съёмка | Карта распределения и свойств снежного покрова |
| Геокриологическая обстановка:<br>- характер распространения ММП и таликов<br>- сезонное оттаивание (промерзание)<br>- свойства пород<br>- температура пород (на поверхности, среднегодовая)<br>-геокриологические и прочие экзогенные геологические процессы | Геокриологическая съёмка, горнопроходческие работы, термометрия в скважинах и шурфах, геофизические исследования | Геокриологические планы и карты м-ба 1:1000 – 1:5000 и разрезы |
| ***Виды режимных наблюдений*** | | |
| Динамика микроклимата | Наблюдения на микроклиматической площадке с последующей привязкой материалов к данным государственных метеостанций с длинными рядами наблюдений | Ряды актинометрических и микроклиматических наблюдений |
| Динамика растительного покрова | Повторная (1-2 года) ландшафтная съёмка | Ландшафтная карта (карта ландшафтного районирования) м-ба 1:1000 – 1:5000 |
| Динамика снежного покрова (внутригодовая и многолетняя) | Наблюдения по стационарным снегомерным рейкам, ежегодная снегомерная съёмка | Графики, разрезы, карты изменения характеристик снежного покрова во времени и по площади |
| За динамикой слоёв СТС/СМС | Термометрия в скважинах и шурфах, радиоизотопные исследования | Разрезы и карты изменения снежного покрова по высоте и в плане |
| Динамика температурного режима горных пород | Термометрия в скважинах, волоконно-оптические системы | Схемы и карты температурных полей и их изменения во времени и по площади |
| Динамика геокриологических процессов и явлений | Комплексы методов наблюдений за изменение рельефа поверхности и характера горных пород, обусловленными возникновением и развитием процессов (дистанционные, топографические, горнопроходческие, геофизические и пр.) | Разрезы, схемы динамики процессов и явлений |

Так системы мониторинга экзогенных геологических (геокриологических в криолитозоне) процессов и явлений (рис. 2) отражают методологию выбора объектов наблюдений, неразрывную связь геокриологических процессов с определённой геокриологической обстановкой и взаимоотношение между режимными наблюдениями и прогнозными исследованиями, а также общую последовательность получения информации о динамике процессов и явлений. Согласно В.К. Епишину и В.Т. Трофимову [2], М.А. Минкину [3], структура системы инженерно-геологического мониторинга (которая может быть принята и для мониторинга геокриологических систем) включает две основные подсистемы: подсистема контроля (слежения) и подсистема управления. Подсистема контроля состоит из следующих блоков: блока сбора информации по температурному и гидрогеологическому режимам, блокам по деформациям сооружений и по развитию деструктивных геокриологических процессов и явлений.

Одной из основных задач, которые возникают при организации работ в системе геокриологического мониторинга, является выбор объектов проведения мониторинговых наблюдений. При решении этой задачи, очевидно, следует исходить из того, что главными целями мониторинга в криолитозоне являются контроль за изменением геокриологических условий и состоянием сооружающей среды и хозяйственных объектов, т.е. – за геокриологическими, геотехническими природно-техническими системами. Ядром при-родно-технической системы является геотехническая система с окружающим её типом геокриологической обстановки. Причиной возникновения и развития геокриологических процессов является изменение геокриологической обстановки, а также других компонентов природных комплексов в результате действия природных или техногенных нагрузок и воздействий и перестройка ПТС (рис. 3)

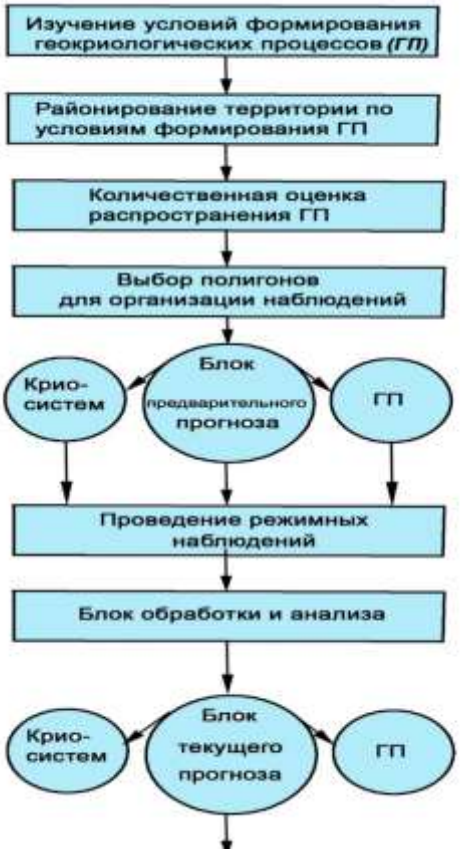
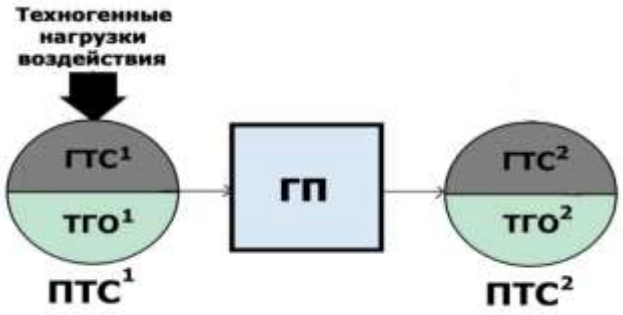



Рис. 2. Организационная структура мониторинга геокриологических процессов




$ПТС^1$ – первичная природно-техническая система;
$ГТС^1$ - первичная геотехническая система;
$ТГО^1$ – исходный тип геокриологической обстановки;
ГП – геокриологические процессы;
$ПТС^2$, $ГТС^2$, $ТГО^2$ – соответственно то же после завершения процесса перестройки

Рис. 3. Перестройка природно-технических систем под действием нагрузок и воздействий

Работы по мониторингу выполняются в определённой последовательности. Их следует начинать до хозяйственного освоения территории с целью оценки фоновой геокриологической обстановки и возможных последствий хозяйственного освоения [4].

Работы ***первого этапа*** по сбору, обработке и анализу информации включают в себя предварительный анализ геокриологических условий, районирование территории по типам природных обстановок и геокриологических условий. Завершается он совместным анализом геокриологических систем и возможных видов нарушений природной среды.

Основной целью ***второго этапа*** работ является предварительный прогноз динамики природных систем под действием техногенеза и естественноисторического развития природных комплексов. Оценка реакции многолетнемёрзлых толщ на естественную и техногенную динамику природной обстановки.

Работы ***третьего этапа*** включают в себя обследование инженерных сооружений, выбор постов мониторинга и мест их размещения, детальное изучение инженерно-геокриологических условий на полигоне проведения режимных наблюдений, разработку программы и методов исследований и полевую организацию сети мониторинга.

Целью работ ***четвёртого этапа*** является: проведение режимных наблюдений за динамикой показателей геотехнических и природно-технических систем.

На следующем, ***пятом этапе*** работ выполняется обработка данных наблюдений и даётся оценка динамики природных или природно-технических систем. Материалы режимных наблюдений

поступают в базы данных о природной среде и об инженерных сооружениях, после чего обрабатываются с помощью программ информационной обработки базы данных и других программ математического обеспечения. По результатам последующего анализа материалов режимных наблюдений производится выявление природных или природно-технических систем требующих проведения управляющих мероприятий.

***Шестой этап*** проведения геокриологического мониторинга посвящён текущему прогнозу динамики природной обстановки и геокриологических процессов на базе данных режимных наблюдений. Главной целью работ является уточнение закономерностей формирования геокриологических условий, прогноза развития геокриологических процессов и явлений, а также прогноза теплового и механического взаимодействия инженерных объектов с сезонно- и многолетнемёрзлыми грунтами основания с использованием материалов режимных наблюдений

Следующий, ***седьмой этап*** технологической схемы геокриологического мониторинга объединяет комплекс задач по разработке проекта защитных мероприятий в геотехнических системах, где развитие геокриологических процессов может вызвать потерю устойчивости сооружений, а также контроль над строительством защитных сооружений.

В случае развития недопустимых изменений наблюдаемых характеристик, принимаются решения о необходимости разработки дополнительных технических мероприятий, направленных на поддержание работоспособности сооружений и устойчивости природной среды.

Работы ***восьмого этапа*** направлены на оценку эффективности осуществлённых управляющих мероприятий.

В последующем, исследования продолжаются циклически, начиная с четвёртого по восьмой этапы в течение всего периода проведения мониторинга.

***Литература***

1 Мельников Е.С., Каменский Р.М., Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны // Вестн. РАН. – 1993. – Т. 63. – № 12. – С. 1090-1095.

2 Епишин В.К., Трофимов В.Т. Литомониторинг – система контроля и управления геологической средой // Теоретические основы инженерной геологии. Социально-экономические аспекты / под ред. Акад. Е.М. Сергеева. – М.: Недра, 1985. – С. 243-250.

3 Минкин. Инженерно-геокриологический мониторинг как механизм превентивной защиты сооружений от опасных геокриологических процессов // Природные опасности России. Геокриологические опасности / Под ред. Л.С. Гарагули, Э.Д. Ершова. М.: Крук, 2000. С.295-306.

4 Оспенников Е.Н. Геокриологический мониторинг /Основы геокриологии. Ч. 6. Геокриологический прогноз и экологические проблемы в криолитозоне / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – С. 657-735.

## ЭКОЛОГО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КАК ОСНОВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

***Е.Н. Оспенников, В.З. Хилимонюк, С.Н. Булдович, Л.В. Емельянова***
*МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, г. Москва*

Эколого-геокриологический мониторинг – это система изучения, прогноза и контроля динамики экосистем в криолитозоне под влиянием природных факторов и техногенеза. Эколого-геокриологический мониторинг в отличии от других видов мониторинга природной среды связан с необходимостью дополнительного учёта и исследования экологических факторов, обусловленных развитием сезонномёрзлых, многолетнемёрзлых пород, а также термического отрицательно температурного фактора.

Так развитие многолетнемёрзлых горных пород, как основного компонента биотопов, вблизи поверхности сопровождается (при постоянном существовании криогенного водоупора) переувлажнением почв и развитием заболачивания [1], а также низким уровнем активных температур почвы (суммы среднесуточных температур за период, когда они превышают 10 $^0$C), лимитирующим развитие ряда сельскохозяйственных культур. С другой стороны, развитие криогенных водоупоров способствует повышению защищённости подземных вод от загрязнения.

Глубокое сезонное промерзание при длительном существовании сезонномёрзлого слоя, а также мелкое сезонное оттаивание горных пород также приводят к повышенному увлажнению поверхности и заболачиванию верхнего горизонта и, как следствие, к сокращению мощности корнеобитаемого

горизонта, развитию гидрофильных моховых растительных группировок и к торфонакоплению, что сопровождается аградацией многолетнемёрзлых пород и понижением среднегодовой температуры почв.

Наконец, геокриологические процессы и экзогенные геологические процессы в целом являются экологическими факторами, определяющими развитие экосистем [2]. Динамика процессов сопровождается изменением мезо- и микрорельефа поверхности, состава и строения горных пород, их температурных полей и других условий и показателей геокриологических систем. В экологическом отношении геокриологические процессы выступают в качестве факторов, вызывающих развитие экосистем.

Отмеченные экологические факторы оказывают влияние на сукцессии биоценозов, как первичные, так и вторичные.

К настоящему времени проведение экологического мониторинга регламентируется в Российской Федерации. Существуют документы, регламентирующие законом «Об охране окружающей среды» (от 20. 12.2001) и Постановление Правительства РФ от 24.11.93 № 1229 «О создании Единой государственной системы экологического мониторинга (ЕГСЭМ). В соответствие с действующим законом «мониторинг окружающей среды (экологический мониторинг)» это – комплексная система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов». В постановлении правительства устанавливаются компоненты природной среды, подлежащие изучению в системе ЕГСЭМ. Это – атмосфера, поверхностные воды, снежные и ледовые покровы, растительность и животный мир, почвы, донные осадки, горные породы, подземные воды. В соответствие с этим постановлением Государственный мониторинг геологической среды (ГМГС) является составной частью ЕГСЭМ. Геокриологический мониторинг и его разновидности в свою очередь входят в ГМГС. Главными объектами ЕГСЭМ в целом являются экосистемы, под которыми понимаются [3] постоянно взаимодействующие между собой и образующие устойчивую систему биотопы и биоценозы Место геокриологического мониторинга в системе экологического мониторинга и его основные направления представлены на рис. 1. Как следует из этого рисунка геокриологический мониторинг, как составная часть литомониторинга, который входит в мониторинг биотопов, является частным мониторингом экологического мониторинга. Собственно геокриологический мониторинг подразделяется на мониторинг геокриологических систем (фоновый геокриологический мониторинг), мониторинг геокриологических процессов, инженерно-геокриологический мониторинг и мониторинг эколого-геокриологический.

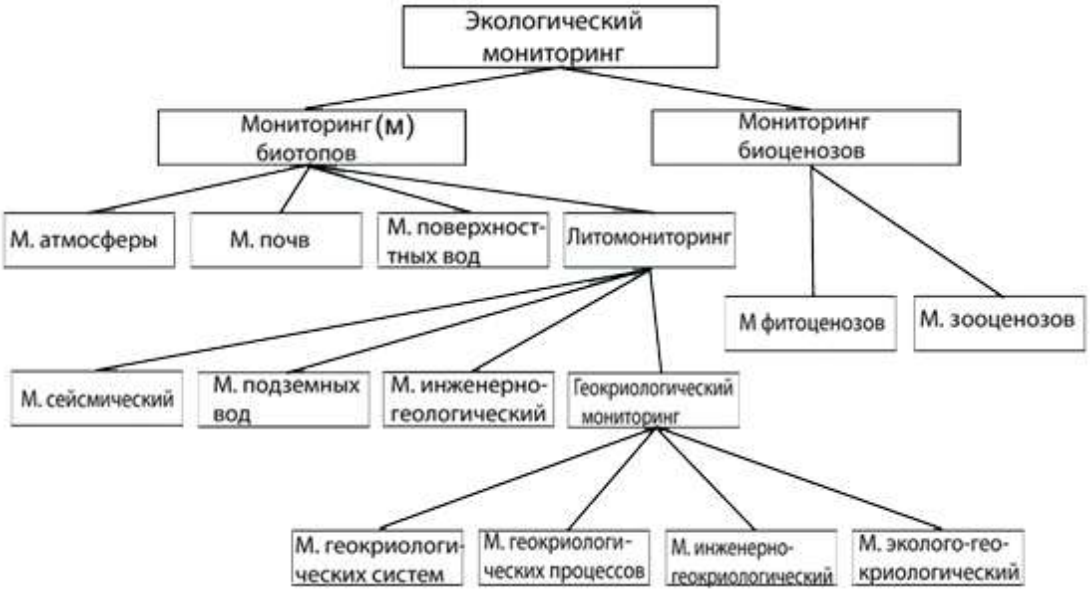



Рис. 1 Структура экологического мониторинга и место в ней системы геокриологического мониторинга

Последний к концу XX – началу XXI веков выходит на одно из наиболее важных мест вследствие обострения проблем обеспечения безопасного проживания человека, и устойчивого развития природных и природно-технических систем разного уровня.

Вследствие этого, целью эколого-геокриологического мониторинга является исследование динамики экосистем в криолитозоне под влиянием природных и антропогенных факторов.

При этом решаются следующие задачи:

- исследуются растительные сукцессии и влияние на них геокриологических факторов и параметров;
- проводятся природоохранные наблюдения, призванные оценить характер и степень воздействия человека на природную среду при хозяйственном освоении территории;
- выработка и применение мероприятий, обеспечивающих предотвращение или минимизацию ущерба от техногенных нагрузок и воздействий;
- проведение наблюдений над эффективностью мероприятий по поддержанию естественного равновесия экосистем фитоценозов.

Рассмотрим основные теоретические положения организации и проведения эколого-геокриологического мониторинга.

Информационную основу эколого-геокриологического мониторинга составляют пункты наблюдений различной иерархии: закреплённые посты (точки и скважины), площадки, стационары (участки). Наиболее предпочтительно проведение работ в пределах стационаров и площадок.

Все системы эколого-геокриологического мониторинга являются информационными, призванными обеспечить, сбор, хранение, обработку, обмен данными, анализ и рассылку информации. Работы в системе мониторинга должны проводиться в соответствии с *программой наблюдений*, включающий выбор объектов мониторинга, постановку конечных целей, определение контролируемых параметров, средств и методов контроля. Программа работ составляется исходя из основополагающих принципов комплексности, стадийности, систематичности и периодичности, полигонного характера исследований с учётом специфики изучаемых природно-технических систем.

*Комплексность* предполагает использование при проведении мониторинга, как наземных полевых исследований, так и методов дистанционного зондирования.

*Стадийность* предусматривает функционирование системы мониторинга на всех этапах освоения территории и естественного развития геокриологической обстановки.

*Систематическое осуществление мониторинга* на основе чётко проработанного регламента стационарных наблюдений является одним из наиболее важных условий выполнения работ.

*Непрерывность* мониторинга обеспечивается преемственность данных, что является информационной основой для выполнения последующих этапов работы

*Полигонный характер исследований* (метод ключевых участков) позволяет сосредоточить стационарные наблюдения на типовых участках, которые выделяются при проведении подготовительных исследований в системе мониторинга.

*Картографические модели* позволяют характеризовать наблюдаемые компоненты геокриологических условий с последовательно меняющимся уровнем генерализации информации.

Система эколого-геокриологического мониторинга отличаются, прежде всего, своей структурой, под которой понимается организация связей и отношение между элементами системы, а также состав этих элементов, каждому из которых соответствуют определённые функции (рис. 2). В представленной схеме (рис. 2) в единую систему объединены системы мониторинга разного уровня, выполняемые функции, объекты мониторинга, а также необходимые средства для выполнения исследований.

Одной из основных задач, которые возникают при организации работ в системе эколого-геокриологического мониторинга, является выбор объектов проведения мониторинговых наблюдений. При решении этой задачи, очевидно, следует исходить из того, что главной особенностью природных систем в криолитозоне является тесная взаимосвязь фитоценозов с особенностями геокриологической обстановки, которая выступает в качестве ведущего компонента биотопов, и которой подчинены практически все прочие компоненты: микроклимат, мезо- и микрорельеф, почвы и прочее [4].

Вследствие этого, на общероссийском уровне, полигоны эколого-геокриологического мониторинга целесообразно организовать в геокриологических подзонах криолитозоны (южной и северной). Им будут соответствовать экосистемы в ранге биомов.

На региональном уровне участки режимных наблюдений должны выбираться исходя из распространения мёрзлых толщ, приуроченных к основным типам морфоструктур (аккумулятивным равнинам, эрозионно-денудационным плато и плоскогорьям, низко- и среднегорьям). К ним приурочены экосистемы локальных группировок видов растений (экологических ассоциаций). На этом уровне одной из важнейших задач мониторинга следует рассматривать наблюдения за реакцией фитоценозов на техногенные воздействия (акции), а ответных реакций фитоценозов на биотопы.

Для работ по организации и проведению эколого-геокриологического мониторинга характерна определённая последовательность или стадийность. Технологическая схема эколого-геокриологического мониторинга, состоит из семи этапов.

*Работы первого этапа* по сбору, обработке и анализу информации включают в себя: изучение геокриологических условий и составление геокриологической карты; типизацию природных условий и многолетнемёрзлых толщ; районирование территории по типам природной обстановки и геокриологических условий; анализ возможных техногенных воздействий на фитоценозы; изучение экосистем и составление карты фитоценозов (рис. 3)

*Работы второго этапа* предусматривают: оценку реакции природных фитоценозов и многолетнемёрзлых толщ на предполагаемые техногенные воздействия; составление карт районирования территории полигона по техногенной изменчивости основных факторов, определяющих геокриологическую обстановку; определение области распространения и масштаба возможного техногенного воздействия и реакции многолетнемёрзлых толщ и фитоценозов. Основной задачей второго этапа работ является предварительный прогноз динамики природных систем под действием техногенеза и естественноисторического развития природных комплексов.

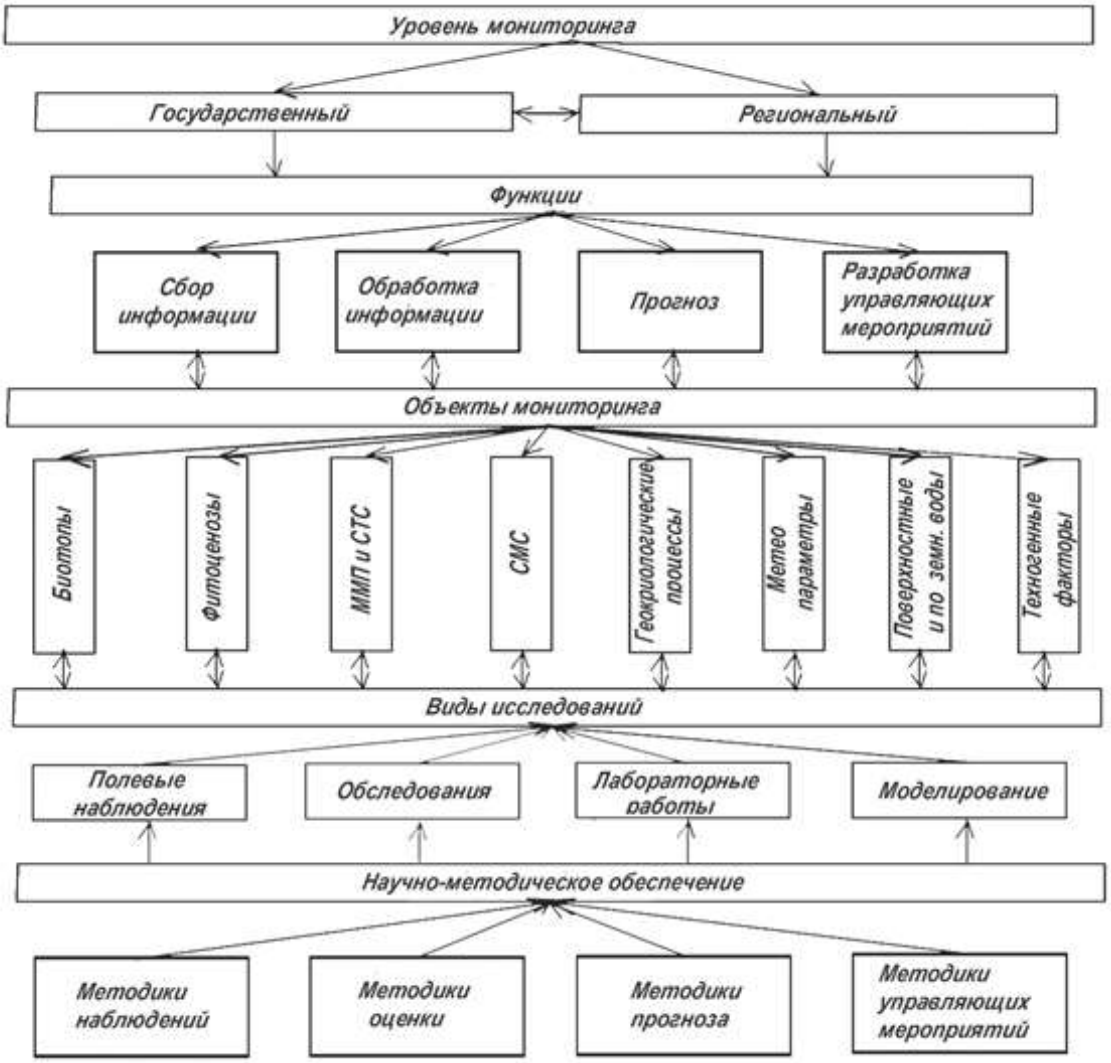



Рис. 2. Организационная структура системы эколого-геокриологического мониторинга

*Работы третьего этапа* включают в себя детальное изучение комплекса геокриологических и фитоценологических условий полигона проведения режимных наблюдений, разработку программы и методов исследований и полевую организацию сети мониторинга.

Целью работ *четвёртого этапа* является: проведение режимных наблюдений за динамикой показателей геокриологических систем и фитоценозов.

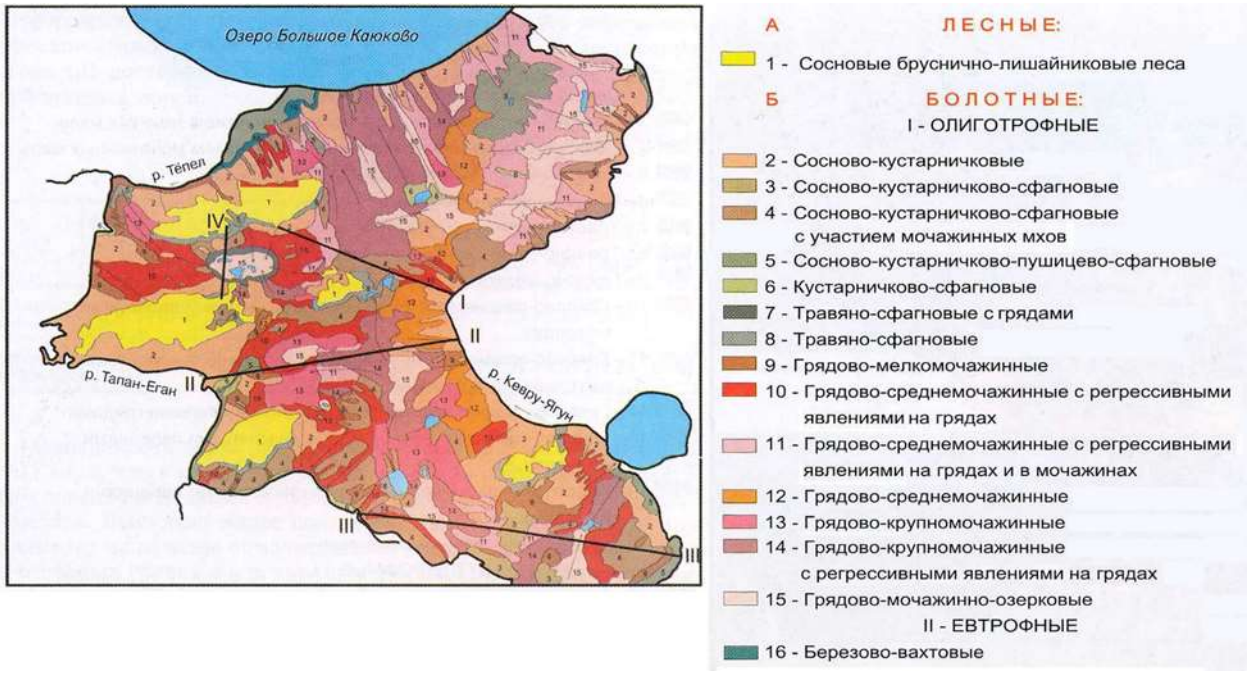



Рис. 3. Карта фитоценозов [5]

Проведение режимных наблюдений осуществляется с целью выявления динамики геокриологических условий и факторов её обеспечивающих, установления ведущих акций, оказываемых биотопом на биоценоз, а также обратных реакций фитоценозов на биотопы и, прежде всего на геокриологическую обстановку.

*На следующем, пятом этапе работ* выполняется обработка данных наблюдений и даётся оценка динамики природных систем. Материалы режимных наблюдений поступают в банк данных и после обработки анализируются. По результатам последующего анализа материалов определяется баланс естественных процессов, свойств компонентов природной среды, обеспечивающий длительное существование этой экосистемы или её развитие в направлении образования сообществ стадии экологического климакса.

*Шестой этап* проведения эколого-геокриологического мониторинга включает в себя исследования по текущему прогнозу динамики природной обстановки и геокриологических процессов на базе данных режимных наблюдений. Главной целью работ является уточнение закономерностей формирования геокриологических условий, прогноза развития геокриологических процессов и явлений и их влияния на фитоценозы.

Следующий, седьмой *этап* технологической схемы эколого-геокриологического мониторинга объединяет комплекс задач по разработке проекта стабилизирующих мероприятий в экологических системах, где развитие геокриологических процессов может вызвать разрушение экосистем.

В заключение следует особо подчеркнуть, что проведение работ в системе эколого-геокриологического мониторинга необходимо проводить в комплексе с прогнозными исследованиями. Только такой подход позволяет избежать развития критических ситуаций путём проведения упреждающих мероприятий по воздействию на биотопы и фитоценозы с целью обеспечения экологического равновесия природных систем. При этом главная роль материалов режимных наблюдений в системе мониторинга заключается в проверке правильности предварительно выполненного прогноза, а не в утилитарном накоплении материалов по развитию природных систем.

***Литература***

1 Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И. Экологическая роль толщ многолетнемёрзлых пород // Криосфера Земли. – 2002. – № 5. – С.403-410.

2 Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И., Оспенников Е.Н. Роль геокриологических процессов в формировании и динамике экосистем криолитозоны. // Криосфера Земли. – 2012. – Т 16. – № 4. – С.31-41.

3 Tansley A.D. The Use Abuse of Vegetational Concepts and Terms / Ecology. – 1935. – V. 16. – № 3. – P. 284-307.

4 Оспенников Е.Н. Эколого-геокриологические аспекты развития болотных систем в криолитозоне. / Шестая конференция геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне», [электронное издание сетевого распространения]. – М.: «КДУ» «Добросвет». – 2022 – С.1092-1099.
5 Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слука З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Под ред. В.Б. Куваева. – Тула: «Гриф и Ко». – 2001. – 584 с.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ

***В.Е Остроумов[1], Д.Г. Федоров-Давыдов[1], В.П. Шабаев[1], С.П. Давыдов[2], А.И. Давыдова[2], Г.М. Зимова[2], П.В. Кирин[3], Н.В. Быстров[3]***
*[1]Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино*
*[2]Северо-Восточная научная станция ТИГ ДВО РАН, Черский*
*[3]Российский университет транспорта, Москва*

На северо-востоке Колымской низменности на площадке комплексного геокриологического мониторинга «Орбита» (пос. Черский) с 2014 г. наблюдения за температурой грунтов сопровождаются измерениями интенсивности теплового потока.

Площадка располагается в ненарушенном лесотундровом сообществе в верхней части пологого склона южной экспозиции. Многолетнемерзлые грунты площадки представлены высокольдистыми пылеватыми суглинками ледового комплекса. Изучаемая территория относится к Яно-Колымскому геокриологическому региону, в пределах которого в полосе отепляющего влияния крупных рек среднегодовые температуры грунтов во второй половине XX-го столетия находились на уровне -4.6 … -8.2$^{o}$ С [1]. На метеостанциях Северо-Восточной Евразии с начала 1970-х годов фиксируются положительные тренды как зимних, так и летних температур воздуха. Зимний термический максимум повсеместно приходится на вторую половину 2010-х годов и для Северной Якутии совпадает с повышенной снежностью зим. С конца 2010-х годов на всей изучаемой территории отмечается снижение зимних температур. За последние десятилетия на приморских низменностях Якутии выделяются два периода потепления летних сезонов. Повышение летних температур в 2000-ые годы вызвало рост мощности деятельного слоя почти во всех ландшафтах Северо-Восточной Евразии. В период после этого потепления наблюдались различные типы динамики сезонного протаивания грунтов: флуктуации без выраженного многолетнего тренда; кратковременная или длительная стабилизация на уровне, превосходящим изначальный; волнообразные колебания на фоне положительного тренда; продолжающийся рост близкий к линейному; постепенный возврат системы в изначальное состояние. С начала 2020-х годов в подавляющем большинстве экосистем наблюдается синхронное сокращение глубины протаивания грунтов [2].

Измерения теплового потока и температуры грунтов на площадке проводятся с помощью измерительных систем на базе логгеров ЛЦД-100, в которые входят термометры сопротивления, тепломеры ДТП, аналогово-цифровые преобразователи и накопители данных, разработанные НПО «Эталон», Омск). Термометры установлены на глубинах 0.00 (на поверхности минерального грунта под мохово-лишайниквым покровом мощностью 10 - 15 см), 0.20, 0.40, 0.80 и 0.85 м, а датчики теплового потока на глубинах 0.00, 0.40 и 0.85 м. Измерения температуры и теплового потока проводятся 1 раз в час на всех глубинах.

Тренды изменения температуры грунтов, определенные по данным термометрии (рис.1) оцениваются положительными величинами: 0.39 град/год на поверхности грунта и 0.04 и 0.02 град/год на глубинах 0.50 и 0.80 м. Наблюдаемые изменения температурного поля грунта связаны не только с ростом среднегодовой температуры воздуха (с -9.6 до -9.2 $^{o}$С по данным м/с Черский [3]), но и с существенным увеличением мощности и отепляющего влияния снежного покрова.

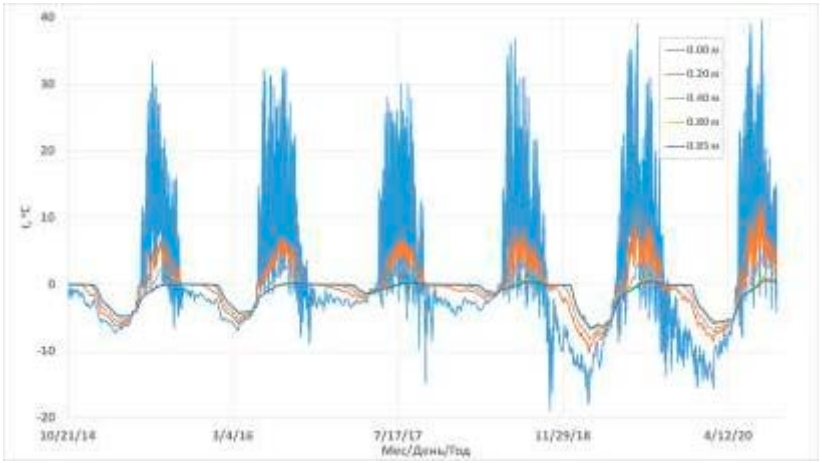



Рисунок 1. Температура грунта на пяти глубинах. На фоне суточных, декадных и годовых колебаний наблюдается постепенное увеличение температуры, отражающее деградацию криолитозоны

Тенденция потепления отражена и в динамике интенсивности теплового потока (рис. 2).

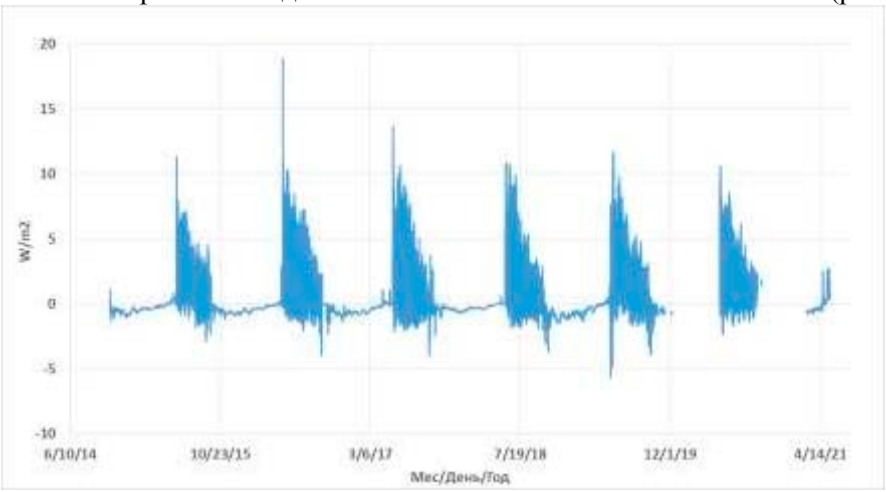



Рисунок 2. Интенсивность теплового потока в грунте. Облако измеренных величин теплового потока смещено в сторону положительных значений, что свидетельствует о деградационных изменениях криолитозоны

Для оценки теплового баланса грунта в цикле годового теплообмена по данным мониторинга теплового потока рассчитаны годовые суммы его значений (рис. 3).

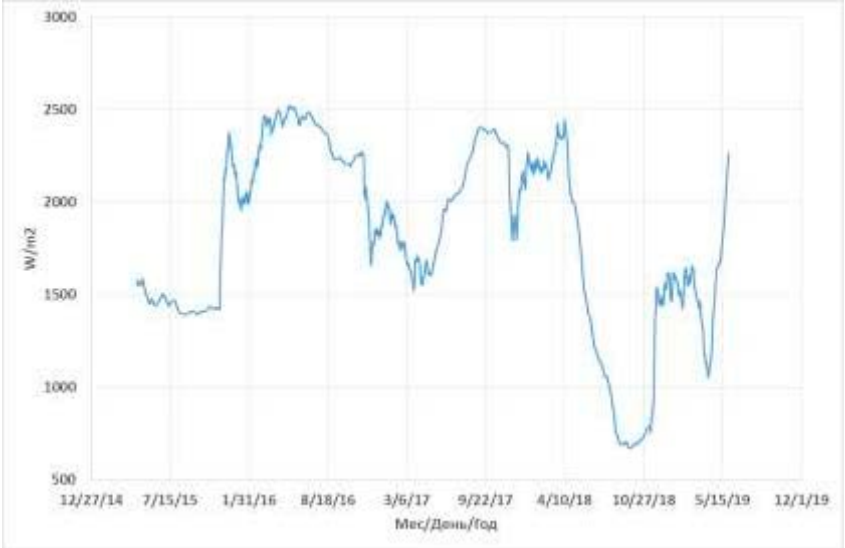



Рисунок 3. Скользящие значения годовой суммы почасовых значений интенсивности теплового потока на поверхности грунта. Среднегодовые суммы потока изменяются в от 700 до 2500 Вт/м$^2$. Положительные значения как сумм, так и среднегодовых значений интенсивности потока, отражают превышение поступления тепла в грунт над расходом (положительный дисбаланс теплообмена)

Положительный баланс теплообмена на поверхности грунтов ранее был описан в работе А.П.Павлова по данным мониторинга на стационаре «Сырдах» в Центральной Якутии (таблица).

Таблица

Положительные и отрицательные тепловые потоки, отражающие положительный дисбаланс теплообмена грунтов

| Объект | Поступление тепла в грунт (положительные потоки), МДж/м$^2$ год | Расход тепла в грунт (отрицательные потоки), МДж/м$^2$ год) |
|---|---|---|
| Площадка «Орбита», 2 января 2015 – 31 декабря 2015 | 629.02 | 407.09 |
| Площадка «Орбита», 1 октября 2015 – 6 сентября 2016 | 629.39 | 393.42 |
| Стационар «Сырдах» по данным А.В.Павлова [4] | 112.99 | 109.00 |

Очевидно, избыток тепла, поступающего в грунт, расходуется на его нагревание в многолетнем ряду, а также на оттаивание мерзлого грунта.

Данные мониторинга теплового потока и температуры грунтов показывают, что на площадке с ненарушенными условиями теплообмена наблюдается тенденция к потеплению, а мерзлотный процесс имеет выраженную деградационную направленность.

*Работа выполнена по темам государственных заданий 126031218738-8 и 125021302113-3*

***Литература***

1 Зайцев В.Н. Закономерности формирования и пространственной изменчивости геокриологических условий. Яно-Колымский регион - Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. Москва, Недра, 1989, 249 – 261с.

2 Федоров-Давыдов Д.Г., Трегубов О.Д., Маслаков А.А. и др. Температурные режимы и динамика глубины промерзания почв Северной Якутии и Чукотки – Глобальный климат и почвенный покров России. Арктическая зона, мерзлотные почвы – будущему России (сельской и лесное хозяйство) Национальный доклад, том 4. Москва, ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им .В.В.Докучаева, 2024, 145 – 186 с.

3 http://www.pogodaclimat.ru/25123

4 Павлов А.В. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны, Новосибирск, 2008, Гео, 2008, 229 с.

## КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛИГОНОВ ТВЁРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ В УСЛОВИЯХ РЕЗКО КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА

***А.Ю. Оттева***

*Кемеровский государственный университет, АО Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли, г. Кемерово*

Введение

Конструктив полигонов твёрдых коммунальных отходов в условиях резко континентального климата подвергается воздействию экстремального промерзания–оттаивания, что способствует формированию комплекса криогенных процессов, потенциально опасных для оснований и барьерных систем: морозное пучения, морозобойного растрескивания и склоновых деформаций.

Цель исследования – выявить, как совокупность физико-географических, геоморфологических и климатических факторов формирует сезонные криогенные процессы и связанные с ними условия деформирования основания и миграции загрязняющих веществ на полигоне ТКО «Левобережный» в левобережной части г. Новосибирска.

На примере полигона ТКО «Левобережный» проанализированы условия формирования и проявления сезонных криогенных процессов в специфических физико-географических и геоморфологических условиях левобережья г. Новосибирска.

Физико-географическое, геоморфологическое рассположение

Полигон расположен в левобережной части долины реки Оби в пределах Западно–Сибирской равнины. Он приурочен к зоне третьей надпойменной террасы, окраине Приобского плато и

характеризуется хорошо развитым овражно-балочным расчленением склонов, что способствует формированию направленного склонового стока и перераспределению поверхностных вод.

На основе материалов инженерных изысканий предшествующих лет и их сопоставления с Государственной геологической картой четвертичных отложений (лист N-44 «Новосибирск») в разрезе площадки полигона выделены два стратиграфо-генетических комплекса: техногенных грунтов (tH) и аллювиальных отложений третьей надпойменной террасы Оби ($a^3III^{1–2}$). Комплекс слабофильтрующих аллювиальных суглинисто-глинистых пород при уровне грунтовых вод, фиксируемом глубже 2 м, сопоставим с категорией геологических условий с повышенной естественной защищённостью по критериям типизации Козляковой И.В. и соавт. (2021) [1], что позволяет рассматривать территорию как инженерно благоприятную для размещения объектов обращения с ТКО. Геологическое строение участка уточнено по данным 28 скважин глубиной до 40 м, описание проведено в соответствии с требованиями ГОСТ 20522-2012 [2] и ГОСТ 25100-2020 [3] (таблица 1).

Участок полигона располагается в диапазоне абсолютных отметок 112,54–156,85 м, что соответствует амплитуде высот порядка 44 м и определяет общий уклон рельефа в сторону пониженной части, приуроченной к руслу реки Тула, расстояние от площадки в 260 м от площадки. В рассматриваемом створе абсолютная отметка уреза воды ~ 112,54 м. Таким образом, нижняя граница рельефа полигона совпадает с уровнем уреза реки Тула, что подтверждает направленность естественного дренирования поверхностного стока и согласуется с высотным положением аллювиальных отложений комплекса $a^3III^{1–2}$, вскрытых в интервале абсолютных отметок порядка 99-120 м.

Таблица 1

Инженерно-геологические элементы разреза площадки полигона ТКО «Левобережный»

| **Номер ИГЭ (слой)** | **Стратиграфо-генетический комплекс (индекс)** | **Подкласс и тип грунтов** | **Вид грунта по ГОСТ 25100-2020** | **Наименование грунта** |
|---|---|---|---|---|
| ИГЭ 1 (слой 1) техногенные отходы | Техногенные грунты, отходы (tH) | Дисперсные, связные, техногенные, антропогенные | Отходы | Насыпной грунт – бытовой и строительный мусор |
| ИГЭ 2 (слой 2) насыпные грунты | Техногенные грунты, насыпные (tH) | Дисперсные, связные, техногенные, перемещённые | Насыпные | Насыпной грунт – суглинок лёгкий пылеватый, твёрдый, незасоленный, слабопучинистый |
| ИГЭ 3 (слой 3) насыпные грунты и шламы | Техногенные грунты, насыпные и отходы производств(tH) | Дисперсные, связные и несвязанные, техногенные, перемещённые и антропогенные | Насыпные, отходы | Насыпной грунт – супесь пылеватая, твёрдая, незасоленная, слабопучинистая. Шлам – песок мелкий однородный водонасыщенный, незасоленный |
| ИГЭ 4 (слой 4) аллювиальные суспеси | Аллювиальные отложения третьей надпойменной террасы ($a^3III^{1–2}$) | Дисперсные, связные и несвязанные, осадочные | Минеральные | Супесь пылеватая пластичная с примесью органического вещества, слабопучинистая |
| ИГЭ 5 (слой 5) аллювиальные суглинки лёгкие | Аллювиальные отложения третьей надпойменной террасы ($a^3III^{1–2}$) | Дисперсные, связные и несвязанные, осадочные | Минеральные | Суглинок лёгкий пылеватый тугопластичный с примесью органического вещества, незасоленный, среднепучинистый |

| Номер ИГЭ (слой) | Стратиграфо-генетический комплекс (индекс) | Подкласс и тип грунтов | Вид грунта по ГОСТ 25100-2020 | Наименование грунта |
|---|---|---|---|---|
| ИГЭ 6 (слой 6) аллювиальные суглинки тяжёлые | Аллювиальные отложения третьей надпойменной террасы ($a^{3}III^{1–2}$) | Дисперсные, связные и несвязанные, осадочные | Минеральные | Суглинок тяжёлый пылеватый тугопластичный с примесью органического вещества, незасоленный, среднепучинистый |
| Примечание:<br>ИГЭ 1–3 образуют единую техногенную толщу тела полигона с вариациями морфологии и гранулометрического состава по разрезу сверху вниз;<br>ИГЭ 4–6 соответствуют минеральным грунтам аллювиального комплекса третьей надпойменной террасы. | | | | |

Инженерно–геологический разрез площадки полигона ТКО «Левобережный» описывается в терминах выделенных инженерно–геологических элементов (ИГЭ), с учётом границ между техногенной толщей и аллювиальным основанием, принятых в таблице 1. Верхняя часть разреза представлена техногенной толщей ИГЭ 1-3, сложенной бытовыми и строительными отходами, насыпными суглинками и супесями с прослоями водонасыщенных шламов, её средняя мощность составляет 3-4 м. Ниже залегают природные аллювиальные грунты третьей надпойменной террасы Оби ИГЭ 4-6 – супеси и суглинки минерального состава, вскрытые в интервале глубин 15-40 м при абсолютных отметках порядка 99-120 м, что соответствует высотному положению террасы относительно поверхности площадки с отметками 112,54-156,85 м.

С учётом небольшой мощности техногенной толщи и непосредственного контакта ИГЭ 1-3 с аллювиальными супесями и суглинками ИГЭ 4-6 активная сезонно промерзающая толща захватывает как техногенные отходы и насыпные грунты, так и верхние горизонты минерального основания полигона. Нормативную глубину сезонного промерзания для грунтов основания ИГЭ 3-6 определяли в соответствии с требованиями СП 22.13330.2016 [4]. Расчётные значения составили 2,23 м для ИГЭ 1-3 и 1,83 м для ИГЭ 4-6.

Морозная пучинистость грунтов, залегающих в пределах расчётной глубины промерзания, оценена по влажности, степени водонасыщения и относительной деформации пучения согласно СП 22.13330.2016, результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты оценки пучинистых свойств грунтов основания в зоне сезонного промерзания (СП 22.13330.2016).

| ИГЭ (слой) | W | WL | Wp | Sr | ρd, г/см³ | Rf | εfh | Степень пучинистости |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ИГЭ 2 (2) | 0,198 | 0,310 | 0,199 | 0,111 | 0,72 | 1,55 | 0,013 | слабопучинистый |
| ИГЭ 3 (3) | 0,191 | 0,240 | 0,193 | 0,047 | 0,87 | 1,70 | 0,010 | слабопучинистый |
| ИГЭ 4 (4) | 0,203 | 0,210 | 0,177 | 0,033 | 0,76 | 1,58 | 0,030 | слабопучинистый |
| ИГЭ 5 (5) | 0,254 | 0,324 | 0,214 | 0,110 | 0,91 | 1,56 | 0,039 | среднепучинистый |
| ИГЭ 6 (6) | 0,258 | 0,341 | 0,205 | 0,135 | 0,93 | 1,54 | 0,040 | среднепучинистый |
| Примечание. W – природная влажность; WL – влажность на границе текучести; Wp – на границе раскатывания; Sr – степень водонасыщения; ρd – плотность сухого грунта; Rf – расчётный параметр морозной пучинистости; εfh – относительная деформация пучения. | | | | | | | | |

Полученные значения параметров и степени пучинистости ИГЭ 2-6 указывают на слабую и среднюю морозную пучинистость верхней части полигона ТКО. При сезонном подтоплении и промерзании способствует развитию деформаций основания и формированию дополнительных путей

миграции загрязняющих веществ из техногенной толщи в подстилающие аллювиальные грунты. Площадка полигона отнесена к территориям, подверженным сезонному (ежегодному) подтоплению техногенным горизонтом верховодки (участок типа I-А-2 по критериям СП 11-105-97 [5], прил. И), в настоящей работе используется как методический ориентир и дополняется требованиями действующего СП 446.1325800.2019 [6] и СП 47.13330.2016 [7]. Согласно СП 115.13330.2016 [8] такой процесс при площадной распространённости подтопления более 75% относится к категории «весьма опасный», что отражает повышенную вероятность периодического переувлажнения верхней части разреза и усиления рисков морозного пучения и просадок. Нормативная сейсмичность района (6 баллов по шкале А, В и 7 баллов по шкале С по картам ОСР-2015 [9]) соответствует умеренно опасной категории эндогенных процессов и в сочетании с криогенными и гидрогеологическими факторами должна учитываться при оценке устойчивости откосов и надёжности барьерных систем полигона.

На данном этапе собственные почвенно-геохимические исследования на полигоне ТКО «Левобережный» не проводились; оценка потенциальных геохимических эффектов выполнялась по обобщённым литературным данным о полигонах ТКО, где для приповерхностных техногенных и супесчано-суглинистых горизонтов характерны локальные повышения содержаний Pb и Cu при отсутствии устойчивых превышений по Hg, As, Cd и Ni, а пространственное распределение металлов контролируется формированием микробиологически обусловленных геохимических барьеров и редокс-зон в толще отходов и основании [10].

Таким образом, рельеф и инженерно–геологическое строение площадки ориентируют естественный дренаж в сторону русла реки Тула, а сезонное подтопление и слабая–средняя морозная пучинистость основания создают условия для деформаций техногенной толщи и формирования путей миграции фильтрата в аллювиальные грунты. Наличие низкопроницаемых прослоёв придаёт породному массиву частичную буферную способность и формирует мозаичную картину миграции загрязняющих веществ, что в сочетании с умеренной сейсмичностью требует учёта при оценке техногенного риска и проектировании системы мониторинга полигона, в том числе с позиции защищённости геологической среды, подчёркнутой в методологических работах по типизации геологической среды для объектов обращения с ТКО [1].

2. Климатические и снегомерзлотные условия

Согласно СП 131.13330.2025 [11] полигон ТКО «Левобережный» расположен в I строительно-климатической зоне, подрайоне 1В первого климатического района, в условиях сухой зоны по влажности, с резко континентальным климатом: среднегодовая температура воздуха около 2 °С, средние температуры января и июля порядка -17 и 19-20 °С соответственно, диапазон абсолютных температур от -51 до 38-39 °С. Устойчивый снежный покров формируется в начале ноября и сохраняется до начала апреля ~ 5 месяцев, по данным метеостанции Огурцово (1966-2022), средняя максимальная глубина сезонного промерзания почвы за зиму составляет 134 см, наибольшее значение достигало 286 см в 1966 г.

В соответствии с СП 20.13330.2016 [12] территория полигона отнесена к III снеговому району, нормативный вес снегового покрова 1,5 кПа, II гололёдному району, толщина стенки гололёда 5 мм и III ветровому району по нормативному ветровому давлению. Фиксируется устойчивый снежный покров с ноября по апрель. Установлена зависимость глубины промерзания от мощности снежного покрова: при малой высоте снега промерзание грунтов увеличивается, при её росте температурный режим верхней части массива стабилизируется. Кратковременное весеннее снеготаяние ~ 1-2 недели вызывает резкое увеличение поверхностного и подповерхностного стока и притока талых вод в тело полигона и дренажно-противофильтрационные системы, что обусловливает эпизодическое усиление миграции загрязняющих веществ в приповерхностных горизонтах.

3. Криогенные факторы риска при эксплуатации полигона

Сочетание литологического строения, резко континентального климата и развитых криогенных процессов формирует сложный и в ряде аспектов неблагоприятный режим работы ключевых конструктивных элементов полигона ТКО – барьерных экранов, дренажной и газосборной систем, откосов и склоновых участков. Морозное пучение, сезонное оттаивание и переувлажнение приводят к неравномерным деформациям основания, снижению устойчивости откосов и локальной разгерметизации инженерных систем, что создаёт дополнительные пути миграции фильтрата и свалочного газа и повышает риск выхода загрязняющих веществ за проектные границы объекта. Дополнительно результаты производственного мониторинга атмосферного воздуха за 2019–2024 гг. характеризуют фактический газовый режим полигона и уровни загрязнения приземного слоя воздуха,

обобщённые показатели концентраций основных компонентов свалочного газа внутри контура полигона и на границе санитарно-защитной зоны приведены в таблице 3.

Анализ обобщённых данных таблицы 3 показывает, что средние концентрации оксида углерода, сероводорода, аммиака, тетрахлорметана и бензола на границе санитарно-защитной зоны составляют доли ПДК порядка 0,1–0,5, тогда как внутри контура полигона их значения, как правило, выше, но также остаются ниже установленных нормативов. Наибольший вклад в газовый режим объекта даёт метан: его средняя концентрация на полигоне достигает около 26 мг/м³ (~0,5 ПДК) при снижении до порядка 8 мг/м³ (~0,15 ПДК) на границе СЗЗ, что указывает на локализованный характер газовыделения и эффективность действующей системы газосбора и санитарно-защитной зоны в ограничении распространения свалочного газа за пределы объекта. Необходимость увязки инженерно-геологических условий, состояния свалочного тела и программ мониторинга качества подземных вод, фильтрата и грунтов показана, в частности, на примере полигона ТКО «Дубна Правобережная», где детальная оценка гидрогеохимической обстановки использовалась для обоснования рекультивационных мероприятий и программы мониторинга в пострекультивационный период [13]. В совокупности это отражает как локализующий эффект существующих инженерных решений, так и необходимость их адаптации к криогенным условиям, усиления контроля деформаций, повышения надёжности газосборной и дренажной систем и уточнения схем мониторинга для обеспечения долгосрочной экологической безопасности объекта.

Таблица 3

Обобщенные средние за 2019-2024 гг. (за 6 лет по 4 замера в год) показатели качества атмосферного воздуха на полигоне ТКО «Левобережный», мг/м$^3$

| **Загрязнитель** | **ПДК** | **Среднее (24 замера) на полигоне** | **Доля ПДК на полигоне** | **Среднее (24 замера) на границе СЗЗ** | **Доля ПДК на границе СЗЗ** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Оксид углерода (CO)** | **5,00** | 1,800 | ~0,35 ПДК | 1,500 | ~0,3 ПДК |
| **Сероводород ($H_2S$)** | **0,008** | 0,005 | ~0,6 ПДК | 0,004 | ~0,5 ПДК |
| **Тетрахлорметан** | **4,0** | 0,100 | ~0,03 ПДК | 0,350 | ~0,09 ПДК |
| **Аммиак** | **0,20** | 0,040 | ~0,2 ПДК | 0,020 | ~0,1 ПДК |
| **Метан** | **50,00** | 26,000 | ~0,5 ПДК | 8,000 | ~0,15 ПДК |
| **Бензол** | **0,30** | 0,120 | ~0,4 ПДК | 0,050 | ~0,17 ПДК |

Заключение

Проведённый анализ показал, что для полигона ТКО в районе г. Новосибирска сочетание резко континентального климата, продолжительного снежного периода, супесчано-суглинистого состава грунтов основания и выраженного перепада высот площадки формирует совокупность факторов, способствующих активному проявлению криогенных процессов. Эти процессы определяют характер деформирования основания и тела полигона, влияют на целостность барьерных и дренажных систем, устойчивость откосов и, в конечном итоге, на уровень экологической безопасности объекта.

Средние концентрации примесных компонентов свалочного газа за 6 лет, всего24 замера на границе санитарно-защитной зоны составляют ~ 0,1–0,5 ПДК, что указывает на локализованный характер газовыделения и достаточную эффективность системы газосбора и санитарно-защитной зоны.

В связи с этим при проектировании и эксплуатации полигонов ТКО в аналогичных климатогеологических условиях целесообразно использовать конструктивные решения, учитывающие криогенное воздействие: теплоизоляционные подушки в основании, оптимизированные минеральные экраны, деформационно–устойчивые геосинтетические материалы, дренажные системы, рассчитанные на циклы замерзания–оттаивания), а также организовывать систему мониторинга температурного и гидрогеологического режима, деформаций основания и тела полигона, работы дренажей и газосборных коммуникаций. Учет криогенных факторов при расчёте устойчивости откосов, планировании рекультивации и последующего наблюдения за объектом, в сочетании с комплексным геокриологическим, гидрогеологическим и инженерным подходом,

позволяет повысить надёжность и экологическую безопасность полигонов ТКО в криогенно активных районах.

***Литература***

1 Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Еремина О.Н., Анисимова Н.Г. Методологические принципы оценки геологической среды для размещения объектов обращения с ТКО // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2021. – № 1. – С. 48–58.

2 ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013. – 24 с. (с Изм. № 1, утв. приказом Росстандарта от 27.12.2022 № 1661-ст, в силе с 01.01.2024).

3 ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2020. – 42 с.

4 СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – М.: Минстрой России, 2016.

5 СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. – М.: Госстрой России, 1997.

6 СП 446.1325800.2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. – М.: Минстрой России, 2019. – 104 с.

7 СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. – М.: Минстрой России, 2016. – 112 с. (с Изм. № 1, утв. приказом Минстроя России от 30.12.2020 № 909/пр, в силе с 01.07.2021).

8 СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. – М.: Минстрой России, 2016. – 36 с.

9 Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2015 (карты А, В, С). – М.: Минстрой России, 2015.

10 Путилина И.Н., Рожкова А.В., Кожевникова И.А., Козлякова И.В. Роль микробиологических процессов в формировании геохимических барьеров и окислительно-восстановительных зон при загрязнении металлами почв и водоносных горизонтов вблизи полигонов ТКО // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2021. – № 6. – С. 60–72.

11 СП 131.13330.2025. СНиП 23-01-99* Строительная климатология. – М.: Минстрой России, 2025. – 215 с.

12 СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: Минстрой России, 2016. – 95 с. (с Изм. № 1–5).

13 Галицкая И.В., Путилина В.С., Костикова И.А. Оценка состояния полигона ТКО для обоснования мониторинговых исследований в пострекультивационный период // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2022. – № 5. – С. 49–60.

## ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО И ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ВЕРХНЕЙ ТОЛЩИ ЭОЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ УРОЧИЩА ПЕСКИ (СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

***В. А. Паламарчук, Д. О. Сергеев***
*Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, г. Москва*

Вопросы происхождения значительных запасов пресных подземных вод в песчаных пустынях детально рассматривались на примере песчаных Каракумов [8, 14], Придонских песков [2], а также в тропических пустынях Аравийского полуострова и Северной Африки [1]. В пределах криолитозоны мощные водоносные горизонты с пресной питьевой водой аналогично приурочены к незакрепленным эоловым массивам, однако их изученность уступает таковой для аридных пустынь [4, 16]. Ключевым аспектом в изучении условий формирования и режима подземных вод песчаных пустынь является анализ процессов тепломассообмена в пределах зоны аэрации. В этой зоне, расположенной между земной поверхностью и уровнем подземных вод, происходит инфильтрация атмосферных осадков, конденсация водяных паров, испарение, а также сложные биохимические и физико-химические процессы, влияющие на состав и режим подземных вод [13].

В данной работе исследуются особенности формирования температурного и влажностного режимов зоны аэрации уникального песчаного массива криолитозоны — урочища Пески в Чарской

котловине. Новые данные позволят расширить существующие представления о процессах тепломассопереноса в песчаных пустынях криолитозоны.

**Объект исследования.**

Урочище Пески расположено в центральной части Чарской котловины (Северное Забайкалье) в междуречье рек Средний Сакукан и Верхний Сакукан. Большую часть песчаного массива площадью 28 км$^2$ занимают развеваемые пески. Растительный покров представлен ксерофитными злаково-бобовыми группировками [3]. По днищам наиболее увлажненных понижений и у подножья наветренных склонов встречаются небольшие рощицы лиственницы. В настоящее время на урочище наблюдается увеличение площади растительного покрова [9].

По данным за 1881–1980 гг. среднегодовая температура воздуха в с. Чара (6 км на СВ от урочища Пески) составляла –8.0 °С, а сумма осадков – 350 мм [7]. За последние 50 лет на данной территории выявлен статистически значимый рост среднегодовой температуры воздуха (0.5°С/10 лет) и наблюдается тенденция к увеличению годовой суммы осадков и учащению лет с их положительными аномалиями [10].

Верхняя часть урочища сложена мелкозернистыми хорошо окатанными песками с коэффициентом фильтрации около 7 м/сут [11]. В легкой фракции преобладают полевые шпаты (плагиоклазы 61%, калишпаты 26%), содержание кварца низкое (12%) [11]. По данным ПГО «Читагеология» влажность песков в междюнных понижениях составляет 3,8–6,5%, а на барханах – в среднем 1,8%.

Урочище Пески характеризуется аномальными мерзлотными условиями, формирующими резкий контраст с окружающими ландшафтами. Здесь развит мощный водоносный талик [4]. Многолетнемерзлые породы мощностью около 35 м вскрыты лишь на периферии массива в залесенных родниковых долинах. Мощность сезонно-мерзлого слоя (СМС) здесь достигает 4–7 м [5]. Среднегодовая температура песчаных отложений урочища Пески на глубине 11–12 м около 0,5°С [5], а на глубине 15 м средняя летняя температура держится на отметке 2 °С [12]. Подземные воды массива гидрокарбонатные преимущественно магниево-кальциевые, реже смешанного катионного состава с минерализацией обычно до 200 мг/л. Воды отличаются повышенными концентрациями фтора, иногда – железа, марганца и мышьяка. Естественная родниковая разгрузка урочища Пески возросла в среднем с 400 л/с в 1976–1981 гг. до 550–730 л/с в июле 2022–2024 гг. [9].

**Методы исследования.**

Температурный режим верхней толщи песчаных отложений урочища Пески изучался по данным наблюдений на вершине бархана (северо-западная часть массива) в шурфах глубиной 1,0 и 4,5 м и в термометрической скважине Peski-1 глубиной 15,3 м. В скважине в летние периоды (июнь-сентябрь) с 2007 по 2025 гг. выполнялись единовременные замеры на разных глубинах с выдержкой термодатчика не менее 30 минут. Для регистрации сезонных колебаний температуры в верхней (до 4,5 м) и нижней (13 м) частях зоны аэрации в шурфах и скважине были установлены температурные логгеры с автоматической записью каждые 1–3 часа. Влажностный режим верхней части зоны аэрации охарактеризован по наблюдениям в шурфе глубиной 1 м с использованием датчиков влажности (автоматическая запись каждый час). Ключевые параметры измерительных комплексов систематизированы в таблице 1.

Таблица 1

Сводная характеристика объектов и методов наблюдений за температурой и влажностью песчаных отложений урочища Пески

| Объект наблюдений | Период наблюдений | Глубины установки датчиков, м | Тип датчика/Параметр | Режим измерений | Погрешность |
|---|---|---|---|---|---|
| Peski-1 | Летний период с 2007–2025* | 0,0; 1,0; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,0; 6,0; 7,0; 7,5; 8,0; 9,0; 10,0; 11,0; 12,0; 12,6; 13,0; 13,4; 13,8; 14,2; 14,5; 14,6; 14,7; 15,3** | HOBO U-12 stainless probe /Температура | Единовременные замеры | 0,025ºС |
| | 30.06.2024 – 29.06.2025 | 13,0 | HOBO Water temp. Pro V2/Температура | Раз в 2 часа | 0,025ºС |
| шурф 4,5 м | 01.08.2014 – 31.07.2015 и 13.07.2016 – 10.07.2017 | 1,5; 2,5; 3,5;4,5 | HOBO U-12, 4Ch./Температура | Раз в 3 часа | 0,025ºС |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| шурф 1 м | 01.01.2012 – 31.12.2013 и 18.07.2018 – 17.07.2020 | 0,2; 0,5; 0,75; 1,0 | HOBO Water temp. Pro V2/Температура | Каждый час | 0,025ºC |
| | 09.07.2012 – 08.07.2015 | 0,2; 0,5; 0,75; 1,0 | 4Ch Soil water content HOBO /Влажность | Каждый час | 0,01 д.ед. |

*Наблюдения в скважине Peski-1 не проводились в 2010, 2021, 2022 и 2024 гг.

**В разные годы замеры проводились на разных глубинах из-за меняющейся глубины забоя скважины

**Температурный режим** песчаных отложений урочища Пески наиболее изменчив в приповерхностном слое на глубине 0,2 м. Среднегодовая температура в период наблюдений варьировала от -2,0 до +1,3°С, амплитуда достигала 45-58°С. Ниже по разрезу диапазон температур сужался, смещаясь в область положительных значений: от -1…+2°С на 0,5 м до 0…+2,5°С на 1,0 м. Фазовый сдвиг зимнего минимума температур на глубине 1 м достигал 31–42 суток, а летнего максимума – не превышал 7 суток. Амплитуда сезонных колебаний закономерно затухала с глубиной с 24–27°С на 1,5 м до 6°С на 4,5 м. На глубине 4,5 м минимум температуры (0,4–0,6°С) фиксировался в июне, а максимум (6,7–7,0°С) – в сентябре.

Факт устойчивых положительных температур на глубине 4,5 м указывает, что мощность СМС на гребне песчаного бархана составляет около 4 м. Сезонное промерзание пород здесь начинается обычно в октябре и заканчивается к середине марта. Оттаивание пород наблюдается в начале-середине апреля и продолжается до июля.

На глубинах 5–10 м по данным летних измерений 2008–2025 гг. температуры варьировали от 0,7 до 6,0°С на 5 м и от 1,8 до 3,1°С на 10 м. На глубине 13 м, по данным непрерывных наблюдений 2024–2025 гг., установилась практически постоянная температура около 3°С с колебаниями в пределах 0,3°С, что указывает на переход к глубинному тепловому режиму, контролируемому тепловым потоком снизу и, вероятно, воздействием водоносного горизонта. Отмечено, что температура на этой глубине демонстрирует рост (2,5°С по замерам 2014–2018 гг.), что отражает увеличение теплового потока, возможно, вследствие подъема уровня подземных вод.

**Влажностный режим.** По данным 2012–2015 гг., влажность песчаных отложений имеет четкую вертикальную и сезонную дифференциацию. Минимальная среднегодовая влажность (1-3%) наблюдалась на глубине 0,5 м, максимальная (3-5%) на 1 м. Выделяются сухой сезон (ноябрь-март) с полным отсутствием жидкой влаги и влажный (июнь-сентябрь) с пиками влажности 12-14%. Переходные периоды промерзания и протаивания сопровождаются, соответственно, падением и ростом влажности. Этот специфический режим – устойчивое превышение летней влажности над зимней — является одной из важнейших причин формирования таликов на песчаных массивах криолитозоны [2].

Летняя динамика влажности песков определяется режимом выпадения осадков. Дожди в количестве 10-15 мм увлажняют лишь верхний слой до 0,2 м, повышая влажность пород на 1-4%. Увлажнение пород на глубинах 0,5-1,0 м на 5-7% происходит при затяжных интенсивных дождях (>50 мм за 1-2 сут). Кратковременные ливни (20-30 мм) увеличивают влажность пород в метровом слое лишь на 1-3%. В конце августа-начале сентября наблюдаемое резкое понижение влажности на 1-4%, вероятно, связано с усилением испарения.

Осеннее снижение влажности пород обусловлено понижением температур воздуха и последующим промерзанием пород, что запускает механизмы криогенного перераспределения влаги. Полное промерзание верхнего слоя (до 0,2-0,3 м) и сопутствующее ему резкое уменьшение влажности до 0% достигалось за 2-7 суток после перехода температуры пород через 0°С. Полное иссушение метрового слоя является протяженным процессом, занимающим около месяца и завершающимся, как правило, к середине-концу ноября.

Весеннее увеличение влажности песчаных отложений инициируется в марте-апреле в связи с переходом температуры воздуха через 0°С, началом таяния снежного покрова и протаивания сезонно-мерзлого слоя. В снежные зимы 2013 и 2015 гг. влажность пород весной начинала увеличиваться до 1-5% еще при отрицательных температурах пород, вероятно, за счет инфильтрации талых вод по локальным проводящим каналам в мерзлых песках [2]. При протаивании пород формируется резкий скачок влажности за счет таяния льда-цемента и конвергенции влаги к границе протаивания. Уже с мая влажность песков реагирует на выпадающие осадки. Дополнительным фактором в этот период может служить конденсация при суточных перепадах температур.

Проведенные наблюдения свидетельствуют, что весенний влагозапас предопределяет характеристики влажностного режима в течение последующего летнего сезона. В 2013 г., несмотря на меньшее количество летних осадков, влажность пород устойчиво превышала показатели 2014 г. Более снежная весна 2013 г. обеспечила высокую влажность (6-10%) пород в начале лета и ее эффективное перераспределение. Тогда как малоснежная весна 2014 г. привела к исходно низкой влажности (3–5%) и потерям осадков на смачивание сухого песка. Достижение порога наименьшей влагоемкости (НВ) [15], которое в нашем случае, по-видимому, наблюдалось летом 2013 г., является важным рубежом, определяющим дальнейший механизм инфильтрационного питания.

**Заключение.**

Температурный режим песчаных отложений урочища Пески характеризуется четкой дифференциацией по глубине. Выделяется деятельный слой (до 4 м) с высокой амплитудой сезонных колебаний (от 45-58°С на поверхности до 6°С на 4 м), переходная зона (5 –13 м) с затухающей амплитудой и среднелетней температурой 2,5-2,8°С, и зона относительно стабильных температур на глубине 13 м с постоянной температурой около 3°С и амплитудой, не превышающей 0.3°С. В настоящее время на глубине 13 м наблюдается повышение среднегодовой температуры пород, что может быть связано с подъемом уровня подземных вод.

Скорость распространения тепловой волны вниз существенно выше в летний период, что указывает на сезонные изменения тепловых свойств пород, связанные с фазовыми переходами влаги. Мощность СМС на гребне бархана составляет около 4 м.

В годовом цикле влажностного режима верхней толщи (до 1 м) урочища Пески выделяются четыре сезона: летний период (июнь – сентябрь) с влажностью до 12–14%, осеннее криогенное иссушение при промерзании толщи (октябрь – ноябрь), зимняя фаза с отсутствием жидкой влаги (ноябрь – апрель), и весеннее увлажнение (апрель – май) за счет протаивания мерзлого слоя, инфильтрации талых вод, и вероятно, конденсации.

Динамика влажности определяется характером выпадения осадков, сезонными температурными колебаниями, запускающими фазовые переходы влаги, а также процессами испарения и конденсации.

Дальнейшие исследования будут направлены на оценку роли растительности и конденсационно-испарительных процессов в формировании термовлажностного режима песчаных пород криолитозоны. Это создаст научный задел для разработки комплексных моделей, позволяющих прогнозировать трансформацию мерзлотных ландшафтов при изменении климата.

**Благодарности.**

Работа проведена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации тема № FMWM-2025-0003 (ИГЭ РАН). Авторы выражают глубокую признательность Литовко А.В. и Шестернёву Д.М. за помощь в проведении полевых работ.

***Литература***

1 Бабаев А. Г., Дроздов Н. Н., Зонн И.С., Фрейкин З.Г. Пустыни. – М.: Мысль, 1986. – 317 с.

2 Бойцов А.В. Условия формирования и режим подземных вод надмерзлотного и межмерзлотного стока в Центральной Якутии: Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Якутск, 2002. – 176 с.

3 Гаращенко А. В. Флора и растительность Верхнечарской котловины (Северное Забайкалье). Новосибирск: ВО «Наука», 1993. – 280 с.

4 Еникеев Ф. И. Урочище пески Чарской впадины (Северное Забайкалье) // География и природные ресурсы. – 2014. – № 4. – С. 73–80.

5 Климовский И.В. Геокриологическая характеристика массива развеваемых песков Чарской котловины // Геокриологические условия Забайкальского Севера. – М. Наука. –1966. –С. 181–186.

6 Кулик К. Н., Кулик Н. Ф., Кулик А. К. Водный баланс почв песчаных массивов (на примере Усть-Кундрюченского массива, Ростовская область) //Почвоведение. – 2012. – №. 8. – С. 846–854.

7 Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 23. Бурятская АССР. Читинская область. Сер. 3. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 550 с.

8 Островский В. Н. Подземные воды пустынь и экосистемы. – М.,1991. – 189 с.

9 Паламарчук В. А., Лебедева Л.С., Павлова Н.А. Подземные воды песчаных массивов криолитозоны Восточной СИБИРИ: химический состав и естественные // Проблемы криосферы Земли: сборник тезисов Всероссийской научной конференции, Пущино, 12–16 мая 2025 года. – Пущино: Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, 2025. – С. 209–210.

10 Рахманова Н.В., Носкова Е.В., Вахнина И.Л. Сток рек Ленского бассейна на территории Забайкальского края и его связь с атмосферными осадками // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – № 5. – С. 43–60.

11 Рубцова М. Н., Акулова В. В. Эоловые отложения Чарской впадины: инженерно-геологический и геоэкологический аспекты //Сергеевские чтения. Устойчивое развитие: задачи геоэкологии (инженерно-геологические, гидрогеологические и геокриологические аспекты). – 2013. – С. 80–84.

12 Сергеев Д.О., Чеснокова И.В., Безделова А.П. и др. Итоги геокриологического мониторинга в Чаре за период 1986–2019: состояние и динамика горной мерзлоты // Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2020. – С. 164–168.

13 Справочное руководство гидрогеолога / Под ред. В.М. Максимова. Т.1. – Л.: Недра, 1979. – 512 с.

14 Чубаров В. Н. Питание грунтовых вод песчаной пустыни через зону аэрации. – М.: Недра, 1972. –134 с.

15 Шеин Е.В. Курс физики почв: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.

16 Шепелев В.В. Подземные воды тукуланов Центральной Якутии // Эоловые образования Центральной Якутии. – Якутск: Изд-во ИМ СО АН СССР. – 1981. – С. 30–41.

## ТЕХНОЛОГИЯ ВСЕСЕЗОННОЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

***А.В. Пахунов***
*ООО «Газпром добыча Надым», г. Надым*

Арктические месторождения углеводородов являются стратегической ресурсной базой экономики Российской Федерации. Геотехническая безопасность объектов нефтегазовой инфраструктуры в регионе критически зависит от сохранения несущей способности оснований, сложенных многолетнемерзлыми грунтами (ММГ). Данное равновесие нарушается как под влиянием глобальных климатических изменений (устойчивый рост температур в криолитозоне), так и вследствие антропогенных факторов промышленного освоения [1]. Повышение температуры ММГ фиксируется повсеместно, однако в районах активного техногенеза этот процесс протекает интенсивнее. Данные геотехнического мониторинга на месторождениях ООО «Газпром добыча Надым» подтверждают данную тенденцию: рост температур ММГ в зонах освоения составляет 0,05–0,12 °С/год.

Проектирование объектов нефтегазового комплекса в Арктике традиционно опирается на сезоннодействующие охлаждающие устройства (СОУ), эффективность которых зависит от продолжительности холодного периода. Прогрессирующее изменение климата критически снижает энергоэффективность СОУ. По данным геотехнического мониторинга на Бованенковском нефтегазоконденсатном месторождении (НГКМ), с момента ввода в эксплуатацию (2012 г.) зафиксировано снижение их эффективности в среднем на 30 %, что актуализирует разработку адаптивных технологий круглогодичной стабилизации термического режима грунтов [2].

В рамках настоящего исследования предложена технология всесезонной термостабилизации, интегрирующая принцип сезонной адаптации и возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [3]. Подход предусматривает пассивный режим зимой (аккумуляция естественного холода) и активное охлаждение с питанием от ВИЭ в летний сезон. В качестве модельного объекта выбраны добывающие скважины Бованенковского НГКМ, характеризующиеся интенсивным тепловым воздействием на массив мерзлых грунтов [1].

Опыт эксплуатации систем температурной стабилизации на объектах показывает, что технические решения должны удовлетворять требованиям надежности, эффективности и управляемости. Эффективная работа СОУ обеспечивается при температуре воздуха не выше минус 15 °С. Наибольшую техногенную нагрузку в системе «скважина – ММГ» несут приустьевые зоны, где критический уровень теплового воздействия формируется за счет добываемого флюида [4].

В рамках исследования решены следующие задачи: теплотехнические расчеты для определения необходимой холодильной мощности; подбор оборудования; расчет площади фотоэлектрических модулей; эскизное проектирование; экономическая оценка [5]. Выполнены конструктивные расчеты устойчивости крепи скважины и определена глубина спуска охлаждающих элементов, обеспечивающая надежное защемление колонны в ММГ. В ходе анализа установлено, что существующие термостабилизационные решения обладают недостатками: пассивная теплоизоляция

не инициирует обратное промораживание грунта [6]; СОУ неработоспособны летом; холодильные машины с принудительной циркуляцией энергозатратны и сопряжены с эмиссией парниковых газов [7].

Функциональное назначение парожидкостных термостабилизаторов заключается в замораживании и поддержании грунта в мерзлом состоянии за счет естественного холода. Интенсивность теплопередачи определяется свойствами циркулирующего теплоносителя. В рамках настоящего раздела рассматриваются аммиак (R717), хладон (R22) и диоксид углерода (R744). Данные о воздействии хладагентов на озоновый слой и их потенциале глобального потепления представлены в таблице 1. С позиций экологической безопасности наиболее предпочтительным является использование диоксида углерода [8]. Хладон R22 подлежит полному выводу из обращения к 2030 году [9].

По результатам выполненных теплотехнических расчетов и анализа экспериментальных данных установлено, что с учетом совокупности экологических требований наиболее эффективным теплоносителем является диоксид углерода (R744) [11].

Расчет устойчивости крепи и обоснование глубины спуска систем термостабилизации. Прогнозное моделирование показало, что при отсутствии мероприятий за 30 лет происходит оттаивание ММГ по всей мощности. При расстоянии между устьями 30 м наблюдается слияние ореолов оттаивания на всю глубину ММГ [12]. Расчет осадок выполнен на глубину 150 м по СП 25.13330.2020 [13], мощность ММГ в районе Бованенковского НГКМ достигает 300 м [14].

Таблица 1

Количественная оценка воздействия хладагентов на окружающую среду

| Критерии сравнения | Двуокись углерода | Аммиак | Хладон R22 |
|---|---|---|---|
| Потенциал разрушения озона (ODP) | 0 | 0 | 0,04–0,06 (5 % от влияния R11) |
| Потенциал глобального потепления (GWP) | 0 | 0 | 0,32–0,37 (37 % от влияния R11) |

По термодинамическим характеристикам (табл. 2) лучшим является аммиак, однако экологические риски ограничивают его применение [10]. Диоксид углерода на 15 % превосходит R22 и безопасен для озонового слоя [11].

Таблица 2

Сравнительные термодинамические характеристики хладагентов

| Критерии сравнения | Двуокись углерода | Аммиак | Хладон 22 |
|---|---|---|---|
| Давление испарения при температуре -1,0 °С, МПа | 3,42 | 0,42 | 0,49 |
| Удельная теплота испарения, кДж/кг | 235,10 | 1264,16 | 206,15 |
| Плотность жидкости, кг/м3 | 933 | 639 | 1358 |

Оценка устойчивости крепи скважины проводилась по СТО Газпром 16–2005 [15] для трех схем. По схеме № 3 (расчетная длина крепи 300 м, заделка концов с коэффициентом μ = 0,5) при глубине термостабилизации $h_l$ = 12,5 м (назначено исходя из мощности слоев с большими коэффициентами оттаивания) критическая длина крепи Lкр получена по формуле (1):

$$L_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times \sum EJ}{\left(P_c + q_{1\text{м}} \cdot L_{\text{кр}}\right) \cdot \mu^2}} = \sqrt{\frac{3{,}14^2 \times 143752154{,}48}{(395030 + 6975{,}24 \cdot 387{,}5) \cdot 0{,}5^2}} = 42{,}43 \text{ м} \quad (1)$$

где $\sum EJ$ – суммарная жесткость элементов, составляющих крепь (обсадных колонн, цементных колец); J – момент инерции элемента крепи (обсадные колонны, цементные кольца); E – модуль упругости материала элемента крепи (стали, цемента); μ – коэффициент приведения длины, зависящий от способов закрепления; $P_c$ – нагрузка, сосредоточенная на верхнем конце критического (расчетного) участка крепи.

Продольная устойчивость крепи соответствует требованию обеспечения надежности конструкции скважины при соблюдении условия СТО Газпром 16–2005:

$L_{\text{кр}} \geq 1{,}05 L_{\text{л.п}}$; 42,43 ≥ 1,05·387,5; 42,43 ≥ 406,88 – условие не соблюдается.

При невыполнении данного условия производится более детальный проверочный расчет по схеме с шарнирным закреплением нижнего конца. Выполняется проверка по условию (10.3), СТО Газпром 16–2005:

$$L_{\text{кр}} \geq 1{,}05 L_{\text{ов}};\ 42{,}43 \geq 1{,}05 \cdot 13{,}03;\ 42{,}43 \geq 13{,}68$$ – условие соблюдается.

Вывод по расчету: продольная устойчивость крепи соответствует требованию обеспечения надежности конструкции скважины при обеспечении работы крепи по схеме №3 в соответствии с СТО Газпром 16–2005 [15]. Мероприятия по температурной стабилизации грунтов приустьевой зоны при проектировании и прогнозном моделировании в сложных геокриологических условиях Бованенковского НГКМ рекомендуется принять на глубину $h_l$ = 12,5 м.

Оценка тепловой мощности, сбрасываемой скважинами в грунт. В процессе эксплуатации скважин возникает техногенное тепловое поле, способное инициировать растепление ММГ [4]. Для сохранения несущей способности грунтов предусмотрена комбинированная система термостабилизации: шесть СОУ вокруг устья и теплоизолированная лифтовая труба (ТЛТ) глубиной 50 м. Выбор глубины спуска ТЛТ обусловлен комплексом геокриологических факторов исследуемой площадки. Согласно уравнению Фурье (2), тепловой поток связан с температурой через градиент:

$$q = -\lambda \cdot grad\ (T) \quad (2)$$

где q – тепловой поток, Вт/м$^2$; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); Т – температура, К.

Для упрощения оценки необходимой холодильной мощности предлагается рассчитывать линейный тепловой поток (3) с каждой скважины на средней плоскости, выделив в грунтовом массиве цилиндрический слой, отнесенный к скважине:

$$q_l = \pi \frac{t_{\text{фл}} - t_{\text{ср}}}{R_\Sigma} \quad (3)$$

где $t_{фл}$ = 28 °С – температура флюида, протекающего через ТЛТ, °С; $t_{ср}$ = -4,694 °С – средняя по горизонтам начальная температура грунта, °С; $R_\Sigma$ – суммарное термическое сопротивление комбинированной цилиндрической стенки, (м·К)/Вт. Суммарное термическое сопротивление комбинированной цилиндрической стенки определялось по (4):

$$R_\Sigma = R_\alpha + R_{\lambda\ \text{скв}} + R_{\lambda\ \text{грунт}} \quad (4)$$

где $R_{(\lambda\ скв)}$ и $R_{(\lambda\ грунт)}$ – соответственно термические сопротивления конструкции скважины и грунтового слоя, (м·К)/Вт.

Термические сопротивления при теплопроводности через слои конструкции скважины и цилиндрический слой грунта определялись по (5):

$$R_\lambda = \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (5)$$

где λ – теплопроводность материала цилиндрического слоя, Вт/(м·К); D – наружный диаметр цилиндрического слоя, м; d – внутренний диаметр цилиндрического слоя, м.

Расчетные значения термического сопротивления конвекции, теплопроводности многослойной конструкции скважины, грунтового массива и величина теплового потока представлены в таблице 3.

Таблица 3

Комплексная оценка теплофизических параметров

| Искомая величина | $R_\alpha$, $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м·К}}\right)^{-1}$ | $R_{\lambda\ \text{скв}} + R_{\lambda\ \text{грунт}}$, $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м·К}}\right)^{-1}$ | $R_\Sigma$, $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м·К}}\right)^{-1}$ | $q_l$, Вт/м |
|---|---|---|---|---|
| Результат | 14.1·10-4 | 1,916 | 1,91666 | 31,1 |

Расчет необходимой холодильной мощности системы термостабилизации. Тепловая мощность, сбрасываемая одной скважиной в грунт по всем направлениям, определялась через рассчитанный ранее линейный тепловой поток и длину необходимого защемления крепи скважины по (6):

$$Q_{\text{скв}} = q_l \cdot H_{\text{скв}} \quad (6)$$

где $H_{скв}$ = 12,5 м – по ранее проведенным расчетам.

Поскольку рассматривается только две скважины, то общая тепловая мощность, сбрасываемая ими в грунт, будет вдвое больше (7):

$$Q_{\text{тепл}} = 2 \cdot Q_{\text{скв}} \quad (7)$$

Основная задача системы термостабилизации заключается в предотвращении растепления многолетнемерзлых грунтов вокруг цементного кольца и поддержании проектной температуры на глубину 12,5 м в течение всего периода эксплуатации. Итоговые значения тепловой мощности, сбрасываемой скважинами представлены в таблице 4.

Таблица 4

Тепловая мощность, сбрасываемая скважинами в грунт

| Параметр | $q_l$, Вт/м | $Q_{скв}$, Вт | $Q_{тепл}$, Вт | $Q_{тепл\ эфф}$, Вт |
|---|---|---|---|---|
| Значение | 31 | 1 550 | 3 100 | 5 635 |

Таким образом, необходимая холодильная мощность для эффективной термостабилизации многолетнемерзлых грунтов в приустьевой зоне добывающих скважины составляет 5,6 кВт.

Для оценки эффективности комбинированной системы термостабилизации и обоснования глубины защемления крепи выполнено численное моделирование теплового взаимодействия скважин с многолетнемерзлыми грунтами в программе «БОРЕЙ 3D» [16] на 30-летний период. Моделирование подтвердило корректность принятых решений: система обеспечивает устойчивое охлаждение грунтов на всем горизонте планирования.

Мощность системы достаточна для компенсации пиковых теплопритоков, что гарантирует предотвращение растепления грунтов в межскважинном пространстве и приустьевой зоне на всю расчетную глубину защемления крепи. Тепловой поток практически не выходит за пределы цементного кольца.

Конфигурация энергосистемы на базе ВИЭ. Проектирование автономных систем энергоснабжения на базе ВИЭ для термостабилизации ММГ в криолитозоне требует учета данных с высоким временным разрешением, отражающих суточную и внутрисезонную динамику температуры, солнечной радиации и ветра [3, 5]. Выходная мощность фотоэлектрического модуля определялась с учетом солнечной освещенности и температуры фотоэлемента (8):

$$P_{\text{СБ вых}} = P_{\text{СБ уст}} \cdot \left(\frac{GHI}{GHI_{\text{исп}}}\right) \cdot \left(1 + K_T \cdot (t_{\text{ячейки}} - t_{\text{исп}})\right) \quad (8)$$

где $P_{(СБ\ уст)}$ – установленная мощность солнечных батарей, Вт; GHI – солнечная радиация на горизонтальную поверхность, Вт/м²; $GHI_{исп}$ – солнечная радиация на горизонтальную поверхность во время испытания, Вт/м²; K_T – температурный коэффициент мощности фотоэлемента; $t_{ячейки}$ – температура фотоэлемента, определяется по формуле (9):

$$t_{\text{ячейки}} = t_{\text{возд}} + 0{,}0256 \cdot GHI \quad (9)$$

Основные технические характеристики модуля представлены в табл. 5.

Таблица 5

Эксплуатационные характеристики фотоэлектрического модуля

| Параметр | $GHI_{исп}$, Вт/м² | $K_T$ | $t_{исп}$, °C |
|---|---|---|---|
| Значение | 550 | 0,00306 | 25 |

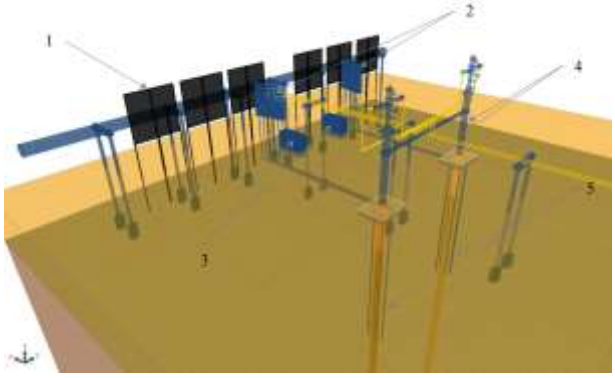
Требуемая тепловая мощность 16,8 кВт соответствует электрической мощности генерирующей части 12,5 кВт. Выбран тепловой насос MARK II (16,8 кВт, EER = 2,9) с резервированием [7, 15]. Потребление электроэнергии по месяцам представлено в таблице 6.

Таблица 6

Электрическая мощность и потребляемая электроэнергия

| Месяцы | Электрическая мощность, кВт | Количество солнечных часов в месяце | Потребляемая электроэнергия, кВт·ч |
|---|---|---|---|
| июнь | 10,90 | 102,00 | 1040 |
| июль | 12,68 | 378,20 | 4536 |
| август | 10,51 | 229,40 | 2290 |
| сентябрь | 8,84 | 147,00 | 1299 |

Моделирование в программе PVsyst подтвердило, что система солнечных панелей мощностью 15 кВт полностью покрывает потребность теплового насоса [14]. Разработка архитектуры комплексной системы термостабилизации представлена на рис. 1.




(1 – солнечные модули; 2 – термостабилизаторы грунта; 3 – тепловой насос; 4 – газовые скважины; 5 – испарители системы термостабилизации, глубиной спуска 12,5 м.)

Рис. 1. Эскизная проработка технологии всесезонной термостабилизации многолетнемерзлых грунтов с использованием восполняемой энергии солнца (ТВТ ВЭС)

Термостабилизаторы в приустьевой зоне соединены с централизованным коллектором, обеспечивающим равномерное распределение холода. Управление осуществляется интеллектуальной системой мониторинга на основе данных о температуре грунта, климатических условиях и нагрузке. Для бесперебойной работы в периоды низкой солнечной активности предусмотрены резервные источники питания.

В рамках исследования выполнен сравнительный экономический анализ трех альтернативных вариантов систем термостабилизации: сезоннодействующие охлаждающие устройства (СОУ), системы с холодильными машинами принудительной циркуляции, а также технология всесезонной термостабилизации с использованием восполняемой энергии солнца (ТВТ ВЭС). Оценка производилась по следующим критериям: уровень капитальных затрат, энергоэффективность и экологическая безопасность. Выбор данных критериев обусловлен необходимостью комплексного анализа решений с учетом как экономической целесообразности, так и требований к снижению антропогенного воздействия на хрупкие экосистемы Арктики.

Сравнительный анализ показал, что сезоннодействующие охлаждающие устройства характеризуются наименьшими капитальными вложениями, однако их эффективность ограничена исключительно зимним периодом. Системы с холодильными машинами обеспечивают круглогодичную термостабилизацию, но сопряжены с максимальными капитальными затратами, высокой энергоемкостью и значительным углеродным следом. Технология ТВТ ВЭС занимает промежуточное положение по уровню капитальных вложений, отличается существенно более низкими эксплуатационными расходами благодаря использованию солнечной генерации, высокой экологической безопасностью и энергетической автономностью, что позволяет рекомендовать ее в качестве наиболее рационального решения для обеспечения устойчивости добывающих скважин в криолитозоне

Выводы: в результате исследования разработана технология всесезонной термостабилизации многолетнемерзлых грунтов с использованием восполняемой энергии солнца, основанная на гибридном подходе, сочетающем пассивное охлаждение в зимний период и активное поддержание температурного режима грунтов летом за счет возобновляемых источников энергии. Определены оптимальные параметры системы: холодильная мощность, конфигурация генерирующего оборудования и тип хладагента, отвечающего экологическим требованиям. Численное моделирование, выполненное в программном комплексе «БОРЕЙ 3D», подтвердило эффективность предложенного технического решения. Установлено, что на заданную глубину защемления крепи твердомерзлое состояние массива многолетнемерзлых грунтов сохраняется в течение всего расчетного срока эксплуатации, а тепловой поток от добывающей скважины полностью купируется.

Результаты экономического анализа убедительно свидетельствуют о конкурентоспособности разработанной технологии. При обоснованном уровне капитальных затрат и существенно сниженных эксплуатационных расходах, достигаемых за счет комбинирования пассивного и активного охлаждения, предлагаемое решение характеризуется высокой надежностью и вариативностью

конструктивных исполнений. Адаптивность технологии к различным геокриологическим условиям обеспечивает минимизацию инвестиционных рисков и создает предпосылки для ее широкого внедрения на объектах нефтегазового комплекса Арктической зоны.

Представленные в работе результаты открывают новое научно-техническое направление в области термостабилизации грунтов, базирующееся на принципах «зеленой» энергетики и декарбонизации процессов недропользования. Дальнейшее развитие разработанной технологии ТВТ ВЭС связывается с формированием гибридных энергокомплексов, интеграцией систем накопления энергии и внедрением интеллектуальных алгоритмов предиктивного управления. Решение этих задач позволит не только повысить надежность и энергоэффективность объектов в криолитозоне, но и внести существенный вклад в сохранение хрупких экосистем Арктики при одновременном обеспечении устойчивого развития нефтегазодобывающей отрасли. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются масштабирование предложенной технологии для кустовых площадок, а также разработка адаптивных режимов работы системы в условиях меняющегося климата и возрастающей антропогенной нагрузки.

***Литература***


1. Иванов А. В., Петров С. А. Технологии термостабилизации многолетнемерзлых грунтов в условиях Арктики // Арктический журнал. – 2020. – № 3. – С. 45-58.
2. Минэнерго РФ. Стратегия развития возобновляемой энергетики в арктическом регионе до 2035 года. – Москва, 2022. – 62 с.
3. Чистяков П., Новиков М. Перспективы развития технологий всесезонной термостабилизации с использованием ветровой и солнечной энергетики в Арктике // Энергетика и ресурсы. – 2022. – № 5. – С. 130-138.
4. Тихонов А., Федоров В. Тепловые насосы и их применение для термостабилизации в условиях вечномерзлой среды: опыт и перспективы // Инженерные системы. – 2020. – № 3. – С. 67-75.
5. Иванова Н. В., Сидоров П. А. Инновационные подходы к использованию солнечной энергии для стабилизации мерзлых грунтов в нефтегазовой промышленности Арктики // Теплоэнергетика. – 2021. – № 4. – С. 89-97.
6. Соловьёв В., Дмитриев Ю. Инновационные материалы для повышения эффективности систем термостабилизации в условиях вечной мерзлоты // Геотехнические науки. – 2020. – № 2. – С. 70-78.
7. Петрова Е., Васильев А. Технологии энергоэффективного отопления и охлаждения в условиях вечномерзлой среды с использованием альтернативных источников энергии // Инженерные системы. – 2020. – № 4. – С. 60-68.
8. Международная ассоциация по исследованиям вечномерзлых грунтов. Руководство по использованию возобновляемых источников энергии в арктических регионах. – 2023. – 112 с.
9. Европейский союз. Отчёт о внедрении возобновляемых источников энергии в арктическом регионе: опыт и рекомендации. – Брюссель, 2021. – 94 с.
10. Смирнов В. Ю., Кузнецов И. М. Использование геотермальных ресурсов для стабилизации грунтов // Геотехнические науки. – 2020. – № 4. – С. 112-119.
11. Гусев М., Лазарев И. В. Использование геотермальных ресурсов для обеспечения термостабильности объектов нефтегазового комплекса в Арктике // Геотехнические исследования. – 2020. – № 2. – С. 50-58.
12. Патент № 2789556 Российская Федерация, МПК E21B 36/00. Способ предотвращения слияния ореолов протаивания вокруг скважин в многолетнемерзлых породах: № 2022120738: заявл. 28.07.2022: опубл. 06.02.2023 / Локтионов Е.Ю.; заявитель Локтионов Е.Ю. – 10 с.
13. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах: свод правил: издание официальное: утв. и введ. в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30 декабря 2020 г. № 915/пр: дата введения 2021-07-01. – Москва: Минстрой России, 2021. – 56 с.
14. Национальный институт исследований Арктики. Технологические решения по стабилизации мерзлых грунтов при строительстве инфраструктуры. – 2023. – 78 с.
15. СТО Газпром 16-2005. Регламент по проектированию крепи добывающих скважин и их конструкций с учетом свойств мерзлых пород. – Москва: ОАО «Газпром», 2005. – (Стандарт организации).
16. Пакет программ для прогнозных расчетов при проектировании на многолетнемерзлых грунтах БОРЕЙ 3D [Электронный ресурс]. – URL: https://www.boreas3d.ru/ (дата обращения: 10.05.2025).

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ НА ПРИМЕРЕ СРЕДНЕГО ЯМАЛА

***Т.В. Печенкин, В.З. Хилимонюк, С.Н. Булдович***
*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, г. Москва*

**Актуальность исследования.**

В условиях интенсивного освоения месторождений полуострова Ямал широкое распространение получила технология создания подземных резервуаров в толще многолетнемерзлых песков для размещения жидких отходов бурения. Резервуары формируются методом скважинной гидродобычи песка: через вертикальную скважину в мерзлую толщу подаётся тёплая вода, размывающая песок, при этом геометрия формируемой полости регулируется уровнем раздела «вода–воздух». Объём одного резервуара может достигать нескольких тысяч кубических метров, а глубина заложения составляет порядка 30 м и более.

При размещении таких объектов группами на ограниченной площади возникает проблема их взаимного теплового влияния. Перекрытие талых зон способно существенно изменить сроки промерзания захоронённых флюидов и условия стабилизации мерзлой толщи. Отсутствие пространственно детализированной оценки этих процессов затрудняет выбор оптимального расстояния между резервуарами и обоснование их безопасной эксплуатации.

**Объект, предмет и цель.**

Объектом исследования являются процессы теплового взаимодействия и промерзания подземных резервуаров, заполненных отходами буровых растворов (ОБР) и размещённых в многолетнемерзлых песках Среднего Ямала. Предмет исследования — пространственно-временная динамика формирования талых и мерзлых зон, а также закономерности полного промерзания флюидов при различном взаимном расположении резервуаров.

Цель работы заключается в разработке трёхмерной численной модели теплового взаимодействия группы подземных резервуаров и установлении зависимости времени промерзания флюидов от расстояния между ними и температурного режима многолетнемерзлых пород.

**Характеристика местности.**

Задача рассматривается в условиях Среднего Ямала, полигон Марресале. Рельеф Ямала представляет собой аккумулятивную равнину с высотными отметками от 0,5 до 55 м над уровнем моря. Для данной местности харакетрна среднегодовая температура -5,7°С, максимальная среднемесячная температура достигается в Июле и составляет +9,0°С, минимальная — в Январе -19,8°С.

Территория Ямала является частью Западно-Сибирской плиты. Верхняя часть разреза исследуемой области сложена породами четвретичного периода плейстоценового и голоценового возраста морского и пролювиального генезиса. Представлены преимущественно суглинками и песками.

Многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение. Мощность сезонно-талого слоя на Ямале колеблется от 0,3 до 1,5 м. Температура многолетнемерзлых пород составляет от –2 до –5°С (Геокриология СССР, 1989).

**Теплофизические свойства пород и растворов.**

По литературным данным (Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений, 2013) характерный разрез района Марресале представлен следующими породами (табл. 1).

Таблица 1

Осредненный геологический разрез

| Индекс | Вид | Описание | Глубина подошвы слоя | Абс. отметка подошвы слоя | Мощность |
|---|---|---|---|---|---|
| m $III_{2-3}$ | супесь с прослоями песка | отложения третьей морской террасы | 6,5 | 16,5 | 6,5 |
| | суглинок лёгкий пылеватый | | 28,5 | -5,5 | 22,0 |
| pm $III_1$ | пластовый лёд | - | 32,4 | -9,4 | 3,9 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | песок пылеватый | отложения казанцевской прибрежно морской равнины | 53,1 | -30,1 | 20,7 |
| mg $II_{2-4}$ | суглинок с прослоями глин | отложения салехардской морской равнины | 70,4 | -47,4 | 17,3 |
| | суглинок с прослоями песоков | | 153,0 | -130 | 82,6 |

Теплофизические характеристики пород следующие (табл. 2).

Таблица 2

Теплофизические свойства пород

| Название | λth, Вт/(м*°С) | λf, Вт/(м*°С) | Cth, КДж/($м^3$*°С) | Cf, КДж/($м^3$*°С) | Qф, МДж/$м^3$ | Tbf, °С |
|---|---|---|---|---|---|---|
| m $III_{2-3}$ супесь | 1,47 | 2,22 | 2730 | 1970 | 148,32 | -0,10 |
| m $III_{2-3}$ суглинки | 0,98 | 1,13 | 2950 | 2310 | 125,81 | -1,36 |
| пластовый лёд | 0,57 | 2,22 | 4200 | 2100 | 335,00 | -1,00 |
| pm $III_1$ пески | 1,95 | 2,86 | 2630 | 1780 | 137,03 | -0,30 |
| mg $II_{2-4}$ суглинок и глина | 1,33 | 1,74 | 2800 | 2320 | 111,60 | -1,97 |
| mg $II_{2-4}$ суглинок и песок | 1,49 | 1,59 | 3010 | 2330 | 104,27 | -1,97 |

В работе рассмотрены два варианта:

1) подземный резервуар хаполнен однородным раствором ОБР, объём 2500 $м^3$.

2) Подземный резервуар заполнен осадком ОБР, объём 1205 $м^3$, и раствором ОБР, объём 2295 $м^3$.

Теплофизические свойства ОБР были взяты по литературным данным (Шахова А.А., Данченко Е.А., Хилимонюк В.З., 2023).

Таблица 3

Теплофизические характеристики флюидов (отработанного бурового раствора, воды)

| | λth, Вт/(м*°С) | λf, Вт/(м*°С) | Cth, КДж/($м^3$*°С) | Cf, КДж/($м^3$*°С) | Qф, МДж/$м^3$ | Tbf, °С |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Раствор ОБР | 1,014 | 1,783 | 3410 | 2313 | 174 | -0,52 |
| Осадок ОБР | 1,910 | 2,370 | 2987 | 2052 | 149 | -0,30 |

**Постановка задачи.**

Температура пород была принята равной –3°С.

Рассматривается ситуация регулярного шахматного размещения резервуаров. Расстояние между их центрами варьируется в диапазоне от 30 до 160 м.

Параметры типового резервуара соответствуют реальным условиям полигона: объём составляет 2500 $м^3$, эквивалентный радиус — 8,42 м, глубина до кровли — около 32 м (Савич О.И., 2013).

При шахматном размещении резервуаров в силу симметрии область теплового влияния каждого отдельного резервуара ограничивается вертикальными плоскостями симметрии, расположенными со всех сторон на расстоянии половины шага размещения объектов. Плоскости симметрии являются теплонепроницаемыми границами и в этом случае появляется возможность рассматривать теплообмен каждого резервуара с породами отдельно. Расчетная область при этом представляет собой прямоугольную вертикальную призму квадратного сечения с размером стороны, равной половине расстояния между центрами резервуаров, ограниченную сверху поверхностью земли и снизу теплонепроницаемой границей на заданной глубине. Граничные условия задаются следующим образом: на боковых границах расчётной области принимается нулевой тепловой поток, нижняя граница фиксируется условием первого рода, а на верхней поверхности задаётся условие третьего рода, отражающее теплообмен с атмосферой.

Основной задачей моделирования является определение динамики изменения пространственной конфигурации талых и мерзлых зон, оценка времени полного промерзания флюидов и выявление критического расстояния, при котором тепловое взаимодействие между резервуарами перестаёт быть существенным.

Расчёты были выполнены выполнены в двух пограммах: QFrost и Cryo3D.

**QFrost**

Программа QFrost не имеет функционала для явного создания трёхмерной модели. Однако в данном случае при шахматном размещении резервуаров имеется возможность свести задачу к ее осесимметричному (радиальному) варианту (Песоцкий Д.Г, 2016).

Чтобы описать задачу в двухмерной плоскости, исследуемая область была разбита на множество прямоугольных параллелепипедов квадратного сечения со стороной X, равной длинне шага размещения объектов (с шириной X, толщиной X) и высотой 100 м. В центре параллелепипедов находятся резервуары. Поскольку в рассматриваемом случае запасы тепла в резервуарах ограничены, то призму с квадратным сечением (параллелепипед) можно заменить цилиндром, объем которого равен объему призмы. Это позволяет использовать для решения задачи двухмерную осесимметричную модель с радиусом *R* и высотой 100 м, где:

$$\boldsymbol{R} = \frac{\mathbf{2}}{\sqrt{\boldsymbol{\pi}}}\boldsymbol{X}$$

**Cryo3D**

Программа Cryo3D была разработана специально для решения задачи теплового взаимодействия подземных резервуаров в трёхмерном пространстве. Реализована на языке Java 21.

Cryo3D разбивает расчётную область на трёхмерную неравномерную прямоугольную сетку, состоящую из прямоугольных параллелепипедов (ячеек). В пределах ячеек грунт считается однородным, а его свойства одинаковыми в объёме и изотропными. Искомые температуры и энтальпии относятся к геометрическим центрам ячеек. Период расчёта делится на временные слои.

В каждой ячейке решается нестационарное уравнение теплопроводности с учётом фазового перехода. Численная реализация основана на методе энтальпий и явной конечно-разностной схеме по времени. Благодаря балансовому подходу расчётная схема выражает закон сохранения энергии: изменение энтальпии ячейки за шаг времени определяется суммарным притоком и оттоком тепла через грани ячейки.

В энтальпийной постановке основной неизвестной является не температура, а объёмная энтальпия H, Дж/м³. Энтальпия рассчитывается для каждой ячейки расчтной области на каждом шаге по следующей формуле:

$$H^{n+1} = H^n + (\Delta t / V) \cdot \Sigma(Qface)$$

Где $H^n$ - энтальпия ячейки на текущем временном слое, $H^{n+1}$ энтальпия ячейки на следующем временном слое, Σ(Qface) - суммарная тепловая мощность через шесть граней, положительная при притоке энергии в ячейку.

Это центральная формула текущего решателя. По своей структуре она представляет дискретный баланс энергии: приращение объёмной энтальпии равно энергии, поступившей в ячейку за шаг времени, делённой на объём ячейки (Инженерная геокриология, 1999).

После вычисления $H^{n+1}$ для всех ячеек значения энтальпии обновляются. После этого выполняется обратное преобразование энтальпии в температуру для каждой ячейки расчётной области и тем самым формирует новое температурное поле. Для текущей реализации Cryo3D используется минимальная кусочно-линейная аппроксимация зависимости H(T) при фиксированной температуре фазового перехода Tbf.

$$H(T) = Cfz \cdot (T - Tbf), T < Tbf$$

$$H(T) = 0 \ldots L, \text{при этом } T = Tbf, \text{в зоне фазового перехода}$$

$$H(T) = L + Cth \cdot (T - Tbf), T > Tbf$$

В такой записи энтальпия естественно объединяет две физические величины: собственно температурный вклад и вклад скрытой теплоты плавления/замерзания. Температура восстанавливается из энтальпии по обратной кусочной зависимости.

Температурное плато фазового перехода реализуется не специальной логикой в шаговом решателе, а самой структурой преобразования H → T. Пока энтальпия ячейки находится в пределах от 0 до L, температура не меняется и остаётся равной Tbf, а подведённая или отведённая энергия расходуется на изменение фазового состояния.

Для интерпретации состояния ячейки вводится доля талой фазы F:

$$F(H) = 0, H < 0$$
$$F(H) = H / L, 0 \le H \le L$$
$$F(H) = 1, H > L$$

В текущей версии программы F не является самостоятельной расчётной переменной и не хранится отдельным массивом; она вычисляется из энтальпии по мере необходимости.

Значения теплофизических характеристик в талой и мерзлой зонах задаются пользователем. В переходной зоне Cryo3D использует линейную интерполяцию по доле талой фазы F:

$$\lambda eff = (1 - F) \cdot \lambda fz + F \cdot \lambda th$$
$$\mathbf{Ceff = (1 - F) \cdot Cfz + F \cdot Cth}$$

Тепловой поток между внутренними ячейками рассчитывается через сумму тепловых сопротивлений двух полуячеек:

$$q = 2 \cdot (Tnb - Tc) / (rnb/\lambda nb + rc/\lambda c)$$
$$Qface = q \cdot Aface$$

Здесь Tc и Tnb - температуры текущей и соседней ячеек, rc и rnb - их размеры по нормали к общей грани, λc и λnb - теплопроводности соответствующих ячеек.

Полученная мощность Qface входит в баланс текущей ячейки со знаком плюс, если поток направлен в неё, и со знаком минус для соседней ячейки.

В Cryo3D поддерживаются три рода граничных условий:

1. граничное условие I рода:

$$q = (Tb - Tc) / ((0.5 \cdot r) / \lambda)$$

где Tb - заданная температура на границе, Tc - температура центра ячейки, r - размер ячейки по нормали к границе, λ - теплопроводность ячейки.

2. граничное условие II рода:

$$Qface = q \cdot Aface$$

3. граничное условие III рода:

$$q = (T\infty - Tc) / ((0.5 \cdot r)/\lambda + 1/\alpha)$$

Здесь T∞ - температура внешней среды, α - коэффициент теплообмена, λ - теплопроводность ячейки, r - размер ячейки по нормали к границе. Формула учитывает два последовательно соединённых сопротивления: теплопроводность внутри полуячейки и конвекцию на внешней поверхности.

**Полученные данные**

Расчётные сценарии показывают, что расстояние между подземными резервуарами является определяющим фактором их теплового взаимодействия для всех случаев. При расстояниях менее 60–70 м тепловое взаимодействие между резервуарами становится интенсивным, что приводит к увеличению времени полного промерзания флюидов. При увеличении расстояния влияние соседних резервуаров постепенно ослабевает и становится практически несущественным (рис. 1).

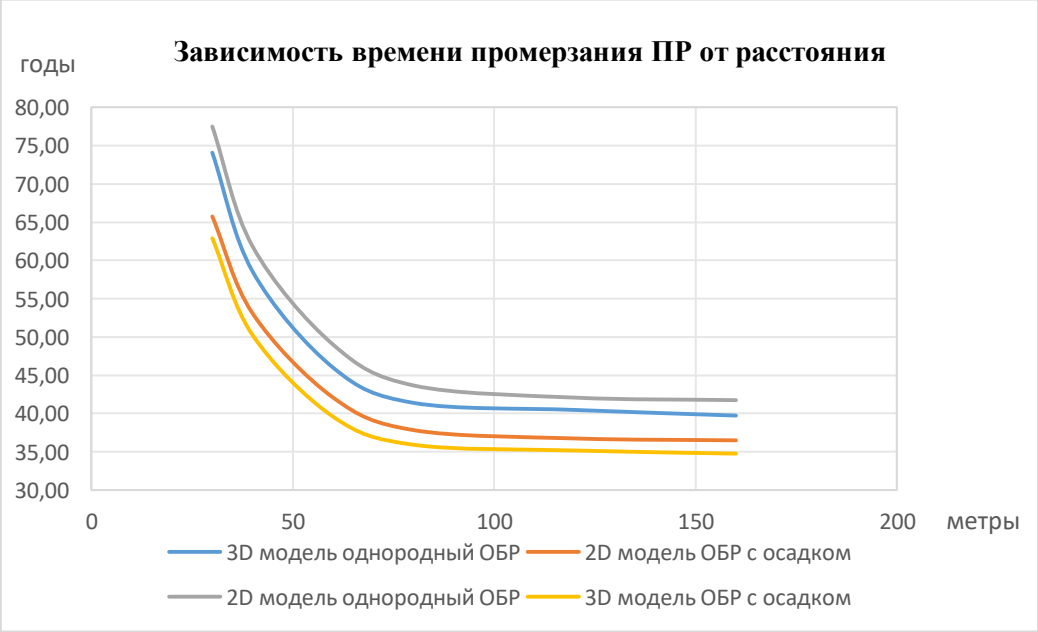



Рисунок 1. Зависимость времени подного промерзания подземного резервуара от расстояния между осями соседних резервуаров.

**Выводы**

Полученные результаты позволяют обосновать минимально допустимые расстояния между резервуарами при их множественном размещении на полигоне. При расстояниях менее 60–70 м тепловое влияние соседних резервуаров существенно увеличивает время промерзания флюидов, тогда как при больших расстояниях взаимодействие практически отсутствует.

В рамках работы реализована трёхмерная численная модель теплового взаимодействия подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах Применение трёхмерного моделирования позволяет определить пространственные закономерности и научно обосновать оптимальные схемы размещения подземных резервуаров в условиях криолитозоны. Разработка Cryo3D создаёт основу для дальнейших усовершенствований исследований тепловых процессов в криолитозоне и позволяет перейти от идеализированных расчётных схем к пространственно детализированному моделированию реальных инженерных ситуаций.

***Литература***


1. Геокриология СССР. Западная Сибирь/Под ред. Э.Д. Ершова. - М.: Недра, 1989. - 454 с.: ил.
2. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация
3. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: Монография. В 3т. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. - М.: ООО «Газпром экспо», 2013. - 424 с.
4. Основы геокриологии. 5. Инженерная геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. — М.: Изд-во МГУ, 1999. — 526 с
5. Песоцкий Д.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ QFrost №2016614404 22.04.2016.
6. Савич О. И. Строительство подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах. 2013. - 24-27 с.
7. Шахова А.А., Данченко Е.А., Хилимонюк В.З. Свойства отходов буровых растворов, влияющие на процесс их промерзания при захоронении в многолетнемёрхлых песках. - Брест: БрГТУ, 2023. - 396 с.


## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОСНОВАНИЯ НА ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ОПОР МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА УЧАСТКА МН "ЗАПОЛЯРЬЕ - НПС "ПУР-ПЕ"


***Б.В. Петров, Ф.А. Шевчик***

*ООО «НИИ Транснефть», г. Москва*


Эксплуатация трубопровода МН "Заполярье - НПС "Пур-Пе" осложнена использованием многолетнемерзлых грунтов (ММГ) в качестве оснований для фундаментов. На территории прокладки трубопровода действует целый комплекс геокриологических процессов, снижающих устойчивость зданий и сооружений. Наблюдаемое потепление климата вносит дополнительную сложность в строительство и эксплуатацию зданий и сооружений.

Для снижения природных воздействий на объекты МТ и, в частности, геокриологических процессов большая часть трубопровода МН "Заполярье - НПС "Пур-Пе" имеет надземную прокладку. Благодаря этому устранено отепляющее влияние трубопровода на подстилающие ММГ, которое способно вызвать глубокий термокарст и в значительной мере снизить устойчивость трубопровода.

Одним из ключевых параметров работоспособности трубопроводов при надземной прокладке является планово-высотное положение (ПВП) опор трубопровода. Измерение ПВП опор позволяет контролировать ключевые геокриологические процессы, способные снизить устойчивость трубопроводов надземной прокладки, - осадку и морозное выпучивание свайных фундаментов. Ежегодно по причине морозного выпучивания в северных регионах России регистрируется порядка 8 тысяч отказов магистральных трубопроводов [1]. На трассе газопровода Ямбург - Ныда доля аварий составляет 6,5 % от общей протяженности магистрального трубопровода [2]. Осадка свайных фундаментов в г. Надым в 1990–2000-х гг. привела к деформации 5-7 % от общего количества сооружений [3]. Существенный вклад в развитие криогенных процессов вносит климатическое потепление. Повышение среднегодовой температуры воздуха на метеостанции г. Новый Уренгой за период наблюдений 1991-2020 гг. составила около 1,7 °С. Повышение температур воздуха ведет к деградации многолетнемерзлых пород. Так, повышение температуры многолетнемерзлых пород на

стационаре в районе п. Тазовский в период 2017-2024 гг. составляет 0,071 °С в год, а в районе г. Тарко-Сале – 0,036°С в год [4].

Для сохранения мерзлого состояния грунтов оснований, с целью повышения несущей способности опор линейных сооружений в пластичномерзлых грунтах на магистральном трубопроводе "Заполярье - НПС "Пур-Пе" применяется сезонно охлаждающие устройства [5]. Применение СОУ является общепризнанным способом сохранения температурного режима оснований сооружений. Вместе с тем их применение не исключает полностью развития вышеназванных процессов (Закирова, Гаррис, 2016).

В данном исследовании рассмотрена динамика процессов осадки и морозного выпучивания опор трубопровода в условиях изменения температуры грунтов оснований. Для целей исследования на участке МН "Заполярье - НПС "Пур-Пе" выбрано 325 опор, оборудованных термометрическими скважинами, по которым с 2017 года ведется непрерывный мониторинг ПВП опор и температуры грунтов оснований. Температура грунтов определяются при помощи термокос в интервале глубин от поверхности до 11 м. Вертикальные перемещения опор трубопроводов измеряются при помощи нивелира (III класс нивелирования).

Трубопровод МН "Заполярье - НПС "Пур-Пе" построен по принципу I использования ММГ в качестве основания (с сохранением мерзлого состояния грунта в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружения). Опоры трубопровода состоят из 2, 4 или 8 свай. Сваи опор обустроены буроопускным или бурозабивным способом. Большая часть опор оснащена термостабилизаторами (ТСГ) – от 4 до 20 ТСГ на одну опору.

Прилегающая к участку трубопровода МН "Заполярье - НПС "Пур-Пе" территория характеризуется островным распространением ММГ (покрытие до 50% территории) с температурой от - 1 °С до 0 °С. ММГ на участках своего распространения двухслойная по глубине – верхний слой имеет мощность 50-150 м, а нижний залегает на глубинах от 180-210 м до 280-350 м.

По результатам исследования средняя температура грунтов оснований выбранных опор за период наблюдений 2017-2024 гг. составляет -1,4°С. По 292 из 325 ТС наблюдается рост температур грунтов. В среднем наблюдается растепление мерзлых оснований со скоростью 0,08 °С в год. На осень 2024 года средняя температура грунтов оснований составляет -0,7°С.

На фоне растепления грунтов преобладающее воздействие на опоры трубопроводов имеет морозное выпучивание – на 226 опор из 325 со скоростью 1,0 мм в год. Осадка наблюдается на 99 опорах из 325 – 0,8 мм в год. Процентное соотношение опор с осадкой и опор с пучением представлено на рис. 1.

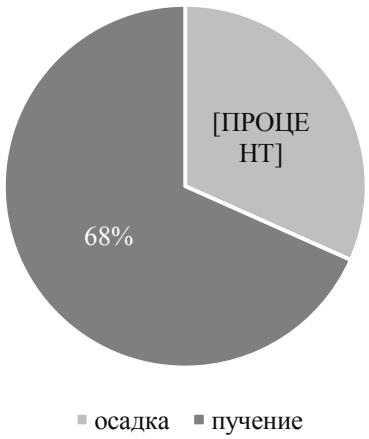



Рис.1. Процентное соотношение опор трубопроводов МН с осадкой и опор с пучением

Усредненная динамика температур оснований МН и планово-высотного положения опор МН представлена на рис. 2.

Осадка наблюдается на фоне несколько более высоких температур грунтов (-1,3°С), нежели пучение (-1,4°С). Более показательна разница динамик пучения и осадки на фоне охлаждения и растепления грунтов оснований (рис. 3). Динамика пучения при охлаждении грунтов выше (2,6 мм в год), нежели при их растеплении (1,8 мм). Динамика осадки напротив: при растеплении грунтов выше (1,4 мм в год), нежели при их охлаждении (1,0 мм).

В заключение следует отметить, что наблюдаемый тренд к растеплению грунтов оснований в текущем состоянии мерзлых пород способствует как осадке, так и выпучиванию (пусть и с разной

силой). Подобные закономерности имеют свои объяснения. Большая осадка при растеплении грунтов реализуется за счет вытаивания подземного льда в верхней части разреза, а также уплотнения нижележащих слоев грунта из-за перехода ММГ из твердомерзлого в пластичномерзлое состояние. Большее морозное выпучивание при растеплении грунтов реализуется за счет снижения силы сцепления талых и мерзлых грунтов со сваей, удерживающих сваю, при промерзании грунта в холодный период года. Сила сцепления снижается из-за вытаивания подземного льда и образования дополнительного объема грунтовой воды. Кроме того, при росте температур ММГ увеличивается толщина слоя сезонного оттаивания, в пределах которого сила сцепления заведомо меньше, чем в пределах нижележащих мерзлых грунтов.

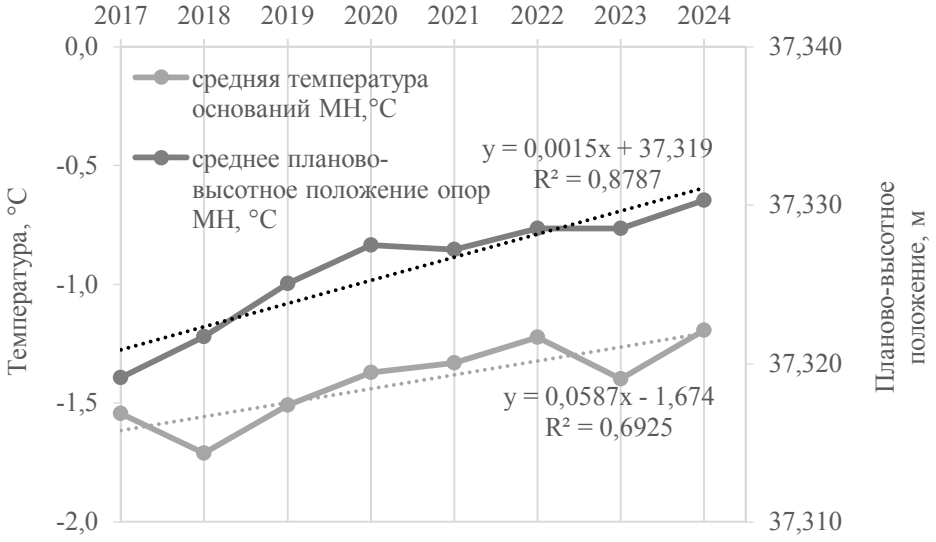



Рис.2. Динамика температур оснований МН и планово-высотного положения опор МН

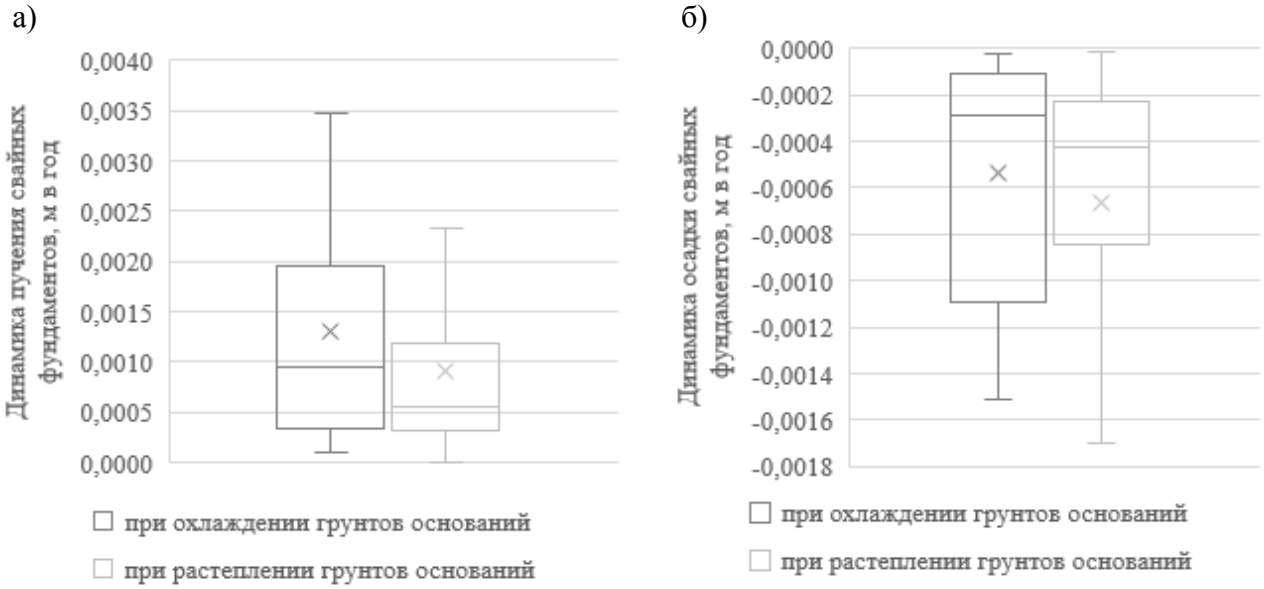



Рис.3. а) Динамика пучения и б) динамика осадки свайных фундаментов при изменении температуры грунтов оснований

Сила и даже направление взаимосвязей между вертикальными перемещениями и температурой грунтов оснований сильно варьирует от опоры к опоре, что объясняется изменчивостью условий на всем протяжении трассы трубопровода. Поэтому важной задачей для дальнейших исследований станет учет ландшафтных и геологических условий, таких как литологический состав грунтов, влажность грунтов, растительность, степень заболоченности, микрорельеф и др. Решение этой задачи позволит более точно определять причины потенциально негативных изменений условий эксплуатации трубопроводов надземной прокладки и предотвращать возникновение нарушений нормативного состояния объектов МТ.

***Литература***

1. Батыров А.М., Королев М.И., Красников А.А. Обоснование конструкции опоры надземных магистральных трубопроводов, снижающей влияние морозного пучения грунта на сваи // Известия Томского политехнического университета //Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 107–116.

2. Новичков А. В., Токарев А. П., Гаррис Н. А. Улучшение условий эксплуатации трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах //Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. –2022. – № 4. – С. 76–88.

3. Мельников В. П. и др. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов //Криосфера Земли. – 2021. – Т. 25. – №. 6. – С. 3–15.

4. Васильев А. А. и др. Тренды деградации мерзлоты Западной Арктики //Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. – 2024. – №. 11. – С. 483-490.

5. Лисин Ю. В. и др. Технические решения по температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов оснований объектов трубопроводной системы" Заполярье–НПС" Пур-Пе" //Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – №. 1. – С. 65-68.

6. Закирова Э. А., Гаррис Н. А. Как избежать выпучивания опор надземных трубопроводов в районах пучинистых грунтов //Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14. – №. 2. – С. 85-92.

## ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

***А.А. Попова, Ю.В. Власова, А.А. Дежникова***
*ООО «Северные Изыскания», г. Москва*

Мониторинг геокриологических условий является необходимым элементом успешной реализации строительных проектов в регионах развития мерзлых грунтов. Этот процесс не только снижает риски и обеспечивает безопасность зданий и сооружений, но и становится частью комплексного подхода к устойчивому строительству. В настоящих тезисах рассмотрен практический опыт разработки программы работ, проекта и непосредственно проведения мониторинга в 2024-2025 гг. на одном из объектов г. Норильска, его значимость, применяемые методы и проблемы, которые выявлены в процессе работы.

Наблюдение за изменением геокриологических условий в рамках геотехнического мониторинга позволяет:

- ✓ Предотвратить аварийные ситуации. Знание о текущем состоянии грунтов и их поведении во времени позволяет прогнозировать возможные риски и уменьшают вероятность обрушений конструкций или других экстренных ситуаций.
- ✓ Экономить ресурсы. Эффективный мониторинг может сократить затраты на ремонт и содержание объектов, так как позволяет заранее выявить потенциальные проблемы и предотвратить их.

В практике мониторинга геокриологических условий применяются различные методы, среди которых можно выделить:

- ✓ Полевые исследования. Данный метод включает в себя наблюдения за инженерно-геологическими процессами, бурение скважин, отбор проб грунта и проведение испытаний на месте.
- ✓ Лабораторные испытания. Пробы грунта, отобранные в ходе полевых исследований, проходят лабораторные испытания для определения их водно-физических, физико-механических и теплофизических характеристик.
- ✓ Мониторинг температуры грунтов. Установка датчиков температуры в скважинах позволяет в режиме реального времени отслеживать изменения температуры грунтов.
- ✓ Мониторинг грунтовых вод. Измерение уровня и химического состава грунтовых вод, в том числе для анализа коррозионной агрессивности грунтов, и взаимосвязь с изменением границ мерзлых пород.
- ✓ Моделирование. Использование математических моделей помогает в прогнозировании поведения грунтов в разные сезоны и при различных климатических условиях. Это может быть особенно актуально в связи с изменением климата.

Опыт реализации проектов геокриологического мониторинга позволил нам выявить некоторые актуальные проблемы:

1. На сегодняшний день существует проблема непонимания заказчиком того, для чего необходим мониторинг и как он должен производится. Несмотря на то, что в нормативной технической документации [5, 6, 7, 8] геотехнический мониторинг описывается именно как комплекс работ, в который могут включатся геодезические работы, лабораторные исследования, геологические работы, экологические измерения, внешние наблюдения и т.д., заказчик может не рассматривать мониторинг как комплексное обследование. Присутствует стремление заказчика выбрать один из видов наблюдений и только по нему производить мониторинг.

2. В написании программы и проекта основной ориентир – нормативные документы. В них есть как и повторения предписаний, так и противоречия. Также не хватает некоторой конкретики, например, по СП 25.13330.2020 [6] глубина заложения термометрических скважин для 1 принципа указана как «Не менее глубины заложения фундаментов», но в случае мелкого заложения фундаментов это некорректно для теплотехнических расчетов. Не указано расстояние от скважины до объекта исследования, условия расположения грунтовых реперов относительно объектов и т.д.

3. Отсутствие описания и тем более, опробования, даже минимального, грунтов при прохождении скважин, как инженерно-геологических, так гидрогеологических. Зачастую с момента изысканий до начала мониторинга проходит 2-3 года. Может измениться планировка поверхности, претерпеть изменения граница мерзлых и талых пород, что естественно отражается на свойствах грунтов основания.

4. По Техническому заданию разработка программ работ и проектов выполняется для каждого из сооружений, а не всей для площадки строительства в целом.

6. Отсутствует единый нормативный документ, который бы описывал порядок обработки материалов полевых наблюдений, а также алгоритмы и критерии последующего анализа измеренных и вычисленных параметров. Существуют некоторые рекомендации для обработки и анализа мониторинга при строительстве на слабых грунтах, для атомных станций и гидротехнических сооружений [1, 2, 3, 4, 9]. Для жилых и промышленных зданий и сооружений единая нормативная документация не создавалась, что приводит к отсутствию однозначных требований к подготовке материалов для технических отчётов, а как следствие – к сложности последующей сдачи их заказчику и дальнейшего использования полученных данных.

7. В нормативных документах [5, 6, 7, 8] не определены зоны ответственности за выполнением дополнительных работ при фиксации отклонений наблюдаемых параметров от ожидаемых. Каким образом следует устанавливать причины отклонений параметров, например, выполнить дополнительные исследования, и кто должен выполнять эти исследования и в рамках какого финансирования. То же самое с разработкой комплекса мероприятий. Под этим может подразумеваться и геотехнические расчеты, и перепроектирование сооружений.

В результате разработки регламентов, программ и проектов геотехнического мониторинга на стадиях строительства и эксплуатации сооружений, контроля строительства элементов сети ГТМ, выполнении наблюдений, предписанных программой работ и выпуску отчетов по результатам мониторинга мы пришли к следующим выводам:

1. Было бы полезно обобщить все требования по разработке документации и проведению ГТМ в едином целевом нормативном документе, в идеале на всех стадиях жизненного цикла сооружения от проведения изысканий до строительства, эксплуатации и реконструкции.

2. Важно разработать и нормативно закрепить перечень необходимых, а также возможных дополнительных контролируемых параметров для мониторинга различных видов знаний и сооружений.

3. Необходимо обучение проведению ГТМ как исполнителей, так и заказчиков работ.

Важно продолжать развивать и внедрять новые технологии и методы мониторинга, чтобы адаптироваться к изменяющимся климатическим условиям и обеспечивать долговечность и надежность строительных объектов.

***Литература***

1 ГОСТ 25358-2012 Грунты. Метод полевого определения температуры

2 ОДМ 218.4.1.002-2020 Организация и проведение геотехнического мониторинга при строительстве земляного полотна на слабых грунтах.

3 Рекомендации по проведению натурных наблюдений за осадками грунтовых плотин, П87-2001 ВНИИГ.

4 Руководство по натурным наблюдениям за деформациями гидротехнических сооружений и их оснований геодезическими методами. П-648, Гидропроект.

5 СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений.
6 СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.
7 СП 305.1325800.2017 Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве.
8 СП 497.1325800.2020 Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила эксплуатации.
9 СТО СРО-Г 60542954 00007–2023 Геодезический мониторинг деформаций зданий и сооружений атомных станций. Обработка данных.

## О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ХРАНИЛИЩА ПРИРОДНОГО ГАЗА В ГАЗОГИДРАТНОЙ ФОРМЕ В ИСКУССТВЕННЫХ ПОЛОСТЯХ, СФОРМИРОВАННЫХ В ТОЛЩЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

***А.С. Портнягин, А.И. Николаев***
*ФИЦ ЯНЦ СО РАН, обособленное подразделение ИПНГ СО РАН, г. Якутск*

Электро- и тепло генерация центральной части Республики Саха (Якутия) и г. Якутска, в частности, где проживает более половины жителей республики, полностью обеспечена за счет использования природного газа. Основные электро- и теплогенерирующие мощности сосредоточены в г. Якутске и до недавнего времени составляли изолированную сеть центрального энергетического блока Якутии. В 2022 году центральный и южный энергоблоки были объединены в общую сеть с двумя мощными генерирующими объектами – Якутская и Нерюнгринская ГРЭС, благодаря чему удалось диверсифицировать генерирующие мощности на два вида топлива – природный газ (Якутская ГРЭС) и каменный уголь (Нерюнгринская ГРЭС). Однако, природный газ остается основным видом топлива для энергетики центральной Якутии. При этом питающие этот район месторождения природного газа расположены в западной части республики и связаны с ним тремя нитками газопровода «Кызыл-Сыр – Мастах – Берге – Якутск». Первую нить газопровода диаметром 530 мм провели в г. Якутск в 1967 году, в дальнейшем газотранспортную артерию расширили до трех ниток с проектной пропускной способностью до 4,5 млрд. м3 в год при давлении газа в газопроводе равном 3,02 МПа. В настоящее время совокупное потребление природного газа в центральной Якутии составляет более 2,2 млрд. м3 газа в год [1].

Несмотря на возможность перетока электрической энергии из южного энергорайона Якутии в центральный, во время аварийного прекращения подачи природного газа, необходимо время для перехода генерирующих мощностей тепло- и электроэнергии на резервные источники топлива, которым в г. Якутске является дизельное топливо. В том числе, на наращивание генерирующих мощностей южного энергоблока, замену топливных форсунок на электро- и теплогенерирующих станциях, что в зимний период может привести к выходу из строя систем подачи тепла, водопровода и канализации. Потому что согласно районированию территории РФ по природно-климатическим условиям, г. Якутск расположен в зоне 1Д, что характеризует данный район как территорию с наиболее суровыми условиями для проживания. Климат в регионе – резко континентальный с небольшим количеством осадков. Среднегодовая температура составляет минус 8,8°С, а влажность воздуха — 69 %. Зима в Якутске исключительно сурова, средняя температура января составляет ниже минус 40°С, минимальные же температуры нередко достирают 50°С мороза, а иногда могут пересечь 60-градусную отметку. При этом, зимний период, когда среднесуточная температура находится ниже нуля, длится с октября по апрель включительно [2].

Недавние события, развернувшиеся в России и связанные с террористическими атаками на топливно-энергетические объекты, показали, что газотранспортная инфраструктура подвержена рискам повреждения не только в результате техногенных аварий, но и в следствие злонамеренных действий, как произошло с газопроводом «Северный поток». Также очень уязвимыми к современным средствам поражения оказались наземные хранилища жидкого топлива. Поэтому вопрос устройства подземных хранилищ жидкого и газообразного вида топлив стоит очень остро. Однако обустройство хранилищ в подходящих естественных геологических формациях связан, с проведением большого объема геолого-разведочных работ по их поиску и изучению, что требует большого вливания материальных средств без четко прогнозируемого результата, а главное занимает большое количество времени. Поэтому изучение возможности обустройства хранилищ жидкого и газообразного топлива в искусственных полостях образованных в толще многолетнемерзлых пород на наш взгляд является очень актуальным.

Искусственные полости в многолетнемерзлых породах получают путем теплового воздействия на залегающие на глубине более 10 метров песчаные грунты с дальнейшим их размывом и извлечением песка на поверхность. Данная технология разработана и опробована ООО «Подземгазпром», для сооружения хранилищ жидких углеводородов, а также утилизации буровых растворов применяемых при строительстве нефтяных и газовых скважин [3, 4]. Подобные хранилища были обустроены на западе Якутии в пределах Мастахского ГКМ, в окрестностях г. Норильска и на севере полуострова Ямал на Бованенковском НГКМ. При этом, хранилище дизельного топлива построенное на Мастахском ГКМ, объемом более 9 тыс. м3, функционирует уже более 30 лет без потери качества хранимого продукта [5].

Так, для сооружения подземного резервуара на Бованенковском НГКМ в отложениях песка мощностью 24 м и залегающих на глубине 11,5 м под слоем отложений суглинков, была пробурена скважина на глубину 37 м с обсадкой по всей длине ствола скважины трубой Ш 426 мм. Для снижения теплового воздействия на околоскважинные породы применялась полиэтиленовая теплоизоляция обсадной трубы. Далее внутри обсадной трубы монтировался добычной агрегат, состоящий из погружного насоса, отводящей водо-песчаную пульту трубы, а также труб подачи воды, воздуха и пара. При подаче воды и пара происходит оттаивание мерзлого песка, который осаждался на дне образующейся подземной камеры и далее насосом водо-песчаная пульпа поднималась на поверхность. Таким образом, удалось добыть за 18 суток более 5000 м3 песка. По результатам звуколокационного исследования (Рис. 1) образовавшейся полости было установлено, что полость имеет форму вертикально ориентированного цилиндра с диаметром основания равным 9 м и высотой 22 м. Свод резервуара расположен на глубине 11 метров и имеет купольную форму [4].

Таким образом, обустройство подземных резервуаров в отложениях мерзлого песка является опробованной технологией с достаточным количеством реализованных объектов на Ямале, севере Тюменской области и на территории Якутии, в частности.

Создание подземных хранилищ природного газа в виде газогидратов обусловлено рядом положительных факторов, таких как: Газогидраты способны вместить в свой объем до 170 объемов газа в свободном объеме, что эквивалентно количеству компримированного газа помещенного в резервуар аналогичного объема, что обеспечивает достаточно большую удельную газоемкость хранилища [6]. Газогидраты стабильны при отрицательных температурах и небольшом избыточном давлении газа над гидратом, в отличие от сжиженного природного газа, температура кипения которого равна минус 160°С. При переходе природного газа в газогидратное состояние происходит концентрирование в гидрате более тяжелых гомологов метана С2-С4, что приводит к увеличению теплотворной способности газа, полученного из гидрата [7, 8]. Процесс дегазирования газогидратов или их диссоциации легко прогнозируем и является саморегулируемым процессом.

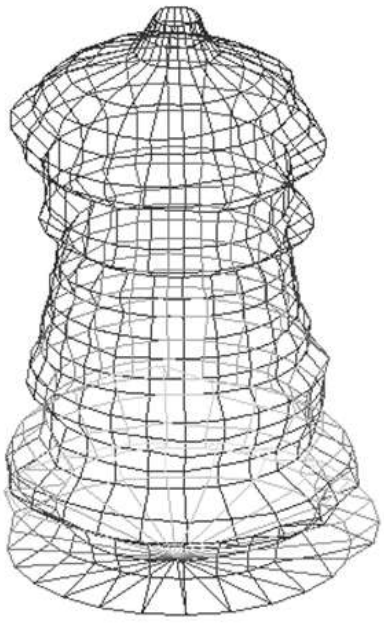


Рис. 1. Форма подземного резервуара обустроенного на Бованенковском НГКМ [4]

Строительство подобного хранилища в близи города Якутск может обеспечить бесперебойное снабжение природным газом центральной части республики в условиях прекращения его подачи по

тем или иным причинам с газовых месторождений. Возможность создания хранилища в этой местности обеспечена большой глубиной распространения мерзлых и морозных грунтов. Так, согласно данным бурения на левом берегу среднего течения р. Лена, мощность толщи ММП составляет – 350-450 м, а нулевая изотерма находится на уровне 400-600 м. При этом, горные породы залегающие на глубине до 250 м характеризуются преимущественно морскими и континентальными осадочными породами – глинами и песками [9].

Однако, для применения внутримерзлотных резервуаров для хранения природного газа в газогидратном состоянии в отличие от хранения жидких углеводородов необходимо соблюдение нескольких условий: во-первых – глубина заложения полости должна обеспечивать литостатическое давление на купол резервуара выше чем предполагаемое давление хранения или образования газогидратов и во-вторых – должна быть гарантирована газонепроницаемость купольной части резервуара, так как при его обустройстве могут образовываться талики вдоль ствола скважины.

Также нерешенным остается вопрос получения и диссоциации газогидратов, так как данные процессы должны быть достаточно прогнозируемыми и интенсивными, чтобы при необходимости покрыть потребности промышленности и населения в природном газе, а также оперативно восполнить его запасы. Для промышленного получения газогидратов применяются несколько различных групп методов: Динамические методы, где образование гидратов происходит при движении потоков газовой и жидкой фаз. [10, 11]. Такой принцип предполагает использование различных перемешивающих приспособлений, барботажа газа через воду, подачу газовой и водной фаз в виде аэрозолей и других методов. Также газогидраты можно получать в статических условиях, где процесс образования газогидратов регулируется только термобарическими условиями в реакционной системе [12, 13]. При этом возможно использование для интенсификации процессов образования гидратов различных добавок – промоторов гидратообразования как в динамических методах, так и в статических условиях [14].

Другим нерешенным вопросом является применение подземных резервуаров как хранилища газогидратов, которые будут произведены промышленным способом на поверхности и помещены в резервуар в виде пеллет и мелкодисперсного порошка или как реактора, где газогидраты будут получены динамическим методом или в статических условиях и далее будут храниться в виде газогидратного монолита. В первом случае, можно контролировать процесс образования газогидратов, отслеживать кинетические параметры его образования и полноту этого процесса. Также диссоциация гидратов в этом случает будет проходить более интенсивнее, ввиду наличия пористости в хранящемся продукте. Однако он подразумевает создание производственной инфраструктуры, завода по производству газогидратов, что может привести к нецелесообразному удорожанию проекта, противоречащему его концепции как резервного хранилища. Во втором случае, не требуется строительства сложной инфраструктуры, но усложняется процесс регулирования гидратообразования и его мониторинга, а также снижение удельной вместимости хранилища, за счет низкой гидратонасыщенности получаемого продукта.

Таким образом, разработка концепции обустройства хранилища природного газа в виде газовых гидратов в мерзлых песчаных грунтах криолитозоны не лишена перспективы, однако нуждается в решении поставленных в сообщении вопросов. Во-первых, необходимо решить задачу подготовки герметичного резервуара, способного выдерживать внутреннее давление газа, необходимое для хранения или образования газогидратов. Во-вторых, выбрать концептуальную схему использования криорезервуара как хранилища гидратов или как реактор для их образования. В-третьих, выбрать методы интенсификации образования/диссоциации гидратов природного газа.

Работа выполнена в рамках проектов Госзадания Минобрнауки РФ FWRS–2026–0001 и FWRS-2025-0045 (рег. № 125121014137-4) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

***Литература***

1. Постановление Главы Городского округа г. Якутск от 05.06.2024 г. № 126п «Об утверждении Схемы газоснабжения городского округа «город Якутск» до 2032 года / Режим доступа: https://yakutskcity.ru/upload/iblock/326/dhw5d0vvnxtnakfxy52r5bd8g1rm11t8/126%D0%9F.pdf

2. Пучнин А.Н., Якутин М.В. Изменения климата Центральной Якутии в XX веке и эволюция аласных экосистем // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2008 – Т.3. – №2. – С. 114-118.

3. Аксютин О.Е., Казарян В.А. и др. Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетнемерзлых осадочных породах. Серия Современные нефтегазовые технологии. – Ижевск:

Издательство «ИКИ», 2013. – 432 с.

4. Хрулев А.С. Строительство подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах для хранения жидких углеводородов и захоронения промышленных отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012 – №7. – С. 228-236.

5. Язев Е.Н., .Кузьмин Г.П. Вчера, сегодня и завтра подземного хранения углеводородов в многолетнемёрзлых грунтах // Наука и техника в Якутии. – 2024. – №1. – С. 14-19. doi:10.24412/1728-516X-2024-1-14-19.

6. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 235 с.

7. Верейкина В.В., Калачева Л.П., Иванова И.К. и др. Влияние условий получения гидратов природного газа на коэффициент жирности газа в гидратной фазе / Геология и нефтегазовый потенциал Республики Саха (Якутия): проблемы разведки и освоения: сборник тезисов Всероссийской научной конференции. – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2022. – С. 18-19.

8. Портнягин А.С., Иванова И.К., Калачева Л.П. и др. Особенности образования гидратов природного газа со структурами КС-I и КС-II в кварцевом песке с водой и растворами полимеров // Георесурсы. – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 89-100. – DOI 10.18599/grs.2025.3.7.

9. Кириллин А.Р., Железняк М.Н., Жижин В.И. Новые данные о мощности многолетнемерзлой толщи на Лено-Алданском междуречье // Криосфера Земли. – 2022. – T.XXVI. – №3. – С. 3–11. DOI: 10.15372/KZ20220301.

10. Мельников В.П., Нестеров А.Н., Феклистов В.В. Устройство для получения газогидратов. Патент России № 2166348. 2001. Бюл. № 13.

11. Якушев В.С., Квон В.Г., Герасимов Ю.А., Истомин В.А. Современное состояние газогидратных технологий. – М.: ООО «ИРЦ «Газпром», 2008. – 88с.

12. Семенов М.Е., Шиц Е.Ю., Сафронов А.Ф. Исследование особенностей искусственного получения гидратов метана и этана в условиях свободной конвекции // Газохимия. – 2011. – №1(17). – С. 18-23.

13. Семенов М.Е., Шиц Е.Ю., Портнягин А.С. Способ получения гидратов природного газа и разработка на его основе концептуальной технологической схемы процесса их производства // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 3. – С. 53—58.

14. Нестеров А.Н. Кинетика и механизм гидратообразования газов в присутствии поверхно стно активных веществ / Диссертация доктора хим. наук. Тюмень, 2006. – 280 с.

## УСТОЙЧИВОСТЬ ГИДРАТОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ ПОНИЖЕНИИ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЕ НИЖЕ 273 К

***А. М.Решетников***

*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия*

Газовые гидраты выглядят как снег или рыхлый лед. В этих кристаллических соединениях молекулы воды образуют ячейки, содержащие газ. Уникальное свойство газовых гидратов заключается в том, что один объем гидрата может хранить до 175 объемов газа [1]. Благодаря своему свойству аккумулировать газ газовые гидраты рассматриваются для хранения и транспорта природного газа, как альтернатива сжижению газа. Интерес к гидратообразованию в пористой среде связан также с возможностью временного хранения попутного нефтяного газа. Для получения гидратов на месторождении из попутного нефтяного газа целесообразнее будет использование бурового раствора. Однако присутствие солей существенно влияет на кинетику образования/диссоциации изменяя равновесные условия [2]. Так как додецилсульфат натрия (SDS) является промотором гидратообразования интерес представляет комбинированный эффект соли и SDS на стабильность гидратов при изменении давления. Кроме того, одним из способов извлечения газа из гидратов является понижение давления, поэтому необходимо знать влияние соли, SDS и их совместное влияние на скорость диссоциации.

Целью работы являлось исследование влияния термодинамического ингибитора (NaCl) и кинетического промотора (SDS) на диссоциацию гидрата природного газа в пористой среде в зависимости от фракционного состава и влагонасыщенности при температуре ниже 273К.

В экспериментах использовался природный газ Уренгойского месторождения (об.%: $C_1$ — 96.41, $C_2$ —1,46, $C_3$ — 0.53, i-$C_4$ — 0.063, n-$C_4$ — 0.07, $C_5$ + и более — 0.069, $CO_2$ — 0.188, $N_2$—1.21). Гидраты получали из дистиллированной воды, растворов SDS 0.1 масс. %, раствора NaCl 3 масс. % или их смесей SDS + NaCl. В качестве пористой среды использовалась песчаная засыпка (фракция 100-200 мкм и 200 - 500 мкм) с 50% или 100% насыщением влагой. Экспериментальные данные *p-V-T* измерений во время роста гидрата природного газа были использованы для расчета потребления газа $\Delta n$ и конверсии воды в гидрат $C_{wh}$. На основе полученных данных по образованию газовых гидратов в ПЗ были проведены эксперименты по диссоциации. В качестве условия рассматривалась возможность хранения и устойчивость газовых гидратов при отрицательных температурах и незапланированных перепадах давления. Кроме того, один из методов извлечения гидрата природного газа из гидратных залежей основан на разгерметизации. Для сравнения рассмотрены данные по диссоциации газовых гидратов, полученных из воды, раствора соли 3 масс.%, раствора SDS 0.1 масс.% и смеси NaCl+SDS в ПЗ с размером частиц 100-200 мкм и 200-500 мкм при полном и частичном насыщении. Снижение давления проводили в два этапа. На первом этапе давление снижали примерно до линии равновесия лед-гидрат-газ. На втором этапе давление медленно снижали до давления эксперимента, стараясь не вызывать изменения температуры в реакторе.

Были проведены три отдельные серии экспериментов. В первой серии экспериментов давление было понижено в область метастабильных состояний [3]. В этой области гидраты могут оставаться в метастабильном состоянии или диссоциируют на лед и газ. Во второй серии экспериментов давление было понижено примерно до 1.3 МПа. Это давление находится ниже области метастабильных состояний и гидраты должны диссоциировать либо на лед и газ, либо на переохлажденную воду и газ с последующей кристаллизацией переохлажденной воды. И, в этом случае, агрегатное состояние жидкости должно определить скорость диссоциации гидратов. В третьей серии экспериментов давление было понижено до атмосферного давления. Следует отметить, что природный газ образует как смешанные гидраты структуры КС-2, так и механическую смесь гидратов структур КС-1 и КС-2. Первым диссоциирует гидрат с более высоким равновесным давлением, поэтому необходимо рассматривать условия равновесия для гидрата метана. Кроме того, учитывалось, что добавление NaCl смещает условия равновесия.

На рис. 1 представлены данные по диссоциации гидратов природного газа полученные из воды в ПЗ фракции 100-200 мкм и 200-500 мкм с частичным и полным насыщением. Давление было снижено в область метастабильных состояний, ограниченной линиями лед–гидрат–газ и переохлажденная вода–гидрат–газ. Из представленным данных на рис. 2, видно, что произошла частичная диссоциация гидратов. После незначительной диссоциации в начальный период времени диссоциация гидратов прекратилась. После прекращения диссоциации образец медленно нагрели

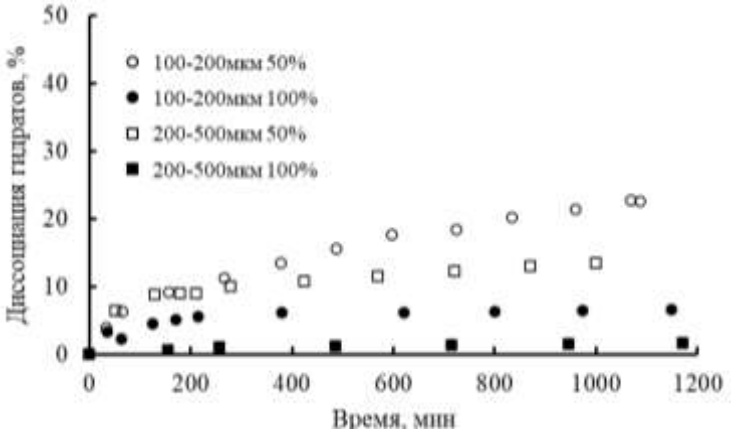
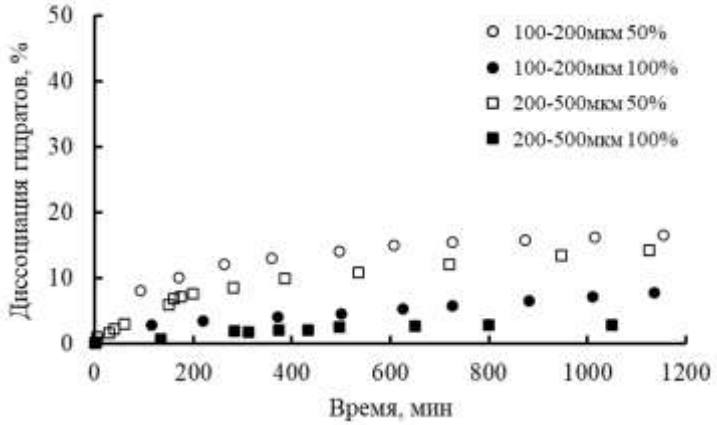



Рис. 1. Диссоциация гидратов природного газа в метастабильной области.
○ ● - гидраты, полученные в ПЗ фракции 100-200 мкм с частичным и полным насыщением водой соответственно. □ ■ - гидраты, полученные в ПЗ фракции 200-500 мкм с частичным и полным насыщением водой соответственно. Конверсия воды в гидрат составила от 70 до 80%.

и диссоциация продолжилась по линии метастабильного равновесия переохлаждающаяся вода-гидрат-газ ($CH_4$). Это означает, что гидрат не был законсервирован льдом и основная часть гидрата не контактировала с образовавшимся льдом. Иначе начало диссоциации при нагреве совпало бы с плавлением льда (273.15К).

Вторая серия экспериментов проводилась при давлении 1.3-1.4 МПа. На рис. 2 представлены экспериментальные данные по диссоциации гидрата. Прекращение диссоциации свидетельствует о




консервации льдом. Для проверки в одном из экспериментов образец был нагрет и частично диссоциация продолжилась при 271 К. Необходимо напомнить, что рассматривается поведение смешанных гидратов природного газа. Первоначально произошла частичная диссоциация гидратов метана, т.к. гидрат структуры КС-2 находился в зоне стабильности. После нагрева до 271К уже возможна диссоциация гидратов структуры КС-2.

Рис. 2. Диссоциация гидратов при давлении 1.3-1.4 МПа.
○ • - гидраты, полученные в ПЗ фракции 100-200 мкм с частичным и полным насыщением водой соответственно. □ ■ - гидраты, полученные в ПЗ фракции 200-500 мкм с частичным и полным насыщением водой соответственно. Конверсия воды в гидрат составила от 70 до 80%.

В третьей серии экспериментов было исследовано поведение гидратов при атмосферном давлении, рис. 3. При таком давлении обе структуры КС-1 и КС-2 находятся вне зоны стабильности и должны диссоциировать. Гидраты, полученные в ПЗ с меньшим количеством воды, диссоциировали интенсивнее. Однако спустя 200 минут после снижения давления во всех образцах диссоциация резко замедлилась – произошла самоконсервация. Дальнейшую диссоциацию гидратов наблюдали при нагреве выше 273К.

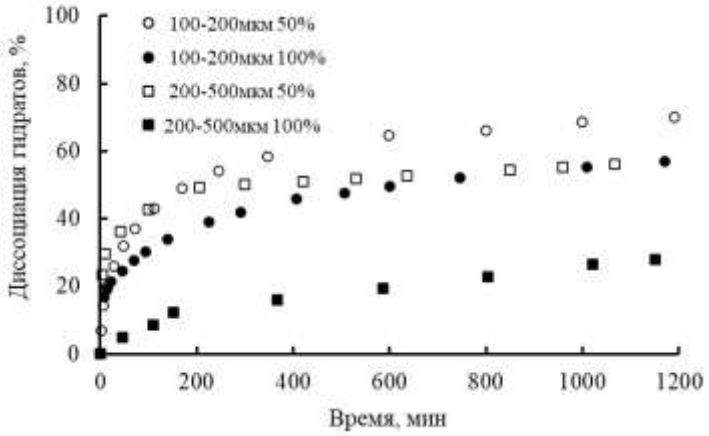



Рис. 3. Диссоциация гидратов при атмосферном давлении.
○ ● - гидраты, полученные в ПЗ фракции 100-200 мкм с частичным и полным насыщением водой соответственно. □ ■ - гидраты, полученные в ПЗ фракции 200-500 мкм с частичным и полным насыщением водой соответственно. Конверсия воды в гидрат составила от 70 до 80%.

На рис. 4 приведены данные по диссоциации гидратов при давлении 1.8 МПа, полученные в ПЗ из раствора 3 масс.% NaCl. Видно, что существенная диссоциация гидратов произошла в ПЗ с полным насыщением. В то же время гидраты в ПЗ с частичным насыщением оказались более устойчивыми.

При полном насыщении все поровое пространство заполнено раствором. В исследованиях [2,4] показано, что гидрат образуется в центре поры. Исходя из этого должно происходить отторжение соли к периферии поры. А диссоциация гидратов, как и плавление льда, начинается с поверхности.

При таком контакте гидрата с солевым раствором можно объяснить существенную диссоциацию в образцах со 100% насыщением. В случаи с 50% насыщением, исходя из выше приведенного предположения, гидрат образуется на периферии поры и соль отторгается в центр поры.

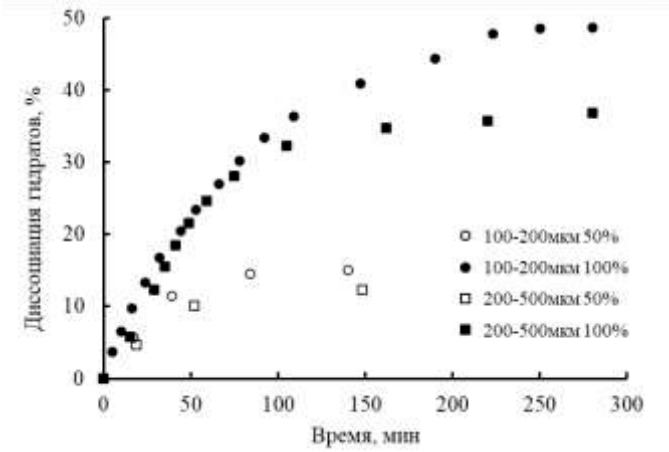



Рис. 4. Диссоциация гидратов при давлении 1.8 МПа, полученных из раствора 3 масс. % NaCl. ○ • - гидраты, полученные в ПЗ фракции 100-200 мкм с частичным и полным насыщением соответственно. □ ■ - гидраты, полученные в ПЗ фракции 200-500 мкм с частичным и полным насыщением соответственно. Конверсия воды в гидрат составила от 55 до 60%.

Во второй серии экспериментов с добавкой NaCl, давление было снижено до 1.4 МПа. При снижении давления, произошло незначительное увеличение процента диссоциирующих гидратов, рис. 5. Это объясняется тем, что гидраты находятся вне области метастабильности и на гидраты повлияло незначительное увеличение движущей силы.

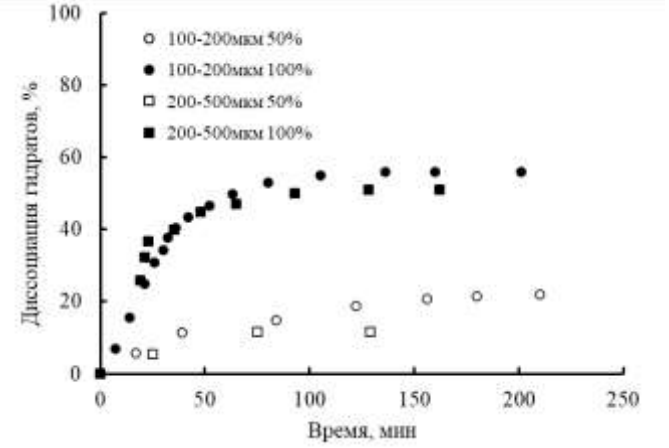



Рис. 5. Диссоциация гидратов при 1.4 МПа, полученных из раствора 3 мас.% NaCl. ○ • - гидраты, полученные в ПЗ фракции 100-200 мкм с частичным и полным насыщением соответственно. □ ■ - гидраты, полученные в ПЗ фракции 200-500 мкм с частичным и полным насыщением соответственно. Степень превращения воды в гидрат составила от 55 до 60%.

В третьей серии экспериментов при снижении давления до атмосферного происходит полная диссоциация гидратов, рис. 6. В отличие от диссоциации гидратов из чистой воды, здесь не наблюдалось консервации. То есть в присутствии соли происходит быстрая и полная диссоциация гидратов после снижении давления до атмосферного. Соль влияет на скорость диссоциации не только при понижении давления, но и при нагревании о чем сообщалось в [5].

Ранее в [6] было показано, что добавление SDS в раствор соли снижает ингибирующее действие соли при образовании гидратов. Поэтому были проведены эксперименты по изучению устойчивости гидратов, полученных из раствора SDS+NaCl.

На рис. 7а приведены сравнительные данные по диссоциации гидратов из раствора SDS 0.1 масс.%+ NaCl 3 масс.% при давлении 1.4 МПа. При наличии соли и температуре 268 К отсутствует метастабильная область. Как показали эксперименты с NaCl влияние на диссоциацию оказывает движущая сила, поэтому давление понизили до 1.4 МПа. Из представленных на рис. 7а данных

видно, что диссоциация не зависит от размера частиц и влагонасыщения. За 100 минут разлагается примерно 80% гидратов. Такое поведение образцов связано с добавлением SDS в раствор соли.

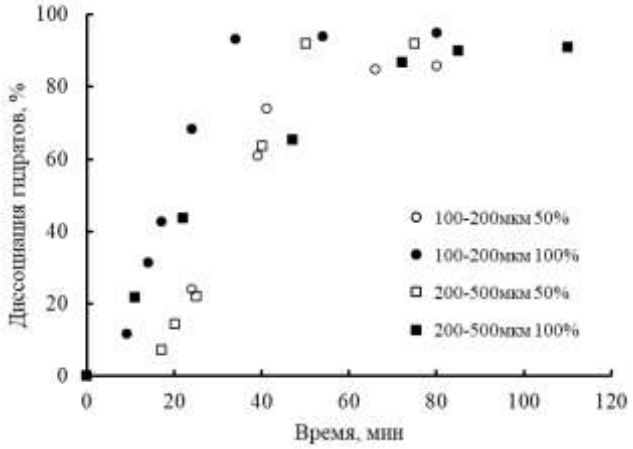



Рис. 6. Диссоциация гидратов при атмосферном давлении, полученных из раствора 3 масс.% NaCl. ○ • - гидраты, полученные в ПЗ фракции 100-200 мкм при частичном и полном насыщении соответственно. □ ■ - гидраты, полученные в ПЗ фракции 200-500 мкм при частичном и полном насыщении соответственно. Степень превращения воды в гидрат составила от 55 до 60%.

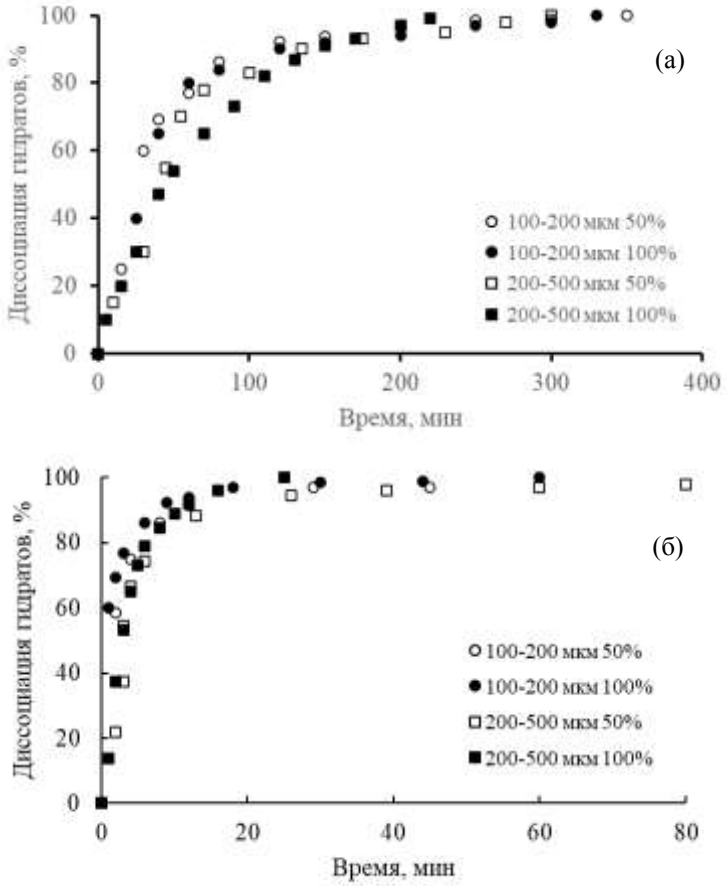



Рис. 7. Диссоциация гидратов природного газа полученых из раствора 0.1 масс.% SDS + 3 масс.% NaCl. а – при давлении 1.4 МПа, б - при атмосферном давлении. ○ • - гидраты, полученные в ПЗ фракции 100-200 мкм с частичным и полным насыщением соответственно. □ ■ - гидраты получены в ПЗ фракции SB 200-500 мкм при частичном и полном насыщении соответственно. Степень превращения воды в гидрат составила от 60 до 70%.

При атмосферном давлении гидраты, полученные из раствора SDS+ NaCl, рис. 7б, диссоциируют значительно быстрее, чем при давлении 1.4 МПа. По всей видимости это связано с увеличением движущей силы процесса диссоциации. Кроме того, если сравнивать диссоциацию гидратов с

добавкой NaCl и SDS+NaCl, видно, что в растворе SDS+ NaCl диссоциация гидратов идет значительно быстрее. Это связано с тем, что добавка SDS вспенивает образец и предотвращает образование сплошной корки льда. Как результат полностью отсутствует эффект самоконсервации гидратов. Поэтому следует учитывать, что добавление SDS в раствор NaCl не только снижает ингибирующее действие соли на стадии роста гидратов, но и снижает устойчивость гидратов при диссоциации.

**Заключение**

Исследование устойчивости газовых гидратов к снижению давления при температурах ниже 273 К в ПЗ с размером частиц 100-200 мкм и 200-500 мкм показало:

- устойчивость гидратов, полученных в ПЗ из чистой воды, зависит от насыщения и более устойчивыми являются образцы с полным насыщением;
- добавка NaCl изменила зависимость стабильности гидратов от насыщения, и наиболее стабильными стали образцы с неполным насыщение;
- добавка SDS в раствор NaCl резко снижает стабильность гидратов при снижении давления;
- при понижении давления до атмосферного гидраты с добавками NaCl и SDS+ NaCl полностью диссоциируют без эффекта самоконсервации.

Полученные результаты важны для понимания гидратообразования в минерализованных коллекторах и могут быть использованы при разработке технологий временного хранения природного газа в виде газовых гидратов.

**Благодарности**: Исследование выполнено в Институте криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2026-0023, FWRZ-2024-0003).

***Литература***

1 Ye Y., Changling L. Natural Gas Hydrates Experimental Techniques and Their Applications. // Springer Geophysicsr - 2013.

2 Sun S.C., Kong Y.Y., Zhang Y., Liu C.L. Phase equilibrium of methane hydrate in silica sand containing chloride salt solution // Journal of Chemical Thermodynamics. — 2015. — Vol. 90. — P. 116-121.

3 Melnikov V.P., Nesterov A.N., Reshetnikov A.M., Zavodovsky A.G. Evidence of liquid water formation during methane hydrates dissociation below the ice point // Chemical Engineering Science. — 2009. — Vol. 64. — P. 1160-1166.

4 Sun S.C., Liu C.L., Ye Y.G., Liu Y.F. Phase behavior of methane hydrate in silica sand//Journal of Chemical Thermodynamics. — 2014. — Vol. 69. — P. 118-124.

5 Chong Z.R., Chan A.H.M., Babu P., Yang M., Linga P. Effect of NaCl on methane hydrate formation and dissociation in porous media // Journal of Natural Gas Science and Engineering. — 2015. — Vol. 27. —P. 178-189.

6 Reshetnikov A.M. Influence of SDS on the Growth of Natural Gas Hydrates in a Sand Bed Depending on Saturation and Mineralization of Pore Moisture // Recent Innovations in Chemical Engineering. — 2024. — Vol. 17. — P. 69–81.

## ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАНДШАФТНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

***Ф.М.Ривкин[1], А.Л.Энтин[2]***

*[1]Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г.Тюмень*

*[2]Географический ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова, г.Москва*

Одним из основных факторов, влияющим на трансформацию геокриологической обстановки в верхней части разреза на фоне современного климатического тренда — это осадка пород при их оттаивании. Пространственная дифференцированность осадки грунтов обусловлена как пространственной неоднородностью положения кровли мёрзлых пород (МП), так и свойствами оттаявших грунтов. Это, в целом, обуславливает и пространственную дифференцировалось преобразования современного микрорельефа. Геокриологические закономерности этого явления, рассматривались и ранее [1, 2, 3]. Прогнозировалось изменение ландшафтно-геокриологических условий в смежных микрорайонах в двухмерном варианте. В рамках поставленных задач основное внимание уделялось установлению общих закономерностей трансформации микрорельефа, то есть, без учёта актуальных топографических условий участка. С одной стороны, это позволило и

качественно и количественно оценить закономерности изменения ландшафтно-геокриологической остановки в том числе и с учётом парагенезиса деградационных и аградационных процессов в грунтах [4], но не позволяло прямо использовать полученные данные для получения прогнозной картографической модели ландшафтно-геокриологических условий, так как не учитывала пространственного изменения топографии поверхности и условий поверхностного стока.

Основная цель данного исследования – совершенствование методики прогноза изменения ландшафтно-геокриологических условий для разработки прогнозных картографических моделей.

Для моделирования трансформации поверхности использован, в рамках поставленной задачи, метод алгебры карт [5]. В рамках реализации метода алгебры карт характеристики поверхности представляются с помощью покрытий, чаще всего в виде регулярных сеток с ячейками квадратной формы. Над ячейками можно производить «обычные» арифметические операции, такие как сложение и умножение [6]. Топографическое покрытие, в каждой ячейке это абсолютная высота местности. Над каждой из ячеек (её численным значением) можно вычислить прогнозное абсолютное значение высоты местности используя величину осадки грунтов при оттаивании как функцию времени (Рис. 1).

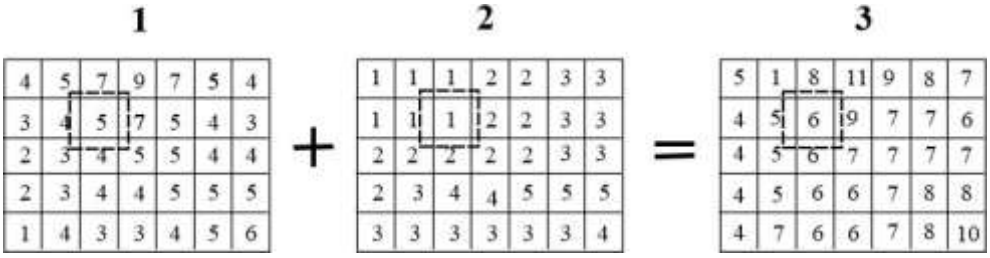



Рис. 1. Принцип работы алгебры карт:
1 – исходная ЦМР; 2 – приращение отметок ЦМР; 3 – прогнозная ЦМР

Это, в целом, корреспондируется с системой матричного анализа, использованной для разработки базовой ландшафтно-геокриологической картографической модели ключевого участка [1, 7]. В таблице 1 приведена результирующая схема районирования к ландшафтно-геокриологической карте, то есть она является и основной частью легенды к картографической модели. Индексы в таблице — это идентификаторы ландшафтно-геокриологических районов в электронной базе данный к геоинформационной картографической модели. Каждый проиндексированный микрорайон, выделенный в таблице, имеет как регулярное цифровое топографическое покрытие (ЦМР), так и содержит функцию величины осадки грунтов при оттаивании. Проведение простого расчёта по аналогии с методом алгебры карт позволяет получить сначала прогнозную ЦМР и на этой основе трансформировать исходную картографическую модель ландшафтно-геокриологических условий в прогнозную с учётом изменения поверхностных условий

| | Геолого-генетические комплексы отложений и характеристика основных криолитологических разрезов. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ландшафтно- | Буквенно-числовые индексы | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |

в результате осадки грунтов при оттаивании.

Таблица 1.

| геокриологическая характеристика | ладшафтно-геокриологических районов | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | | | | 4a | 5a |
| | b | 1b | 2b | 3b | | |
| | c | | | | 4c | 5c |
| | d | | | | 4d | |
| | e | 1e | 2e | 3e | | |
| | f | 1f | 2f | 3f | | |
| | g | 1g | | | | |

Результирующая таблица матричного анализа ландшафтно-геокриологических условий

Таким образом исходными позициями для разработки прогнозной картографической модели являются:

- цифровая модель рельефа (ЦМР) участка исследования;
- ландшафтно-геокриологической картографической моделью участка;
- криолитологическая характеристика разреза и свойства грунтов, необходимые и достаточные для расчёта осадки грунтов при оттаивании;
- прогнозная оценка глубины положения кровли ММП на прогнозируемый период времени.

На тестовом участке были проведены комплексные исследования, выполнено дешифрирование КС высокого разрешения, полевая ландшафтно-геокриологическая съёмка, буровые и геофизические исследования (ВЭЗ и ЭП), комплекс лабораторных исследований (полевых и стационарных), прогнозное моделирование геокриологических условий, оценка величины озадки грунтов при оттаивании для каждого инженерно-геокриологического микрорайона. На этой основе была разработана ландшафтно-геокриологическая картографическая модель участка [1,7].

Для трансформации рельефа в контуре каждого ландшафтно-геокриологического микрорайона была получена цифровая модель рельефа, информация по положению кровли ММП и результирующая осадка грунтов (осадка поверхности приравнивается к величине осадки грунтов) при оттаивании на прогнозируемый период. На этой основе исходная ландшафтно-геокриологическая карта была трансформирована в прогнозную (на 2050 и 2099 годы) с учётом изменения поверхностных условий в результате осадки грунтов при оттаивании.

***Литература***

1 Ривкин Ф.М., Власова Ю.В., Пармузин И.С. Закономерности изменения геокриологических условий в результате осадки мерзлых грунтов при оттаивании // Криосфера Земли. – 2017. - Т. XXI. - № 6, - С. 26-34.

2 Осадчая Г.Г. Мерзлотно-ландшафтная дифференциация Большеземельской тундры: современное состояние и использование при освоении. Автореф. дис. д-ра геогр. наук. – Москва. – 2016. – 50 с.

3 Ривкин Ф.М., Булдович С.Н. Закономерности новообразования мерзлых пород на фоне положительного климатического тренда // Криосфера Земли. - 2024, - Т. XXVIII. - № 1. - С. 15–22. DOI: 10.15372/KZ20240102. EDN: BRODEN.

4 Ривкин Ф.М., Булдович С.Н., Каверин Д.А. Парагенезис деградационных и аградационных процессов в мерзлых грунтах // Криосфера Земли. –2025. -Т. XXIX. - № 1. - С. 25–36. DOI: 10.15372/KZ20250103. EDN: VERPVK.

5 Кошель С. М. Моделирование рельефа по изолиниям // Университетская школа географической картографии. К 100-летию профессора К. А. Салищева / под ред. А. М. Берлянт. М.: Аспект Пресс, 2005. -С. 198–208.

6 Лурье И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков: – Москва: КДУ, 2010. –424 с.

7 Власова Ю.В., Кюхри П., Мажитова Г.Г., Марченко С., Пармузин И.С., Ривкин Ф.М. Геокриологическое картирование участка «Сейда» в рамках проекта “CARBO-NORTH/ В сб. Материалы Четвертой конференции геокриологов России. МГУ М34 имени М.В. Ломоносова, 7-9 июня 2011 г. Т.2. Часть 5. Региональная и историческая геокриология. –М., 2011, Университетская книга. –С. 37-40.

# ШЛИРОВАЯ КРИОТЕКСТУРА МЁРЗЛЫХ ТОРФЯНИКОВ КАК ФАКТОР ЗАТУХАНИЯ ГЕОРАДАРНОГО СИГНАЛА

***П.А. Рязанцев, М.О. Цветков***
*Институт геологии КарНЦ РАН, г. Петрозаводск*

Георадиолокация широко используется для решения задач геокриологии, так как мёрзлые грунты контрастны по электрофизическим свойствам в сравнении с немёрзлыми, что порождает интенсивный отклик в волновом поле [1–3]. При исследовании субарктических мёрзлых торфяников, например полигональных или бугристых болот, подобный эффект усиливается, так как влажный торф имеет диэлектрическую проницаемость на порядок больше в сравнении как с мерзлым торфом, так и с подстилающим минеральным грунтом [4–6]. Как результат, в большинстве случаев на георадарных записях можно уверенно обнаружить отражающую границу, сформированную на подошве сезонно-талого слоя (СТС) мерзлого торфяника, и достаточно точно определить мощность СТС [7–9]. Также георадар уверенно детектирует области таяния мерзлоты (талики) из-за их повышенной влажности в сравнении с окружающими грунтами.

Впервые аномальное затухание георадарного сигнала при отражении от кровли мерзлоты на буграх морозного пучения (пальза) было показано в работе Дулиттла и др. [10], где этот эффект объяснялся процессами рассеивания и поглощения на границе оттаивания-промерзания. Также отмечалась сезонная вариативность результатов георадарного изучения торфяных бугров – в летний период, по сравнению с зимним, нижняя граница ледяного ядра не была выявлена, что объяснялось повышенным поглощением в СТС [11]. Аналогичные сценарии наблюдались и для торфяных плато [12,13], где с увеличением глубины в мерзлом торфе регистрировалось сильное ослабление георадарного сигнала по сравнению с вмещающими немёрзлыми грунтами. Кроме эффекта поглощения, могут существовать и иные механизмы избыточного затухания георадарного сигнала, связанные с геометрическими свойствами среды. Так, например, известно влияние тонких неоднородностей, таких как трещины, на амплитуду отражённого сигнала в зависимости от отношения их толщины к длине волны [14]. В свою очередь, тонкий слой льда может выступать диспергирующим волноводом [15], а неоднородное распределение шлиров – локальными точками, выступающими мелкомасштабными рассеивателями [16]. Формирование торфяных бугров морозного пучения обусловлено сегрегационными ледяными линзами, совокупность которых формирует ядро бугра со шлировой криогенной текстурой [17].

В связи с чем следует предположить значительное влияние криогенных текстур мерзлого торфа на распространение электромагнитного сигнала георадарного диапазона частот. Чтобы детально изучить данную проблему в программной среде «gprMax» [18], было выполнено математическое моделирование шлировой криотекстуры, характерной для мерзлых торфяников, а также с учётом полученных сведений проанализированы полевые георадарные данные. На первом этапе с помощью «gprMax» была создана модель среды, приближённая к естественной структуре мерзлого ядра пальза, на основе чего был получен набор простых одномерных моделей отдельных георадарных трасс. Для всех моделей использованы одни и те же параметры: длина записи составляла 42400 точек, шаг дискретизации 1 мм, источник – в виде синтетической дипольной антенны с частотой 400 МГц, зондирующий импульс Рикера. После получения моделей анализировались кинематические и динамические параметры сигнала. Толщина ледяных шлиров в торфе задавались в диапазоне 1–10 см, так как по данным бурения такие размеры характерны для реальных условий [17], а их количество варьировалось от 4 до 27. Для формирования моделей использовались следующие показатели относительной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon$) и электропроводности ($\sigma$) слоев: 1) верхний СТС толщиной 40 см, с $\varepsilon = 35$, $\sigma = 0.02$ мСм/см; 2) мерзлое ядро толщиной 38–42 см в зависимости от количества слоев с $\varepsilon = 4$, $\sigma = 0.1$ мСм/см для льда и $\varepsilon = 50$, $\sigma = 2.5$ мСм/см для торфа; 3) нижний 40 см слой торфа с $\varepsilon = 50$, $\sigma = 2.5$ мСм/см; 4) минеральное основание бугра с $\varepsilon = 10$, $\sigma = 0.1$ мСм/см.

Моделирование отдельных трасс показало, что для рассматриваемой многослойной структуры амплитуда отраженного сигнала непостоянная, а переменная величина, зависящая от количества слоев в зондируемой среде (рис. 1а). При этом после включения в модель более 20 слоев амплитуда резко снизилась и зафиксировалась на низком уровне. Анализ коэффициента отражения для отдельного тонкого слоя с малыми потерями $K_{121}$ [19] выявил зависимость интенсивности от отношения толщины слоя к длине волны (рис. 1б). Таким образом можно сделать вывод, что и количество ледяных шлиров, и их толщина оказывают влияние на уровень отраженной энергии. Это влияние комплексное и частотозависимое, поэтому в реальных условиях порождается множество

вариантов, суперпозиция которых в итоге приводит к общему затуханию регистрируемого георадарного сигнала.

Для определения характеристик волнового поля георадара, которое может потенциально наблюдаться для мерзлоты в торфе с шлировой криотекстурой в «gprMax» выполнено полноволновое моделирование. В качестве геокриологической основы использовалось изображение детального разреза пальза (рис. 2а), выполненное в разведочной траншее [20]. Для всей модели были заданы следующие параметры: длина записи составляла 100 нс, частота дискретизации 1 см, шаг георадара – 2 см, размер задаваемой области – 4,0×2,0×2,5 м, источник в виде модели дипольной антенны на основе существующего георадара GSSI с центральной частотой 400 МГц, форма зондирующего импульса – импульс Рикера. Использовались следующие электрофизические параметры сред: СТС $\varepsilon$=35 и $\sigma$=2.0 мСм/м; шлиры льда $\varepsilon$=4 и $\sigma$=0.1 мСм/м; вмещающий торф $\varepsilon$=50 и $\sigma$=2.5 мСм/м; минеральное основание $\varepsilon$=10 и $\sigma$=1.0 мСм/м. Для ускорения расчетов привлекался вычислительный кластер в ЦКП КарНЦ РАН. Среднее время вычисления одной георадарной трассы составляло около 6 минут, а всей модели – около 18 часов. Всего для формирования радарограммы было получено 179 трасс.

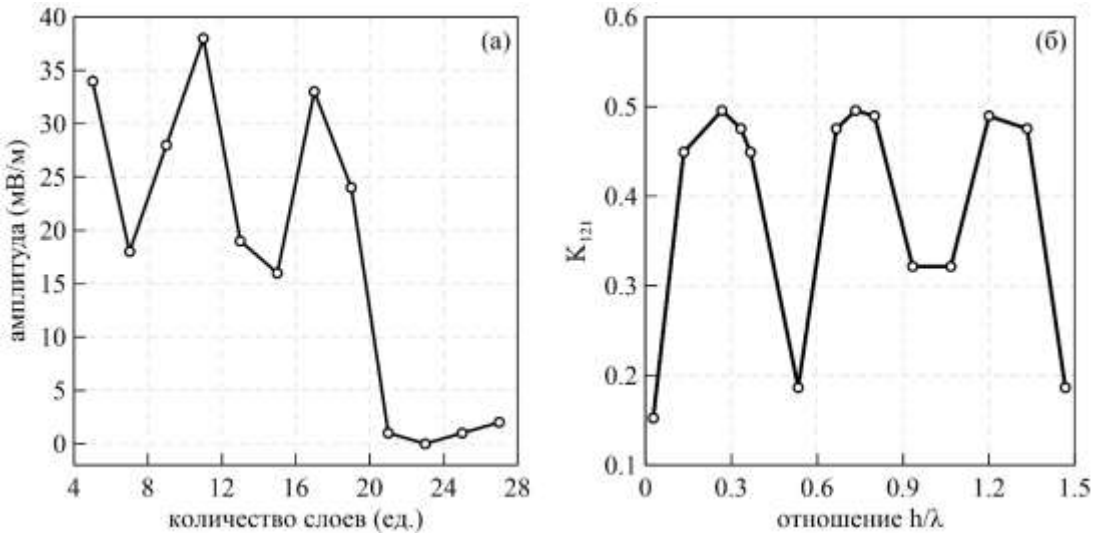



Рис. 1. Результаты численного моделирования (а) зависимости амплитуды отраженного сигнала от количества ледяных слоев в мерзлом ядре толщиной 1 см, и (б) вариативности коэффициента отражения ($K_{121}$) для разных отношений толщины слоя (h) к длине волны (λ).

В результате расчетов получена синтетическая радарограмма (рис. 2б), демонстрирующая структуру волнового поля и подчеркивающая отличительные особенности распространения георадарного сигнала в бугре пучения. В верхней части временного разреза уверенно читается волнистая ось синфазности, которая сформирована на кровле мерзлого торфа. Тогда как внутренняя часть ядра содержит ряд дифрагированных волн, интенсивность и размах которых резко убывают, начиная примерно с 25 нс. Эти волны формируются на узких участках ледяных линз, которые выступают в качестве локальных объектов. В нижней части поле рассеивается и принимает «хаотичный» облик, без явных отражений, граница минерального основания бугра пучения не прослеживается. В результате полученная модель подтверждает избыточное затухание сигнала, обусловленное криотекстурой мерзлоты.

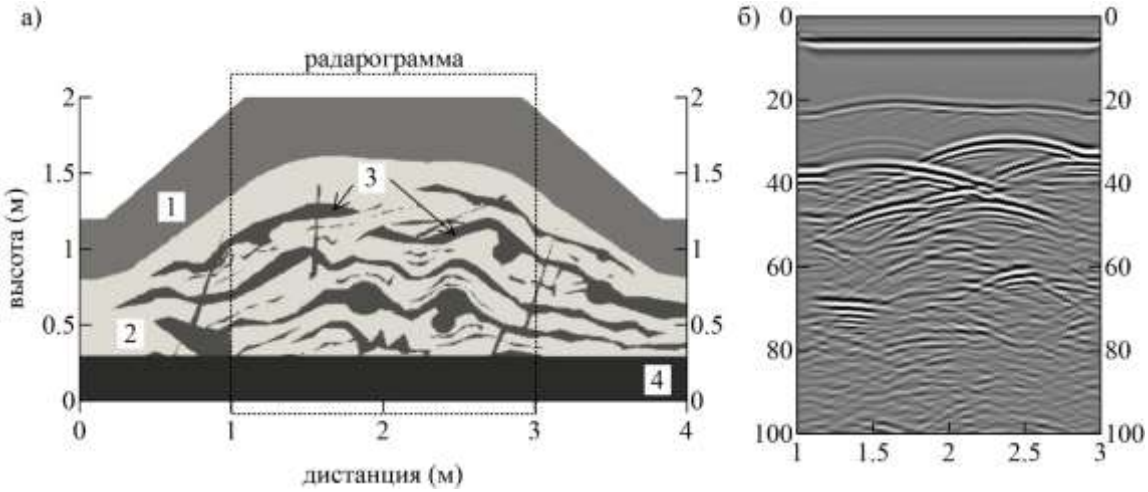



Рис. 2. Оцифрованный разрез пальза (а), где 1 – СГС, 2 – вмещающий торф, 3 – ледяные линзы, 4 – минеральное основание; (б) смоделированная радарограмма для вершины пальза.

Чтобы верифицировать полученные данные сделано сравнение с полевыми наблюдениями, выполненными георадаром ОКО-2 с антенным блоком 400 МГц на бугристом комплексе, расположенном в центре Кольского полуострова рядом с п. Ловозеро. Для этого района в СТС и грунтовых вод наблюдаются невысокие значения σ [6], что исключает избыточное затухание сигнала из-за потерь, вызванных проводимостью торфа. На рисунке 3 представлены радарограммы, полученные на одном и том же бугре в холодный и теплый сезоны. В первом случае мерзлое торфяное ядро характеризуется набором протяженных и интенсивных волнистых рефлекторов, которые постепенно сегментируются и затухают при переходе к минеральным грунтам (рис. 3а). Мощность ядра по данным георадара составила 1.6–1.8 м, что соответствует результатам бурения на бугре. По всей видимости, зимнее промораживание привело к консолидации верхней части ядра и в волновом поле оно выступает как единый слой с малыми потерями. Тогда как нижняя часть ядра сохранила стратификацию и в нём сохранился эффект рассеивания в тонких ледяных шлирах. При этом в склоновых частях бугра на отметках 9–17 м и 30–37 м начиная с глубины 0.7 м наблюдались локальные области затухания. Предполагалось, что они могут быть связаны с латеральным таянием мерзлоты, которое нарушает криотекстуру ядра.

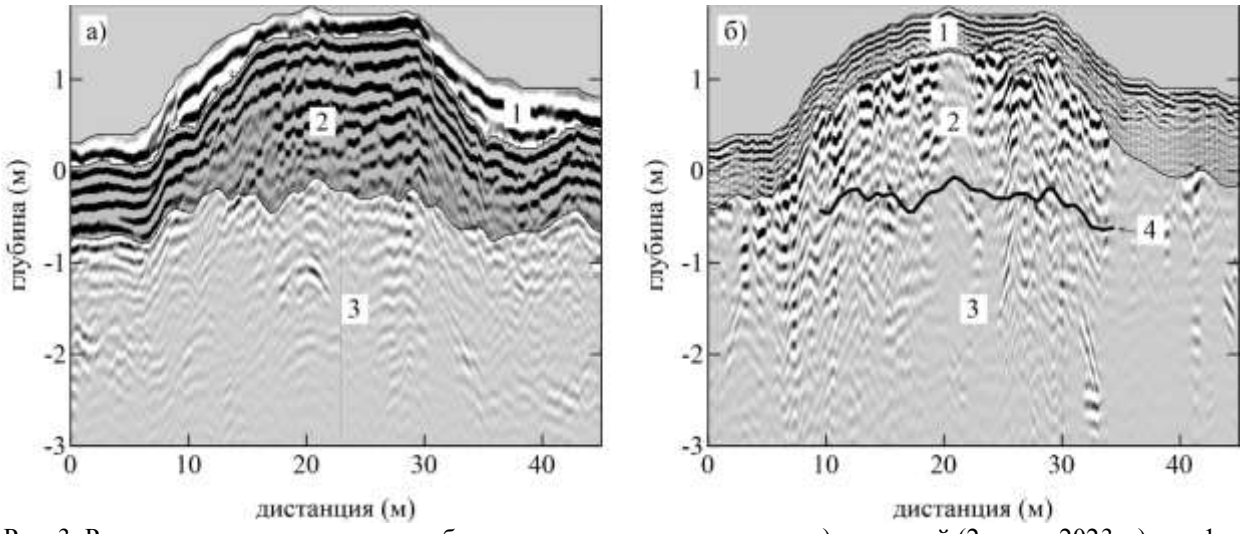



Рис. 3. Радарограммы, полученные на бугре пучения в разные сезоны: а) холодный (2 марта 2023 г.), где 1 – снежный покров V=15 см/нс, 2 – мерзлое ядро V=10.6 см/нс, 3 – подстилающий минеральный грунт V=9.4 см/нс; б) теплый (11 июля 2022 г.), где 1 – сезонно-талый слой V=4.7 см/нс, 2 – мерзлое ядро V=10.6 см/нс, 3 – подстилающий минеральный грунт, 4 – нижняя граница ядра по данным холодного сезона.

В теплый период напротив – волновое поле мерзлого ядра имело преимущественно фрагментарный характер, тогда как СТС уверенно определялся как по протяженной оси синфазности на границе с мерзлотой, так и по серии горизонтальных осей в его толще (рис. 3б). Непосредственно в мерзлом торфе оси синфазности были короткими и извилистыми, с локальными участками затухания, а также дифрагированными волнами. Усиленное затухание сигнала начиналось с 30 нс. На

радарограмму была вынесена предполагаемая нижняя граница мерзлого ядра, определённая в холодный сезон, но найти для нее четкие признаки не удалось. По конфигурации отражателей и характеру затухания радарограмма полученная летом сопоставима с синтетической моделью.

В результате исследований обосновано и продемонстрировано влияние криотекстуры мерзлого торфа на интенсивность затухания георадарного сигнала. Механизм этого эффект объяснён за счет повышенного рассеивания энергии импульса на поверхности ледяных включений, а также его ослабления при распространении в тонких ледяных слоях, выступающих в роли волноводов. Это свидетельствует о возможных ошибках в интерпретации георадарных данных, когда затухание объясняется только повышением электропроводности мерзлых грунтов, например из-за глинистости, а также о существовании перспектив к дистанционному определению криотекстуры методом георадиолокации. Кроме того, выполненные полевые работы показали целесообразность использования серий разносезонных наблюдений для выявления особенностей форм криогенного рельефа, таких как бугры мерзлого пучения.

***Литература***


1 Moorman B.J., Robinson S.D., Burgess M.M. Imaging periglacial conditions with ground-penetrating radar // Permafrost and Periglacial Processes. – 2003. – V. 14. – №4. – P. 319-329.

2 Судакова М.С., Садуртдинов М.Р., Малкова Г.В., Скворцов А.Г., Царев А.М. Применение георадиолокации при комплексных геокриологических исследованиях // Криосфера Земли. – 2017. – Т.21. – №3. – С. 69-82.

3 Sudakova M.S., Brushkov A.V., Velikin S.A. et al. Geophysical Methods in Geocryological Monitoring // Moscow University Geology Bulletin. – 2023. – V. 78. – P. 142-152.

4 Sjöberg Y., Marklund P., Pettersson R., Lyon S.W. Geophysical mapping of palsa peatland permafrost // The Cryosphere. – 2015. – V. 9. – №2. – P. 465-478.

5 Судакова М.С., Садуртдинов М.Р., Царев А.М., Скворцов А.Г., Малкова Г.В. Возможности георадиолокации для исследования заболоченных торфяников в криолитозоне // Геология и геофизика. – 2019. – Т.60. – №7. – С. 1004-1013.

6 Ryazantsev P. Can Ground-Penetrating Radar Detect Thermal Gradients in the Active Layer of Frozen Peatlands? // Remote Sensing. – 2025. – V. 17. – №11. – 1805.

7 Gusmeroli A., Liu L., Schaefer K., Zhang T., Schaefer T., Grosse G. Active Layer Stratigraphy and Organic Layer Thickness at a Thermokarst Site in Arctic Alaska Identified Using Ground Penetrating Radar // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. – 2015. – V. 47. – №2. – P. 195-202.

8 Каверин Д.А., Судакова М.С., Хомутов А.В., Хайруллин Р.Р., Факащук Н.Ю., Пастухов А.В. Применение георадиолокации для оценки влияния автодороги на глубину залегания многолетнемерзлых пород в полигональных болотах Севера Западной Сибири // Арктика и Антарктика. – 2022. – № 2. С. 1-12.

9 Ryazantsev P., Kutenkov S., Kabonen A. Study of Subarctic Palsa Permafrost Under Various Thawing Conditions Based on Geophysical and Geospatial Models // Permafrost and Periglacial Processes. – 2025. – V. 36. – №3. – P. 403-425.

10 Doolittle J.A., Hardisky M.A., Black S. A Ground-Penetrating Radar Study of Goodream Palsas, Newfoundland, Canada // Arctic and Alpine Research. – 1992. – V. 24. – №2. – P.173-178.

11 Kohout T., Bućko M.S., Rasmus K., Leppäranta M., Matero I. Non-invasive geophysical investigation and thermodynamic analysis of a palsa in Lapland, Northwest Finland // Permafrost and Periglacial Processes. – 2014. – V. 25. – №1. – P. 45-52.

12 Kettles I.M., Robinson S.D. A ground-penetrating radar study of peat landforms in the discontinuous permafrost zone near Fort Simpson, Northwest Territories, Canada // Northern Forested Wetlands: Ecology and Management. – Boca Raton: Routledge, 1997. – P. 147-160.

13 Jones B.M., Baughman C.A., Romanovsky V.E., Parsekian A.D., Babcock E.L., Stephani E., Berg E.E. Presence of rapidly degrading permafrost plateaus in south-central Alaska // The Cryosphere. – 2016. – V. 10. – №6. – P. 2673-2692.

14 Deparis J., Garambois S. On the use of dispersive APVO GPR curves for thin-bed properties estimation: Theory and application to fracture characterization // Geophysics. – 2009. – V. 74. – №1. – P. J1-J2.

15 Arcone S.A., Peapples P.R., Liu L. Propagation of a ground-penetrating radar (GPR) pulse in a thin-surface waveguide // Geophysics. – 2003. – V. 68. – №6. – P. 1922-1933.

16 Annan A.P. Ground penetrating radar in near-surface geophysics // Near-Surface Geophysics (Investigations in Geophysics, No.13) / Ed. by D.K. Butler. – Society of Exploration Geophysics. – P. 357-438.

17 Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемёрзлых торфяных массивов. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 571 с.

18 Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar // Computer Physics Communications. – 2016. – V. 209. – P. 163-170.

19 Van der Wielen A. Characterization of thin layers into concrete with Ground Penetrating Radar. – Liège: Université de Liège, 2014. – 228 p.

20 Åkerman H.J. Observations of palsas within the continuous permafrost zone in eastern Siberia and in Svalbard // Geografisk Tidsskrift. – 1982. – V. 82. – P. 45-51.

## ИЗУЧЕНИЕ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

***М.Р. Садуртдинов [1], М.С. Судакова [1,2], А.Г. Скворцов [1], А.М. Царев[1], С.Ю. Давыденко[1], Г.В. Малкова[1]***

*[1]Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия*
*[2]МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

***Введение***. При изучении криолитозоны применяется широкий спектр методов. К ним относятся геокриологические измерения с помощью металлического щупа [Методика…, 1979; Brown et al., 2000]; бурение термометрических скважин с использованием термокос и логгеров [Шарков, 2022]; геофизические методы – георадиолокация, электроразведка [Зыков, 2007; Судакова и др., 2022; Панькова и др., 2023], сейсморазведка [Воронков, 2009; Скворцов и др., 2011, 2023], грави- и магниторазведка [Кошурников и др., 2019], электромагнитное зондирование [Кошурников и др., 2016]; лабораторный анализ керна и образцов мерзлых грунтов [Демидов, 2023]; изучение газового состава пород [Задорожная и др., 2022]; а также применение беспилотных технологий [Léger, et al., 2023]. Наиболее достоверные результаты достигаются при комплексном использовании нескольких методов.

**Методы.** Полевые исследования проводились в августе 2023 года и в конце июля - начале августа 2024 года. Применялся следующий комплекс методов: георадиолокационное профилирование и зондирование, сейсморазведка методом отраженных волн (МОВ) на поперечных SH-волнах, электротомография и термометрия. Общая длина профиля составляет 272 метра.

**Результаты.** На рис. 1 представлен сейсмогеологический разрез, построенный по результатам сейсмических исследований с помощью поперечных SH-волн. Положение кровли ММП и кровли глин совпадает с полученными по данным георадиолокации.

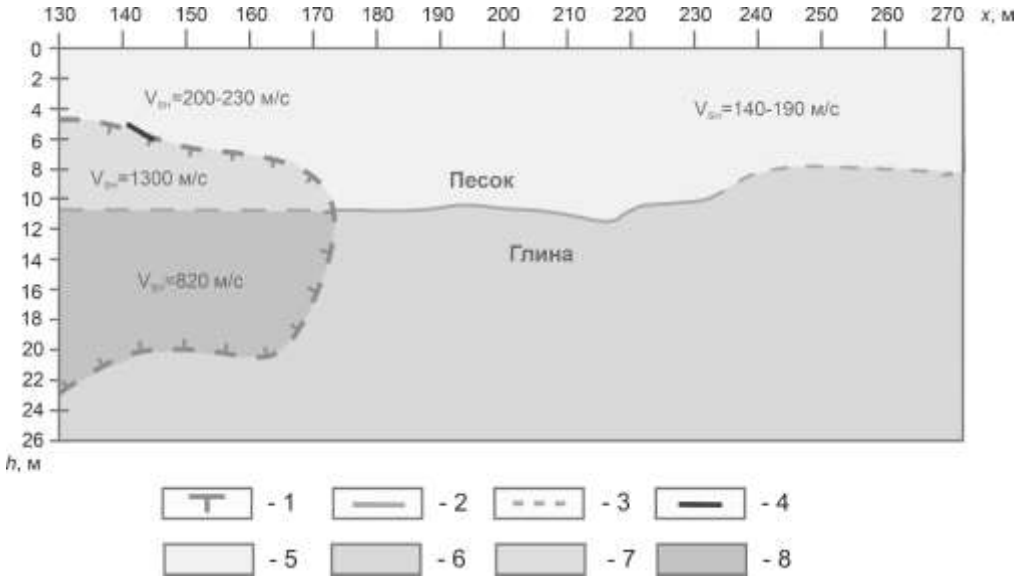


Рис. 1. Сейсмогеологический разрез, полученный по результатам исследований с помощью поперечных SH-волн.
1 – граница ММП, определенная с помощью отраженных волн, 2 – кровля глин, 3 – предполагаемое продолжение кровли глин, 4 – глубина кровли ММП, определенная с помощью преломленных волн, 5 – талые пески, 6 – талые глины, 7 – мерзлые пески, 8 – мерзлые глины.

По данным электроразведки (рис. 2) выделяются следующие слои: пески зоны аэрации, талые водонасыщенные пески, ММП и предположительно талые глины.

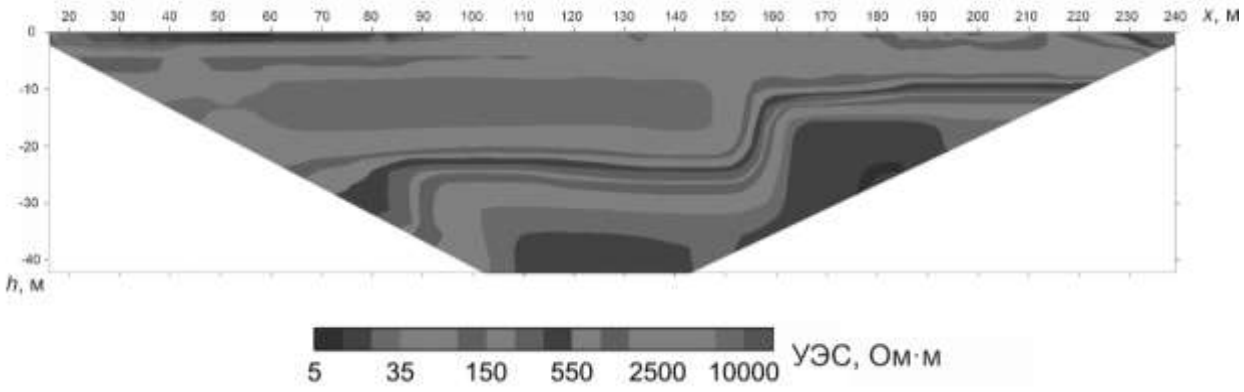



Рис. 2. Результаты инверсии электротомографии 2023 г. (шаг по профилю 2.5 м).

Совместная интерпретация комплекса геофизических методов состояла в проведении инверсии данных электротомографии с учётом положения границ, определённых с помощью георадиолокации и сейсморазведки: УГВ (георадиолокация), кровля ММП (сейсморазведка и георадиолокация), подошва ММП (сейсморазведка) и кровля глин (георадиолокация и сейсморазведка).

Сводный геолого-геофизический разрез представлен на рис.3. В результате выделены: песок зоны аэрации, талый водонасыщенный песок, мёрзлый песок, глины в талом и мёрзлом состояниях. Были определены скорости ЭМ волн в сухом песке и влажном талом и льдистом мёрзлом песке, скорости поперечных волн в талом и мёрзлом песке, в мёрзлых глинах, значения сопротивлений во всех вышеперечисленных слоях.

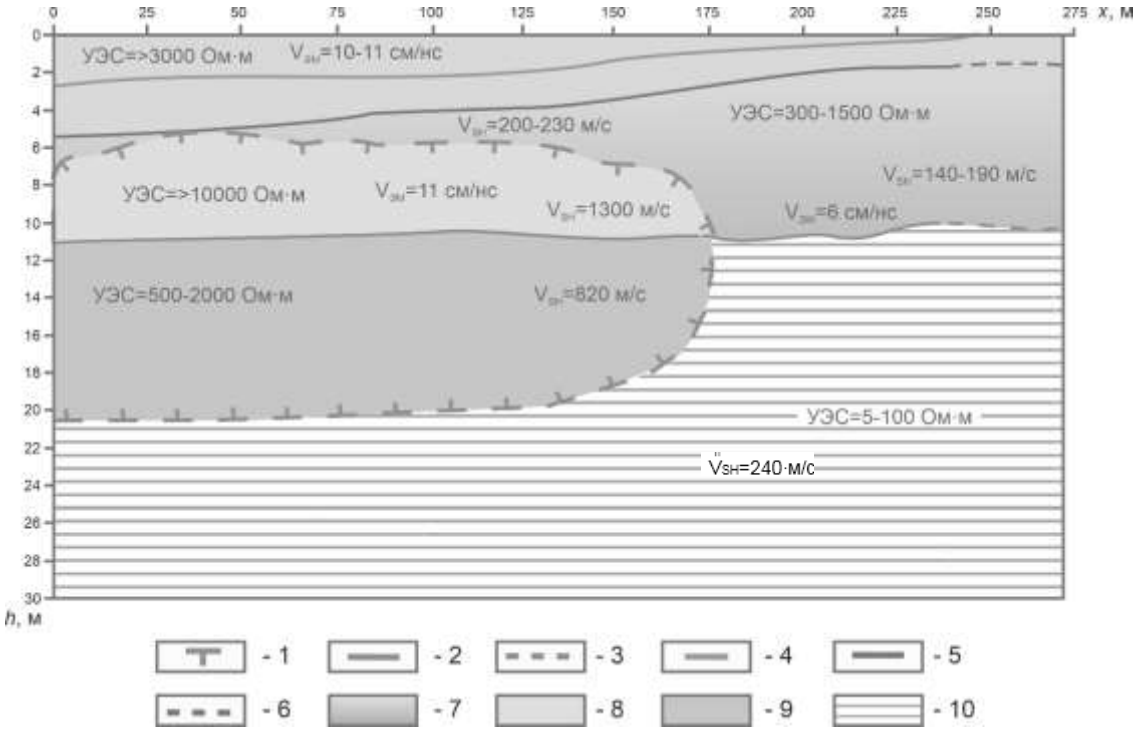



Рис. 3. Сводный геолого-геофизический разрез по профилю, полученный по комплексу методов. 1 – граница ММП, 2 – кровля глин, 3 – предполагаемое положение кровли глин, 4 – УГВ, 5 – суглинок, 6 – предполагаемое положение суглинка, 7 – талые пески, 8 – мерзлые пески, 9 – мерзлые глины, 10 – талые глины.

**Выводы.** Комплекс геофизических методов на геокриологическом полигоне в дельте Печоры позволил точно определить положение кровли и подошвы толщи ММП, выявить её внутреннюю структуру: мерзлая толща состоит из песков и глин с границей на глубине ~10-12 м. Обнаружены участок выклинивания мерзлой толщи в разрезе и граница между талыми песком и глиной.

**Благодарности.** Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FWRZ-2026-0027).

***Литература***

1. Методика мерзлотной съёмки: учеб. пособие для геол. специальностей вузов / В. А. Кудрявцев, Л. С. Гарагуля, К. А. Кондратьева [и др.]; под ред. В. А. Кудрявцева. — М.: Изд-во МГУ, 1979. — 358 с.

2. Brown J., Hinkel K. M., Nelson F. E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program: Research designs and initial results // Polar Geography. — 2000. — Vol. 24, № 3. — P. 167–258.

3. Шарков, А. А. Системы температурного мониторинга. Практика применения на объектах в криолитозоне / А. А. Шарков // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях: материалы Общерос. науч.-практ. конф., Москва, 18 марта 2022 г. — М.: Геомаркетинг, 2022. — С. 122–127.

4. Зыков, Ю. Д. Геофизические методы исследования криолитозоны: учебник / Ю. Д. Зыков. — М.: Изд-во МГУ, 2007. — 272 с. — ISBN 978-5-211-05338-0.

5. Судакова, М. С. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге / М. С. Судакова, А. В. Брушков, С. А. Великин [и др.] // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4, Геология. — 2022. — № 6. — С. 141–151.

6. Панькова, Д. С. Строение многолетнемерзлой толщи в пределах стационара Парисенто (п-ов Гыдан) по геофизическим данным / Д. С. Панькова, В. В. Оленченко, Л. В. Цибизов [и др.] // Криосфера Земли. — 2023. — Т. XXIV, № 2. — С. 52.

7. Воронков, О. К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (Изучение строения и свойств мёрзлых и талых горных пород, и массивов) / О. К. Воронков. — СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2009. — 401 с.

8. Скворцов, А. Г. Мониторинг криолитозоны волновыми методами геофизики / А. Г. Скворцов, М. Р. Садуртдинов, М. С. Судакова [и др.] // К познанию цельного образа криосферы Земли: изучение природных явлений и ресурсного потенциала Арктики и Субарктики: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф., Тюмень, 29–30 нояб. 2023 г. — Тюмень: ТюмГУ-Press, 2023. — С. 96–99.

9. Скворцов, А. Г. Методические особенности изучения сейсмогеокриологического разреза / А. Г. Скворцов, А. М. Царев, М. Р. Садуртдинов // Криосфера Земли. — 2011. — Т. XV, № 4. — С. 110–113.

10.Кошурников, А.В., Демидов Н.Э., Гунар А.Ю., и др. Информативность геофизических методов разведки при решении геокриологических задач на суше и шельфе // Российские полярные исследования. — 2019. — № 2(36). — С. 17-23.

11.Кошурников, А.В., Тумской В.Е., Шахова Н.Е., и др. Первый опыт электромагнитного зондирования для картирования кровли подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 469, № 5. — С. 616-620.

12.Демидов, Н.Э. Из опыта бурения мёрзлых пород в Арктике и Антарктике малогабаритными установками в научно-исследовательских целях // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. — 2023. — № 4(121). — С. 6-20.

13.Задорожная Н.А., Облогов Г.Е., Васильев А.А., и др. Метан в мёрзлых и оттаивающих отложениях Западной Арктики // Криосфера Земли. — 2022. — Т. 26, № 5. — С. 41-55.

14.Léger E., Saintenoy A., Grenier C., et al. Comparing Thermal Regime Stages along a Small Yakutian Fluvial Valley with Point Scale Measurements, Thermal Modeling, and Near-Surface Geophysics // Remote Sens. — 2023. — Vol. 15. — Art. 2524.

## МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ И ФИТОМАССЫ В ТИПИЧНЫХ ТУНДРАХ ЗАПАДНОГО ЯМАЛА

***Н.Д. Самохвалов[1], А.А. Васильев[2], Г.Е. Облогов[2], И. Д. Стрелецкая[1]***

[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т, Москва,*
[2]*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень*

В последние десятилетия оценка реакции многолетнемерзлых пород и криогенных ландшафтов на текущее и прогнозируемые изменения климата в Арктики выдвинулась в ряд первостепенных, в виду их значительного вклада в глобальный водный и углеродный циклы, а также в связи с современным промышленном освоением арктических территорий. Обычно, на основе разного рода моделей прогнозируются температуры многолетнемерзлых пород и глубина сезонного протаивания. Главным источником неопределенности модельных прогнозов состояния криолитозоны является недоучет изменения растительности при потеплении климата [1]. Потепление климата сопровождается изменениями фотосинтетической активности и фитомассы ландшафтов криолитозоны, которая в свою очередь является «буферным слоем» и во многом определяет условия теплообмена на поверхности. Оценить изменение фотосинтетической активности можно с помощью нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) [2]. Ранее многочисленными работами была обоснована устойчивая связь между величиной NDVI и натурно определенной надземной фитомассой, что позволяет на основе этого индекса получить количественные оценки динамики растительного покрова арктических и субарктических ландшафтов [3].

Цель работы заключалась в выявлении закономерностей многолетних изменений глубины сезонного протаивания, анализе динамики надземной фитомассы и установлении связи фитомассы с глубиной сезонного протаивания в доминантных ландшафтах типичных тундр Западного Ямала на фоне потепления климата.

Изучение многолетней динамики глубины сезонного протаивания и динамики растительности проводится на мониторинговых площадках, охватывающих все доминантные ландшафты типичной тундры? и площадке CALM R3 на стационаре Марре-Сале, расположенном на западном побережье п-ова Ямал. В основании разреза многолетнемерзлых пород Западного Ямала залегают морские и прибрежно-морские супесчано-глинистые отложения казанцевского и каргинского возраста. Морские отложения перекрыты песчано-супесчаными континентальными озерно-аллювиальными отложениями сартанского возраста. Сезонно-талый слой повсеместно представлен супесями и тонкозернистыми пылеватыми песками. Как правило, с поверхности почти всегда присутствует маломощный слой торфа. В геоморфологическом отношении район исследований приурочен к расчлененной поверхности третьей морской террасы.

Ландшафтная структура стационара Марре- Сале репрезентативна для типичных тундр п-ова Ямал. В ландшафтной структуре исследуемого региона выделяются девять доминантных ландшафтов в ранге урочищ. По условиям увлажнения их можно разделить на четыре класса [4]. Класс дренированных тундр включает урочища песчаных раздувов (пл. 7 и 43) и хорошо дренированных тундр (пл. 6). В класс слабо увлажненных тундр входят урочища увлажненных тундр (пл. 1). Класс влажных тундр включает в себя увлажненные полигональные тундры (пл. 2) и переувлажненные тундры (пл. 3). В класс заболоченных тундр входят обводненные ложбины стока (пл. 4), озерные котловины (пл. 44) и болота (пл. 36). Особняком располагаются торфяники (пл. 17), которые формально относятся к болотам, но в нашем случае представлены дренированными торфяными буграми. Видовой состав растительности в каждом доминантном ландшафте детально рассмотрен ранее [4].

Измерения глубины сезонного протавания проводились ежегодно в конце теплого сезона с 20-кратной повторностью с помощью металлического щупа. Таким образом были получены данные по межгодовой динамике сезонного протавания с 1978 по 2023 гг, сформированные в базу данных. В 2002, 2021 и 2023 гг. в узлах сетки площадки CALM R3 были проведены измерения толщины торфяного слоя и высоты мохово-лишайникового покрова. В 2019 г. на всех доминантных ландшафтах по стандартной для геоботаники методике проведено опробование растительного покрова для определения зеленой биомассы (фитомассы).

В отличие от многочисленных оценок индекса NDVI для крупных регионов мы попытались определить индекс NDVI для каждого доминантного ландшафта. Для определения NDVI были использованы данные со спутника Landsat 7-9 и спутника Sentinel, имеющих пространственное разрешение 30 метров для мультиспектральных данных и 15 м для панхроматических данных. Методическими ограничениями и, как следствие, погрешностями в оценках NDVI для каждого типа ландшафтов являются те виды растительности, чье значение NDVI низкое, несмотря на высокие значения фитомассы. К ним могут быть отнесены белые мхи и светлые лишайники. Кроме того, погрешности в определении NDVI возникают из-за сравнительно небольшой площади некоторых

ландшафтных урочищ, сравнимой с пространственным разрешением спутниковых снимков. В таких случаях погрешность оценки NDVI возрастает за счет влияния соседних ландшафтов. Таким образом, полученные оценки NDVI носят предварительный характер и требуют дальнейшего уточнения.

Влияние торфяного слоя и мохово-лишайникового покрова по данным площадки CALM R3 хорошо иллюстрирует рис. 1. На нем представлено соотношение суммарной мощности торфяного и мохово-лишайникового слоя и нормированной глубины протаивания за 2002, 2021 и 2013 гг, которая вычислялась как отношение текущего значения глубины СТС к среднему для соответствующего года значению глубины СТС на площадке CALM R3.

Как видно из рис. 1, наблюдается устойчивое во времени соотношение относительной (нормированной) глубины протаивания и мощности торфа и мохово-лишайникового покрова. Зависимость аппроксимирована экспотенциальной функцией. Практически наблюдается совпадение линий аппроксимации. При увеличении суммарной мощности торфяного и мохово-лишайникового слоя с 0 до 30 см относительная глубина протаивания уменьшается с 1,2 до 0,5.

Результаты многолетнего мониторинга глубины сезонного протаивания на площадках в доминантных ландшафтах и на площадке CALM R3, которая представляет собой некоторое осреднение глубины протаивания по всей территории, приведены на рис. 2. На этом же рисунке приведены линейный тренды изменения глубины протаивания во времени для дренированных ландшафтов (песчаный раздув - пл. 3), торфяников (пл.17) и увлажненной полигональной тундры (пл. 2). Хорошо видно, что разные типы ландшафтов имеют отличающиеся тренды, что характеризует разную реакцию ландшафтов на потепление климата. Максимальные тренды присущи, как правило, дренированным ландшафтам, минимальные – увлажненным и заболоченным. В тоже время некоторые ландшафты характеризуются нулевыми или даже отрицательными трендами (пл. 2). Другими словами, потепление климата в таких ландшафтах формально не приводит е увеличению глубины сезонного протаивания. Это связано с тем, что потепление климата в районе Марре-Сале сопровождается ростом летних осадков и, соответственно, возрастанием средней влажности грунтов сезонно-талого слоя, что в свою очередь требует повышенных затрат тепла на протаивание. Кроме того, по мере возрастания глубины протаивания при потеплении климата граница протаивания достигает высокольдистого промежуточного слоя, что вновь требует повышенных затрат тепла. Протаивание льдистого промежуточного слоя приводит к значительной осадке дневной поверхности со скоростью до 2 см/год [5]. Наконец, третьим весомым фактором, снижающим протаивание, является прирост растительности, преимущественно, мохово-лишайникового покрова [6].

На основании результатов мониторинга глубины сезонного протаивания построены карты пространственного распределения глубины протаивания на ландшафтной основе [4] по состоянию на 1978 и 2023 гг. (рис. 3).

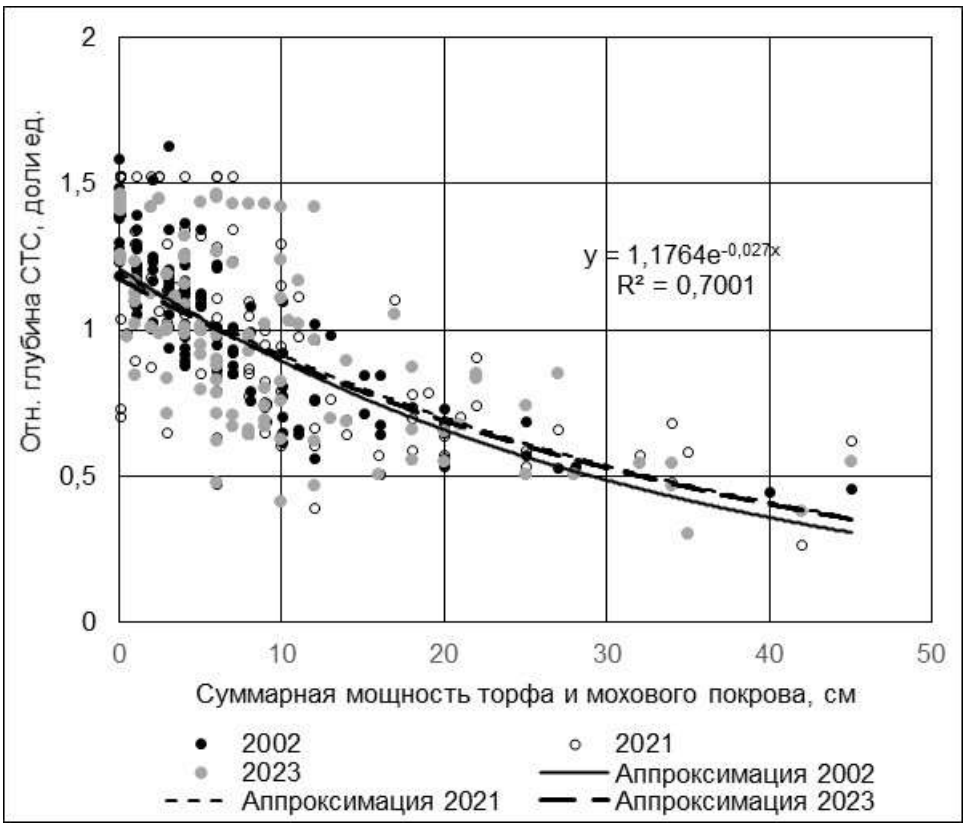



Рис. 1. Влияние суммарной мощности торфа и мохового покрова
на относительную глубину протаивания (по данным площадки CALM R3).

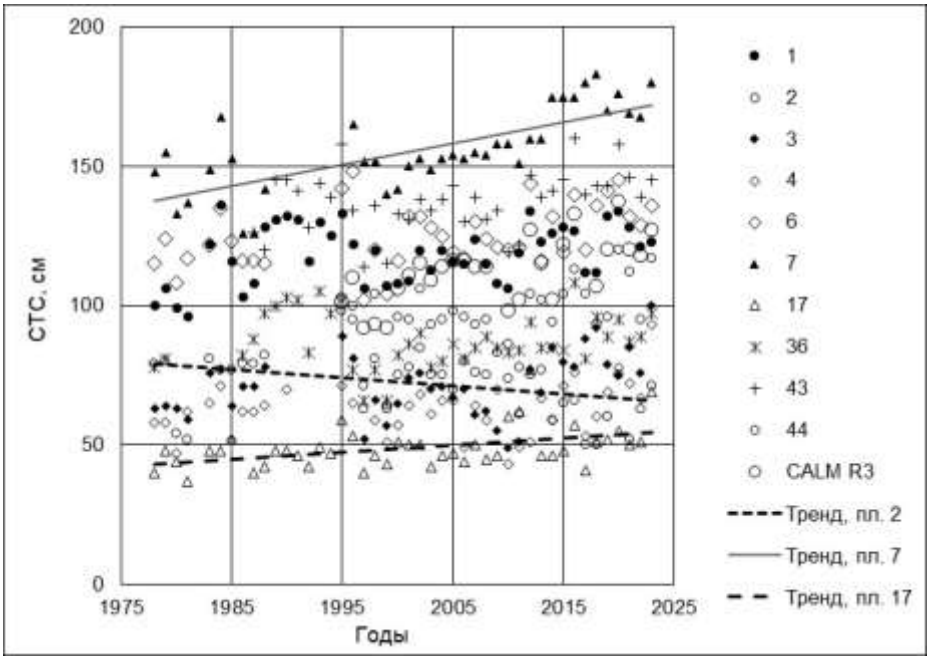



Рис. 2. Изменение глубины протаивания в доминантных ландшафтах типичной тундры во времени.
В легенде -номера площадок

Как видно из рисунка, наблюдается ярко выраженная тенденция увеличения глубины сезонного протаивания в типичных тундрах - правый рисунок явно более темный по сравнению с левым.

В августе 2019 года были проведены измерения фитомассы в урочищах стационара. Наибольшие значения фитомассы характерны для площадок 3 и 36 (заболоченные и болотные урочища типичной тундры), тогда как полное отсутствие растительности характерно для площадки 7 (песчаный раздув без растительного покрова), а минимальная фитомасса присуща пл. 43 (зарастающий песчаный раздув). Соотношение фитомассы и глубины сезонного протаивания приведены на рис. 4.

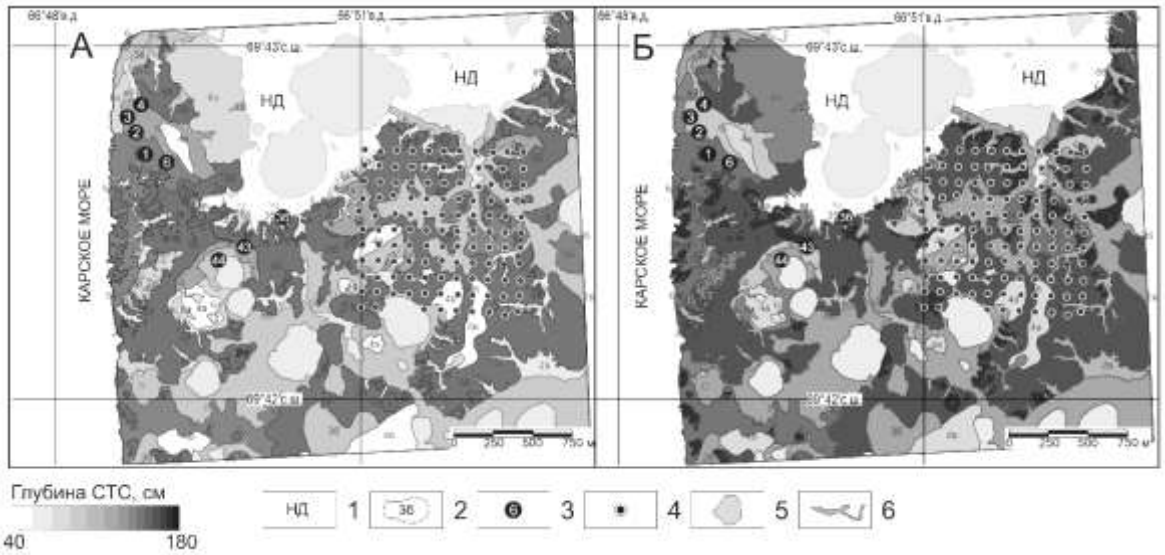



Рис. 3. Карты глубины сезонного протаивания на 1978 (А) и 2023 (Б) гг. В легенде:: 1 — нет данных о глубине сезонно-талого слоя, 2 — ландшафтные урочища с индексами, 3 — наблюдательные площадки, 4 — точки измерения СТС по программе CALM, 5 — озера, 6 — река Марре-Яха. Шкала глубин сезонного протаивания приведена в легенде.

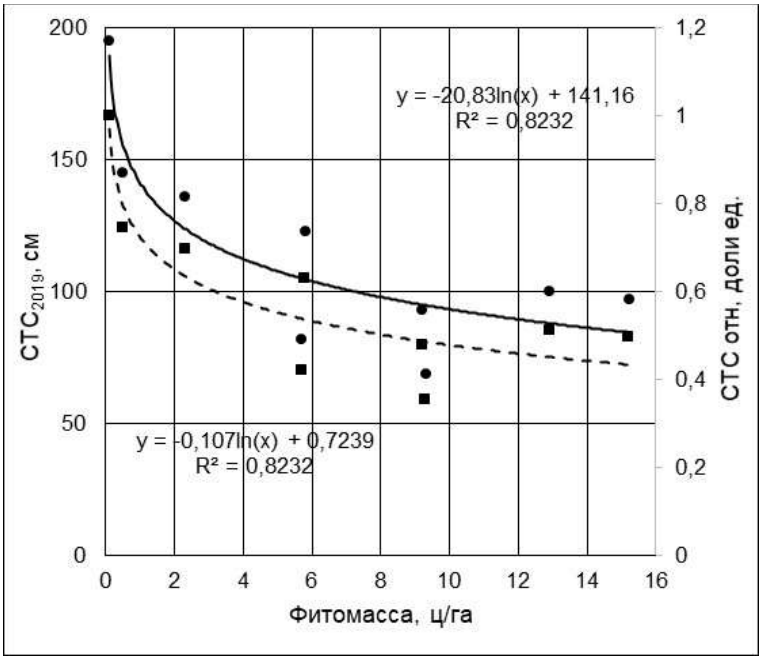



Рис. 4. Корреляция фитомассы и глубины сезонного протаивания.

График на рис. 4 представлен в двух версиях: сплошными кружочками даны фактические значения глубины протавания в 2019 г, а квадратиками приведены относительные величины глубины протаивания, по отношению к максимальному значению. В качестве линии аппроксимации в обоих случаях выбрана логарифмическая функция. При этом в абсолютных величинах график отражает влияние растительности на глубину протаивания только в 2019 г, а вот в относительных величинах этот график дает возможность в первом приближении оценить вклад растительного покрова в снижение протаивания грунтов, независимо от года измерения. Коэффициент детерминации составляет около 0,82, что подтверждает решающее влияние фитомассы на протаивание грунтов.

По результатам обработки спутниковых снимков пока удалось определить предварительные значения NDVI для доминантных ландшафтов района Марре-Сале. Временные ряды изменения NDVI для отдельных ландшафтов неустойчивы и не демонстрируют явного возрастания индекса на отрезке времени 2016 – 2023. Тем не менее полученные данные позволяют сравнить изменение фитомассы и индекса NDVI (рис. 5).

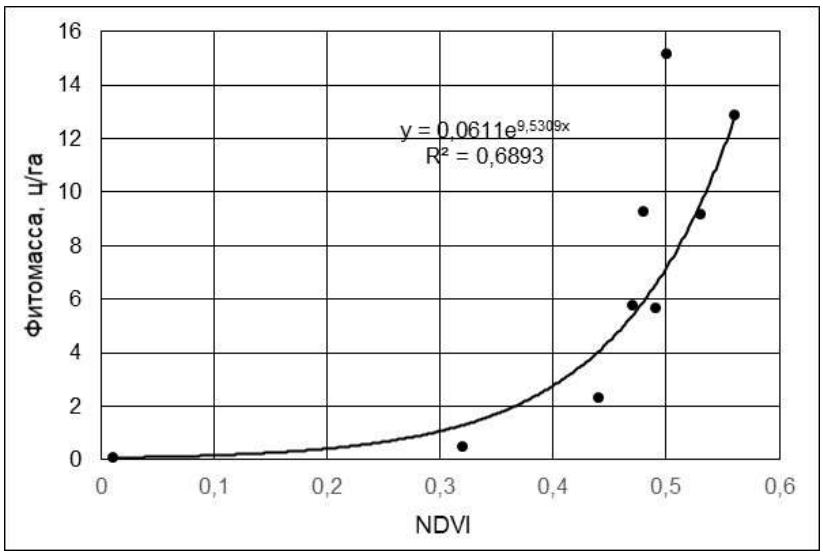



Рис. 5. Соотношение индекса NDVI и фитомассы в типичных тундрах Западного Ямала.

Для процессов, развивающихся сначала с высокой, а затем со все более замедляющейся скоростью, удобно использовать логистическую функцию. Но в нашем случае все фактические данные сосредоточены в левой части диапазона NDVI, поэтому здесь в качестве аппроксимации возможно применение экспотенциальной функции. Коэффициент детерминации составляет около 0,67, что можно считать приемлемым для оценки влияния изменения NDVI на приращение фитомассы.

Таким образом, получены многолетние данные по изменению глубины сезонного протаивания в доминантных ландшафтах типичной тундры. Установлено, что возрастание глубины протаивания на фоне потепления климата наблюдается не во всех типах ландшафтов. Это связано с влиянием возрастающей влажности грунтов сезонно-талого слоя, осадками дневной поверхности при протаивании сильно льдистых грунтов промежуточного слоя, приростом растительности и увеличением фитомассы. Выявленные связи между глубиной сезонного протаивания и фитомассой, а также фитомассы и NDVI позволили получить количественные оценки и дают возможность внести корректирующие поправки при прогнозе изменения глубины сезонного протаивания при потеплении климата.

Работы выполнены в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ «Наземное и подземное оледенения в условиях современного изменения климата и техногенного воздействия» (МГУ). Мониторинг изменения геокриологических условий на стационаре Марре-Сале проводится при поддержке Госзадания (тема FWRZ-2026-0027) (ИКЗ ТюмНЦ СО РАН).

***Литература***

1 Анисимов О.А., Шерстюков А.Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России //Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 2, с. 90–99.

2 Tucker, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ. 1979, 8, pp. 127–150.

3 Walker D.A., Epstein H.E., Raynolds M.K. et al. Environment, vegetation and greenness [NDVI] along the North America and Eurasia Arctic transects //Environmental Res. Lett., 2012, vol. 7, No. 015504, pp. 1–17.

4 Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskaya I.D., Zadorozhnaya N.A., Kuznetsova A.O., Kanevskiy M.Z., Semenov P.B. Methane content and emission in the Permafrost landscapes of Western Yamal, Russian Arctic. Geosciences, 2020, 10, 412, doi:10.3390/geosciences10100412.

5 Каверин Д.А., Пастухов А.В., Новаковский А.Б. Динамика глубины сезонного протаивания тундровых мерзлотных почв (на примере площадки циркумполярного мониторинга деятельного слоя в Европейской России) //Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 35-44.

6 Васильев А.А., Облогов Г.Е., Широков Р.С. Долговременный мониторинг сезонного протаивания в типичных тундрах Западного Ямала // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 4, с. 3-13.

# МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИСТЕМЫ КРУГЛОГОДИЧНОЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ОПЫТНОЙ ПЛОЩАДКИ ЗВЕНИГОРОДСКОЙ БИОСТАНЦИИ МГУ)

***А.Н. Северин[1], И.А. Комаров[1], Ф.А. Шевчик[1], А.Е. Скапинцев[2]***
*[1] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва*
*[2] ООО «МобиДик», г. Курган*

Потепление климата является причиной экономического ущерба [1, 2]. Наиболее уязвимыми к климатическим изменениям являются объекты, построенные с использованием грунтов оснований по принципу I. При длительном сроке эксплуатации сооружений использование привычных сезонно-действующих методов сохранения мерзлого состояния грунтов основания в обозримом будущем станет неэффективным. Так, на основании существующих прогнозов изменения климата результаты теплотехнических расчетов показывают снижение несущей способности фундаментов к 2050 г., в результате которого большинство зданий старой постройки в криолитозоне России окажутся непригодными для эксплуатации еще до окончания их «жизненного цикла».

Перспективным решением для повышения надежности эксплуатации инфраструктуры на многолетнемерзлых грунтах может быть использование системы круглогодичной термостабилизации (СКТ), включающей сезонно-действующие охлаждающие устройства (СОУ) в сочетании с принудительной холодоподачей в летний период с помощью холодильной машины, работающей по принципу теплового насоса [3].

В исследовании представлены результаты сбора и обработки данных термометрических скважин, обустроенных на опытной площадке Звенигородской биостанции МГУ с использованием автоматизированной системы температурного мониторинга (АСТМ) компании «Русгеотех» в целях выполнения научно-исследовательских работ по оценке воздействия прототипа СКТ (мощностью 2кВт) компании «МобиДик» на температурный режим грунтов. Результаты замеров температуры грунта по стволу термометрической скважины, находящейся на расстоянии 0,5 м от СОУ системы круглогодичной термостабилизации по сравнению с температурами грунта, находящегося в естсественных условиях, представлены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Температура грунта $t_2$ на расстоянии 0,5 м от СОУ1 (фреон) и естественная температуры грунта $t_1$

| Глубина, м | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 6,0 | 7,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $t_1$, ˚C | 6,62 | 5,48 | 4,64 | 4,11 | 4,23 | 4,30 | 4,50 | 4,86 | 5,43 | 6,66 | 6,81 |
| $t_2$, ˚C | 0,72 | 0,80 | 0,89 | 0,61 | 0,55 | 0,52 | 0,59 | 0,93 | 0,90 | 0,73 | 0,92 |

Таблица 2

Температура грунта $t_2$ на расстоянии 0,5 м от СОУ3 (СО2) и естественная температуры грунта $t_1$

| Глубина, м | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 6,0 | 7,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $t_1$, ˚C | 6,62 | 5,48 | 4,64 | 4,11 | 4,23 | 4,30 | 4,50 | 4,86 | 5,43 | 6,66 | 6,81 |
| $t_2$, ˚C | 3,28 | 2,58 | 2,30 | 2,35 | 2,54 | 2,79 | 3,05 | 3,17 | 3,40 | 3,76 | 4,49 |

Предложен ряд инженерных соотношений для расчета параметров тепловой и гидравлической схем трехконтурной СКТ. На примере программного комплекса «Борей 3D» предложен алгоритм подбора и верификации неопределенных параметров граничных условий расчетной области модели на основе адаптации тепловых и гидравлических расчетов к наблюдаемому в термометрических скважинах температурному режиму грунтов.

Полнота и точность данных АСТМ позволяют выполнить количественную оценку теплообмена испарителей СКТ с массивом грунтов. Результаты сопоставления данных термометрических наблюдений с данными численного расчета температурного режима грунтов для СОУ с различными хладагентами показали сильную корреляцию за весь период наблюдений, и представлены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициент корреляции r и величина линейной аппроксимации $R^2$ расчетных и наблюдаемых значений температур грунтов для СОУ1 (хладагент – фреон) и СОУ3 – (хладагент - CO2) в период активной работы СКТ

| | СОУ 1 (хладагент - фреон) | | СОУ 3 (хладагент - CO2) | |
|---|---|---|---|---|
| Дата | *r* | $R^2$ | *r* | $R^2$ |
| 15.11.2021 | 0.95 | 0.91 | 0.97 | 0.93 |
| 15.12.2021 | 0.94 | 0.88 | 0.98 | 0.96 |
| 15.01.2022 | 0.88 | 0.78 | 0.99 | 0.97 |
| 15.02.2022 | 0.85 | 0.72 | 1.00 | 0.99 |
| 15.03.2022 | 0.86 | 0.68 | 0.99 | 0.98 |
| 15.04.2022 | -0.28 | 0.18 | 0.99 | 0.98 |
| 15.05.2022 | 0.95 | 0.90 | 0.90 | 0.81 |
| 15.06.2022 | 0.98 | 0.97 | 1.00 | 0.99 |
| 15.07.2022 | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 0.97 |
| 15.08.2022 | 1.00 | 0.99 | 0.99 | 0.97 |

***Литература***


1 Мельников В.П. Адаптация инфраструктуры арктики и субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов / В.П. Мельников, В.И. Осипов, А.В. Брушков // Криосфера Земли. – 2021. - т. XXV, №6. – с. 3-15.

2 Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I., Porfiriev B.N.,Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. № 025003. P. 1–15.

3 Zueter A. F., Newman G., Sasmito A. P. Numerical study on the cooling characteristics of hybrid thermosyphons: Case study of the Giant Mine, Canada //Cold Regions Science and Technology. – 2021. – Т. 189. – С. 103313.


## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЭОЛОВЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА В КРИОЛИТОЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ


***О.С. Сизов*[1,2]**

[1] *Институт проблем нефти и газа РАН, Москва*

[2] *Нижневартовский государственный университет, г. Нижневартовск*


Эоловый рельеф имеет широкое распространение в криолитозоне Евразии и Северной Америки [1]. На севере Западной Сибири эоловые формы (яреи, песчаные раздувы, оголенные пески) также являются типичным элементом криогенных природных комплексов, а эоловых отложения имеют сплошное развитие [2]. Однако, общие закономерности локализации оголенных песков, кроме отдельных участков в северо-таежной подзоне [3–5], в данном регионе до настоящего времени не рассматривались.

Актуальность проведения подобных исследований определяется тем, что активизация антропогенной деятельности на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) способствует росту площадей нарушенных территорий и повышению интенсивности дефляции [1]. Нарушения почвенно-растительного покрова возникают в результате изысканий (инженерных, экологических), в ходе строительных работ по освоения нефтегазовых месторождений, при размещении промышленных и твердых бытовых отходов, а также вследствие утечек нефти и нефтепродуктов. Существующие участки песчаных раздувов, дюнных массивов и котловин выдувания нередко подвергаются интенсивному механическому воздействию, а возникающие нарушения становятся очагами дефляции.

В рамках данной работы методологически предполагается наличие тесной связи между формой рельефа и генезисом слагающих ее отложений. Возможный изоморфизм исключается за счет использования наиболее детальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) и подтверждением генетической связи полевыми методами на наиболее характерных участках. Важным аспектом является то, что эоловые формы в азональных арктических условиях являются устойчивым индикатором генезиса подстилающих отложений и в целом позволяют определить и проследить их пространственное положение [6].

По современным представлениям эоловые отложения в северной части Западно-Сибирской равнины (*байдарацкий эолий*) представлены параллельно слоистыми палевыми, светло-серыми и желто-серыми песками и алевритами с песчаными и грунтовыми клиньями, а также псевдоморфозами по повторно-жильным льдам [7]. Песчаные и алевритистые прослои имеют мощность от нескольких мм до первых см, слабоволнистые, прерывистые с резкими контактами и без выраженной слоистости. Наблюдаются многочисленные пятна ожелезнения по корнеходам. В нижней части толщи обычно встречается большое количество растительного детрита. По всей толще прослеживаются небольшие (до 0,3 м) морозобойные трещины. Верхняя часть толщи деформирована (по всей видимости, современными криогенными процессами) и разбита многочисленными сбросами [8].

Байдараций эолий имеет повсеместное распространение и прерывистым покровом залегает на различных формах и элементах рельефа. Зачастую он венчает разрез аллювия II террасы, резко отличаясь от подстилающей водно-осадочной толщи. Максимальные мощности эолия (до 15-16 м.) отмечены на речных террасах, а также в местах прислонения озерных и морских террас к склонам водораздельных поверхностей. На водоразделах мощность эоловых образований не превышает 4-6 м. [9]. Многочисленные радиоуглеродные и ОСЛ датировки показывают, что формирование байдарацкого эолия относится к сартанскому времени – большинство дат попадает в интервал 18-26 тыс. лет [9,10].

Фактической основой данной работы являются результаты детального картографирования участков современного естественного эолового рельефа на севере Западно-Сибирской равнины с использованием актуальных космических снимков и ЦМР среднего пространственного разрешения.

В качестве основы для картографирования были выбраны мультиспектральные снимки Sentinel-2 (съемка за 2016-2020 гг., разрешение 10 м), которые находятся в открытом доступе и обеспечивают высокую детальность результатов дешифрирования. Последовательность действий включала:

– получение исходных данных Sentinel-2 – формирование с помощью облачной платформы Google EarthEngine безоблачной мозаики на всю рассматриваемую территорию северной части Западной Сибири (период съемки – июль-август, облачность итогового покрытия – менее 3%);

– получение маски оголенных песков – использовался метод неконтролируемой классификации ISODATA с последующим атрибутированием класса песчаной поверхности (изначально выделялось до 15-ти различных исходных классов);

– редактирование и верификация полученной маски оголенных – использовался метод экспертного дешифрирования, удалялись участки песчаных отмелей (долины рек, прибрежная полоса озер, береговая линия моря), участки густых лишайников, площадные и, частично, линейные антропогенные объекты со значительной долей песчаной поверхности в пределах нефтегазовых месторождений (промышленные площадки, вахтовые поселки, затопленные карьеры и т.д.). Предельный минимальный порог площади выделяемых объектов был установлен на уровне 400 кв.м. Для верификации результатов дешифрирования применялись высокодетальные мозаики в картографическом сервисе *Яндекс.Карты*;

– проведение пространственного анализа – средствами геоинформационных систем (ГИС) выполнялся анализ распределения естественных и антропогенно нарушенных песков по административным районам, по границам горных отводов нефтегазовых месторождений, а также по абсолютным высотам (на основе цифровой модели рельефа TanDEM90). Пространственный анализ выполнялся в программной среде ArcGIS 10.8.

Для картографирования отдельных линейных форм рельефа использовались ЦМР ALOS World 3D-30m (AW3D30) и TanDEM90. AW3D30 представляет собой загрубленную до 1 угловой секунды (~30 м) ЦМР World 3D Topographic Data (разрешение 5 м), модель практически не содержит пробелов и артефактов, плановая точность составляет 4,4 м, абсолютная ошибка по высоте – 5,12 м, что подтверждается в частности для бассейна р.Надым [11]. Глобальная ЦМР TanDEM90 с разрешением 90 м создана на основе ЦМР WorldDEM с исходным разрешением 12 м. Модель WorldDEM является результатом интерферометрической съемки с двух радиолокационных спутников TerraSAR-X и TanDEM-X. Показатели точности достигают 2 м для относительных измерений и 4 м – для абсолютных. Обе описываемые ЦМР (AW3D30 и TanDEM90) находятся в открытом доступе.

Для улучшения визуализации ЦМР использовалась светотеневая отмывка рельефа в цветном виде. При создании светотеневой модели использовался способ многолучевого освещения с увеличением вертикального коэффициента. При настройке цветовой схемы границы гистограммы задавались с учетом небольшой (до 200 м) амплитуды абсолютных высот рассматриваемой территории.

Верификация результатов основана на материалах собственных полевых исследований и фондовых источниках.

Всего было выявлено 394129 участков оголенных песков естественного происхождения, средняя площадь составила 0,44 га, максимальная площадь – 33,52 кв.км (55 объектов более 1 кв.км.), общая площадь – 1929,15 кв.км. Пространственное распределение современного эолового рельефа отличается неравномерностью. Зоны максимальной концентрации выделяются на Ямальском, Гыданском и Тазовском полуостровах, а также в бассейнах рр. Пур и Надым (рис. 1).

На Ямале оголенные пески имеют два явно выраженных ареала распространения. В северной части развеваемые пески приурочены к Северо-Ямальской возвышенности, а также к северо-западной части полуострова (наклонная равнина севернее р. Пяседаяха). Южнее озер Ямбуто и Нейто плотность раздувов северного ареала в целом уменьшается. Южный ареал занимает территорию от устья р.Харасавэй до оз. Ярато 1-е, западная граница ареала проходит вдоль побережья Байдарацкой губы, восточная по возвышенности Хой, южная совпадает с водоразделом Щукинской возвышенности. Примечательно, что в пределах Усть-Обской и Ямальской низменностей, а также на западе полуострова оголенные пески практически не встречаются.

На Гыдане развеваемые пески приурочены к Гыданской гряде и, в меньшей степени, к Юрибейской и Нижнеенисейской возвышенностям. В пределах Северо-Гыданской, Танамской и Мессояхской низменностей эоловые раздувы имеют незначительное распространение. На Тазовском полуострове песчаные поверхности локализованы в северной части, а также в пределах Ямбургского месторождения. В бассейне рр. Пур и Надым наиболее крупные эоловые формы концентрируются в пределах второй надпойменной террасы, а также на водораздельных пространствах.

Согласно современным картам четвертичных образований (листы R-42, R-43 и др.), на территории полуострова Ямал большая часть площади современных эоловых образований (64,7%) приурочена к морским отложениям Лабсуйяхинской и Моржовской свит (казанцевского и ермаковского возраста соответственно). Более 10% площади относится к аллювию каргинского времени (Нярминская свита), 8,5% площади совпадает с участками ледниковых и озерно-ледниковых отложений (ермаковский горизонт), а порядка 4,5% относится к участкам Байдарацкого эолия. На Гыданском полуострове треть площади развеваемых песков также относится к морским отложениям верхнего звена неоплейстоцена (Паютинский мариний) приуроченным к зоне гляциодислокаций пород ледникового ложа. Треть площади приурочена к ледниковым отложениям Юрибейского гляциофлювиала и Карской морены (22,2 и 14% соответственно). Участки Байдарацкого эолия пересекаются с 3,2% оголенных песков.

Естественные участки оголенных песков имеют в целом нормальное высотное распределение – 86,6% площадей локализованы в интервале 10-60 м с явно выраженным плато от 30 до 45 м. Это несколько отличается от общего распределения высот рассматриваемой территории, где, в частности, присутствует локальный пик в интервале от 0 до 10 м.

В части линейных форм рельефа было выявлено 590 объектов, общей протяженностью 19,13 тыс.км, которые представляют собой линейно вытянутые гряды и могут быть отнесены к конечным ледниковым образованиям (рис. 1). Большая часть объектов как по количеству, так и по протяженности отнесена к тазовскому оледенению (46,6% и 43,7% соответственно), треть объектов отнесена к зырянскому оледенению. Расчет средней высоты объектов по всей выборке показывает статистически значимые различия – максимальные высоты характерны для морен самаровского оледенения (более 120 м, при стандартном отклонении 44,8 м), минимальные – для морен зырянского оледенения (около 70 м, при стандартном отклонении 30,5 м).

Следы ранезырянского оледенения более выражены по сравнению с древними оледенениями. В западной части равнины граница проходит по восточным предгорьям Урала и водоразделу полуострова Ямал (с выступом к востоку в районе озер Ярато). В центральной и восточной частях граница проведена по Гыданской гряде и водоразделу рр. Таз и Енисей приблизительно до 61,5° с.ш. В целом это соответствует представлениям А.А. Земцова [12] и В.А. Астахова [13], за исключением отдельных участков в районе г.Салехард, севера Ямала и верхнего течения р. Танама. В первом случае достаточно протяженная моренная гряда отнесена, согласно результатам полевых работ [13], к тазовскому оледенению, хотя ее морфологическая выраженность, сохранность и пространственное положение более соответствуют признакам зырянского оледенения. Во втором случае отличие связано с отсутствием геоморфологических признаков оледенения на севере Ямала. В третьем случае граница проведена восточнее р. Танама, учитывая и уточняя актуальные результаты, полученные в ходе работ по обновлению геологической карты [14].

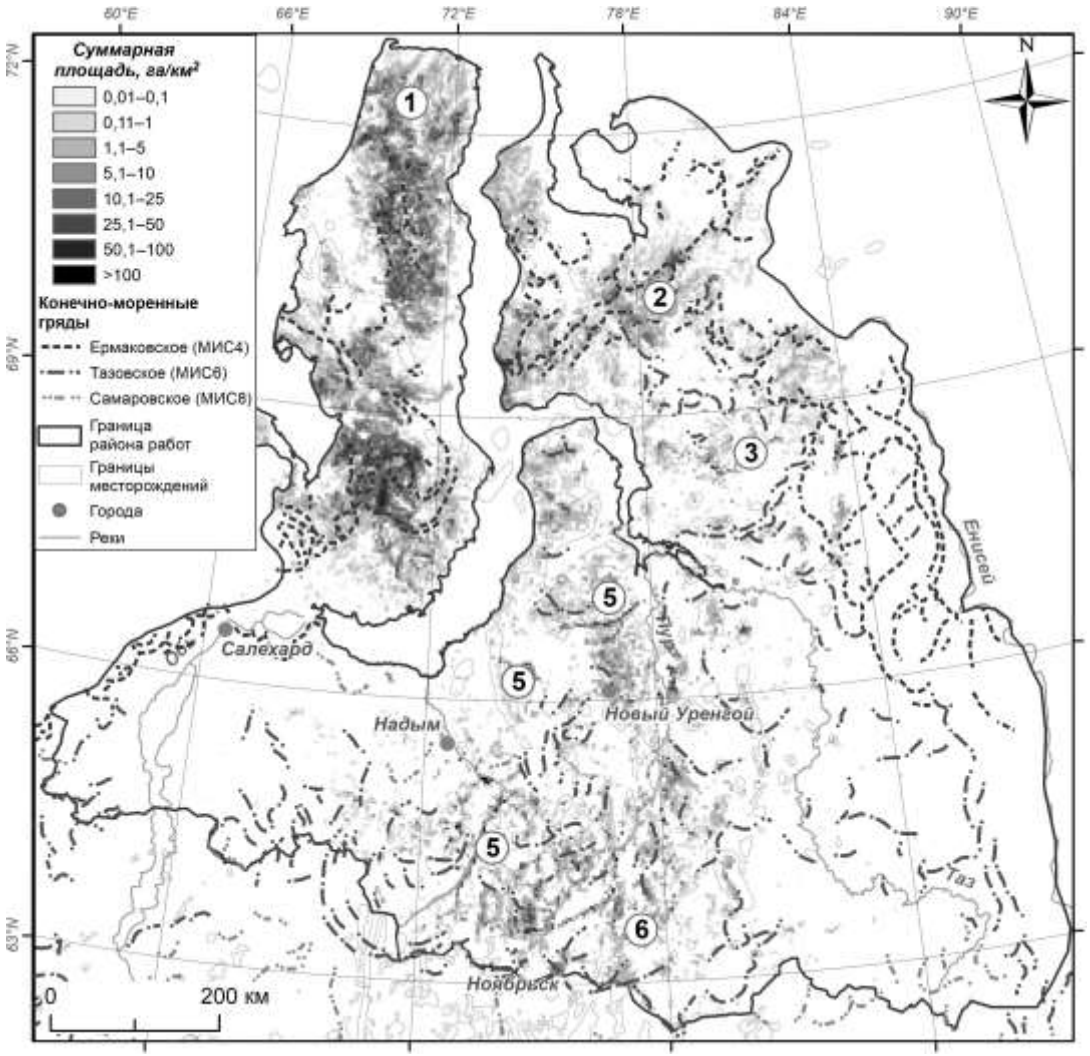



Рис. 1. Пространственная локализация оголенных эоловых песков в криолитозоне Западной Сибири: 1) древняя дельта р. Обь; 2) зандровые отложения к югу от конечной морены раннезырянского оледенения; 3) водно-ледниковые отложения в бассейне р. Мессояха; 4) водно-ледниковые отложения в зоне конечной морены карского (раннезырянского) оледенения; 5) переотложенные водно-ледниковые отложения в долинах современных рек; 6) зандровые отложения тазовского оледенения на водоразделах (МИС – морская изотопная стадия)

Результаты проведенных исследований [1,4,12,15,16] в целом показывают, что эоловые морфолитосистемы, закономерно развивающиеся в постледниковых материковых обстановках севера Западной Сибири, выражена на трех иерархических уровнях:

– макроуровень – зона распространения покровного оледенения;

– мезоуровень – зандровые равнины, долины стока талых ледниковых вод, прибрежные зоны ледниково-подпрудных водоемов, речные террасы и дельты современных рек;

– микроуровень – эоловые массивы, включающие котловины выдувания, параболические дюны и участки оголенных развеваемых песков.

Пространственные границы эоловых морфолитосистем на макроуровне совпадают с границами распространения покровных оледенений среднего и позднего неоплейстоцена. На мезоуровне границы выделяются на основе детальной палеогеографической интерпретации геологического и геоморфологического строения территории [12]. На микроуровне основой для выделения границ служит ландшафтная индикация хвойных лишайниковых редколесий [5].

По вертикали нижняя граница эоловой морфолитосистемы прослеживается в зоне контакта эоловых песков с нижележащими водными или водно-ледниковыми осадками [8,17]. Верхняя граница на участках оголенных песков непосредственно контактирует с нижней границей атмосферы, либо, в случае стабилизации подвижных песков почвенно-растительным покровом, проходит по контакту с иллювиально-эллювиальным горизонтом подзолов [1].

Таким образом, обобщенная геоморфологическая структура эоловых морфолитосистем состоит из нескольких каскадно-сопряженных зон накопления и переноса песчаного материала:

– зоны аккумуляции водно-ледниковых осадков (исходного субстрата) – включает пояс краевых ледниковых образований, зандровые равнины и ложбины стока талых ледниковых вод, а также участки развития временных ледниково-подпрудных водоемов [11];

– транзитной зоны переноса и трансформации (переотложения) исходных водно-ледниковых осадков – включает речные долины более молодого по отношению к оледенению возраста [4];

– зоны аккумуляции производных эоловых осадков – для дюнной фации (параболические дюны, периферические валы и поперечные дюны котловин выдувания) охватывает водораздельные пространства и прибрежные участки реки и озер, для водно-эоловой фаций (перевевание на отмелях) охватывает прибрежные участки водоемов; для покровной фации отмечается практически повсеместное (плащеобразное, «всюдное») распространение [7].

Выделенные этапы эрозионно-аккумулятивного цикла развития эоловых морфолитосистем на севере Западной Сибири могут быть привязаны к абсолютной геохронологической шкале. Этому способствует накопленный к настоящему времени существенный массив абсолютных датировок эоловых песков, а также подстилающих и перекрывающих их четвертичных отложений различного генезиса [13,18,19]. Геохронологические этапы развития эоловых морфолитосистем включают:

I. Ледниковый этап (МИС-6/4): формирование обширных зандровых и озерно-ледниковых аккумулятивных песчаных равнин.

II. Водный внеледниковый этап (МИС-5/3): речное переотложение водно-ледниковых песчаных отложений, аккумуляция фации «холодного» аллювия в речных долинах.

III. Водно-эоловый этап (МИС-2): формирование котловин выдувания и параболических дюн во время глобального климатического перехода от потепления к похолоданию и от похолодания к потеплению (эоловая активизация не ранее 34 тыс л.н.; стабилизация – не позднее 12 тыс л.н.).

IV. Эолово-биологический этап (голоцен): повсеместно затухание эоловых процессов на фоне развития процессов заболачивания и почвообразования (начиная с 12-11 тыс. л.н. до настоящего времени); эпизодическая эоловая активизация в результате локального сочетания благоприятных условий и антропогенного воздействия.

Таким образом, в криолитозоне Западной Сибири можно выделить особый тип иерархически организованной эоловой морфолитосистемы, в которой эоловые процессы функционально объединяют и завершают эрозионно-аккумулятивный цикл трансформации водно-ледниковых песчаных осадков, инициируемый рельефообразующим воздействием покровного оледенения.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00732, https://rscf.ru/project/25-27-00732/*

***Литература***

Сизов О.С. Геоэкологические аспекты современных эоловых процессов северотаежной подзоны Западной Сибири. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2015. – 124 с.

Velichko A.A., Timireva S.N., Kremenetski K.V., MacDonald G.M., Smith L.C. West Siberian Plain as a late glacial desert // Quat. Int. – 2011. – V. 237, № 1–2. – P. 45–53.

Сизов О.С., Лоботросова С.А. Особенности восстановления растительности в пределах участков развеваемых песков северотаежной подзоны Западной Сибири // Криосфера Земли. – 2016. – Т. 20, № 3. – С. 3–14.

Зыкина В.С., Зыкин В.С., Вольвах А.О., Овчинников И.Ю., Сизов О.С., Соромотин А.В. Строение, криогенные образования и условия формирования верхнечетвертичных отложений Надымского Приобья // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 20, № 6. – С. 14–25.

Сизов О.С., Лоботросова С.А., Соромотин А.В. Лишайниковые сосняки северной тайги Западной Сибири как индикатор ледниковых условий рельефообразования // Проблемы региональной экологии. – 2017. – № 2. – С. 60–68.

Derbyshire E., Owen L.A. Glacioaeolian Processes, Sediments, and Landforms // Past Glacial Environments. – Elsevier, 2018. – P. 273–308.

Forman S.L., Ingólfsson Ó., Gataullin V., Manley W., Lokrantz H. Late Quaternary stratigraphy, glacial limits, and paleoenvironments of the Marresale area, Western Yamal Peninsula, Russia // Quat. Res. – 2002. – V. 57, № 2. – P. 355–370.

Nazarov D.V., Nikolskaia O.A., Zhigmanovskiy I.V., Ruchkin M.V., Cherezova A.A. Lake Yamal, an ice-dammed megalake in the West Siberian Arctic during the Late Pleistocene, ~60–35 ka // Quat. Sci. Rev. – 2022. – V. 289. – P. 107614.

Лист R-44 – Гыданский п-ов. Объяснительная записка. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. – СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2019. – 302 с.

Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав повторно-жильных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций). – М.: МГУ, ПНИИИС, 1992. – Т. 2. – 264 с.

Sizov O. Predictive Mapping of Glacial and Fluvioglacial Landforms in the Nadym River Basin (North of West Siberia) with TanDEM-X DEM // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. – 2021. – V. 14. – P. 5656–5666.

Земцов А.А. Геоморфология Западно-Сибирской равнины: Северная и центральная части. – Томск: Издательство Томского университета, 1976. – 343 с.

Астахов В.И., Назаров Д.В. Стратиграфия верхнего неоплейстоцена севера Западной Сибири и ее геохронометрическое обоснование // Региональная геология и металлогения. – 2010. – № 43. – С. 36–47.

Назаров Д.В., Никольская О.А., Гладышева А.С., Жигмановский И.В., Ручкин М.В., Меркульев А.В. Плейстоценовые морские толщи бассейна нижнего Енисея: ОСЛ-возраст, фациальная и палеонтологическая характеристики // Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 82. – С. 16–34.

Сизов О.С., Соромотин А.В., Лоботросова С.А., Лобжанидзе Н.Е., Приходько Н.В. Нарушенность почвенно-растительного покрова на севере Западной Сибири: пространственное распространение и способы рекультивации // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2022. – Т. 4, № 307. – С. 40–46.

Сизов О.С. Концепция криогидроэолового рельефообразования в постледниковых материковых обстановках севера Западной Сибири // Региональные геосистемы. – 2025. – Т. 49, № 4. – С. 735–752.

Земцов А.А. Развевание песков на севере Западно-Сибирской низменности // Вопросы географии Сибири. Сборник 4. – Томск: Издательство Томского университета, 1962. – С. 81–90.

Sizov O., Konstantinov A., Volvakh A., Molodkov A. Timing and Sedimentary Record of Late Quaternary Fluvio-Aeolian Successions of the Tura-Pyshma Interfluve (SW Western Siberia, Russia) // Geosciences. – 2020. – V. 10, № 10. – P. 396.

Астахов В.И., Свенсен Й.И. Покровная формация финального плейстоцена на крайнем северо-востоке европейской России // Региональная геология и металлогения. – 2011. – Т. 47. – С. 12–27.

## АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ПО ДИАГНОСТИКЕ СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ НА КАПИТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ Г. САЛЕХАРД

***А.И. Синицкий, А.Н. Шеин, А.А. Башкова***
*ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики»*

За последние десять лет, значительный рост строительства гражданской инфраструктуры на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (далее - ЯНАО) и вопрос с надежностью оснований и фундаментов данных сооружений становится наиболее значимым и острым.

Процессы создания и функционирования сооружений методологически увязываются в звенья единой цепи: изыскания – проектирование – строительство – эксплуатация путем управления качеством природно-технических геосистем на всех этих стадиях.

Вместе с этим, при эксплуатации инженерных объектов на многолетнемерзлых грунтах (далее – ММГ) часто наблюдается ситуация, когда в здание было вложено немало средств: проводились текущие ремонты, утепление и облицовка фасада, установка систем термостабилизации грунтов. Однако, несмотря на эти усилия, здание в конечном итоге было снесено. Практически все, описанные в литературных источниках отказы, связанные с потерей надежности геотехнической системы «фундамент — грунты основания», были обусловлены либо просчетами проектировщиков или служб эксплуатации, либо некорректной оценкой её снижения вследствие теплового загрязнения грунтов основания. Разные исследователи оценивают потерю надежности сооружений по упомянутым причинам в пределах 65–83% (остальное объясняют строительным браком) [1].

Для защиты свойств грунтового основания зданий и сооружений с прошлого столетия в строительстве активно используются системы и устройства температурной стабилизации грунтов

(далее - ТСГ). Данные системы и устройства необходимы для поддержания грунтов основания зданий и сооружений в их первоначальном виде.

Принцип действия системы ТСГ заключается в том, что термостабилизаторы, помещают в специальные скважины, пробуренные рядом с фундаментом для создания мерзлотного экрана. В зимнее время конвекционная циркуляция хладагента в термостабилизаторах обеспечивает охлаждение грунтов основания. С наступлением летнего периода, как только температура верхней части устройства, находящегося на наружном воздухе, становится выше температуры хладоносителя, циркуляция прекращается, и процесс приостанавливается с частичным инерционным оттаиванием верхнего слоя грунта до следующего похолодания.

Система ТСГ, как и любое техническое средство, требует проведения периодического контроля на разных этапах жизненного цикла объекта. Для этого требуется проводить диагностику с целью определения технического состояния системы и выявления элементов, которые находятся в нерабочем состоянии.

Соответственно, одним из способов определения работоспособности системы является тепловизионная диагностика, позволяющая на основании термографической съемки объекта выявить дефектные её элементы.

Способ тепловизионной диагностики, предусматривающий использование тепловизора (термографа) и съемку разности температур, на данный момент является оптимальным при диагностике работоспособности системы ТСГ. Среди всех преимуществ тепловизионной диагностики можно выделить:

- высокую температурную и пространственную разрешающую способность приборов;
- дистанционность измерения при полном исключении механического контакта и нарушения поля температур измеряемого объекта;
- высокую информативность;
- возможность использовать приборы для диагностики систем различных размеров;
- большой диапазон температур, охватываемых одним и тем же прибором.

Основной проблемой проведения работ по тепловизионной диагностике систем и устройств термостабилизации грунтов является отсутствие единой методики и нормативной базы, подходящей для проведения диагностики таких устройств. В связи с этим однозначно определить, насколько установленная на инженерном объекте система эффективна, невозможно [2].

В п. 8.6. СП 497.1325800.2020. «Свод правил. Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила эксплуатации» сказано, что для проверки работоспособности термостабилизаторов используется метод тепловизионного контроля, дистанционного измерения тепловизором полей температур поверхности конденсаторной части термостабилизаторов. Тепловизионное обследование должно проводиться в соответствии с требованиями ГОСТ 26629.

При этом ГОСТ 26629 распространяется только на ограждающие конструкции жилых, общественных, промышленных и сельскохозяйственных зданий и сооружений…

В этой связи, назрела необходимость в разработке свода правил по обследованию систем термостабилизации грунтов оснований для условий городской застройки и производственных объектов, в том числе с помощью метода тепловизионного контроля.

Контроль работоспособности систем ТСГ в рамках предварительного(визуального) осмотра или геотехнического мониторинга базируется на их основном принципе работы в холодный период года, который заключается в естественно-действующей циркуляции теплоносителя (углекислота, аммиак и др.) между подземной трубной конструкцией, где он нагревается и переходит в парообразное состояние, и находящимся на земной поверхности конденсаторным блоком, где этот теплоноситель остывает и конденсируется. В дальнейшем сконденсированная жидкость под влиянием силы тяжести вновь опускается в подземную конструкцию. Тем самым происходит охлаждение и замерзание грунтов, формирующих основания зданий и сооружений. Сравнивая температуру наружного воздуха с температурой на оребрении термостабилизатора, конденсаторного блока и подведенных к ним труб с теплоносителем, можно судить об эффективности работы систем ТСГ [3].

Техническими причинами неисправности СОУ могут быть: попадание в состав газа-теплоносителя других газовых примесей, способствующих остановке или затруднению его циркуляции в системе; разгерметизация системы; нарушение состояния оребрения; нарушение проектного положения конденсаторной части и др.

Частично работающие СОУ, как правило, выявляются при наличии в них заводских дефектов, связанных с некачественной заправкой хладагента, применением хладагентов с низкой степенью очистки от примесей, сложностью отдельных узловых элементов самих устройств. По результатам

диагностики таких устройств в конденсаторной части СОУ образуются неконденсируемые газы в виде «шапки», приводящей к снижению эффективности работы.

Вместе с этим, в своей статье Т.В. Шепитько из Российского университета транспорта отмечает, что существенным недостатком работы СОУ является необходимость их обслуживания для обеспечения эффективной работы данных устройств [4].

Существующие мероприятия по определению выхода систем из строя весьма трудоемки и требуют значительное количество материальных и финансовых затрат. Именно поэтому определение работоспособности и тепловой эффективности работы сезоннодействующих охлаждающих устройств эффективнее всего выполнять методом тепловизионной диагностики, которая предусматривает использование тепловизора (термографа).

Термограммы, получаемые с помощью тепловизора, позволяют судить о качестве заправки по состоянию однородности температурного поля на поверхности конденсаторной части (перепад температур между ее верхней и нижней частями не должен превышать 1 $^{o}$C) [5].

Выполнение тепловизионной диагностики оребренной поверхности термостабилизаторов (конденсаторного блока) и подведенных к ним труб с теплоносителем (корпус испарителя) на объектах капитального строительства в г. Салехард осуществлялось с помощью профессионального инфракрасного тепловизора Tianbo H60 (регистрационный номер №89288-23), который находится на балансе в ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (далее – научный центр). Тепловизор H60 полностью соответствует, а по многим пунктам превосходит типовые технические требования ПАО «Россети» к профессиональным моделям инфракрасных камер (свидетельство о поверке № С-ДЮП/16-11-2023/295233951).

Диапазон измеряемых температур: от -20 до +50 градусов по Цельсию, что позволяет использовать прибор в различных отраслях промышленности таких как энергетика, металлургия, в т.ч. применять в условиях Крайнего Севера.

Обследование систем термостабилизации грунтов проводилось согласно разработанной методике (см. [2]) в конце зимнего сезона 2026 года (конец марта). В ходе полевых работ были обследованы проветриваемые подполья и прилегающая территория у четырёх капитальных зданий в г. Салехард, где установлены повсеместно СОУ разных производителей и модификаций. Работы проводились в темное время суток, чтобы исключить влияние энергии солнечного излучения, которая при отражении вносит погрешность в измерения, а также при температуре воздуха от -17 до -25°С.

Система ТСГ на обследуемых инженерных объектах преимущественно представляет собой систему единичных СОУ, которые приурочены к свайному фундаменту (в среднем, на одну сваю, одно СОУ).

Помимо тепловизионной съемки, с помощью высокоточного поверхностного смарт-зонда со встроенной флеш-памятью, на конденсаторном блоке контактным способом определялась температура его верхней части, там, где заканчивается оребрение и нижней части конденсатора, в месте стыковки с подводящей трубкой (рис. 1). Скорость ветра в разных частях подполья определялась с помощью портативного датчика скорости ветра (крыльчатый анемометр), установленного на штативе на уровне кондесаторного блока у СОУ. Для заверки микроклиматических условий в конкретном участке подполья использовался многофункциональный прибор для контроля параметров микроклимата, который позволяет одновременно измерять до 8 параметров окружающей среды, включая температуру, относительную влажность, атмосферное давление, скорость воздушного потока и др. Всё измерительное оборудование включено в реестр СИ, имеет сертификацию и поверку на момент обследования капитальных объектов.

Получаемые с помощью вышеуказанных приборов параметры микроклимата в проветриваемом подполье требуются для последующей оценки общей эффективности работы системы ТСГ, когда требуется рассчитать коэффициент удельной тепловой нагрузки на испарительную часть каждого элемента системы, используя уравнение Ньютона-Рихмана, указанного в методических рекомендациях на стр. 22 [2].

Важно отметить, что для правильной диагностики систем ТСГ необходимо знать температуру грунтов оснований в момент проведения обследования. Ведь термостабилизатор «работает» на полную мощность только тогда, когда разница в температуре достигает минимум 15 градусов между конденсаторным блоком и его испарительной частью. В этой связи, самые объективные данные о работе систем ТСГ будут получены в начале зимнего периода, т.е. с наступлением первых холодов, в то время как грунты оснований находятся ещё в самом «теплом» своём состоянии.

Рис. 1. Обследование систем термостабилизации грунтов оснований под объектом капитального строительства в г. Салехард, март 2026 г.

Первые результаты апробации методики по диагностике систем и устройств температурной стабилизации грунтов на капитальных объектах г. Салехард показали интересные практические результаты. Так, например, при температуре воздуха в подполье -18$^0$С, средняя температура конденсаторного блока СОУ на 3-4 градуса выше, что вполне соответствует теоретическим положениям, указанных в методических рекомендациях. В периферийных частях зданий, где подполье более подвержено внешнему задуванию холодного воздуха зимой, а это как правило со стороны открытых участков городской агломерации, со стороны проспектов, дорог и т.п., грунты оснований находятся в более «холодном» состоянии по сравнению с частями зданий, которые расположены со стороны дворовых, «закрытых» городских зон. Это косвенно подтверждает тот факт, что от интенсивности и равномерности обдува воздухом зоны конденсации термосифона напрямую зависит эффективность отвода тепла и общая производительность устройства.

При этом часто получить однозначный ответ о работоспособности всего СОУ в конце зимнего периода наблюдений сложно, т.к. грунты оснований в это время года максимально промерзлые или охлаждены, а хладагент внутри корпуса СОУ не всегда заполняет внутритрубное пространство (поднимается до верхней части конденсатора).

Помимо знаний температурного режима грунтового основания на объекте, на момент обследования систем ТСГ, важно также знать технические характеристики установленных здесь СОУ, которые указываются в паспорте на техническое изделие (тип хладагента, площадь оребренной поверхности, длина испарительной части и др.). Только по совокупности всех климатических, геологических и технических параметров на инженерном объекте можно объективно оценить работоспособность систем и устройств температурной стабилизации грунтов.

***Литература***

1 Попов А.П., Милованов В.И., Жмулин В.В., Рябов В.А., Бережной М.А., Усачев А.А., Дуденко И.А. Перспективы использования криогенного ресурса для строительства крупных центров добычи и систем транспорта газа в циркумполярных областях в случае подтверждения гипотезы о глобальном потеплении климата // Инженерные изыскания. - 2009. - №10. – С. 18-37.

2 В.А. Муря, Д.В. Топчий, В.В. Ефимов. Разработка положений методических рекомендаций по тепловизионной диагностике систем и устройств температурной стабилизации грунтов // ООО «НИИ ПТЭС». - Москва. - 2024. - 43 с.

3 Г.М. Долгих. Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне: Актуальные вопросы исследований, расчетов, проектирования, производства, строительства, авторского надзора и мониторинга // НПО «Фундаметстройаркос». – Новосибирск: Академическое издательство «Гео». - 2014. – 217 с.

4 Т.В. Шепитько., И.А. Артюшенко. Оценка влияния сезонно-действующих охлаждающих устройств на теплофизические процессы грунтов основания железнодорожной насыпи // Мир транспорта. - 2023. - Т. 21. №1 (104). - С. 14 – 21.

5 С. Н. Стрижков, Н. А. Скорбилин Мониторинг как критерий оценки надежности объектов с системами температурной стабилизации грунтов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2012. – № 1(29). – С. 10-17.

## ДРЕВНИЕ ЛЕДНИКОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ КАК КРИТЕРИЙ ДОСТОВЕРНОСТИ МОДЕЛЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ (НА ПРИМЕРЕ ДОКЕМБРИЙСКИХ И ФАНЕРОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ АФРИКИ И БЛИЖНЕГО ВОСТОКА)

***К.А. Ситар[1], Б.В. Георгиевский[2], С. Цзыни[1]***
*[1]Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва*
*[2]ООО «ЗН НТЦ», г. Москва*

Дочетвертичные гляциальные отложения представляют собой специфический комплекс литофаций, формирующийся в результате экзарационной и аккумулятивной деятельности ледников в истории Земли. В отличие от аллювиальных систем, где гидродинамический режим обеспечивает сепарацию обломочного материала по гидравлической крупности, ледниковый отложения характеризуются отсутствием сортировки. Это приводит к образованию диамиктитов (или тиллитов) – массивных мегабрекчий, в которых алевропелитовый матрикс заключает в себе неокатанные обломки широкого диапазона размерности, от гравия до гигантских эрратических валунов.

Важнейшим диагностическим признаком прямого ледникового воздействия является морфология кластов и состояние подстилающего субстрата. В процессе движения ледника под давлением вышележащих масс льда обломки подвергаются механической абразии, приобретая характерную форму и покрываясь ледниковой штриховкой – системой субпараллельных борозд. Аналогичные микроформы рельефа, называемые ледниковыми шрамами, фиксируются на поверхности коренных пород (ледниковых ложах), что позволяет реконструировать вектор движения палеоледника [1].

В бассейнах, сопряженных с ледниковыми щитами, формируются специфические перигляциальные и гляциоморские фации. К ним относятся дропстоуны – класты, перенесенные айсбергами (айсберговый разнос) и захороненные в тонкослоистых дистальных осадках. Ключевым критерием их идентификации служат структуры протыкания и деформации нижележащих слоев при их последующем облекании фоновой седиментацией. В условиях приледниковых озер типично формирование варвов – ритмично слоистых ленточных глин, где каждая пара слоев отражает сезонный цикл таяния и стагнации, выступая в роли высокоразрешающего хронометра седиментационных процессов.

Тектоническая позиция таких отложений часто приурочена к этапам рифтогенеза или пассивных окраин, а их изучение в разрезах древних платформ, таких как Восточно-Европейская, позволяет верифицировать модели глобальных климатических перестроек [2]. Сочетание геоморфологических признаков, таких как озы (инфильтрационные песчаные тела подледниковых потоков), с изотопно-геохимическими данными позволяет не только подтвердить факт оледенения, но и оценить динамику изменения уровня мирового океана и газового состава атмосферы в геологическом прошлом.

Исследование ледниковых отложений в осадочных разрезах играет важную роль в современной геологии, выступая ключевым инструментом для верификации моделей глобальных тектонических перестроек и климатических катастроф. Так, например, на основе неопротерозойских осадочных разрезов и выделенных в них ледниковых отложений, повсеместно распространенных на всех древних кратонах, была сформулирована гипотеза «Земли-снежка» (Snowball Earth). В рамках этой концепции палеогляциальные индикаторы, такие как диамиктиты и дропстоуны, обнаруженные в низких палеоширотах, свидетельствуют о критическом падении температур, при котором ледниковые щиты достигали экватора, полностью изолируя океан от атмосферы [3]. С точки зрения седиментологии, изучение этих толщ позволяет реконструировать динамику распада суперконтинента Родиния.

Ледниковые горизонты часто локализуются в рифтогенных структурах и перикратонных прогибах, фиксируя моменты тектонической нестабильности. Особое значение имеет анализ сопутствующих перекрывающих карбонатных отложений – специфических доломитовых пачек, резко перекрывающих ледниковые тиллиты. Их изотопный состав (резкие отрицательные аномалии $\delta^{13}C$) служит геохимическим индикатором, отражающим мгновенный коллапс ледниковой системы и катастрофический выброс парниковых газов, что делает неопротерозойские разрезы эталоном для изучения обратных связей в системе «климат – биосфера – литосфера» [4].

В контексте биогеохимии ледниковые отложения криогения рассматриваются как своего рода эволюционное «бутылочное горлышко», особенно ярко выраженное в разрезах окраин кратона Конго [5] и супергруппы Хукф в Омане [6]. Интенсивное химическое выветривание после завершения оледенений приводило к масштабному поступлению биогенных элементов, в частности фосфора, в мировой океан. Это стимулировало первичную продуктивность и последующую оксигенацию атмосферы, создавая условия для появления эдиакарской фауны. Таким образом, палеогляциологические исследования неопротерозоя выходят за рамки узкой дисциплины, становясь междисциплинарным мостом, соединяющим тектонику плит, химическую эволюцию океана и биологический прогресс на рубеже становления многоклеточной жизни.

Исследование позднеордовикских гляциальных отложений (хирнантский ярус) занимает уникальное место в калибровке плитотектонических реконструкций, выступая в роли высокоточного палеогеографического репера. В отличие от глобальных неопротерозойских оледенений, Хирнантское событие имело четко выраженную полярную локализацию, что позволяет использовать его следы для жесткой фиксации южного полюса на суперконтиненте Гондвана [7]. Обнаружение тиллитов, дропстоунов и ледниковых лож этого возраста на территориях современной Северной Африки, Аравийского полуострова и Южной Америки служит неоспоримым доказательством нахождения этих блоков в приполярных широтах в конце ордовикского этапа развития Земли.

С точки зрения плитотектонического моделирования, позднеордовикские гляциальные комплексы позволяют верифицировать скорости и траектории дрейфа Гондваны. Кратковременность этого оледенения (по разным оценкам от 0,5 до 2 млн лет) обеспечивает уникальную возможность для «мгновенной» (в геологическом масштабе) синхронизации разрезов. Точное картографирование границ распространения ледникового щита в Африке и на сопредельных территориях Ирана и Омана дает возможность уточнить взаимное расположение этих террейнов и их ориентацию относительно палеополюса, что критически важно для устранения неопределенностей по долготе в существующих реконструкциях [8].

Кроме того, анализ гляциоэвстатических колебаний уровня моря, зафиксированных в стратиграфической «летописи» этого периода, позволяет оценивать объемы палеольда и сопоставлять их с палеогеографической площадью суши в высоких широтах. Таким образом, хирнантские ледниковые отложения возможно применять как инструмент калибровки, позволяя сверять палеомагнитные данные с реальными литологическими индикаторами климата.

Исследование каменноугольно-пермских гляциальных отложений (интервал около 320-270 млн лет назад) имеет определяющее значение для верификации конфигурации и кинематики суперконтинента Гондвана в рамках плитотектонических реконструкций позднего палеозоя. Данный ледниковый период, известный как позднепалеозойское ледниковое событие (LPIA), характеризуется исключительным пространственным масштабом, охватывающим современные территории Южной Америки, Африки, Индии, Австралии и Антарктиды. Фиксация палеогляциальных отложений (тиллитов и флювиогляциальных пород, экзаррационных поверхностей) позволяет использовать их в качестве палеогеографических индикаторов для восстановления взаимного расположения континентальных блоков, составлявших ядро южного суперконтинента.

С точки зрения плитотектонического моделирования, эти отложения выступают как критический инструмент контроля точности палеомагнитных данных. На рис. 1 приведена карта анализируемых в данной работе гляциальных отложений региона: примечательно, что гляциальные отложения и разрезы неопротерозойских и палеозойских комплексов в современном расположении могут быть весьма географически близки. В то время как палеомагнетизм дает информацию о широте и ориентации блока, анализ гляциальных систем позволяет реконструировать относительную долготу и связность материков. Например, сопоставление направлений движения ледниковых потоков, зафиксированных в штриховке на скальных ложах Бразилии и Западной Африки, позволяет однозначно подтвердить их сочленение в составе единого гляциального центра. Это делает каменноугольно-пермские отложения «связующим звеном», исключающим гипотезы о значительных океанических пространствах между этими фрагментами Гондваны в указанный период.

Кроме того, высокая цикличность каменноугольно-пермских отложений предоставляет уникальные данные для калибровки моделей глобальной эвстазии. Резкие колебания уровня Мирового океана, зафиксированные в мелководных шельфовых разрезах Лавразии (например, в паралических угленосных сериях), напрямую коррелируют с объемом ледяных щитов в высоких широтах Гондваны. Таким образом, гляциальные отложения этого возраста функционируют как глобальный временной репер геологических событий, позволяя верифицировать не только положение

континентальных плит, но и динамику их взаимодействия с океанической и атмосферной системами в условиях экстремального похолодания.

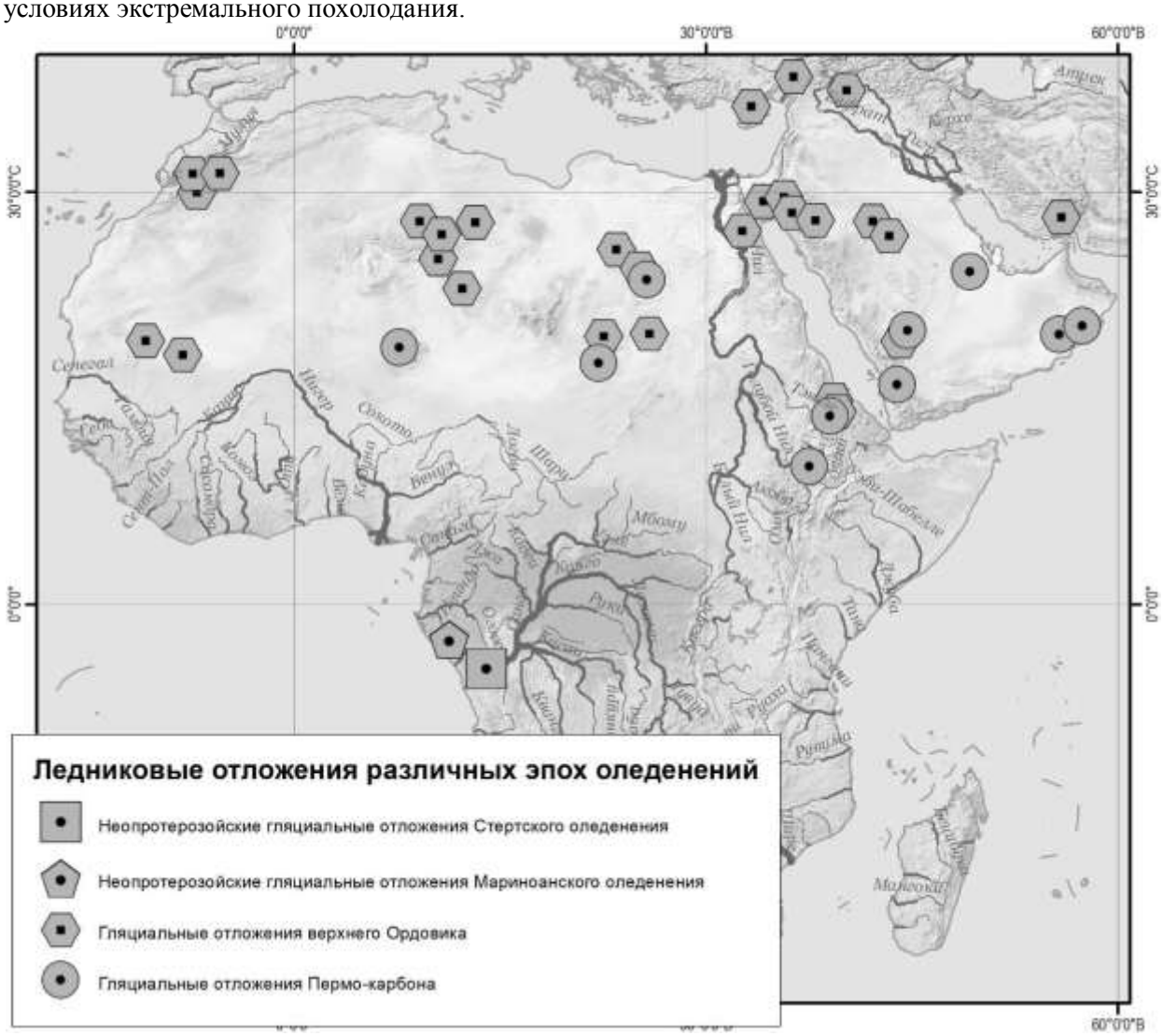


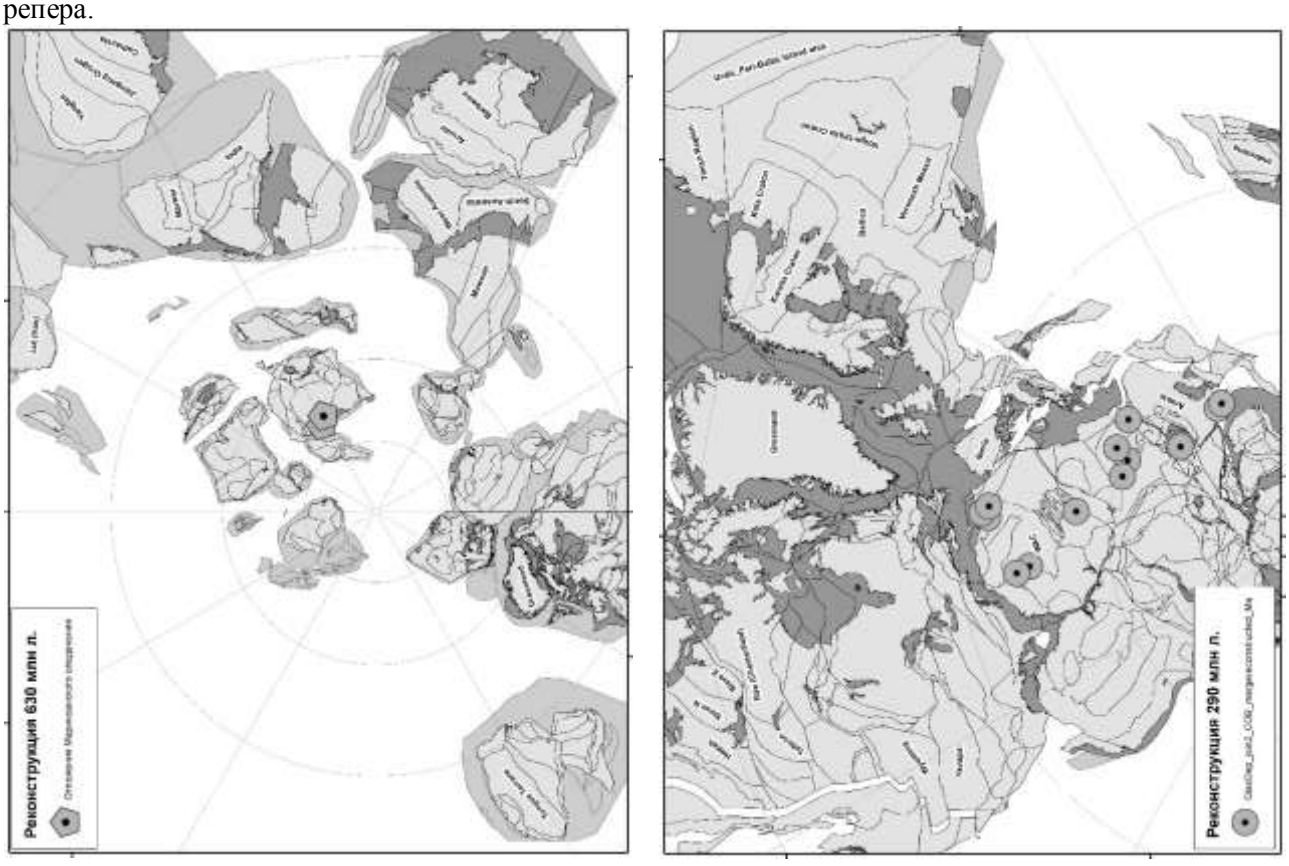

Рис. 1. Расположение неопротерозойских и палеозойских гляциальных комплексов, анализируемых на плитотектонических реконструкциях в данной работе. На основе материалов [9, 10].

Для разновозрастных гляциальных комплексов были выполнены плитотектонические реконструкции на основе одной из наиболее детально проработанных плитотектонических моделей [4]; серия реконструкций приведена на рис. 2. Для верификации докембрийских плитотектонических реконструкций [4] были использованы данные по неопротерозойским ледниковым отложениям пачки «Grand Conglomérat» (Конголезского осадочного бассейна; [5]) и формаций Абу-Махара супергруппы Хукф (Huqf Supergroup) [6]. Неопротерозойские гляциальные отложения пачки «Grand Conglomérat»представлены мощными толщами массивных диамиктитов. Эти отложения характеризуются матрикс-поддерживаемой текстурой, где алевропелитовый основной состав заключает в себе неокатанные обломки (кластеры) метаосадочных и магматических пород. Авторы подчеркивают тесную связь этих отложений с этапами внутриконтинентального рифтогенеза и активностью крупных изверженных провинций (LIPs), что позволяет использовать их для калибровки положения кратона Конго в составе Родинии. А ледниковые отложения супергруппы Хукф представлены массивными тиллитами, переходящими в тонкослоистые дистальные осадки с многочисленными дропстоунами (что свидетельствует об активности плавучих льдов). Здесь же зафиксирована выраженная отрицательная аномалия в перекрывающих доломитах («cap carbonates»). Детальный седиментологический анализ позднеордовикских хирнантских отложений в работах [7, 8] описывает уникальные ледниковые ландшафты, зафиксированные в разрезах формаций Сахмах и аравийских аналогов. Гляциальный комплекс представлен палеодолинами, заполненными флювиогляциальными песчаниками, и массивными тиллитами, залегающими на экзаррационных

поверхностях. Здесь же фиксируется наличие ледниковой штриховки и характерных микроформ рельефа, указывающих на вектор движения ледникового щита Гондваны с юга на север.

Каменноугольно-пермские гляциальные комплексы Гондваны, согласно обобщенным данным [1], представляют собой результат позднепалеозойских ледникового события (LPIA) в Африке и на сопредельных территориях и представляют собой наиболее мощные и латерально выдержанные гляциальные серии в истории Земли. Основной литофацией являются массивные диамиктиты, формировавшиеся как в континентальных условиях (наземные морены), так и в гляциоморских обстановках. В разрезах центральной и южной Африки эти толщи залегают на палеозойском фундаменте с четко выраженными формами ледниковой экзарации: «бараньими лбами», глубокими бороздами и штриховкой, что позволяет с высокой точностью восстанавливать центры оледенения. В работах [2] и [4] подчеркивается, что для этого периода характерна высокая цикличность: тиллиты закономерно сменяются межледниковыми морскими и озерными осадками, что отражает пульсацию ледникового щита Гондваны. Эти отложения выступают в качестве «контрольных точек» для верификации модели, подтверждая нахождение данных блоков в приполярных и умеренных широтах Южного полушария в интервале 320-270 млн лет назад.

Таким образом, анализ специфических литофаций (диамиктитов, дропстоунов) и геоморфологических признаков (ледниковой штриховки) дает возможность не только уточнить взаимное положение континентальных блоков в составах суперконтинентов Родиния и Гондвана, но и проследить взаимосвязь между глобальными оледенениями, резкими изменениями газового состава атмосферы и переломными этапами в эволюции биосферы. Исследование дочетвертичных ледниковых отложений Африки и Ближнего Востока позволяет верифицировать модели тектонической эволюции Земли, выступая в роли надежного палеогеографического и климатического репера.



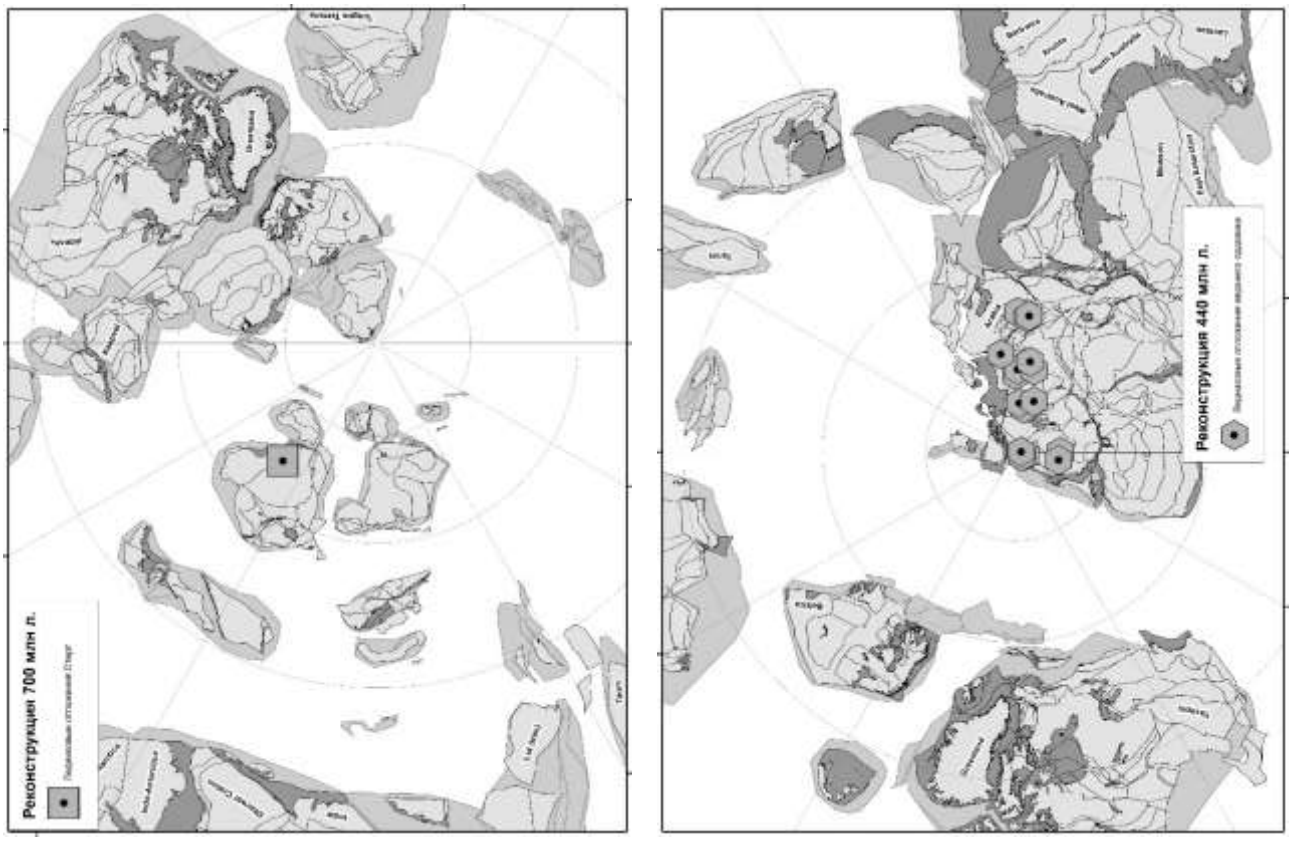



Рис. 2. Серия плитотектонических реконструкций положения гляциальных комплексов неопротерозоя, ордовика и пермо-карбона на реконструкциях 700 млн л., 630 млн л., 440 млн л. и 290 млн. л. Реконструкции выполнены на основе модели [4]. Фактические данные положения гляциальных комплексов [9, 10].

***Литература***

1 Eyles N., Januszczak N. 'Zipper-rift' structural signals for the Neoproterozoic glaciations of Rodinia supercontinent // Earth-Science Reviews. 2004. Vol. 65. P. 1–73.

2 Merdith A.S., Williams S.E., Collins A.S. et al. Extending full-plate tectonic models into deep time: Linking the Neoproterozoic and the Phanerozoic // Earth-Science Reviews. 2021. Vol. 214. 103477.

3 Hoffman P.F., Schrag D.P. The Snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change // Terra Nova. 2002. Vol. 14. P. 129–155.

4 Cao X., Collins A.S., Pisarevsky S. et al. Earth's tectonic and plate boundary evolution over 1.8 billion years // Geoscience Frontiers. 2024. Vol. 15. Issue 6. 101922.

5 Cederberg J., Soderlund U., Ernst R.E. et al. The 1.1 Ga (late Mesoproterozoic) and 0.8 Ga (early Neoproterozoic) large igneous provinces of the Congo Craton // Precambrian Research. 2016. Vol. 278. P. 237–251.

6 Le Guerroué E., Allen P.A., Cozzi A. Chemostratigraphy of the Neoproterozoic Huqf Supergroup of Oman: A standard for the Cryogenian to Early Cambrian of the East Arabian Margin // Sedimentary Geology. 2006. Vol. 190. P. 225–259

7 Ghani H., Zeigler K., Al-Saeedi A. Late Ordovician (Hirnantian) glaciation in the Middle East: A review of the sedimentary record and palaeogeography // Geological Journal. 2021. Vol. 56. P. 1520–1545.

8 Ghani H., Roscher M., Al-Saeedi A. et al. Stratigraphy and sedimentology of the Late Ordovician (Hirnantian) glacial deposits in the United Arab Emirates and Oman // Journal of Asian Earth Sciences. 2020. Vol. 191. 104231.

9. Elhebiry M.S., Sultan M., Abu El-Leil I., Kehew A.E., Bekiet M.H., Shahid I.A., Soliman N. M. A., Abotalib A.Z., Emil M. Paleozoic glaciation in NE Africa: field and remote sensing-based evidence from the South Eastern Desert of Egypt, International Geology Review. 2019.

10. Arnaud E., Halverson G. P. Shields-Zhou G. (eds). The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations. Geological Society, London, Memoirs, 36, 2015. 185–194.

# МИКРОТЕКСТУРЫ ОТЛОЖЕНИЙ В ТАБЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ КОНТИНЕТАЛЬНОГО ОБРАМЛЕНИЯ БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ

***Е. А. Слагода***
*Институт криосферы Земли Тюм НЦ СО РАН, Тюмень*

В настоящее время далеко не все известно о последствиях преобразования осадков и отложений под воздействием процессов криогенеза, включая цикличное промерзание-протаивание, сингенетическое, эпигенетическое промерзание и глубокое протаивание толщ. Основные литологические и седиментационные признаки разных фаций и генетических типов четвертичных континентальных и морских отложений, пород, в том числе микростроение в шлифах, были установлены без учета воздействия фазовых переходов вода↔лед [1, 2, 3, 4]. Многолетнемерзлые толщи содержат следы первичных и вторичных преобразований под воздействием колебаний термодинамических условий за весь период времени их существования. Их строение на основе мерзлотно-фациального анализа установлено в субаэральных и морских толщах [5, 6]. К седиментационным признакам отложений относят залегание, форму, слоистость, деформации текстуры, включения и биоту; тип сингенетического, эпигенетического промерзания определяет криогенное строение толщ; а цикличное или длительное протаивание таберированных и таберальных комплексов фиксируют посткриогенные образования - текстуры, псевдоморфозы и др. [7, 8]. В микростроении склоновых, аллювиальных, прибрежно-морских отложений также выражены следы стадийных процессов промерзания и протаивания [9]. Данных о микростроении таберальных образований в морских толщах, промерзавших и протаявших отложений на суше или в субаквальных условиях недостаточно для выделения субаквальной палеокриолитозоны [10].

Цель исследования - выявить особенности микротекстур, следы промерзания и протаивания в отложениях таберальных образований многолетнемерзлых толщ берегов Байдарацкой губы.

Многолетнемерзлые отложения береговых обнажений обрамления Байдарацкой губы изучены криолитологическими методами. Монолиты отложений отобраны ИКЗ СОРАН в 2007 году А.А. Васильевым из разреза "Марре-Сале" п-ва Ямал и Е.А. Слагодой из разрезов Югорского п-ва (рис. 1, а) и в экспедиции ВНИИОкеангеологии под руководством Б. Г. Ванштейна на НИС "Иван Петров" из отложений дна Байдарацкой губы, Новоземельской впадины Карского моря. Строение мерзлых толщ на суше позволят сопоставить их с осадками дна на разной глубине моря (рис.1, б), отобрнных с минимальным нарушением структуры проб [11]. Высушенные льдистые отложений суши, нелитифицированные водонасыщенные отложения дна моря неизбежно меняют естественный цвет и неустойчивые компоненты [12, 13, 14]. При этом они сохраняют состав и соотношения терригенных компонентов, пустот, включений, т. е. текстуры являются условно ненарушенными, как в литифицированных четвертичных отложениях, преобразованных в континентальных обстановках. Ненарушенность текстур и сопоставимость микростроения в шлифах из изученных отложений обеспечено одинаковой подготовкой водонасыщенных и мерзлых проб: медленной отдачей влаги при сушке и постепенным оседанием вертикально ориентированных монолитов при положительной температуре. Микростроение синкриогенных и эпикриогенных отложений изучено в 17 шлифах из разрезов «Марре-Сале»( п-в Ямал) и «Первая Песчаная», «Шпиндлер» (Югорский п-в).

Разрезы Югорского, Ямала включают многолетнемерзлые верхнечетвертичные толщи с пластовыми и жильными льдами, покровные сезонно-талые и талые осадки термоцирков. Внизу разреза "Первая Песчаная", выше уровня моря на цоколе коренных пород, залегают морские голубые, темно-серые глинистые породы с раковинами, предположительно, зырянско-казанцевского возраста. Выше разрез слагают каргинские пачки ритмитов: дельтовые, флювиальные алевриты, пылеватые, мелкие, пески, с включениями гравия и галек местных коренных пород, с наклонными ожелезненными трещинами. Они перекрыты голоценовыми многолетне- и сезонно-мерзлыми склоновыми отложениями с линзовидно-слоистыми и сетчатыми криогенными текстурами или галечными песками морской террасы (рис. 2, А, Б, 1, 4). В морских глинах присутствуют решетчатые и массивные криогенные текстуры, пластовая субгоризонтальная залежь льда с оплавленной неровной кровлей от которой отходят субвертикальные шлиры и трещины заполненные льдом. Ритмиты над вытаявшим пластовым льдом ожелезнены, с линейными трещинами, смещениями слоистости песков, алевритов, суглинков, и морские глины над цоколем с ожелезненными посткриогенными решетчатыми текстурами протаивали, вторично промерзли и отнесены к таберальными образованиями( [15].

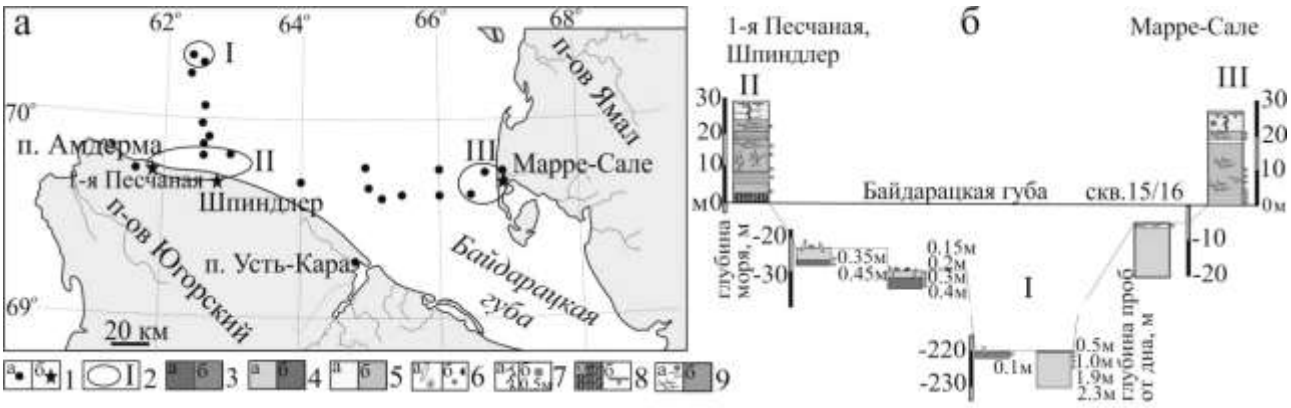



Рис. 1. Район исследований, профили отбора проб (а) и схематические разрезы с отбором проб (б). 1 - трубки, боксы на дне моря (а), разрезы мерзлых отложений берегов (б); 2 - районы отбора монолитов для шлифов: I - Новоземельская впадина, глубина моря 220 м; II - прибрежная зона трубки 3-5, глубина моря 30-23 м; разрезы "Первая Песчаная", Шпиндлер; III - разрез "Марре-Сале". Отложения дна моря: 3 - темно-коричневые текучие глинистые алевриты (а), коричневые глинистые алевриты с примесью песков (б); 4 - серые глинистые алевриты, алевритовые глины (а), темно-серые комковатые плотные глины (б); 5 - многолетнемерзлые пески (а), суглинки, глины (б); 6 - полихеты, раковины (а), обломки коренных пород (б); 7 - растительные остатки (а), места и глубина отбора проб (б); 8 - коренные породы (а); верхняя граница мерзлых пород (б); 9 - текстурообразующие льды (а), подземные льды (б).

В разрезе "Шпиндлер" участвуют те же типы отложений, две залежи пластовых льдов, светло-серые без ожелезнения песчаные ритмиты со слоистыми и линзовидно-сетчатыми криогенными текстурами (рис. 2, А, Б, 5), глинисто-песчаные алевриты включают окатыши глин с неполно-сетчатыми криогенными текстурами, по-видимому изученные части разреза синкриогенной толщи не протаивали и таберальные образования не выделены.

Разрез "Марре-Сале" отличается как возрастом, набором генетических типов отложений, так и криогенным строением. Внизу разрез слагают прибрежно-морские, предположительно, казанцевско-зырянские глинистые породы с решетчатыми криогенными текстурами (рис. 2, А, 6), с включениями дресвы, редких галек коренных пород, в середине – переслаивающиеся глинисто-алевритовые отложения, вверху – сартанские и голоценовые флювиальные, дельтовые, озерные, склоновые биогенные отложения [16, 17]. В толще присутствуют две сложные залежи пластовых льдов со штоками и лакколитами, жилы льда, которые деформируют все горизонты вмещающей толщи. Под хасыреями, над частично вытаявшим льдом в толще выделены ожелезненные уплотненные отложения с деформированной, смятой слоистостью, иногда с посткриогенными текстурами, которые отнесены к таберальным образования [17, 18, 19].

Микротекстуры дельтовых, флювиальных и прибрежно-морских отложений в разрезах «Первая Песчаная» «Шпиндлер», «Марре-Сале» (рис. 2, В). Для ритмично-слоистых песчаных и глинисто-алевритовых в шлифах характерны параллельная, косая седиментационная слоистость, выклинивание слойков по латерали, мелкие растительные остатки, спикулы губок, обломки диатомовых, фораминифер, окатыши глин, трещиноватые зерна кварца. Линзовидным и сетчатым криогенным текстурам толщи соответствуют секущие и унаследованные зияющие микропустоты и/или частично залеченные терригенными зернами или глинистыми частицами пустоты. В отложениях четко выражены сложные многопорядковые агрегатные и кольцевые микротекстуры; разрушенные на месте залегания глинистые окатыши, трещиноватые обломки кварца, что характерно для цикличного протаивания - промерзания в период их накоплении.

Микротекстуры отложений в таберальных образованиях отличаются ожелезнением, дислокациями седиментационных текстур – разрывами, смещенными, оползшими фрагментами слоев с разным составом, плотной упаковкой сложных многопорядковых агрегатов. Промежутки между крупными агрегатами, обогащены ориентированными обломками или глинистой массой, вероятно, представляют остатки первичной посткриогенной текстуры. Криогенные пустоты связаны с вторичным эпигенетическим промерзанием протаявших и просевших на месте отложений, в глинистых и глинисто-песчано-алевритовых уплотненных породах секут посткриогенные микротекстуры и микротекстуры оползания (рис. 2, В, 6.1, 6,2).

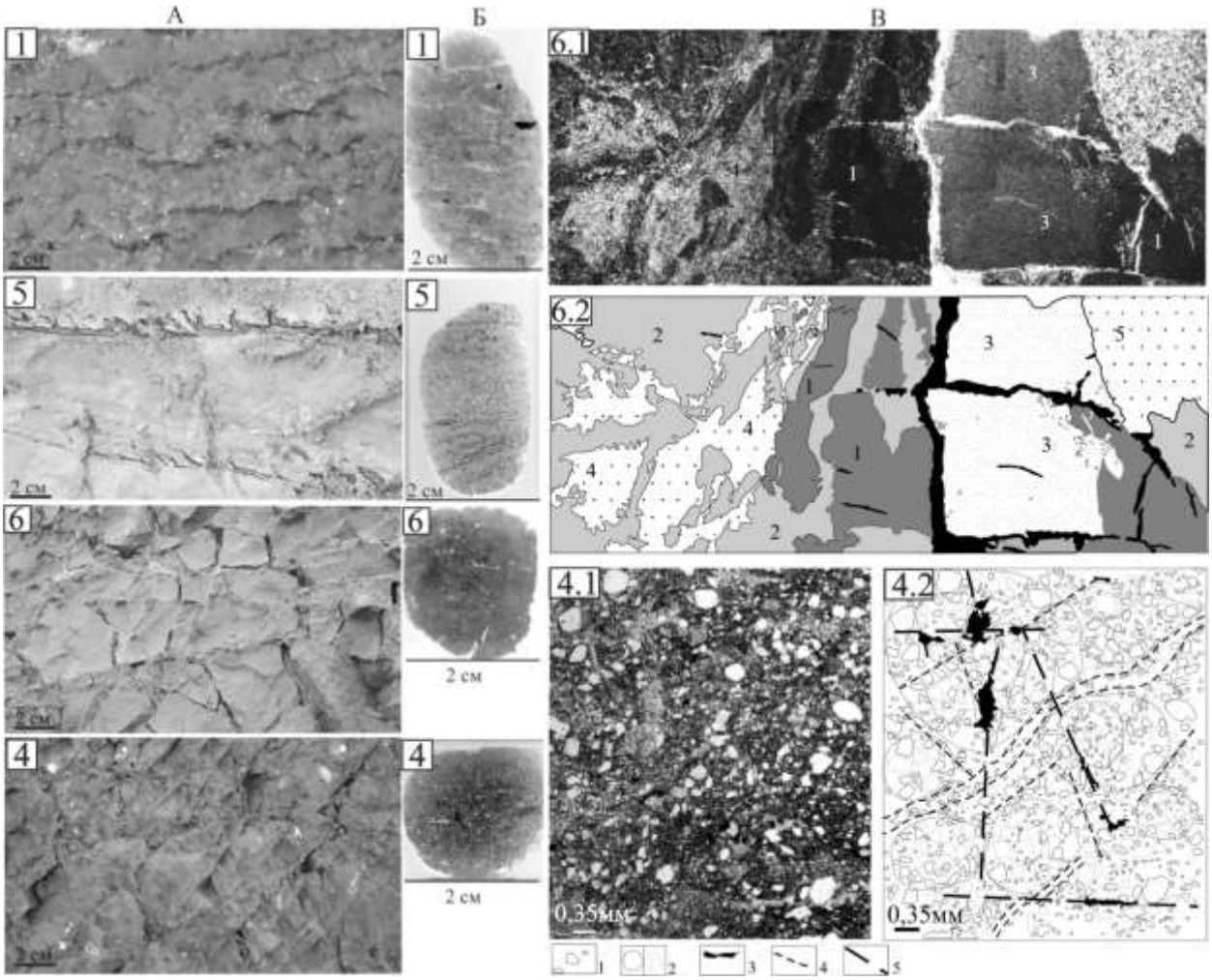



Рис. 2. Криогенные текстуры (А), сканированные шлифы отложения (Б), фотографии шлифов в микроскопе и схемы микротекстур отложений (В) континентального обрамления Байдарацкой губы в разрезах: «Первая Песчаная» - № 1, 4 , «Шпиндлер» - № 6 , «Марре-Сале» - № 5. Цифрами на рис. В № 6.1 и 6.2 обозначены: 1 - глины; 2 - глинисто-песчаные алевриты; 3 - алевриты; 4 - алевритовые пески, 5 - мелкие пески. Обозначения на рис., 6.2, 4.1, 4.2: 1 - обломочные частицы кварца, полевых шпатов, песчаников, сланцев; 2 - сложные многопорядковые агрегаты; 3 - криогенные пустоты; 4 - посткриогенные текстуры; 5 - залеченные криогенные пустоты.

Микротекстуры глинистых морских отложений в шлифах неслоистые с преобладанием мелких элементарных и простых агрегатов глин, реже с нечеткой слоистостью за счет соотношений глинистых, алевритовых частиц; включают окатыши глин, черную разложенную органику, мелкую морскую фауну. Мелкие замкнутые или тонкие линзовидные пустоты присутствуют в блоках глин ограниченных крупными криогенные пустотами. Эти же глины с гравием залегающем на цоколе коренных пород отнесены к таберальным образованиям. Блоки глинистых пород пропитаны гидроокислами железа, состоят из уплотненных деформированных многопорядковых сложных агрегатов с кольцевыми микротекстурами, имеют вертикальную ориентировку удлиненных зерен, трещиноватость кварца. Пространства между крупными агрегатами содержат глинистые частицы или ориентированные обломки, что соответствуют первичной сетчатой посткриогенной текстуре (Рис. 2, В, № 4.1 и 4.2) Криогенным микротекстурам в отложениях соответствуют пустоты и заполненные зоны на их продолжениях, секущие сложные агрегаты и посткриогенный рисунок.

Исследования микротекстур отложений из многолетнемерзлых верхнечетвертичных толщ Югорского, Ямала полуостровов позволили выявить в различных генетических типах отложений деформации седиментационной и посткриогенной макро- и микротекстур, выделить в разрезах вторично промерзшие таберальные образования. Разрезы "Первая песчаная" и "Шпиндлер" Югорского п-ва "Марре-Сале" п-ва Ямал, несмотря на недостаток датировок, различия и удаленность, сложены сходными генетическими типами отложений и деформированными ожелезненными таберальными образованиями, что позволило сопоставить изученные разрезы. В микростроении таберальных комплексов обрамления Байдарацкой губы прибрежно-морских,

дельтовых флювиальных отложениях выделены микротекстуры, характерные для протаявших мерзлых и вторично промерзших толщ. Глинистые синкриогенные, эпикриогенные толщи после затопления морем в ходе трансгрессии [7, 20, 21] в меньшей степени подверженные размыву, могут протаивать на дне с образованием таберальных комплексов и характерных микротекстур, которые могут применяться для выделения субквальной палеокрилитозоны.

Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 126022618021-5)

***Литература***

1 Рухин Л.Б. Основы литологии. Учение об осадочных породах.–Ленинград. Недра, 1969. – 0703 с.

2 Романовский С.Н. Седиментологические основы литологии. –Ленинград: Недра. 1977.–408 с.

3 Фролов В.Т. Генетическая типизация морских отложений. М.: 1984.– 222 с.

4 Крашенинников Г. Ф., Волкова А. Н., Иванова Н. В. Учение о фациях с основами литологии. Руководство к лабораторным занятиям. М.: Изд-во МГУ, 1988. – 214 с.

5 Катасонов Е .М. Литология мерзлых четвертичных отложений (криолитология) Янской приморской низменности. Под ред Т.Н. Каплиной, М.: Изд-во ПНИИС 2009. –176 с.

6 Ершов Э.Д., Лебеденко Ю.П., Чувилин Е.М. и др. Микростроение мерзлых пород. М.: Изд-во МГУ, 1988. –180 с.

7 Романовский Н.Н. Основы криолитогенеза криосферы. М.: изд-во МГУ, 1993, –335 с.

8 Каплина Т.Н. Древние аласные комплексы северной Якутии // Криосфера Земли. -2011. -Т.XV. -№ 3. -С. 20-30.

9 Слагода Е.А. Криолитогенные отложения Приморской равнины моря Лаптевых: литология и микроморфология. Тюмень. ИПЦ «Экспресс». 2004. -120 с.

10 Хименков А.Н., Брушков А.В. Океанический криолитогенез. Москва. Наука. 2003. - 336 с.

11 Чикирёв И. В., Ульянцев А. С., Никифоров С. Л., и др. Сравнительная литологическая характеристика современных осадков Карского и Печорского морей // Вестник МГТУ. -2020. -Т.23, -№ 1. - С. 93–101.

12 Рогов В.В. Основы криогенеза. Учебно-методическое пособие. Отв. ред . В.Н. Конищев. Новосибирск. Ихд-во-ГЕО. 2009. –208 с. ,

13 Губин С.В., Лупачев А.В. Подходы к выделению и изучению погребенных почв в мерзлых толщах отложений ледового комплекса // Криосфера Земли. -2012. -Т. XVI, -№2. -С. 79–84

14 Романенко К.А. , Абросимов К.Н. Курчатова, А.Н., и др. Опыт применения рентгеновской компьютерной томографии в исследовании микростроения мерзлых пород и почв // Криосфера Земли. 2017. -Т. XXI. -№ 4. -С. 75–81.

15 Слагода Е.А., Лейбман М.О., Опокина О.Л. Генезис деформаций в голоцен-четвертичных отложениях с пластовыми льдами на Югорском полуострове // Криосфера Земли. 2010. -Т. XIV. -№ 4. С. 30-41.

16 Опокина О.Л., Слагода Е.А. , Курчатова А.Н. Стратиграфия разреза «Марре-Сале» (Западный Ямал) с учётом новых данных радиоуглеродного анализа. // Лёд и Снег. 2015. -Т. 55. -№ 4. С. 87-94.

17 Бутаков В.И., Слагода Е.А., Опокина О.Л. и др. Особенности формирования гидрохимического и микроэлементного состава разных типов подземных льдов мыса Марре-Сале // Криосфера Земли. -2020. -Т. 24. -№ 5. С. 29-44.

18 Каневский М.З., Стрелецкая И.Д., Васильев А.А. Закономерности формирования криогенного строения четвертичных отложений Западного Ямала (на примере района Марре-Сале) // Криосфера Земли. -2005. -Т. IX. -№ 3. -С. 16-27.

19 Стрелецкая И.Д., Гусев Е.А. Васильев А.А. и др. Подземные льды в четвертичных отложениях побережья Карского моря как отражение палеогеографических условий конца неоплейстоцена-голоцена. // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. - 2012. -№ 72. -С.28-59.

20 Зинченко А.Г., Лейбман М.О., Ванштейн Б.Г. и др. Влияние разломной тектоники на развитие термоденудационных цирков на северном побережье Югорского п-ва. / Рельефообразующие процессы: теория, практика, методы исследования. Новосибирск. - 2004. – С. 115-117.

21 Мельников В.П., Спесивцев В.И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск. Наука. - 1995. – 108 с.

# ИЗМЕНЕНИЕ ИНСОЛЯЦИИ МАРСА ЗА 1 МЛН. ЛЕТ

***И.И. Смульский***
*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, ФИЦ, г. Тюмень*

***1. Введение.*** Созданная нами новая Астрономическая теория изменения климата Земли согласуется со всеми потеплениями и похолоданиями, которые можно проследить за 250 тыс. лет назад, и объясняет их [1]. Причиной этих изменений являются колебания поступающего на Землю солнечного тепла, т.е. инсоляции Земли.

В результате изучения поверхности Марса автоматическими космическими аппаратами установлены многие свидетельства присутствия воды на Марсе в прошлом. Отсюда следует, что в прошлом температуры на Марсе были такие, что погребенные льды таяли, на Марсе образовывались водоемы, текли реки, по небу плыли водяные облака, шли дожди и даже бушевали грозы. Поэтому ряд исследователей рассчитывали изменение инсоляции Марса. Но результаты эти не однозначны. Поэтому на основе разработанных нами методов несколько лет назад мы приступили к созданию новой Астрономической теории изменения климата Марса. С новыми начальными условиями была решена задача об эволюции орбитального движения Марса. Прежние программа решения задачи о вращательном движении Земли [2]- [3] и программа расчета ее инсоляции [4]- [5] были модифицированы так, чтобы они могли решать эти задачи для любой планеты. Решение задач об орбитальном и вращательном движениях Марса осуществлялось на суперкомпьютерах ЦКП Сибирского Суперкомпьютерного Центра ИВМиМГ СО РАН. Результаты за 1 млн. лет назад (м.л.н.) были обработаны, проанализированы и представлены в настоящей работе.

***2. Эволюция инсоляции Марса.*** На рис. 1 на интервале 1 м.л.н. представлена эволюция инсоляции Марса за летнее $Q_s$, зимнее $Q_w$ калорические полугодия и за год в целом $Q_T$ на разных широтах Северного и Южного полушарий. Инсоляция выражена в ГДж/м$^2$, а широты указаны с правой стороны графиков. На широте 65º летняя инсоляция $Q_s$, начиная с современной эпохи ($T$ = 0), испытывает небольшие колебания с периодом порядка 50 тыс. лет. Они продолжаются около 300 тыс. лет. Затем период колебаний увеличивается примерно до 120 тыс. лет и возрастает амплитуда до 1.3 ГДж/м$^2$. Такой характер изменения колебаний обусловлен аналогичным характером колебаний оси орбиты Марса на исследованном нами интервале 100 млн. лет [6]. Эти колебания чередуются двумя порциями малых и больших колебаний.

Колебания зимней инсоляции $Q_w$ на широте 65º имеют аналогичный двух порционный характер. Дополнительно большие колебания модулированы малыми колебаниями. Амплитуда больших колебаний порядка 0.5 ГДж/м$^2$. Колебания зимней инсоляции проходят в противофазе колебаниям летней $Q_s$.

Колебания годовой инсоляции $Q_T$ на широте 65º аналогичны колебаниям $Q_s$ и находятся с ними в одной фазе. На первом интервале до 300 т.л.н. они отличаются тем, что период их колебаний в два раза больше. А на втором интервале колебания $Q_T$ более регулярны, чем колебания $Q_s$. Амплитуда этих колебаний $Q_T$ равно 0.85 ГДж/м$^2$, т.е. меньше амплитуды колебаний летней инсоляции $Q_s$.

Итак, на широте 65º зимняя инсоляция $Q_w$ колеблется в противофазе летней $Q_s$ и годовой $Q_T$. Поэтому в холодные периоды зимы будут теплее, а в теплые – холоднее по сравнению с современной эпохой.

На широте 80º структура колебаний на рис. 1 такая же, как на широте 65º за некоторым исключением. Для зимней инсоляции $Q_w$ колебания с периодом 50 тыс. лет имеют большую амплитуду, сопоставимую с амплитудой колебаний с периодом 120 тыс. лет. Амплитуда этих колебаний на широте 80º для летней инсоляции $Q_s$ =1.68 ГДж/м$^2$, а для годовой $Q_T$ – 1.62 ГДж/м$^2$, т.е. существенно больше, чем на широте 65º. А амплитуда колебаний зимней инсоляции на порядок меньше, и в несколько раз меньше колебаний $Q_w$ на широте 65º. Следует отметить, что на графиках величины колебаний представлены примерно одинаково, но цены деления по вертикальной оси – разные.

На широте 45º вид колебаний подобен, но амплитуды существенно отличаются. Так амплитуда колебания годовой инсоляции $Q_T$ равна 0.04 ГДж/м$^2$, а летней – 0.98 ГДж/м$^2$. То есть, можно сказать, что годовая инсоляция на широте 45º практически не изменяется. А амплитуда колебания зимней инсоляции $Q_w$ ровна 0.95 ГДж/м$^2$, т.е. почти такая же, как летней $Q_s$.

Итак, в высоких широтах, чем больше широта, тем больше амплитуда колебания, т.е. основные изменения климата происходят в высоких широтах.

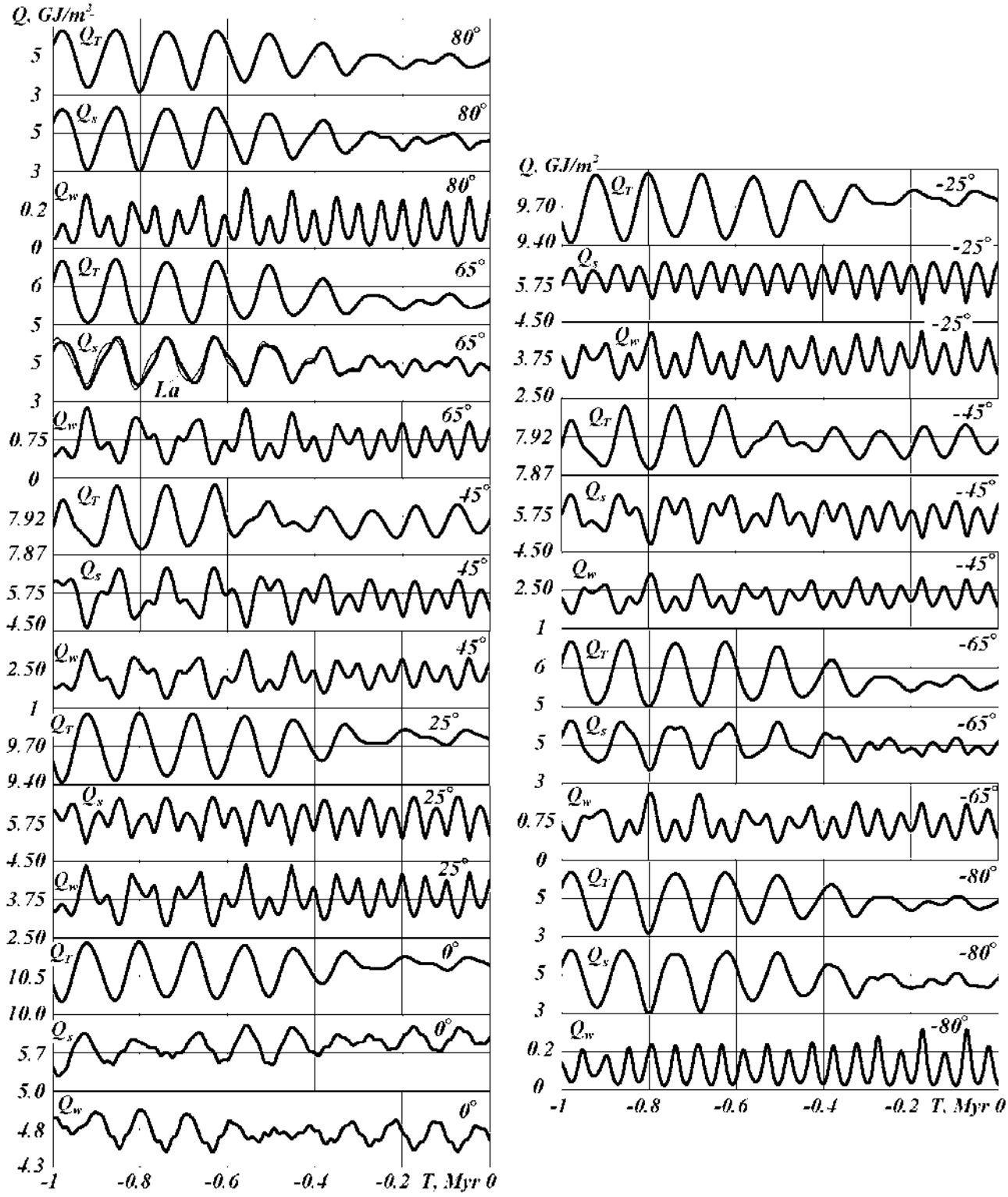



Рис. 1. Эволюция инсоляции Марса в ГДж/м$^2$ за 1 млн. лет назад на разных широтах Северного и Южного полушарий: $Q_s$ – за летнее калорическое полугодие; $Q_w$ – за зимнее калорическое полугодие; $Q_T$ – за весь год; *La* –инсоляция $Q_s$ по данным работы [7]. По оси инсоляции $Q$ отсчет начинается с текущего графика. Время $T$ отсчитывается в млн. лет назад с 2000.0 г.

Графики колебаний годовой инсоляции $Q_T$ на широтах 25º и 0º аналогичны графикам колебаний в высоких широтах, однако их фазы противоположны. То есть в холодные в высоких широтах эпохи в экваториальных широтах будет теплее. Амплитуда колебаний годовой инсоляции равна 0.27 ГДж/м$^2$ на широте 25º и 0.39 ГДж/м$^2$ на экваторе. Эти амплитуды значительно меньше, чем в высоких широтах. Но средние значения инсоляции значительно больше по сравнению с высокими широтами, например, больше в два раза по сравнению с широтой 80º.

Амплитуда колебаний с периодом 50 тыс. лет вносит значительный вклад в изменение $Q_s$ и $Q_w$ на широте 25º и усложняют картину. Фазы у них противоположны. Колебания $Q_T$ с большим периодом, 120 тыс. лет, находятся в фазе с колебаниями зимней инсоляции $Q_w$. То есть, в теплые в экваториальных широтах периоды зимы будут теплее.

На экваторе также в ряде случаев инсоляции $Q_w$ находится в фазе с годовой инсоляцией $Q_T$. Однако в целом колебания $Q_w$ и $Q_s$ – небольшие, и софазность и противофазность за весь интервал изменения нарушаются.

Итак, когда в высоких широтах наступает холодный период, в низких широтах становится теплее. На средней широте 45º количество солнечного тепла за год не изменяется, однако инсоляции за летние и зимние полугодия подвержены существенным и противоположным изменениям.

Эволюция инсоляции в Южном полушарии показана на правых графиках рис. 1. На широте -25º изменения годовой инсоляции $Q_T$ такое же, как и на широте 25º. Летняя инсоляция $Q_s$ изменяется в противофазе с зимней $Q_w$. Изменение $Q_s$ и $Q_w$ находятся в противофазе их изменениям на широте 25º: они сдвинуты на полпериода. Но полностью они не идентичны. Амплитуды колебаний этих инсоляций, такие же, как и на широте 25º.

На широте -45º годовая инсоляция $Q_T$ такая же, как и на широте 45º. $Q_s$ и $Q_w$ изменяются в противофазе друг другу. По отношению к этим инсоляциям на широте 45º они сдвинуты на полпериода, т.е. на 25 тыс. лет, но не идентичны друг другу.

Аналогичная ситуация на широте -65º. Однако колебание больших периодов, 120 тыс. лет, для $Q_s$ и $Q_w$ совпадают с таковыми на широте 65º, но не идентичны.

На широте -80º годовая инсоляция $Q_T$ совпадает с таковой на широте 80º, но инсоляции не идентичны. Зимняя инсоляция $Q_w$ сдвинута на полпериода, 25 тыс. лет, по сравнению с широтой 80º, но не идентична.

Итак, в Южном полушарии годовая инсоляция такая же, как и Северном полушарии. А полугодовые инсоляции отличаются. В большинстве случаев они сдвинуты на полпериода малых колебаний и находятся в противофазе колебаниям этих инсоляций в Северном полушарии.

Четыре последних максимума инсоляциий $Q_T$ и $Q_s$ и три последних минимума практически одинаковы на широтах 65º и 80º, но экстремальными из них являются холодная эпоха при $T$ = 802 т.л.н. и самая теплая – при $T$ = 855 т.л.н.

***Изменение инсоляции по широте Марса.*** На рис. 2 приведены изменения по широте $\varphi$ инсоляции Марса за год $Q_T$, за летнее калорическое $Q_s$ и зимнее калорическое $Q_w$ полугодия в современную эпоху $T$ = 0. Годовая инсоляция $Q_T$ на графике уменьшена в два раза. Она изменяется от минимального значения 4.75 ГДж/м$^2$ на полюсах, до максимального значения 10.64 ГДж/м$^2$ на экваторе.

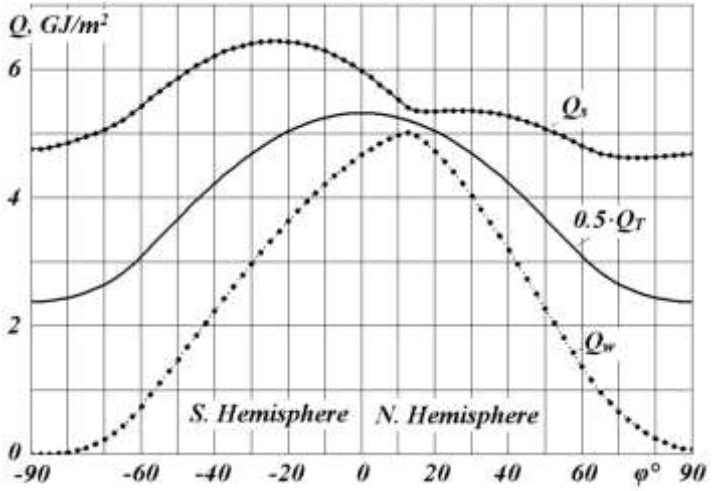



Рис. 2. Распределение по широте Марса удельного солнечного тепла в ГДж/м$^2$ в современную эпоху $T$ = 0 (2000.0 г.): $Q_s$ – за летнее калорическое полугодие; $Q_w$ – за зимнее калорическое полугодие; $Q_T$ – за весь год: на графике величина $Q_T$ уменьшена в два раза; $\varphi > 0$ – северное полушарие; $\varphi < 0$ – южное полушарие.

Летняя инсоляция $Q_s$ также на полюсах имеет наименьшее значение, и с уменьшением широты она увеличивается. На тропиках $\varphi = \varepsilon$, где $\varepsilon$ – угол между плоскостями орбиты и экватора Марса, летняя инсоляция имеет максимум, затем она уменьшается и вблизи экватора имеется её минимум [4] - [5]. В современную эпоху инсоляция $Q_s$ по полугодиям значительно отличается. В Южном полушарии её

максимум достигает величины 6.44 ГДж/м$^2$, а в Северном полушарии максимум летней инсоляции практически отсутствует. Экваториальный минимум инсоляции также вырожден, и его точка находится на широте 12º.

Зимняя инсоляция $Q_w$ имеет нулевые значения на полюсах и максимальное значение 5.01 ГДж/м$^2$ в экваториальной зоне, на широте 12º, т.е. в Северном полушарии. Поэтому зимняя инсоляция в Северном полушарии больше, чем в Южном. Итак, в современную эпоху более теплым в Южном полушарии является летнее полугодие, а в Северном полушарии – зимнее. Этот результат подтверждается фактическими данными: летом Южное полушарие Марса более теплое по сравнению с Северным, и снежная полярная шапка почти полностью исчезает [8].

Изменение инсоляции по широте в самую холодную эпоху $T$ = 802.4 т.л.н. показано на рис. 3, слева. Годовая инсоляция $Q_T$ изменяется от 2.86 ГДж/м$^2$ на полюсах до 10.55 ГДж/м$^2$ на экваторе. То есть, в высоких широтах количества тепла за год почти в два раза меньше по сравнению с современной эпохой (4.75 ГДж/м$^2$). Это – действительно очень холодный период.

Летняя инсоляция $Q_s$ монотонно увеличивается от минимального значения на полюсе 2.86 ГДж/м$^2$ до максимального 5.95 ГДж/м$^2$ на широте 10º. В эту эпоху инсоляция по полугодиям более равномерная по сравнению с современной эпохой. В современную эпоху инсоляция $Q_s$ на полюсах равна 4.7 ГДж/м$^2$, т.е. в рассматриваемую эпоху летнее полугодие значительно холоднее.

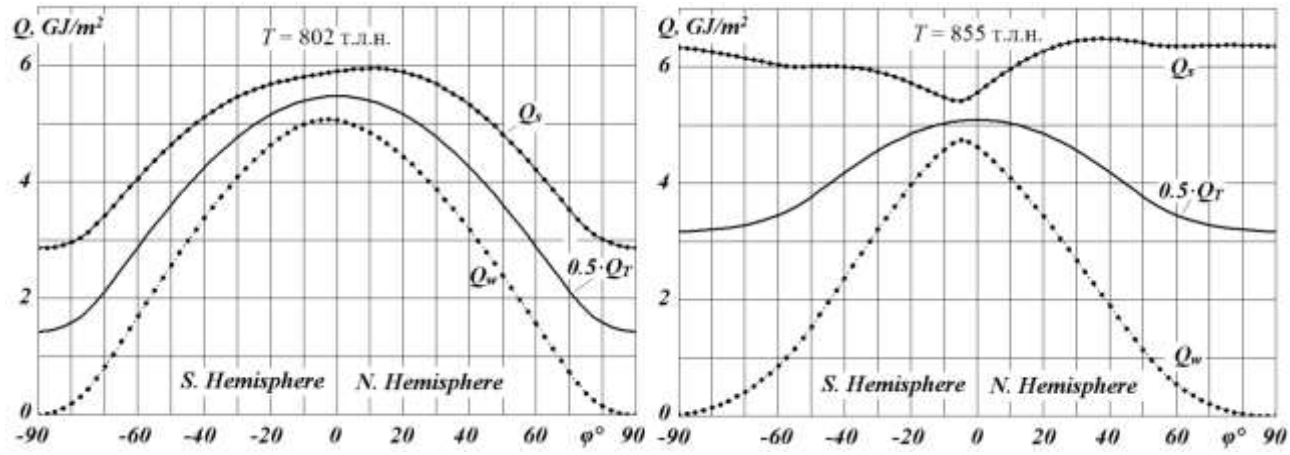



Рис. 3. Распределение по широте Марса удельного солнечного тепла в ГДж/м$^2$ в самую холодную эпоху $T$ = 802 т.л.н. и в самую теплую эпоху $T$ = 855 т.л.н. за 1 млн. лет. Обозн. см. на рис. 2.

Зимняя инсоляция $Q_w$ (рис. 3, слева) изменяется от нулевого значения на полюсах до максимального 5.07 ГДж/м$^2$ на широте $\varphi$ = -5º. Обычно максимум $Q_w$ и экваториальный минимум $Q_s$ совпадают по широте [4] - [5]. Однако, в эту эпоху у летней инсоляции $Q_s$ этот минимум является вырожденным. Зимняя инсоляция $Q_w$ по сравнению с современной эпохой практически совпадает с инсоляцией в Северном полушарии в современную эпоху и значительно превышает инсоляцию в Южном полушарии. Это обусловлено тем, что, как уже отмечалось, полугодовые инсоляции Марса в современную эпоху (рис. 2) значительно отличается по полушариям.

Изменение инсоляции по широте в самый теплый период $T$ = 802.4 т.л.н. показано на рис. 3, справа. Годовая инсоляция $Q_T$ изменяется от наименьшего значения 6.35 ГДж/м$^2$ на полюсах до наибольшего 10.18 ГДж/м$^2$ на экваторе. Таким образом, в высоких широтах в эту эпоху солнечного тепла за год больше в 2.2 раза по сравнению с холодной эпохой.

Летняя инсоляция $Q_s$ в этом случае имеет минимальное значение не на полюсах, а в экваториальной зоне, на широте -5º, равное 5.41 ГДж/м$^2$. На полюсах она практически – максимальна и равна $Q_s$ = 6.3 ГДж/м$^2$, что больше летней инсоляции в современную эпоху на полюсах в 1.3 раза, а в холодную эпоху – в 2.2 раза.

Эти значения годовой и летней инсоляции в высоких широтах свидетельствуют, что эта эпоха действительно является теплой. Летняя инсоляция $Q_s$ в высоких широтах достигает значений наибольшей инсоляции $Q_s$ в современную эпоху в Южном полушарии (рис. 2). Этот максимум располагается в приэкваториальной зоне, и при нем тает южная полярная шапка. Поэтому в эпоху 855 т.л.н. в летние полугодия в обоих полушариях будут таять полярные шапки еще интенсивней, чем сейчас в Южном полушарии. Это приведет к росту содержания $CO_2$ в атмосфере, увеличению давления и снижению контрастности температуры дня и ночи [8]. В настоящее время в отдельных местах в экваториальной области летом температура днем достигает 35°С, но ночью опускается ниже

-20°C. Поэтому есть основания считать, что в эту эпоху положительные температуры летом будут не только днем, но и ночью.

Зимняя инсоляция $Q_w$ в теплую эпоху (рис. 3, справа) изменяется от нулевого значения на полюсах до максимального 4.74 ГДж/м$^2$ на широте $\varphi$ = -5º. Её значение в Южном полушарии почти такие же как в современную эпоху, а в Северном – значительно меньше. По сравнению с холодной эпохой (рис. 3, слева) зимняя инсоляция по всей поверхности Марса существенно меньше. Таким образом, в теплую эпоху зимы будут холодными.

***4. Сравнение с работами других авторов.*** В работе [7] таких детальных исследований инсоляции, как у нас, не проводилось. Рассчитывалась только инсоляция в день летнего солнцестояния на Северном полюсе. По данным [7] нами была рассчитана инсоляция на широте 65° за летнее полугодие, которая приведена линией *La* на рис. 1. До 300 тыс. лет она не отличается от наших результатв, а на остальном интервале отличия небольшие. Совпадение результатов за первые 300 тыс. лет свидетельствует, об идентичности начальных условий и исходных данных, и адекватности методов решения этих задач.

Отличия результатов [7] от наших результатов за время большее 300 тыс. лет обусловлены неточностями решения задач орбитального и вращательного движений авторами работы [7]. Постепенно погрешности нарастают и после 3-х м.л.н. результаты [7] становятся неустойчивыми. Наши решения устойчивые. Их устойчивость надежно доказана по орбитальному движению за 100 млн. лет [6], а по вращательному движению Земли – за 20 млн. лет [2] - [3].

Следует отметить, что в более ранней статье Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой [9] на этом же интервале времени рассчитаны инсоляции $Q_s$, $Q_w$ и $Q_T$ на широтах 50° и 80°. Они хорошо согласуются с нашими результатами.

***Заключение.*** На интервале 1 м.л.н. инсоляция Марса характеризуется двумя участками ее изменения. На первом участке до 300 т.л.н. периоды колебания порядка 50 тыс. лет и амплитуды небольшие, а далее – периоды 120 тыс. лет и большие амплитуды.

В современную эпоху инсоляция Южного полушария за летнее калорическое полугодие значительно больше, чем Северного. Это приводит почти полному исчезновению южной полярной шапки летом. В целом климат Марса сейчас находится в середине своих долгопериодических колебаний.

Наиболее холодный климат был 802 т.л.н. Количество тепла за год и за летнее полугодие в высоких широтах уменьшалось в 1.66 раза. Это могло приводить к существенному расширению полярных шапок Марса, падению давления и температуры на всей поверхности Марса. В самую теплую эпоху 855 т.л.н. количество тепла за год и за летнее полугодие возрастало в 1.34 раза по сравнению с современной эпохой. Это могло приводить к исчезновению полярных шапок Марса летом, росту атмосферного давления и температуры до положительных значений не только днем, но и ночью. Эти выводы также относятся ко всем последним 3 холодным эпохам и 4 теплым.

Работа выполнена в Институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2026-0025).

***Литература***

1 Смульский И.И. Инсоляционная причина долгопериодических изменений климата // Геофизические процессы и биосфера. 2024. – Т.23. – №2. – С. 25-39. DOI: 10.21455/GPB2024.2-3. https://www.ikz.ru/~smulski/Papers/IPDIKl03_1JP.pdf.

2 Смульский И.И. Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет // Сложные системы. 2020. – №1 (34). – С. 4-49. https://thecomplexsystems.ru/archive/.

3 Smulsky J.J. New Understanding in Physics and Astronomy. India, UK: B P International, 2023. – 209 p. DOI: 10.9734/bpi/mono/978-81-967401-5-3. https://www.bookpi.org/bookstore/product/new-understanding-in-physics-and-astronomy/.

4 Смульский И.И., Кротов О.И. Новый алгоритм расчета инсоляции Земли / Институт криосферы Земли СО РАН, 2013. – 38 с. Деп. в ВИНИТИ – № 103-В2013. http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/NwAlClI2c.pdf.

5 Smulsky J.J., Krotov O.I. New Computing Algorithm of the Earth's Insolation // Appl. Phys. Res. 2014. – V. 6. – No.4. – P. 56-82. https://doi.org/10.5539/apr.v6n4p56.

6 Гребеников Е.А., Смульский И.И. Эволюция орбиты Марса на интервале времени в сто миллионов лет / Сообщения по прикладной математике. Российская Академия Наук: ВЦ им. А.А. Дородницына. 2007. 63 с. http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/EvMa100m4t2.pdf.

7 Laskar J., Correia A. C. M., Gastineau M., Joutel F., Levrard B. and Robutel P. Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars // Icarus. – 2004. – 170. – Iss. 2. – P. 343-364.

8 Montmessin F. The Orbital Forcing of Climate Changes on Mars // Space Science Reviews. – 2006 – 125 (1-4). –P. 457-472.

9 Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. Об астрономической теории колебаний климата Марса // Докл. АН СССР. – 1975. – Т.221. – №1. – С. 64-66.

## ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА И СВОЙСТВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА Г. НОРИЛЬСК И Г. ДУДИНКА

***В.Г. Сокасян[1], Е.Н. Оспенников[1], П.И. Котов[2]***

*[1] ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», г. Москва*

*[2]ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет имени Н.М. Федоровского», г. Норильск*

***Введение.*** Территория исследования расположена в пределах криолитозоны, на участке между городами Норильск и Дудинка. В феврале 2026 года проводились полевые геокриологические изыскания в рамках Третьей зимней полевой школы Заполярного государственного университета имени М.Н. Федоровского. Снежный покров является одним из ключевых факторов, определяющих температурный режим многолетнемерзлых пород. В условиях урбанизированных территорий Арктики его изучение приобретает ряд особенностей, которые необходимо учитывать для достоверной оценки геокриологической обстановки и прогноза ее изменений под влиянием техногенных воздействий. Исследования снежного покрова проводились в нескольких характерных зонах: в пределах города Норильска, в придорожных полосах, в прибрежных зонах термокарстовых озер, а также на фоновых природных полигонах в тундре. Целью работы является выявление закономерностей распределения снежного покрова на территории Норильского промышленного района, оценка его влияния на температурный режим грунтов, а также сравнительный анализ параметров снегонакопления в природных и техногенных условиях.

***Природные условия района исследований.*** Рассматриваемая территория охватывает города Норильск и Дудинка, а также прилегающие районы Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района (Красноярский край). Данная территория расположена на крайнем севере Средней Сибири, в пределах Таймырского полуострова. Климат территории Норильского района относится к суровому субарктическому, резко континентальному типу. Для региона характерна продолжительная и крайне холодная зима (до 8–9 месяцев в году) и короткое, прохладное лето. Средняя температура января составляет около −30…−35 °С, в отдельные периоды понижается до −50 °С и ниже. Средняя температура июля редко превышает +10…+12 °С. Снежный покров в регионе Норильска формируется в условиях длинного и холодного зимнего сезона с устойчивыми отрицательными температурами и частыми метелями. Климат Норильска характеризуется продолжительной зимой, которая начинается в начале октября и может продолжаться до конца мая, а снежный покров сохраняется от 7 до 9 месяцев в году. В результате снег лежит большую часть календарного года, часто с непрерывностью в пределах нескольких месяцев подряд [4]. Регион Норильска служит северным пределом распространения таёжной растительности. Основные древесные породы: лиственница сибирская, ель сибирская, берёза пушистая и извилистая. На рассматриваемой территории (правый борт Норильско–Рыбнинской долины с прилегающими участками плато Хараелах и Норильского плато, включая районы Норильск–Талнах–Кайеркан) можно выделить несколько крупных морфоструктур и морфогенетических типов рельефа: Норильское плато и сопряжённые гряды (структурно денудационный рельеф), Норильско Рыбнинская долина (аккумулятивно эрозионное понижение), приозёрно болотные низменности и террасово пойменные участки рек [1]. Норильский регион находится в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты. Геокриологические условия в Норильском промышленном районе неоднородны. Мощность многолетнемерзлых пород (ММП) изменяется от 5 до 800 м и более, а в межгорных долинах значительные пространства (до 40 %) заняты таликами даже на севере региона. Среднегодовая температура пород варьирует в диапазоне – от –7 до +2°С. На высоких вершинах плато формируются наиболее низкие среднегодовые температуры пород (-11°С и ниже), с уменьшением высоты водоразделов они повышаются до -7–9°С. Температурный режим горных пород равнинной части характеризуется диапазоном температур от 0 до -3°С, редко ниже -5°С на участках распространения мерзлых пород, от 0 до +2°С – на участках развития талых пород и до

+7°C – на участках разгрузки подземных вод. В центральных частях Норильского структурно-денудационных плато мощность ММП составляет 200–400 м [3].

***Методика проведения работ.*** Метод с использованием плотномера заключается в определении ключевых характеристик снежного покрова – его мощности и плотности. Мощность измерялась с использованием снегомерной рейки – трубки со шкалой (в см), которую вставляли в снег вертикально до достижения грунта, затем снимали показания с рейки. Для оценки плотности снега применялся специальный прибор – весовой снегомер (снегомер-плотномер). Снегомер представляет собой полый металлический цилиндр высотой 60 см с площадью сечения 50 см² и весами типа безмен. Один конец цилиндра заточен, а на другом находится съемная крышка.

После определения средних значений плотности производился расчет коэффициентов теплопроводности снега, характерных для тех или иных ландшафтных микрорайонов. Расчет производился по формуле Проскурякова.

Методика снегомерной съемки включает комплекс полевых работ, направленных на определение основных характеристик снежного покрова – мощности, плотности, объёма снежных масс, а также последующий расчет теплофизических параметров. Все измерения проводятся в типичных ландшафтных условиях исследуемой территории, в период устойчивого снежного покрова [2].

Определение мощности снежного покрова выполняется с помощью снегомерного щупа, представляющего собой металлический прут (арматуру) диаметром 8–12 мм и длиной 1,5–2,5 м с заостренным нижним концом. Щуп устанавливается вертикально на поверхность снега и медленно погружается вращательно-поступательным движением до момента четкого контакта с подстилающей поверхностью. После достижения грунта щуп фиксируется у поверхности снега, а затем с помощью строительной рулетки измеряется длина его погруженной части. Нулевое деление рулетки прикладывается к острию щупа внизу, лента натягивается вдоль стержня до уровня снежной поверхности, и показание снимается с точностью до 1 см. По профилю выполняется не менее 10 таких измерений, равномерно распределенных по длине (через 1 м). Полученные значения усредняются, что дает среднюю мощность снега на участке; при этом вычисляется стандартное отклонение для оценки пространственной изменчивости покрова.

Для измерения мощности и объема снега в сугробах применяется методика, адаптированная под их форму. Для отдельно стоящих сугробов, форма которых визуально приближена к конусу или усеченному конусу, выполняются три ключевых измерения. С помощью снегомерной рейки или того же щупа измеряется максимальная высота сугроба (H) в его наивысшей точке. Длина и ширина сугроба определяются как средние значения двух взаимно перпендикулярных диаметров основания ($D_1$ и $D_2$), которые измеряются шагами (с предварительной калибровкой длины шага) или рулеткой. Далее высчитывается объем сугроба.

Для детального изучения стратификации снежной толщи и послойного отбора проб закладываются снежные шурфы. Шурф представляет собой прямоугольную яму размером 1,0×1,5 м, ориентированную длинной стороной перпендикулярно преобладающему направлению ветра. Копание ведется с подветренной стороны с аккуратным выбрасыванием снега на расстояние не менее метра от края. После достижения грунта одна из вертикальных стенок шурфа тщательно зачищается ножовкой или лопатой для выявления слоев. Проводится послойное описание снежной толщи: для каждого слоя фиксируется мощность, структура снега, твёрдость по качественной шкале (от очень рыхлого до ледяной корки), и наличие включений (ледяные прослойки, растительный детрит). Для документации выполняется фотофиксация стенки шурфа с масштабной линейкой.

***Обработка результатов обследования районов г. Норильск.*** В ходе проведения полевой школы были пройдены рекогносцировочные маршруты по 6 секторам города Норильска. В ходе маршрутов было обработано более 400 точек наблюдений. По форме сугробы подразделяются на линейно-ориентированные, конусовидные и ксеноморфные. По расположению подразделяются на внутри дворовые и находящиеся около зданий.

Результатом обработки упомянутых маршрутов стало 6 карт сугробов города Норильск, передающая в масштабе их площадные параметры, а также отражающая его мощность с помощью смоделированной шкалы. Кроме того, стояла задача сравнить расположение и мощность сугробов с результатами маршрутов прошлых лет, поскольку ежегодное расположение отвалов в одной точке указывает на многолетнее тепловое воздействие снежного покрова в этих точках, тогда как в остальных это воздействие носит скорее случайный характер. Сравнение проводилось с результатами рекогносцировочных маршрутов 25 и 24 годов. Анализ показал, что в первом районе 54% сугробов располагаются на тех же участках, что и в прошлых годах. Во втором районе уже 71% сугробов имеет

постоянное местоположение, в третьем районе все современные сугробы располагаются на участках прошлых лет, в четвертом лишь 47.5%.

***Результаты изучения снегоотвалов.*** Все снежные отвалы были разделены по двум категориям: форма – конус, усеченный конус, треугольная призма и местоположение – у здания или во дворе. Максимальная мощность снежного отвала 5,5 метров, минимальная – 0,7 метра. Максимальный объём – 1188 м$^3$, минимальный объём – 2 м$^3$. Наиболее крупные по объему отвалы располагаются на окраинах города. Отдельно изучая мощности у зданий, отвалы распространены точечно и не носят какого-либо закономерного распределения. Число встреченных снегоотвалов у зданий 24, что составляет 20% от всех описанных точек. Максимальная мощность снежного отвала обнаруженного на территории города Норильск составляет 6,5 метров, минимальная – 0,7 метра. Максимальный объём – 1875 м$^3$, минимальный объём – 2 м$^3$. Средняя мощность отвалов составляет 2,36 метров, объём – 167 м$^3$. Наибольшие по объему и мощности отвалы распространены между улицами Ленинская и Хантайсая. Минимальные объемы снежных отвалов встречаются в начале ленинского проспекта, старая часть города.

В ходе зимней полевой школы были изучены некоторые участки дороги Дудинка-Норильск. В ходе их обследования было выявлено что снежный покров закономерно изменяется с востока на запад. На востоке, в районе города Талнах зафиксирована минимальная мощность, а на западе в районе города Дудинка – максимальные. Также выявлено закономерность распределение снежного покрова в зависимости от преобладающего ветра. Например, в городе Талнах снежный покров на склонах, ориентированных на восток гораздо больше чем на склонах, ориентированных на запад. Это связано с тем, что ветер, дующий с востока преобладающий.

***Результаты детальных исследований на мерзлотных полигонах***. В ходе работы были проанализированы материалы режимных наблюдений по сети скважин, расположенных в пределах исследуемых полигонов. В число контролируемых параметров вошли: мощность снежного покрова, термическое сопротивление снега R (м²·°C)/Вт, температура воздуха Твозд (°C), а также температура грунта на поверхности ($T_0$, °C) и на глубине 10 м ($T_{10}$, °C).

Полигон 3 расположен вблизи промышленных объектов. На скважине 3-1 зафиксированы значения R = 3 (м²·°C)/Вт, $T_{возд}$ = –26°C, $T_0$ = –7,93°C, T10 = –0,15°C; на скважине 3-2 – R = 4,5 (м²·°C)/Вт, $T_{возд}$ = –26 °C, $T_0$ = –7,35 °C, $T_{10}$ = –0,49 °C. Более высокое термическое сопротивление снега на скв. 3-2 обусловливает незначительно более высокую температуру грунта.

Полигон 9 (район Оганер) характеризуется наиболее низкими температурами грунта среди всех. На скв. 9-1 получены значения R = 7,6 (м²·°C)/Вт, $T_{возд}$ = –26 °C, $T_0$ = –13,86 °C, $T_{10}$ = –0,15 °C; на скв. 9-2 – R = 3 (м²·°C)/Вт, $T_{возд}$ = –26 °C, $T_0$ = –20,14 °C, $T_{10}$ = –2,94 °C; на скв. 9-3 – R = 3,7 (м²·°C)/Вт, $T_{возд}$ = –26 °C, $T_0$ = –19,53 °C, $T_{10}$ = –3,43 °C. Экстремально низкие температуры на глубинах 0 и 10 м, вероятно, связаны с пониженной теплоизолирующей способностью снежного покрова.

Полигон 6 (район Алыкель) находится в зоне распространения растительности. В разрезе наблюдаются повторно-жильные льды и термокарстовые озера; мощность деятельного слоя достигает 1–2 м. Отложения представлены тремя слоями снега. На скв. 6-1 термическое сопротивление снега – R = 4,94 (м²·°C)/Вт при $T_{возд}$ = –20°C. Высокая теплоизоляция обеспечивает наиболее высокие температуры $T_0$ = –6,9 °C и $T_{10}$ = –0,81°C.

Полигон 4 (район р. Ямная) объединяет точки наблюдения в пределах одной ландшафтной зоны, но на различных геоморфологических уровнях. На скв. 4-1 определены R = 2,4 (м²·°C)/Вт, $T_{возд}$ = –27 °C, $T_0$ = –13,42°C, $T_{10}$ = –0,94°C; на скв. 4-2 – R = 1,8 (м²·°C)/Вт, $T_{возд}$ = –27 °C, $T_0$ = –14,51 °C, $T_{10}$ = –1,42°C. Снижение мощности снега на скв. 4-2, обусловленное более высоким гипсометрическим положением, привело к падению термического сопротивления и понижению температуры поверхности грунта примерно на 1,5 °C.

Полигон 8 (окрестности г. Дудинка) характеризуется затененностью и ветровым переносом снега, что способствует его накоплению. На скв. 8-1 значения параметров составили: R = 4,1 (м²·°C)/Вт, Твозд = –19 °C, $T_0$ = –12,65 °C, $T_{10}$ = –0,94 °C. Теплоизоляционные свойства снежного покрова обеспечивают поддержание температуры на глубине 10 м вблизи нулевых значений.

В результате выполненных исследований установлена определяющая роль снежного покрова в формировании температурного режима многолетнемерзлых пород на всех изученных полигонах. Термическое сопротивление снега, зависящее от его мощности и условий накопления, выступает ключевым фактором теплоизоляции грунта. На полигоне 6 (Алыкель) зарегистрированы максимальные температуры поверхности грунта и глубинного слоя, что обусловлено высокими значениями R. Напротив, минимальные температуры $T_0$ и $T_{10}$, зафиксированные на полигоне 9 (Кайеркан/Оганер), связаны с наименее выраженным теплоизолирующим эффектом снега. В

диапазоне от –14,5 до –6,9 °С для $T_0$ и от –3,4 до –0,2 °С для $T_{10}$ варьируют среднегодовые температуры грунта, что отражает широкий спектр локальных геокриологических условий.

***Результаты измерения плотностей снега.*** На основе проведенной снегомерной съемки на различных полигонах получены данные по плотности, теплопроводности и термическому сопротивлению снежного покрова. Измерения выполнялись на точках вокруг скважин. Для некоторых точек проводилось несколько замеров в связи с ограничением измерительной способности прибора, поэтому рассчитывалась средняя плотность снега. Ключевым параметром исследования является термическое сопротивление снега, которое определяет его изолирующие свойства в отношении теплопередачи между атмосферой и почвой.

Мощность снежного покрова по профилю варьируется в значительном диапазоне: от 0,13 м до 1,65 м. Наименьшие значения отмечались на участках с неглубоким снежным покровом, в то время как максимальная мощность была зафиксирована в зонах аккумуляции снега, связанных с особенностями рельефа и растительности. Плотность снега оказалась сравнительно низкой, изменяясь от 0,14 до 0,34 г/см³, что характерно для рыхлого, слабоуплотненного снега в период проведения измерений.

Расчетное термическое сопротивление снега показало широкий разброс значений - от 1,8 до 7,6 (м²·°С)/Вт. Наибольшие величины термического сопротивления соответствуют участкам с большой мощностью снега при относительно низкой плотности, что усиливает его изолирующую способность. Напротив, в точках с повышенной плотностью снега, даже при умеренной мощности, термическое сопротивление снижается из-за роста теплопроводности.

***Результаты изучения температурного режима грунтов.*** Для каждой из изученных скважин были проведены термометрические исследования. Значения температур были получены датчиками, установленными от поверхности снежного покрова до поверхности грунта с шагом 0,5м до глубины 5 м, а далее с шагом 1 м. Видна тенденцию к повышению температуры в верхних слоях грунта (≈2м для скважин 3-1, 3-2, 4-1, 4-2, 8-1, 9-1) и к дальнейшему её стремлению к стабилизации на отметке ≈ 0 до -1,5 °С.

Резкое отличие демонстрируют скважины 9-2 и 9-3. Стабилизация в них наблюдается на глубинной отметке 4 м. В приповерхностных слоях наблюдается более резкое падение температуры и дальнейшая её стабилизация на отметке ≈-3 – -4°С. Такая картина может быть связана с низкой мощностью снега на территории при средних значениях теплопроводности. Скважина 9-1, несмотря на непосредственную близость, демонстрирует другую картину, что связано с различиями в геологии площадок, на которых этих скважины находятся. Скважина 9-1 находится в непосредственной близости к реке, которая оказывает на неё отепляющее воздействие.

Ещё один нетипичный случай представлен скважиной 6-1. Температура в этой скважине стабилизируется на глубинной отметке 1м и далее находится около 0°С на протяжении всей глубины. Предположительно, такой результат связан с тем, что снежный покров вблизи скважины 6-1 имеет очень высокое термическое сопротивление (≈22,9($м^2$*°С)/Вт) при высоком показателе мощности - 1,5м.

***Результаты мониторинга температурного режима грунтов***. В целях определения влияния снегомерного покрова на температуру грунтов было выполнено моделирование теплофизических процессов в грунтах с помощью программы QFrost. Для примера взят большой снегоотвал в центральной части дворовой территории города Норильск. Для расчета выбран двухслойный грунт, состоящий из техногенного слоя до 3 метров из суглинка, так как он наиболее распространен. Кроме того, на основании средних многолетних данных метеорологических станций Норильска рассчитана начальное температурное поле грунта. На глубине 10 метров температурный режим составляет –1,9°С.

На рис. 1 представлена модель влияния снегоотвалов на температурный режим грунтов в течение 1 года, 5 и 15 лет.

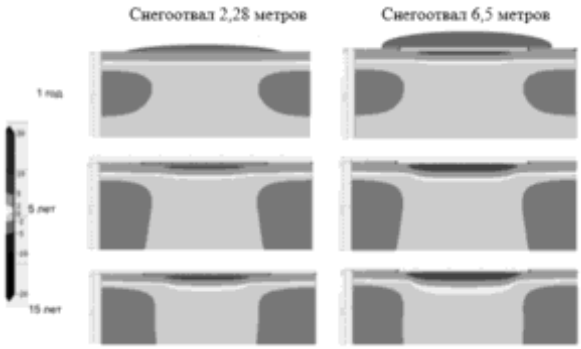



Рис. 1. Модель влияния снегоотвалов на температурный режим грунтов в течение 1 года, 5 и 15 лет

При высоте снегоотвала 2,28 метров через 15 лет оттаивание грунта произойдет на 4,5 метра. При высоте снегоотвала в 6,5 метров на третий год уже сформируется круглогодичный талик, а через 15 лет его мощность составит 7,5 метров.

Следует отметить, что в таких местах, где снег очищается, в грунтах происходит промерзание.

Для расчета нужно знать один верхний граничный слой, то есть климат, второй – состав и свойства грунтов. Третий – тепловой поток снега. Таким образом, можно сказать, что мощность снега напрямую влияет на температурный режим грунтов.

***Мониторинг термокарста***. Также было проведено исследование термокарстовых озер для дальнейшего использования полученных данных в системе мониторинга и последующем построении теплотехнических математических моделей. В ходе работ были измерены мощности снега на бортах четырех термокарстовых озер: два на полигоне вблизи района Оганер, один около аэропорта Алыкель и один вблизи р. Ямная. В результате исследования была выявлена зависимость высоты снежного покрова от преобладающих ветров и построены разрезы снежного покрова. Рассматриваемые озера последовательно располагаются с востока на запад. Можно сделать вывод, что от Норильска до Дудинки происходит закономерное изменение условий снегопереноса: чем западнее от Норильска, тем больше мощность снежных отложений

***Заключение.*** В ходе исследования были проведены замеры у дорог, где снежный покров имеет аномальную мощность и плотность из-за снегоочистки и ветрового переноса. Выполнено сравнение характера снегонакопления у озер, что важно для понимания режима промерзания грунтов в гидрологически чувствительных зонах. Сравнение данных по Норильску и Дудинке позволило нам проследить, как разница в градостроительной структуре и микроклимате влияет на состояние криолитозоны. Практика формирования крупных стационарных снегоотвалов в городской черте, вероятно, сохранится. Моделирование показывает, что через несколько десятков лет под наиболее мощными отвалами сформируются сквозные талики, что приведёт к неравномерным осадкам зданий, активизации термокарста и деформациям инженерных сооружений. На фоновых природных участках ожидается постепенное увеличение мощности деятельного слоя, особенно в зонах ветровой аккумуляции снега (восточные склоны, придорожные кюветы).

***Литература***.

1. Геокриология СССР. Средняя Сибирь. Под ред. Ершова Э.Д. – М.: Недра, 1989. – 414 с

2. Общая геокриология: Учеб. для студентов вузов. Под ред. Ершова Э. Д.. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002, 683

3. Научно-методические основы организации и проведения фонового геокриологического мониторинга (на примере территории от Норильского промышленного района до Дудинки): монография / П.И. Котов, Е.Н. Оспенников, М.Ю. Чербунина, О.М. Макарова; под общ. ред. Е.Н. Оспенникова; Министерство науки и высшего образования РФ, Заполярный гос. ун-т им. Н.М. Федоровского. – Норильск: ЗГУ, 2024. – 211 с.

4. Падерин П.Г., Деменюк А.Ф., Назаров Д.В., Чеканов В.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Норильская. Лист R-45 - Норильск. Объяснительная записка. - СПб: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2016. 366 с. (Минприроды России, Роснедра, ФБГУ «ВСЕГЕИ»)

# ЛАНДШАФТНАЯ ИНДИКАЦИЯ НЕГЛУБОКО ЗАЛЕГАЮЩИХ ПЛАСТОВЫХ ЛЬДОВ, ПОЛУОСТРОВ ЯМАЛ

***И.Д. Стрелецкая[1], А.И. Кизяков[1], Н.Д. Самохвалов[1], М.О. Лейбман[2]***
*[1] Географический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва*
*[2] Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень*

В ходе освоения и эксплуатации крупнейших нефтегазоконденсатных месторождений Ямала, строительства железных и автомобильных дорог, трубопроводов, поселков требуются качественные изыскания и последующий мониторинг в районах сплошного распространения вечномерзлых пород полуострова Ямал. Известно, что в мерзлой песчано-глинистой толще северных районов Западной Сибири встречаются пластовые залежи льда залегающие неглубоко от поверхности [1]. Пластовые льды являются одним из ведущих факторов, определяющих инженерно-геологические условия территории для любого вида строительства. До настоящего времени для проектирования и строительства не хватает фактических данных изысканий о глубине залегания и мощности пластовых льдов, часто распространенных по площади на десятки и сотни метров. Сложные морфологические особенности неглубоко залегающих пластовых льдов требуют дополнительных геофизических и буровых работ для оконтуривания ледяных тел.

Пластовые льды Арктики изучаются на протяжении десятков лет, существует обширная литература, в которой обсуждаются как палеогеографические, так и криолитологические условия их формирования [2]. Обсуждается роль неглубокозалегающих пластовых льдов в активизации опасных процессов (термоденудации, термокарста, воронок газового выброса и пр.) [3-6].

Ландшафтные методы широко используются и вошли в практику инженерно-геокриологических исследований, в том числе для оценки льдистости верхних горизонтов мерзлой толщи. Тема ландшафтной индикации неглубоко залегающих пластовых льдов остается актуальной. До настоящего времени нет ясной картины, в каких условиях шло промерзание водонасыщенных осадков, формировались ли все ледяные залежи одномоментно, или в разрезах мы можем наблюдать льды разного генезиса и возраста. От решения этих задач зависит, какие ландшафтные индикаторы применимы и указывают на неглубокое залегание пластового льда. В том числе, особенности современного рельефа могут свидетельствовать о деградации пластовых льдов и косвенно о глубине их залегания.

Цель исследования – обсудить индикационные признаки неглубоко залегающих пластовых льдов. Главная закономерность распространения пластовых льдов – это их связь с неоплейстоценовыми морскими трансгрессиями-регрессиями, которые сопровождались синхронным промерзанием осадков дна после регрессии моря.

Севернее $68^0$ с. ш. мерзлые и охлажденные песчано-глинистые отложения, слагающие водораздельные поверхности высотой от 30-40 м до 120 м, в разной степени засолены до подошвы криогенной толщи и включают линзы криопэгов различной минерализации и дебита. Континентальная пачка мерзлых осадков (аллювиального, биогенного, озерного и склонового генезиса) мощностью от нескольких метров (торфяники на водоразделах) до 30 м (район устья Се-Яхи (Зеленая) перекрывает морские засоленные осадки и включает эпигенетические и сингенетические неоплейстоценовые и голоценовые полигонально-жильные льды, хвосты которых проникают в кровлю пластовых ледяных залежей и морских отложений. Склоновые отложения, сформировавшиеся недавно, в результате термоденудационных процессов и недостаточно промытые поверхностными водами, относятся к средне и слабо засоленным осадкам, на участках с аномально высокой температурой пород в разрезах встречаются криопэги [7].

Граница распространения засоленных пород совпадает с южной границей пластовых льдов. Линзы льдов могут быть встречены в пределах всех геоморфологических уровней – от водораздельных поверхностей до пойм. Близко к дневной поверхности (часто под слоем сезонного протаивания) пластовые льды залегают на склонах морских террас, в днищах седловин, разделяющие горизонтальные поверхности террас, в береговых обрывах рек, озер и бортах хасыреев. На ровных поверхностях водоразделов пластовые залежи залегают на глубинах ниже 10-15 м [1]. Кровля ледяных тел нередко имеет куполообразную форму, а протяженность залежей может достигать нескольких километров при мощности льда от первых метров до 50 м. Под руслами рек и тыловых частях пойм встречены ледяные залежи мощностью до 10 м и протяженностью несколько сот метров.

В 1992 г. составлена вероятностная карта распространения и глубины залегания кровли пластовых льдов на площадь шести листов топографической карты масштаба 1:25 000 с использованием метода

автоматизированного дистанционного дешифрирования [8]. Для обучения компьютерной системы использовались 200 скважин с известными условиями залегания льдов. Перечень дешифровочных признаков включал несколько десятков признаков, включая абсолютную высоту в точке бурения, геоморфологическое положение, экспозицию склона и пр. Верификация карты показала, что ее достоверность превышает 70%.

В 2012 г. на участок центрального Ямала по результатам бурения (76 скважин) и опубликованных материалов составлена карта глубины залегания кровли пластового льда. Карта базируется на применении схемы ландшафтных индикационных признаков [9]. Характеристика рельефа рассматривается как один из наиболее значимых компонентов ландшафта при рассмотрении глубины залегания пластовых льдов. По мнению авторов, пластовые льды встречаются в контурах междуречий, где наблюдается пластовый лед в естественных обнажениях и в скважинах, на поверхностях, осложненных оползневыми цирками и вогнутыми оползневыми склонами, на склонах, где встречаются небольшие висячие термокарстовые озера, а также под небольшими хасыреями и на участках пойм с узкими сильно мигрирующими руслами.

Термоденудационные процессы особенно активные в последнее десятилетие на Центральном Ямале из-за потепления климата, определяются криогенным строением разреза и свидетельствуют, в том числе, и о неглубокозалегающих пластовых залежах.

Выполнен анализ распространения термоденудационных форм рельефа (ТФР) на полуострове Ямал в зависимости от льдистости верхней части криогенной толщи и вертикальной расчлененности рельефа [6]. (рис.1).

Проведенное районирование полуострова Ямал по проявлению термоденудации позволило установить, что продолжающееся потепление климата и увеличение глубины сезонного протаивания на участках распространения полигонально-жильных льдов и малой вертикальной расчлененности рельефа приводит к активизации термоэрозии и термокарстовым просадкам, а не термоденудации. А возникновение новых термоденудационных форм (рис.1 А точки на карте) происходит именно на участках близкого к поверхности залегания пластовых льдов (рис.1 А показано штриховкой), для которых характерна значительная расчлененность рельефа.

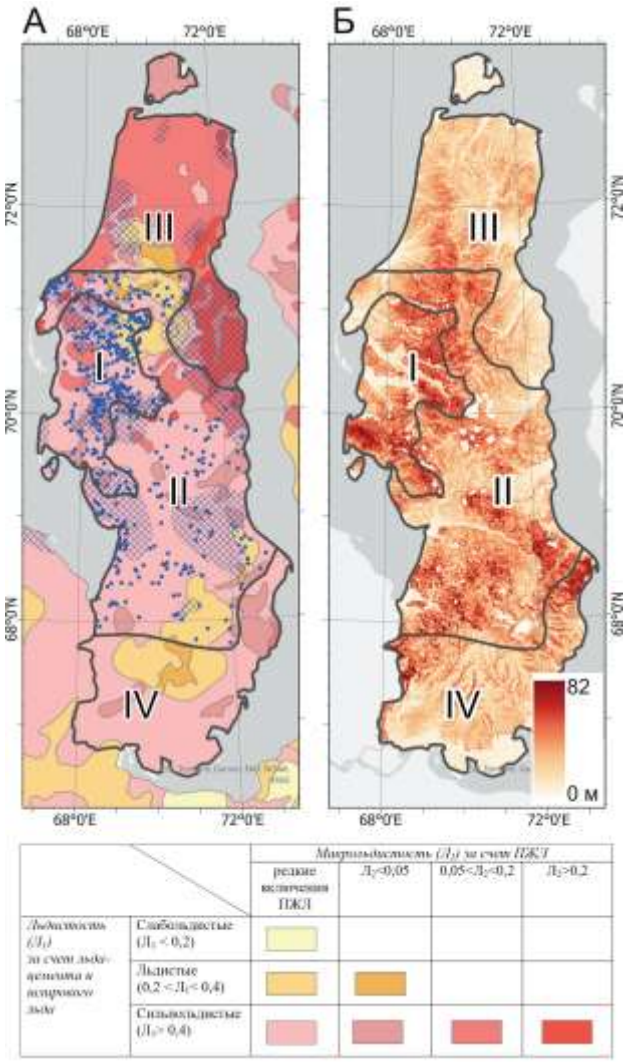



Рис. 1 Неравномерность распространения ТФР на полуострове Ямал и ее связь с льдистостью отложений и вертикальной расчлененностью рельефа (по Кизяков и др., 2025). Римскими цифрами I–IV обозначены выделенные районы распространения ТФР: А – точки ТФР [10] на картосхеме льдистости отложений [11], объяснение градации льдистости по цвету приведены в таблице, широкое распространение пластовых льдов показано штриховкой; Б – вертикальная расчлененность рельефа. Насыщенные цвета характеризуют районы с большим перепадом высот.

Больше всего термотеррас и термоцирков встречено на склонах водоразделов в подзоне **типичных тундр** (южнее широты мыс Бурунный – мыс Поруй и севернее широты р. Юрибей – мыс Каменный), здесь повышение температуры пород и увеличение глубины сезонного протаивания приводят деградации пластовых льдов Площади широкого распространения неглубоко залегающих пластовых льдов и термоденудационных форм рельефа практически совпадают (I и II районы распространения ТФР). Оползневые процессы активно перерабатывают первичную поверхность водоразделов, сложенных засоленными морскими песчано-глинистыми отложениями. Зеркалом скольжения служит как подошва сезонно-талого слоя, так и кровля ледяной залежи. При смещении масс засоленных пород происходит латеральное перераспределение химических элементов в слое сезонного оттаивания [12]. Установлено, что высота и продуктивность ивняковых тундр связана с засоленностью поверхностных отложений [13]. В пределах поверхностей скольжения, приуроченных к верхним частям склонов и занятых пионерными злаками и разнотравьем можно ожидать пластовые льды на глубине нескольких метров или сразу под слоем сезонного оттаивания. На хорошо дренированных верхних частях склонов, где преобладает низкорослая травяно-ивняковая растительность, пластовые льды залегают на глубине до 10 м. В нижних частях склонов, в полосах и ложбинах стока в зоне аккумуляции оползневых тел, заросшими густыми зарослями ивняков высотой 0,5-1,5 м, следует ожидать кровлю пластовых залежей льда глубже 10 м. В подзоне **южных (кустарниковых) тундр** пластовые льды неглубоко от поверхности практически все вытаяли, а сохранившиеся находятся на большой глубине. В подзоне **Арктических тундр** глубина оттаивания в

настоящее время не достигает кровли ледяных залежей и пластовые льды не вовлечены в термоденудационные процессы и находятся в стадии консервации. Ближе всего к поверхности они находятся в верхних и средних частях склонов.Пластовые льды являются экраном для миграции подземных газов, а воронки газового выброса указывают на участки распространения пластовых залежей вблизи поверхности [4,17].

**Выводы**

Ландшафтные индикационные признаки неглубокого залегания пластовых льдов можно установить только для районов Ямала, занятых типичными тундрами. Это участки, на которых активно развиты современные термоденудационные процессы (термоцирки, термотеррасы, криогенные оползни), а именно, склоны, занятые ивняками, берега озер, рек, в обрывах которых можно наблюдать линзы пластового льда. Воронки газового выброса также указывают на близкое залегание кровли ледяной залежи. В арктической тундре – это верхние и средние части склонов расчлененного рельефа. В подзоне южных тундр залегание пластовых льдов неглубоко от поверхности маловероятно.

Исследования выполнены при поддержке РНФ в рамках проекта № 25-27-00480 «Картографическая модель распространения пластовых подземных льдов Ямала как основа прогноза развития опасных криогенных процессов».

***Литература***

1. Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М.: ГЕОС, 2002, 246 с.

2. Стрелецкая И.Д., Украинцева Н.Г., Дроздов И.Д. Происхождение и распространение пластовых льдов в криолитозоне Арктики // Вестник МГУ. 2002. Сер. 5. География. № 3. С. 7-13.

3. Кизяков А.И., Лейбман М.О., Передня Д.Д. Деструктивные рельефообразующие процессы побережий арктических равнин с пластовыми подземными льдами // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 2. С. 79–89.

4. Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О., Кизяков А.И., Облогов Г.Е., Васильев А.А., Хомутов А.В., Дворников Ю.А. Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса // Вестник Московского университета. Серия 5: География, Изд-во Моск. ун-та, 2017, том 1, № 2, с. 91-99

5. Бабкина, Е. А., Лейбман, М. О., Дворников, Ю. А., Факащук, Н. Ю., Хайруллин, Р. Р., Хомутов, А. В. (2019). Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород. *Метеорология и гидрология*, (4):99–109.

6. Кизяков А.И., Тарасевич И.И., Зотова Л.И., Гребенец В.И., Рогов В.В., Костенков Н.А., Стрелецкая И.Д. Районирование полуострова Ямал по проявлению термоденудации // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2025. Т. 80. № 6. С. 118–130 https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.9

7. Стрелецкая И, Д. Закономерности распространения и формирования засоленных мерзлых грунтов и криопэгов Севера Западного Ямала (на примере Бованенковского ГКМ): Автореф. Дисс. на соискание уч. ст. канд.г.-м. наук. – Москва: 1991. - 21.с.

8. Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. В двух томах. Т. II. Геокриологические условия освоения Бованенковского месторождения /В.В. Баулин, В.И. Аксенов, Г.И. Дубиков и др., Тюмень: ИПОС СО РАН, 1996, 240 с.

9. Хомутов А.В., Лейбман М.О., Андреева М.В. Методика картографирования пластовых льдов Центрального Ямала // Вестник Тюменского государственного университета, 2012, № 7, с. 76-84

10. Nitze I., Heidler K., Nesterova N. et al. DARTS: Multi-year database of AI-detected retrogressive thaw slumps in the circum-arctic permafrost region, Scientific Data, 2025, no. 12, 1512, DOI: 10.1038/s41597-025-05810-2.

11. Карта генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. Масштаб 1:1 000 000 / гл .ред. В.Т. Трофимов. М.: Центргеология, 1982

12. Украинцева Н.Г., Стрелецкая И.Д. Ландшафтная индикация засоленности поверхностных отложений на оползневых склонах Западного Ямала // Ландшафтная школа Московского университета: традиции, достижения, перспективы. – М.: РУСАКИ, 1999. –С. 120-129.

13. Украинцева Н.Г. Ивняковые тундры Ямала как индикатор засоленности поверхностных отложений // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. – Новосибирск: Наука, 1997.- с.182-187.

14. Leibman, M., Babkina, E., Dvornikov, Y. et al. Yamal Peninsula, Permafrost-related Terrain Phenomena: Tabular Ground Ice, Thermocirques and Gas Emission Craters. Dokl. Earth Sc. 525, 55 (2025).

## РАЗРАБОТКА МЕРЗЛОЙ ПОГРЕБЕННОЙ РОССЫПИ ЗОЛОТА МЕТОДОМ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ

***С.Д. Сурин***
*ООО «Морские платформы», г. Москва*

В настоящее время на балансе государства находится значительное количество запасов полезных ископаемых, находящихся в россыпях. При этом ведущаяся разработка данных запасов ведется с постоянно увеличивающимся коэффициентом вскрыши и разработкой глубоко залегающих выработок, что требует обустройства глубоких карьеров или проходки шахт с сопутствующими затратами на вскрышу, водоотведение и крепеж. Актуальной задачей горного дела является поиск эффективных решений по отработке погребенных россыпей [1].

Добыча полезных ископаемых в условиях криолитозоны еще более осложняется за счет сезонности работ, вызванной климатическими условиями, сложности разрушения и экскавации грунтов на поверхность, невозможностью осуществить обогащение поднятого материала в круглогодичном цикле, изменчивостью свойств грунтов при фазовых переходах.

В последней четверти XX века получила развитие скважинная гидродобыча как отдельное направление науки и техники, направленное на отработку подземного пространства без ведения вскрышных и горнопроходческих работ. Данная технология применима к добыче россыпного золота и алмазов, фосфоритов, песков, содержащих редкие металлы, янтаря, разработки асфальтитов и битумов, создания устойчивых подземных выработок [2, 3]. Для скважинной гидродобычи наличие мерзлоты в разрезе может являться положительным фактором, повышающим параметры технологии.

В 2026 г. на опытном участке структуры АО «Русская платина» планируется опытно-промышленное внедрение технологии скважинной гидродобычи.

Состав рыхлых отложений глубокозалегающей россыпи представлен следующим усреднённым литологическим разрезом: ниже почвенно-растительного слоя до глубины около 10 м залегают речные валунно-галечные отложения с гравийно-супесчаным заполнителем. Галька от мелкой до крупной, преобладает средняя и крупная, валуны малые и средние, песок разнозернистый. Ниже идут аналогичные отложения с гравийно-суглинистым заполнителем до плотика. Плотик россыпи представлен известняками, глинистыми сланцами, доломитами, обломочный материал сложен разнообразными по составу породами.

Разрабатываемый участок является сложным и ресурсоемким для отработки открытым способом ввиду большой мощности торфов (местами до 40 м) и наличия действующих водотоков на участке, что влечет за собой необходимость отвода водотоков на поверхности. Осложняющим фактором является островная мерзлота в теле россыпи с периодически проявляющимся горизонтом межмерзлотных и подмерзлотных вод. Район работ расположен в зоне развития многолетней мерзлоты, на долю которой приходится приблизительно 70% территории.

Всего россыпь разделена на несколько блоков, выделенных на основании данных разведки. Предлагается внедрение технологии скважинной гидродобычи взамен технологии открытой разработки с ожидаемым результатом более 400 кг золота. При этом экономические параметры разработки должны быть не хуже, чем при разработке карьера или строительстве шахты. Ожидаемый объем добычи в первый сезон опытной разработки должен составить около 10 кг с дальнейшей масштабируемостью до 100 кг за сезон.

Скважинная гидродобыча подразумевает образование подземных камер цилиндрической или полусферической формы. Форма подземных камер определяется технологической схемой отработки. Размер подземных камер, образующихся в результате работ по скважинной гидродобыче, должен обеспечивать максимальную выборку материала золотоносного пласта с минимальным количеством скважин. Высота подземных камер должна обеспечивать захват всего золотоносного пласта по мощности. Радиус камеры обеспечивает рентабельность внедрения технологии и определяется технической возможностью разрушения и устойчивостью горных пород. Таким образом, высота камеры должна захватывать весь продуктивный пласт мощностью до 5 м и частично задирать плотик на глубину проникновения золота.

В процессе опытных работ основной упор ставится на оптимизацию типовых схем и определение параметров технологии для данных геологических условий.

Основной задачей работ является определение зависимости объема отработки от параметров технологических схем: объема подаваемой воды и воздуха, оказываемого давления на забой, мощности и глубины продуктивного слоя, схемы подъема и разрушения грунтов.

F(V) = F(P, H, S, Q, условия), где V – единичный объем подземной выработки, $м^3$; P – давление на насадке Мпа;. H – глубина залегания кровли продуктивного пласта, м; S – мощность продуктивного пласта, м; Q – расход подаваемой воды, $м^3$/час; условия – затопленное или незатопленное состояние подземной камеры в процессе добычи.

Основой процесса скважинной гидродобычи является механическое воздействие воды на породный массив. В процессе скважинной гидродобычи выделяют три основных процесса: разрушение, доставку до скважины и подъем на поверхность.

**Разрушение** породного массива происходит за счет механического действия струи воды, направляемой на стенку грунта из насадки гидромонитора. На участке работ предполагаются к опробованию схемы в затопленных и незатопленных условиях с приоритетом схемы в воздухе при отсутствии затопления.

**Доставка**. В незатопленных условиях используют смыв струей на расстоянии до 10-15 м. В затопленных условиях транспорт разрушенного материала до скважины может осуществляться рядом транспортирующих насадок, первая из которых должна находиться в зоне всасывания.

**Подъем на поверхность**. Подъем на поверхность осуществляется либо эрлифтом, либо гидроэлеватором. Эрлифт прост в использовании, но для текущих глубин добычи требует затопленных условий и подачи воздуха по скважинному снаряду с расходом не менее 25 $м^3$/мин. Гидроэлеватор более сложен конструктивно и требует большого объема подаваемой воды. Гидроэлеваторный подъем чувствителен к водопритокам из пласта и требует обсадки скважины с заходом в плотик. При реализации гидроэлеваторной схемы для подъема потребуется подача воды в объеме около 700 $м^3$/час.

**Затопленное состояние.** Разрушение – грунт разрушается в пределах 1-2 м от насадки гидромонитора, т.к. механическое воздействие струи внутри водной среды резко ограничено из-за значительной вязкости воды. Доставка – грунт перемещается под действием водного потока и гравитации. При снижении скорости потока тяжелые элементы перестают перемещаться. Нужны сложные инженерные решения, обеспечивающие непрерывный поток к месту забора грунта. Подъем – эрлифт.

Резюме. Затопленные условия требуют сложного раздвигающегося или раскладывающегося скважинного оборудования для продвижения разрушающих и транспортирующих насадок к фронту разрушения грунта. Радиус одиночных выработок достаточно мал (до 10 м максимум), что требует бурения значительного количества технологических скважин, но при этом обеспечивается относительно легкий подъем на поверхность за счет эрлифта.

На текущем уровне развития технологии наиболее перспективным выглядит конструкция скважинного снаряда, позволяющего отрабатывать породный массив через одиночные скважины [4]. Схема снаряда представлена на рис. 1.

Крупность поднимаемого материала определяется конструкцией скважинного снаряда. На этапе опытно-промышленных работ крупность поднимаемых частиц для данной схемы ограничена 140 мм (определяется как расстояние между стенками ∅273 мм пульповода и ∅114 мм водовода). Поступление материала большей крупности в пульповод невозможно по геометрическим параметрам. На стадии промышленных работ крупность поднимаемого материала может составлять около 200 мм при увеличении пульповода до ∅325 мм.

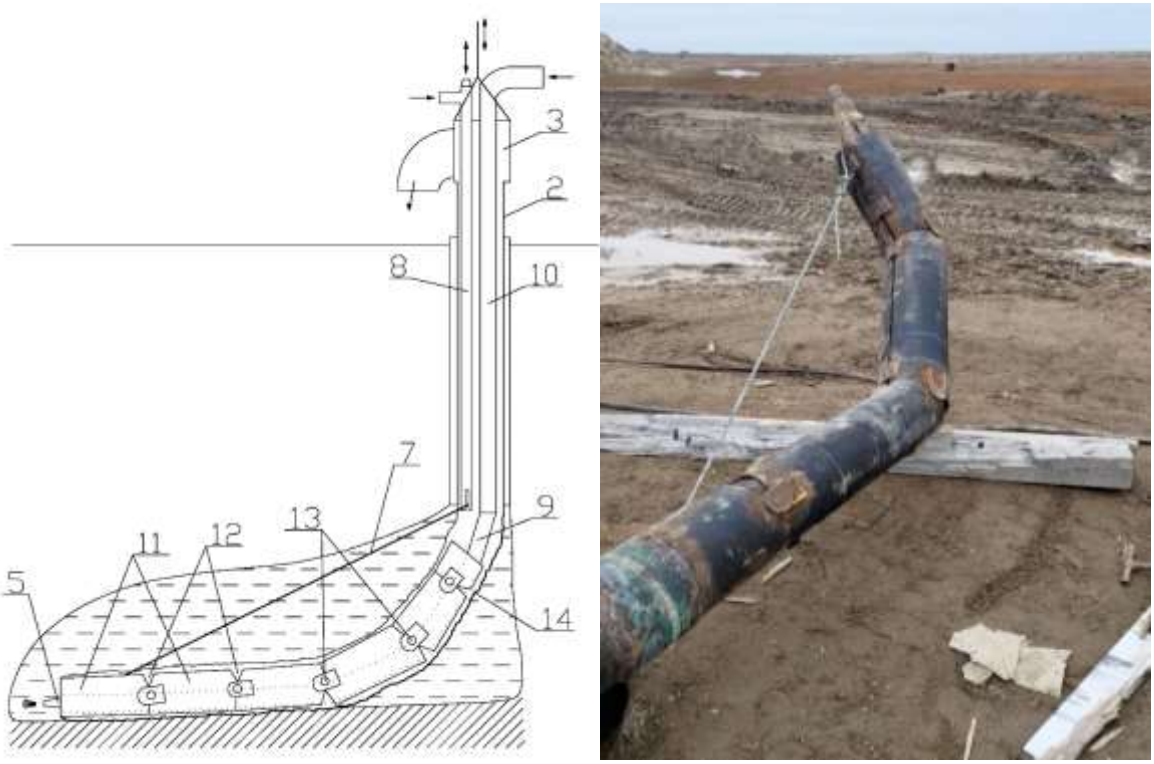



Рис. 1 – Эрлифтный снаряд с отклоняющимся выдвижным гидромонитором.
2 – обсадная труба, 3 – приемный гаситель, 5 – выдвижная насадка, 7 – трос управления, 8 – воздуховод, 9 – гибкий водовод, 10 – жесткий водовод, 11 – сегменты скважинного снаряда, 12 – гофрированный рукав, 13 – соединительные элементы, 14 – защитный кожух)

На поверхности схема отработки выглядит как треугольная сетка со стороной 10-12 м. Отработка ведется рядами камер в отступающем порядке с временным формированием межрядовых целиков и их последующей отработкой (рис. 2). Каждая добычная камера отрабатывается в три этапа. Сначала размывается предварительная круговая камера радиусом 3 м без выдвижения гидромониторного ствола. Затем снаряд с отклоненным на $90^0$ всасом опускается до плотика.

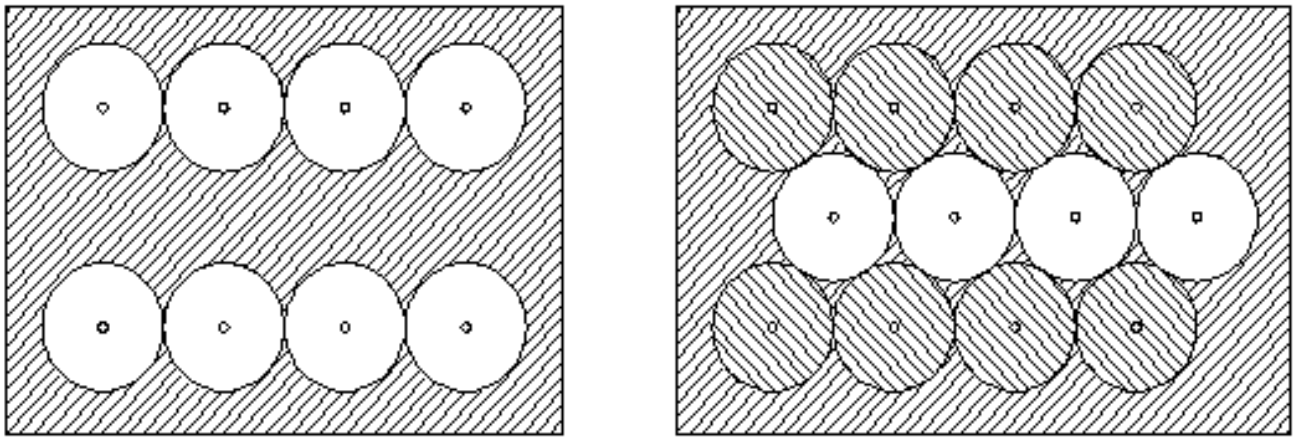


Рис. 2. Система отработки добычного полигона. Отработка рядов гидродобычных камер и отработка межрядного целика после закладки отработанных камер.Несколько раз производится вывод/ввод гибкого ствола в породный массив до прекращения интенсивного подъема породы эрлифтом. После этого снаряд поворачивается в скважине на угол $5\text{-}10^0$ и ввод/вывод гибкого ствола повторяется. На третьем этапе производится зачистка дна предварительной камеры путем кругового перемещения снаряда в скважине аналогично второму этапу. В мерзлом массиве схема отработки сверху вниз от кровли к плотику. В талом, наоборот, снизу вверх. Ожидаемое максимальное соотношение твердого к жидкому в поднимаемой пульпе может достигать 1:4, стандартное значение плотности должно находиться в диапазоне 1:8 – 1:15.

**Незатопленные условия.** Разрушение – в 10 и более метрах от насадки. Доставка – возможна в соседние скважины по вектору разрушения. Подъем – гидроэлеватор.

Резюме. Незатопленному типу условий характерны: большие радиусы подземных камер, малое количество технологических скважин, сложная конструкция подъемного устройства и обсадной трубы (рис. 3), простота гидромониторной скважины, в которой фактически спускается только боковая насадка.

Рис. 3. Нижняя часть гидроэлеваторного снаряда (слева) и обсадной колонны (справа)

Ожидаемым результатом опытно-промышленных работ является определение максимально возможного размера подземной камеры в зависимости от технологических и геологических параметров. Данные результаты позволят оптимизировать технологические схемы для непосредственно промышленного внедрения. Ожидаемые параметры разрушения должны подвести научную базу под технологические коэффициенты, определяемые эмпирическим путем: потери давления в приборе, дальности полета струи до ее разрушения, максимальный размер устойчивого пролета, потери золота при технологическом процессе и т.п.

Перспектива развития технологии в дальнейшем с точки зрения фундаментальных процессов – оптимизация технологических параметров, физическое и математическое комплексное описание процесса скважинной гидродобычи, включая устойчивость образующихся выработок с течением времени.

Перспектива развития инженерных решений заключается в интеграции новых решений по разрушению грунта в зоне всасывания (механическому или гидравлическому за счет выброса некондиционного материала в уже образованную камеру за счет изменения гидродинамических режимов работы), использовании новых методов бурения для ускорения проходки скважин и минимизации турбулентности при движении воды по скважинному снаряду.

**Устойчивость подземной камеры** упрощенно можно определять по методу Протодъяконова: $f = \frac{H}{d}$, где f – коэффициент крепости; H – высота выработки, м; a – d – ее диаметр, м. При значениях f от единицы и больше, выработка считается устойчивой в достаточно длительном времени. Однако, для подземных камер устойчивость требуется только на стадии их отработки. Отсюда возникает актуальная задача поиска понижающего коэффициента K, связывающего эффективный радиус разрушения породного массива с мощностью продуктивного пласта и глубиной его заложения. Так, при строительстве подземных резервуаров в мерзлых дисперсных породах на Ямале на глубинах 20-50 м [3], было показано, что их устойчивость может сохраняться при величинах f ~ 0,6-0,7. При опытной добыче гидроэлеватором [5] на глубинах 15-20 м, при мощности отрабатываемого пласта 3-5 м, максимальный радиус в мерзлых грунтах составлял до 15 м, в талых – до 7-10 м (с быстрым опусканием кровли в течение первых суток). В связи с этим в рамках проводимых опытных работ стоит задача поиска решений функции f.

В рамках выполнения опытных работ по скважинной гидродобыче на участке работ будет получен материал для уточнения рамок классификационных параметров, лежащих в основе районирования территории регионов России со значительными запасами погребенных россыпных месторождений с

точки зрения внедрения технологии скважинной гидродобычи. Приблизительная классификация может быть представлена в следующем виде (таблица 1).

Таблица 1

Классификация геологических условий для применения скважинной гидродобычи

| Условия | Глубина заложения кровли пласта, м | Наличие валунов (d>20 см) в разрезе по объему, % | Водоприток*, $м^3$/час | Состав заполнителя** |
|---|---|---|---|---|
| Оптимальные | ≥ 15 | ≤ 5 | ≤100 | Пески, супеси |
| Возможно применение | 12 – 15 | 5 – 15 | 100 – 200 | Тяжелые супеси, тяжелые суглинки |
| Ограниченно применимые | 10 – 12 | 15 – 25 | 300 – 1000 | Тяжелые мерзлые глины с тонкодисперсным золотом |
| Неприменимые | ≤ 10 | ≥ 25 | ≥ 1000 | Тяжелые мерзлые глины с мелким золотом |

* при водопритоке в скважину более 300 $м^3$/час работа возможна только в затопленных условиях при использовании эрлифтных схем добычи

** наличие мерзлых пород может являться плюсом, т.к. обеспечивает длительную устойчивость кровли. Однако, при наличии тонкого золота возможны технологические потери полезного ископаемого при промывке

**Расчет гидроэлеватора.** Глубина добычи – 28 м. Высота подъема – 33 м. Максимальный расход воды на насадке гидроэлеватора от 2-х насосов ЦНС 300-240 принят 600 $м^3$/час. Максимальный расход воды на насадке гидромонитора от насоса ЦНС 300-240 принят 300 м /час. Диаметр насадки гидроэлеватора – 70 мм. Диаметр камеры смешения гидроэлеватора – 126 мм. Диаметр насадки гидромонитора – 40 мм. Обоснование методики расчета приведено в [5].

Высота подъема составит 45 м при необходимой высоте – 37 м. Расход воды на гидромониторе при насадке ø40 мм составит 220 $м^3$/час. Расход воды при всасывании пульпы с учетом эжекции составляет 680 х 0,4 = 272 $м^3$/час, что превышает расход воды на гидромониторе с учетом производительности по пескам. Для обеспечения общего расхода воды на гидроэлеваторе 680 $м^3$/час часть воды от третьего насоса ЦНС 300х240 отводится из гидромониторного водовода в гидроэлеваторный водовод (около 80 $м^3$/час).

Для геологических условий залегания россыпи согласно методике [6] произведен **расчет параметров эрлифтного подъема**. При расходе воздуха до 20 $м^3$/мин эрлифт с выдвижным гидромонитором обеспечивает производительность по гидросмеси не менее 300 $м^3$/час при уровне воды на 5 м ниже поверхности. При минимальном уровне затопления производительность эрлифта с выдвижным всасывающим наконечником будет составлять около 120-130 $м^3$/час, что потребует снижения расхода воды на гидромониторе при размыве предварительной камеры. При отработке основной камеры, подача воздуха с расходом 20 $м^3$/мин обеспечит производительность до 300 $м^3$/час по гидросмеси с поддержанием уровня воды в скважине ниже 5 м от поверхности.

***Литература***


1. Россыпные месторождения России как источник стратегических видов минерального сырья. Лаломов А.В., Бочнева А.А. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2024. № 3 (188). С. 5-18.
2. Аренс В.Ж., Фазлуллин М.И., Хрулёв А.С., Хчеян Г.Х. Опыт разработки погребенных многолетнемерзлых россыпей золота скважинной гидродобычей Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 1. С. 26-35.
3. О.Е. Аксютин и др. Строительство и эксплуатация подземных резервуаров в многолетнемерзлых осадочных породах. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. – 432 с.
4. Патент на изобретение RU 2807619 C2, 17.11.2023. Заявка № 2022103912 от 16.02.2022.
5. Аренс В.Ж. и д.р. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых – М.: Изд. «Горная книга», 2007. – 295 с.
6. Аренс В.Ж., Сурин С.Д., Хрулев А.С., Хчеян Г.Х. Скважинная гидротехнология. – М.-Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 196 сХрулев А.С., Сурин С.Д., Родомысльский Д.В.

# ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ТЕРРИТОРИИ ЯКУТИИ

***И.И. Сыромятников, А.В. Литовко, Ю.А. Смирнов, Г.И. Шапошников***
*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

В современном мире автомобильные дороги являются одним из важнейших элементов инфраструктуры, которые имеют значительное влияние на развитие и жизнедеятельность любого региона страны. В настоящее время в северных и арктических регионах безопасная эксплуатация автомобильных дорог осложняется деформациями земляного полотна по причине деградации мерзлых грунтов основания и активизации опасных криогенных процессов в связи с потеплением климата [1]. Как показывает опыт, в области распространения многолетнемерзлых грунтов деформации на автомобильных дорогах в основном проявляются в виде просадок и пучений земляного полотна, морозобойного растрескивания дорожной одежды, а также разрушений откосов под действием термоденудации [2, 3].

Для выяснения причин возникновения этих явлений необходимы специальные исследования и на их основе разработка научно-обоснованных рекомендаций по предотвращению деформаций. Одним из методов проведения специальных исследований считается организация системы контроля за состоянием автомобильных дорог и дорожных конструкций. В рамках организации такой системы наиболее эффективным способом является создание постов геотехнического мониторинга на участках трассы автодороги с различными мерзлотно-ландшафтными условиями [4]. Геотехнический мониторинг (ГТМ) – это система комплексного контроля, прогнозирования и управления состоянием природно-техногенных систем с целью обеспечения эксплуатационной надежности на всех стадиях жизненного цикла. Анализ информации, получаемой с постов ГТМ на автодорогах, позволит оценить динамику состояния мерзлотно-грунтовых условий, выявить опасные криогенные процессы на ранней стадии их развития, а также своевременно разработать и применить превентивные мероприятия для сохранения устойчивого состояния автомобильных дорог.

Создание системы геотехнического мониторинга линейных инженерных сооружений большой протяженности необходимо начинать с мерзлотно-климатического и инженерно-геокриологического районирования территории прохождения их трассы. В результате районирования составляются разномасштабные карты и схемы, включающие различные мерзлотно-грунтовые условия территории прохождения автомобильных дорог [5, 6]. В выделенных районах отмечаются ключевые участки с наиболее типичными природно-техногенными комплексами для организации мониторинга на их территории.

На площадке геотехнического мониторинга устанавливаются контрольно-измерительные оборудования и приборы для регистрации, накапливании и передачи данных о состоянии и темпах изменения климатических и инженерно-геокриологических условий. Ключевыми параметрами наблюдения на таком посту являются: температурный и влажностный режим грунтов, условия теплообмена, гидрогеологические и метеорологические наблюдения, деформации дорожного полотна и насыпи, а также динамика развития криогенных процессов на автодороге и полосе отвода [7].

Федеральная автомобильные дороги Р-504 «Колыма» и А-331 «Вилюй» относятся к IV категории и проходят по территории развития криолитозоны. Автодорога «Колыма» имеет протяженность 2032 км и соединяет Республику Саха (Якутия) и Магаданскую область. Эта автодорога является одной из ключевых на Дальнем Востоке России и обеспечивает обширную территорию со значительными запасами полезных ископаемых выходом на побережье Тихого океана. Автодорога «Вилюй» соединяет Якутию и Иркутскую область. и Ее протяженность от г. Якутска до г. Тулун составляет 2146 км. Автодорога имеет важное значение для снабжения западных и северо-западных районов республики. Рассматриваемые автомобильные дороги в основном имеют переходный тип покрытия, но в последние годы идут работы по асфальтированию их обширных участков, особенно на территории Центральной Якутии.

В 2022 и 2023 годах в рамках реализации проекта по организации геотехнического мониторинга на федеральных автомобильных дорогах в криолитозоне были установлены 4 поста наблюдения за комплексными метеорологическими и мерзлотными условиями на автодорогах «Колыма» и «Вилюй».

В результате этих работ получены данные о метеорологических и инженерно-геокриологических условиях на ключевых участках рассматриваемых автодорог. В том числе детальные характеристики изменения температурного режима грунтов (срочные, среднесуточные, декадные, среднемесячные, среднегодовая) для разных элементов конструкции автомобильной дороги. Например, на участке 75 км автодороги «Вилюй» за период наблюдений выявлен тренд на повышение температуры многолетнемерзлых грунтов. При этом значение глубины сезонного протаивания грунтов оставался стабильным. (рис. 1).

По данным геотемпературного мониторинга выявлены значительные различия в температурных режимах в откосах насыпи разной экспозиции. Так, данные поста на 75 км автомобильной дороги А-331 «Вилюй» показывают, что значение ΔT в течение 2024 года между противоположными откосами на глубине 1 м изменяется от 0,1 до 3,8°С. Наибольшее значение разницы температур наблюдается в марте. С глубиной величина снижается и на 10 м варьирует от 0 до 0,2°С. Важность параметра ΔT определяется тем, что температурный градиент в грунтах насыпи и её основания является основным фактором в механизме подтока (влагонасыщения) в сезонноталом слое и в основание полотна дороги [8].

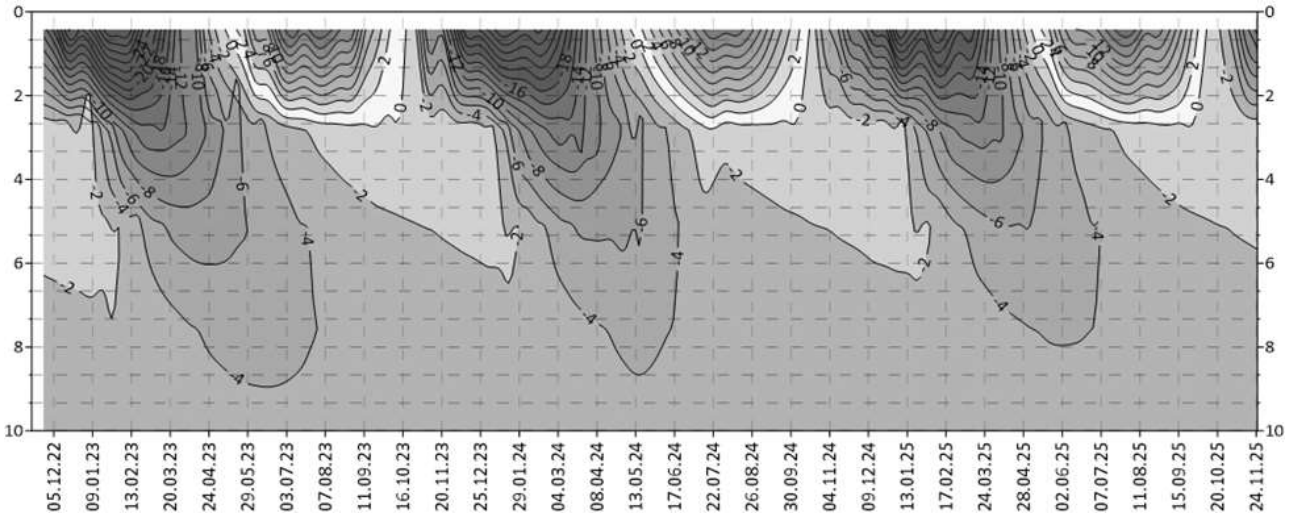



Рис. 1. Динамика теплового режима земляного полотна и грунтов основания на 75 км автодороги «Вилюй»

Данные мониторинга теплового режимов различных элементов конструкции автомобильной дороги свидетельствуют, что самая значительная разница температуры грунтов фиксируется в скважинах, пробуренных под осью автодороги и на полосе отвода (табл. 1).

Таблица 1

Разница значений среднемесячной температуры грунтов (°С) в 2024 году
между осью автодороги (а/д) и полосой отвода (п/о)

| | h, м | янв | фев | мар | апр | май | июн | июл | авг | сен | окт | ноя | дек |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| а/д | 1 | -20,9 | -22,6 | -17,7 | -9,0 | -3,9 | 0,5 | 6,7 | 8,1 | 5,0 | 0,8 | -2,0 | -9,4 |
| п/о | 1 | -1,9 | -4,4 | -6,0 | -4,6 | -1,8 | -0,6 | 5,0 | 6,5 | 3,8 | 0,5 | -0,4 | -0,7 |
| | ΔT | 19,0 | 18,2 | 11,7 | 4,4 | 2,1 | 1,1 | 1,7 | 1,5 | 1,2 | 0,4 | 1,7 | 8,7 |
| а/д | 3 | -4,1 | -8,2 | -10,3 | -9,4 | -7,2 | -5,4 | -3,7 | -2,5 | -1,9 | -1,5 | -1,3 | -1,3 |
| п/о | 3 | -0,9 | -0,9 | -1,0 | -2,2 | -2,4 | -2,2 | -1,9 | -1,6 | -1,2 | -1,1 | -1,0 | -0,9 |
| | ΔT | 3,2 | 7,3 | 9,3 | 7,2 | 4,8 | 3,2 | 1,8 | 1,0 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,3 |
| а/д | 5 | -2,6 | -3,9 | -5,6 | -6,5 | -6,3 | -5,7 | -4,7 | -3,9 | -3,3 | -2,8 | -2,5 | -2,3 |
| п/о | 5 | -1,9 | -1,8 | -1,8 | -1,9 | -2,3 | -2,4 | -2,4 | -2,3 | -2,2 | -2,1 | -2,0 | -1,9 |
| | ΔT | 0,7 | 2,1 | 3,8 | 4,6 | 4,0 | 3,3 | 2,3 | 1,6 | 1,1 | 0,8 | 0,6 | 0,4 |
| а/д | 10 | -3,7 | -3,6 | -3,5 | -3,6 | -3,7 | -3,9 | -4,0 | -4,0 | -3,9 | -3,8 | -3,7 | -3,5 |
| п/о | 10 | -2,9 | -2,9 | -2,8 | -2,8 | -2,8 | -2,8 | -2,8 | -2,8 | -2,8 | -2,8 | -2,8 | -2,8 |
| | ΔT | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 0,8 | 0,7 |

На глубине 1 м значение ΔT между этими элементами автодороги может достигать до 19°С (январь). Такие значительные различия объясняются тем, что на формирование температурного режима грунтов основания автодороги существенное влияние оказывает снежный покров. Регулярная уборка снега с поверхности асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги способствует интенсивному промерзанию земляного полотна и, в зависимости от количества зимних атмосферных

осадков, определяет особенности формирования термовлажностного режима грунтов на откосах и в основании насыпи.

В рамках геотехнического мониторинга проводится определение влажностного режима грунтов земляного полотна автодороги и полосы отвода. Для чего на определенных глубинах указанных элементов дорожной конструкции были установлены датчики влажности с возможностью автоматической регистрации данных через заданный промежуток времени. В результате наблюдения получены детальные данные о влажностным режиме грунтов на всех постах. В качестве примера на рис. 2 приводится график распределения влажности грунтов по глубине на участке км 145 автодороги «Вилюй».

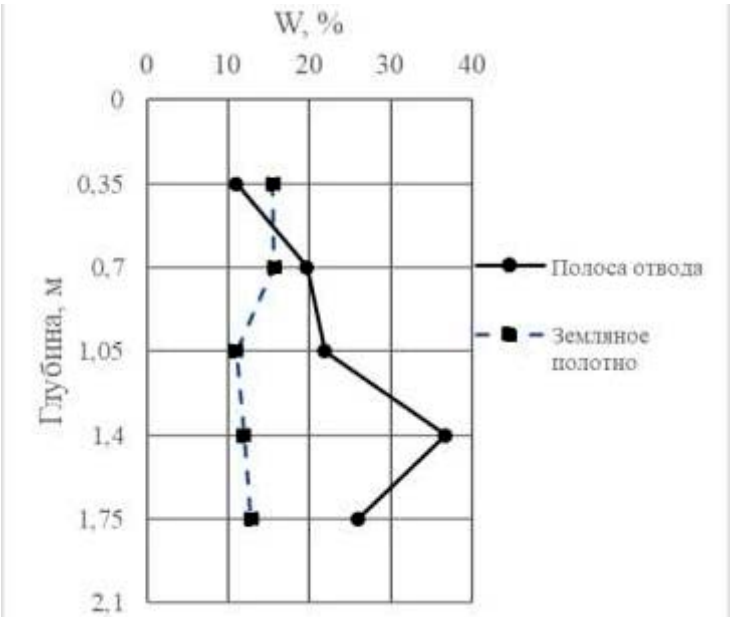



Рис. 2. Распределение влажности грунтов по глубине на участке км 145 автодороги «Вилюй» (июль 2024 г.)

По данным мониторинга влажность грунтов в полосе отвода автодороги изменяется от 6 до 37%, а в земляном полотне от 9 до 16%. Наибольшие значения влажности грунтов отмечаются на глубине 1,4 м. На глубине 0,35 и 0,7 м разница величины влажности между полосой отвода и земляным полотном незначительна (от 0 до 6%). Ниже 1,05 метров значение $\Delta W$ повышается и варьирует от 6 до 23%. В результате мониторинга выявлено, что на этом участке грунты ниже глубины 1,05 м имеют влажность грунтов полосы отвода существенно ниже, чем грунты земляного полотна. Это объясняется тем, что на рассматриваемом участке до глубины 5 метров залегают мелкозернистые пески. Они подстилаются отложениями ледового комплекса, сложенными суглинками с повторно-жильными льдами. Следовательно, датчики влажности установлены в песчаном слое, который имеют высокие фильтрационные свойства. Поэтому нижние горизонты песков имеют существенно большую влажность чем верхние. А стабильные значения влажности в земляном полотне, объясняется наличием асфальтобетонного покрытия и высотой насыпи (около 1 м).

Кроме того, впервые получены данные о плотности теплового потока вблизи поверхности (глубина 15 см). Спецификой измерения плотности теплового потока является его векторная величина. Поэтому его положительные или отрицательные значения характеризуют поступление или потерю тепла в системе «атмосфера – дорожное полотно – грунты основания». Зарегистрированные датчиками положительные и отрицательные значения плотности теплового потока определяют его направление (в грунт или в атмосферу). На участке75 км автомобильной дороги «Вилюй» под дорожным полотном в значение плотности теплового потока (q) варьирует в широких пределах от -57 до 110 Вт/м$^2$, а в полосе отвода – от -37 до 81 Вт/м$^2$. В зимний период предельные значения плотности теплового потока отличаются почти в 2 раза (рис. 2).

Суточные колебания величины плотности теплового потока зависит от влажности грунтов и разности предельных значений суточных температур воздуха. Поэтому суточные колебания q в период снеготаяния (конец апреля) и формирования снежного покрова (начало октября) минимальны или равны нулю. В теплый период года, когда влажность грунтов минимальна и суточная разность температуры воздуха максимальна наблюдаются максимальные суточные амплитуды колебания плотности теплового потока, величина которого изменяется в пределах мониторингового профиля от

-68 до +120 Вт/м$^2$. Значительны колебания теплового потока и в суточном режиме. Установлено, что в зимний период предельные значения плотности теплового потока отличаются почти в 2 раза.

Зная и управляя распределением тепловых потоков (используя подбор грунтов по теплофизическим свойствам) возможно добиться охлаждающего эффекта грунтов полотна автодороги. Детальный анализ распределения теплового потока позволит разработать эффективные решения конструкции земляного полотна автодороги, для конкретных условий.

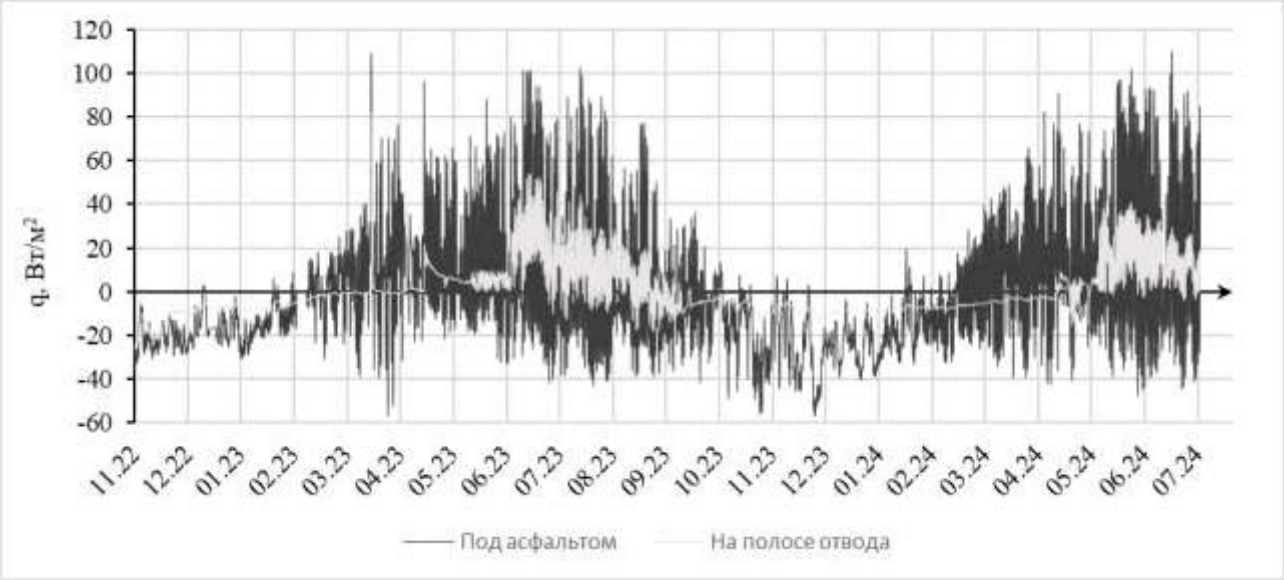



Рис. 3. Динамика теплового режима земляного полотна и грунтов основания на 75 км автодороги «Вилюй»

Полученные региональные данные по формированию температурного режима грунтов в полосе прохождения автомобильной дороги, позволят повысить достоверность прогноза инженерно-геокриологических условий в процессе эксплуатации и подбирать наиболее эффективные проектные решения конструкции насыпи автомобильных дорог, для обеспечения их устойчивости с учетом возможных с климатических изменений.

***Литература***

1 Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии, 2022. – 124 с.

2 Гребенец В.И. Исаков В.А., Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск-Талнах и методы борьбы с ними // Криосфера Земли. – 2016. – Т. 20. – № 2. – С. 69-77.

3 Кондратьев С.В., Кондратьев В.Г., 2017. Причины деформаций автодороги "Амур" Чита-Хабаровск на участках льдистых многолетнемерзлых грунтов и пути их стабилизации / Материалы IX Международной научно-технической конференции. – Новосибирск: 2016, с. 96-102.

4 ОДМ 218.11.007-2023. Методические рекомендации по организации инженерно-геокриологического мониторинга и оборудованию инженерно-геокриологических мониторинговых стационарных постов в полосе отвода автомобильных дорог в криолитозоне. Росавтодор, Москва.

5 Константинов П.Я., Васильев Н.Ф., Ефремова В.А. и др. Картирование устойчивости ландшафтов на участках Восточно-Сибирской, Дальневосточной и Забайкальской железных дорог с распространением вечной мерзлоты / Материалы 6-го Международного Симпозиума по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах. – Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2023 – С. 119-121.

6 Викторов А.С., Орлов Т.В., Капралова В.Н. и др. Использование дистанционных методов при ландшафтно-геокриологическом районировании применительно к эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне / Сергеевские чтения. Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии – Москва: Геоинфо, 2025. – С. 238-241.

7 Сыромятников И.И., Литовко А.В., Кириллин А.Р. и др. Геотехнический мониторинг на федеральных автомобильных дорогах в области криолитозоны // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2024. – № 3. – С. 5-13.

8 Жирков А.Ф., Кириллин А.Р., Сивцев М.А. Температурный режим грунтов основания и тело насыпи на участке 175-177 км автодороги Р-504 «Колыма» / Материалы 6-го Международного Симпозиума по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах. – Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2023 – С. 105-107.

## МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СПЛОШНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ СЕВЕРО-ВОСТОКА ЕВРАЗИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ РЯДОВ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

***Р.Г. Сысолятин[1,2], Ж. Вен[2]. Ч. Гао[2], Я.В. Тихонравова[1,2]***
*[1]Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск*
*[2]Северо-западный институт экологии и природных ресурсов КАН, г. Ланьчжоу, Китай*

Сведения о климатических условиях области сплошной криолитозоны северо-востока Евразии, представляют большую ценность ввиду их ограниченного количества [1, 2, 3]. Суровый климат, труднодоступность территории, а также высокая стоимость проведения режимных наблюдений и обслуживания оборудования обусловливают низкую плотность метеорологической сети [4]. Несмотря на разнообразие параметров, отображающих метеоусловия, наиболее ценными, с точки зрения геокриологии, показателями являются температура приземного воздуха, осадки и высота снежного покрова. Изменения этих параметров оказывают существенное влияние температурный режим многолетнемёрзлых пород. Поскольку длительные ряды наблюдений необходимы практически для любого исследования, сведения с метеорологических станций является ключом к более глубокому пониманию всех аспектов эволюции природной среды.

Известно, что выраженное усиление климатического потепления началось в 1960-х годах, для настоящего исследования в качестве начала формируемого набора данных был выбран 1966 год [5]. Кроме того, переход с четырёхкратных (каждые 6 часов) на восьмикратные (каждые 3 часа) измерения на государственных метеорологических станциях состоялся 1 января 1966 года на всей территории бывшего Советского Союза; таким образом, эта дата считается началом стандартизированного метеорологического мониторинга на обширных территориях Северо-Востока России (Рис. 1). Этот же год наиболее часто встречается при анализе климата той или иной территории.

Рис. 1. Схема расположения метеостанций, информация по которым доступная online. Несмотря на то, что на некоторых станций первые наблюдения были проведены в XIX веке, это не означает что они имеют непрерывный ряд наблюдений.

Помимо NOAA (https://www.ncei.noaa.gov/), для получения метеорологических данных по Северо-Востоку России используются три основных источника: официальный репозиторий Всемирного центра данных — meteoru (http://meteo.ru/data/), а также два набора данных, поддерживаемых энтузиастами, — rp5 (https://rp5.ru/) и pk (www.pogodaiklimat.ru). Создание единой базы данных на основе описываемого набора данных принципиально важно для упрощения использования метеорологической информации в различных научных целях — в частности, для оценки воздействия изменения климата и выявления причин прошлых геоморфологических процессов. Появление единой базы данных устраняет неоднозначность в данных, исключает различия в представлении информации и структуре баз данных, а также окажется полезным для практического применения. Корректное объединение существующих наборов данных с сохранением всех их достоинств и минимизацией недостатков является главной задачей при создании полезного и удобного продукта.

С учётом значительного объёма метеорологических баз данных онлайн-представление в формате дашборда (интерактивной таблицы) значительно проще для интерпретации, чем традиционные форматы — .csv, .xlsx или .txt. Тем не менее внешне несложные операции — такие как поиск минимальных и максимальных значений, вычисление средних и выбор временного периода — применительно к необработанным данным могут занять даже больше времени, чем более содержательная и важная научная работа. Для решения этой проблемы данные должны быть очищены и предварительно обработаны, а дашборд должен отражать обеспечить интерактивные графики и таблицы, реагирующие на выбранный временной период.

В настоящей работе представлена объединённая база данных сведений всех доступных online метеорологических станций (167) на площади 4,27 млн км² Северо-Востока России. Набор данных сформирован и проверен с использованием языка *R* и простых статистических методов. Для каждой станции оценены доступность данных и качество информации, что принципиально важно для изучения климатической изменчивости на длительных временных масштабах. Проведённая предварительная обработка дополнительно повышает согласованность описания локальной природной среды.

За период 1966–2025 гг. лишь треть метеорологических станций обладает практически непрерывными рядами наблюдений. Для значительной части станций характерны перерывы длительностью 5–10 лет, а около 10% пунктов наблюдений предоставляют менее 50% от потенциально доступного объёма данных (Рис. 2). Несмотря на эти ограничения, проведенный анализ выявил статистически значимый рост температуры воздуха на всей территории исследования. Наиболее выраженное потепление наблюдается на станциях, распложенных в пределах городов, тогда как в горных областях, прибрежных зонах и на станциях сезонных автодорог тенденции повышения температуры выражены более умеренно. В течение рассматриваемого периода среднегодовая температура воздуха увеличилась на 0,8–1,5°C на 18 станциях, на 1,5–2,5°C на 95 станциях и более чем на 2,5°C на оставшихся 56 станциях. Для жидких атмосферных осадков чётких пространственно-временных закономерностей выявлено не было. В то же время толщина снежного покрова демонстрирует общую тенденцию к уменьшению, особенно на станциях с наиболее продолжительными и качественными рядами наблюдений.

Итоговый набор данных включает 3 688 256 суточных записей за период с 01.01.1966 по 30.09.2025 по 167 метеорологическим станциям. Однако лишь 2 596 754 записи (70,4%) содержат хотя бы данные о температуре воздуха. В результате только 15 метеорологических станций имеют непрерывные ряды наблюдений за выбранный период: Алдан (31004), Анадырь (25563), Чокурдах (21946), Чульман (30393), Исить (24951), Ленск (24923), Магадан (25913), Олёкминск (24944), Сунтар (24738), Тикси (21824), Усть-Мая (24966), Якутск (24959), Жиганск (24343), Жилинды (21908) и Зырянка (25400). С другой стороны, наименьшую доступность данных демонстрируют Ытык-Кюёль (24766) и Экючю (24361) — 29,4% и 30,4% соответственно. 71 метеорологическая станция имеет доступность данных более 95%, хотя не все из них охватывают весь период с 1966 по 2025 гг. Примерно треть станций утратила более 30% временного ряда наблюдений за температурой воздуха, тогда как временные ряды жидких осадков и высоты снежного покрова находятся в значительно худшем состоянии. Суточные максимальные и минимальные температуры воздуха были получены расчётным путём на основе суточных наблюдений, а не взяты непосредственно из исходных наборов данных, поскольку последние не поддавались верификации. Для отдельных временных рядов высоты

снежного покрова в зимний период применялась линейная экстраполяция для заполнения небольших пропусков.

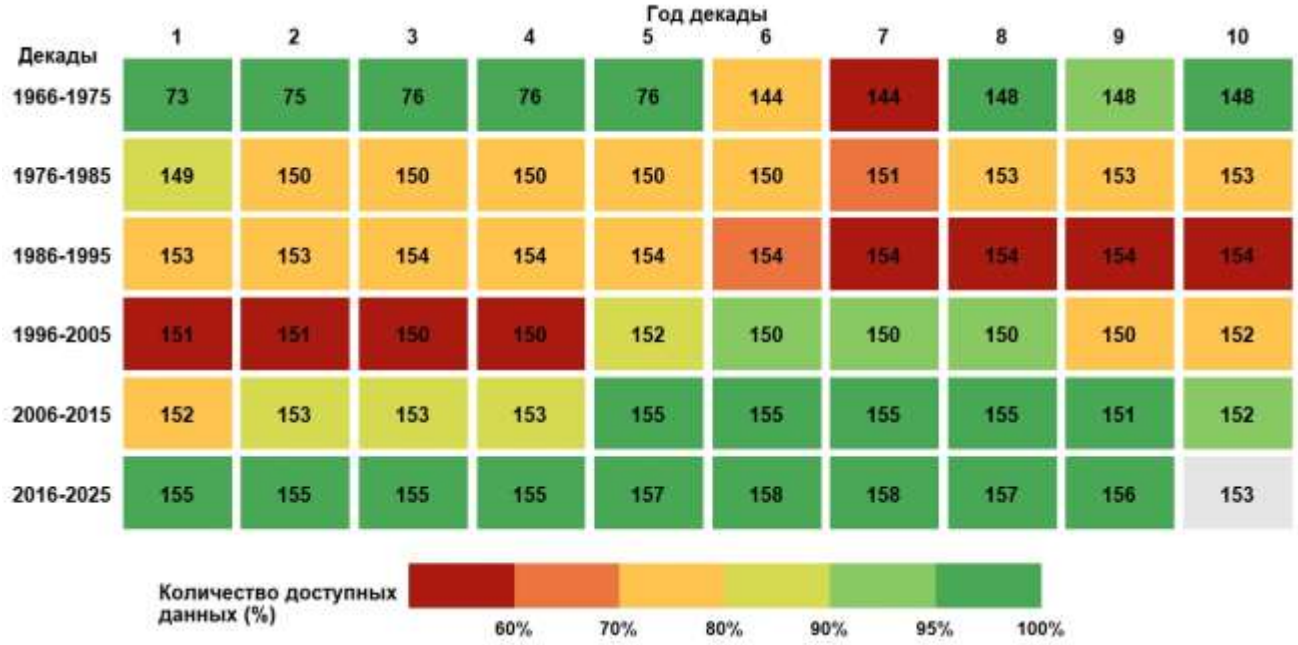



Рис. 2. Распределение метеонаблюдений с 1966 по 2025 гг. по годам. Количествометеостанций (цифры в центре ячеек) определялось по условию что по ним имеются сведения до и после данного года. Цветом отображается количество доступных данных о температуре воздуха в текущем году.

Для анализа трендов температуры воздуха за период с 1966 по 2024 год использовались только станции с непрерывными рядами наблюдений. Тринадцать из них расположены в Якутии, ещё по одной — в Магаданской области и Чукотке. Перед извлечением трендов ряды были проверены на однородность, учитывая, что за 60-летний период условия метеорологических наблюдений могли существенно измениться. Анализ однородности позволяет выявить точку разрыва, в которой разность между средними значениями левого и правого сегментов временно́го ряда максимальна [6]. Действительно, анализ однородности разделил станции на две основные подгруппы — арктические (точка разрыва в апреле 2005 года) и континентальные (точка разрыва в апреле 1988 года) — а также одну подгруппу, на которую повлияло наводнение 2001 года (точка разрыва в апреле 2001 года) (рис. 3). Несмотря на сходство характеристик континентальной группы и группы, пострадавшей от наводнения, само событие 2001 года (Килмянинов, 2001) и его отчётливый след в анализе однородности станций Ленск и Исить — обеих расположенных в пойме реки Лены — подтверждают состоятельность применённой методологии.

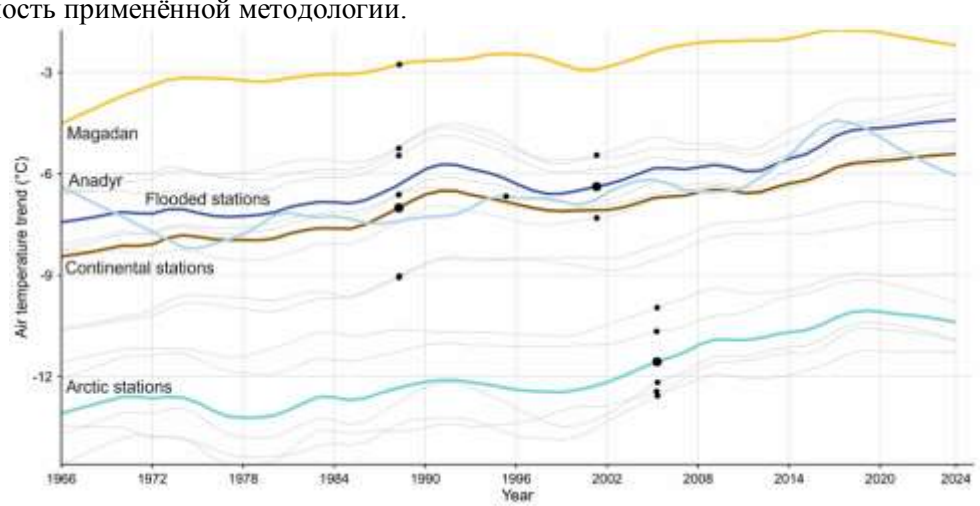



Рисунок 3. 10-летний тренд температуры воздуха с 01-01-1966 по 31-12-2024. Тонкие серые линии – отдельные станции. Чёрные точки отражают статистически значимые места разрыва (точка в который разница между левой и правой частью графика максимальна). Группа арктических станций - (Тикси – 21824, Чокурдах – 21946, Зырянка – 25400, Жиганск – 24343, Жилинды – 21908) Группа континентальных станций (Алдан –

31004, Чульман – 30393, Олёкминск – 24944, Сунтар – 24738, Усть-Майя – 24966, Якутск – 24959), группа станций затронутых наводнением 2001 г. (Исить – 24951, Ленск – 24923).

Станция Анадырь-25563 демонстрирует ярко выраженное индивидуальное поведение, обусловленное сильным влиянием вод Тихого океана. Напротив, Магадан-25913, расположенный на побережье Охотского моря, имеет ту же дату точки разрыва, что и континентальные станции Якутии. Это может свидетельствовать об общем влиянии глобального потепления на климат более широкого макрорегиона. На основании общего распределения точек разрыва можно заключить, что временны́е ряды как арктических, так и континентальных станций однородны — даже с учётом неоспоримого эффекта городского острова тепла на станции Якутск-24959. Для группы арктических станций точка разрыва значительно смещена влево, что наглядно свидетельствует о более выраженном росте температур за последние два десятилетия. Этот результат вновь подтверждает гипотезу об усиленном сигнале глобального потепления на арктических широтах.

Сформированный высококачественный и непрерывный массив метеорологических данных является критически важным для корректного пространственного моделирования, палеореконструкции и прогноза состояния криолитозоны, поскольку климатические условия остаются доминирующим фактором, определяющим температурный режим и состояния ММП.

***Литература***


1. Некрасов И.А. Криолитозона Северо-Востока и Юга Сибири и закономерности её развития. – Якутск: Кн. Изд-во, 1976. – 248 с.
2. Скачков Юрий Борисович (2024). Динамика многолетних изменений экстремумов температуры воздуха в г. Якутске. Целостность и ресурс в экстремальных условиях, (1), 185-187. doi: 10.24412/cl-37269-2024-1-185-187
3. Скачков, Ю. Б. (2012). Тенденции изменения экстремальных значений температуры воздуха в г. Якутске. Природные ресурсы Арктики и Субарктики , (2), 39-41.
4. Streletskiy, D. A., Maslakov, A., Grosse, G., Shiklomanov, N. I., Farquharson, L., Zwieback, S., Iwahana, G., Bartsch, A., Liu, L., Strozzi, T., Lee, H., and Debolskiy, M. V: Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere—review and perspectives, Environmental Research Letters, 20, 013006, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ada2ff, 2025.
5. Справочник по Климату СССР. Л.: Гидрометоеиздат, 1989. Ч. 1. Вып. 22.
6. Alexandersson, H.: A homogeneity test applied to precipitation data, Journal of Climatology, 6, 661–675, https://doi.org/10.1002/joc.3370060607, 1986.


## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И МЕРЗЛОТЫ НА ЭРОЗИОННЫЕ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОКРЕСТНОСТЯХ Г. САЛЕХАРДА


***А.М. Тарбеева, А.А. Маслаков, М.С. Судакова, И.В. Крыленко, Ф.Д. Юров***
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва*


Изменения климата, наиболее активно проявляющиеся в арктических широтах, влияют на многие компоненты ландшафта, включая многолетнемерзлые породы, растительность, поверхностные и подземные воды, рельеф. Это влияние комплексное, поэтому важно установить взаимосвязи между изменением различных компонентов ландшафта. В докладе приводятся как опубликованные, так и полученные авторами данные об изменении климата, мерзлоты и флювиального рельефа в окрестностях г. Салехарда и обсуждаются возможные причинно-следственные связи между ними с целью постановки задач для более детальных исследований.

Рассматриваемая территория находится вблизи Полярного круга, на границе области сплошного и прерывистого распространения многолетней мерзлоты, вблизи северной границы распространения двуслойной мерзлой толщи, на стыке лесотундры и северной тайги Западной Сибири [1]. Изученные объекты флювиального рельефа – овраги и малые реки Васьеган и Малая Аксарка – расположены на относительно ненарушенных участках в радиусе 70 км от г. Салехарда.

***Изменения климата.*** По данным метеостанции Салехард, с конца XIX в. происходит повышение температуры воздуха, на фоне которого выделяются фазы потепления и похолодания более мелкого порядка (Таблица 1). Суммарное годовое количество осадков с конца XIX до середины XX в. увеличилось почти вдвое, а затем изменялось менее существенно. Текущий этап потепления наблюдается с 1970-х гг. и сопровождается повышением суммарного количества осадков.

Данные по изменению характеристик снежного покрова неоднозначны. Так, по метеостанции Салехард с 1960-х гг. максимальная толщина снега уменьшилась, при этом маршрутные съемки показали увеличение максимальной высоты снега и влагозапаса [3, 4]. Такие расхождения можно объяснить различиями в характеристиках снежного покрова в лесу и на закустаренных территориях по сравнению с открытыми луговыми участками на метеоплощадках.

Специальные оценки изменения растительного покрова в районе Салехарда не проводились, но зарастание древесной растительностью отдельных участков тундры за последние десятилетия отмечается по разновременным снимкам, а также описано вблизи Нового Уренгоя [5]. Увеличение площади, занятой лесом и кустарниками, приводит к уменьшению плотности снега и увеличению его мощности, что способствует уменьшению глубины промерзания почвы.

Таблица 1

Средняя годовая температура воздуха и осадки в разные периоды по 10 лет по метеостанции Салехард [2]

| Периоды (по 10 лет) | | Средняя годовая температура воздуха, °С | Средняя годовая сумма осадков, мм |
|---|---|---|---|
| 1883-1892 гг. | холодный | −7,7 | 239,0 |
| 1942-1951 гг. | теплый | −5,0 | 474,6 |
| 1963-1972 гг. | холодный | −7.6 | 457,8 |
| 2015-2024 гг. | теплый | −3.6 | 488,9 |

***Изменения характеристик мерзлых пород.*** Анализ глубины залегания кровли многолетнемерзлых пород и их температуры на глубине 10 м в скважинах, пробуренных в 2020-2025 гг. на фоновых участках вдоль автодороги «Салехард-Надым-Новый Уренгой» [6], показал, что в окрестностях Салехарда распространены участки как со сливающейся, так и с несливающейся мерзлотой, в том числе с глубоким залеганием кровли мерзлых пород. Минимальная среднегодовая температура горных пород на глубине 10 м, составляющая −1,4°С (2022-2024 гг.), выявлена в бугристом торфянике, где кровля мерзлоты залегает непосредственно под слоем сезонного оттаивания толщиной 0,5 м. Тогда как на залесенных поймах рек и под закустаренными ложбинами стока кровля мерзлоты залегает на глубинах более 5 м. На междуречьях широко распространена несливающаяся мерзлота, кровля которой расположена на глубине до 2,5 м.

По отдельным скважинам установлено существенное повышение температуры мерзлых пород и понижение их кровли за последние десятилетия. Так, в скважине 23Т, заложенной на пологом склоне междуречья в урочище Ангальский мыс вблизи Салехарда, в 1976 г. температура мерзлых пород на глубине 10 м составляла −2,3°С, а их кровля располагалась сразу под сезонно-талым слоем на глубине 0,8 м. В 2024 году в пробуренной рядом скважине кровля мерзлоты была обнаружена на глубине 8 м, а температура мерзлых пород на глубине 10 м составила −0,2°С. Аналогичные изменения описаны по скважинам в районе Надыма и Нового Уренгоя [5]. Выявленные изменения согласуются с данными Циркумполярного мониторинга сезонноталого слоя [7]. Так, на площадке R59 в районе Салехарда с 2021 по 2024 г фиксировалось понижение кровли мерзлых пород со скоростью 6,1 см в год, что близко к значениям по площадкам в районе Надыма и Нового Уренгоя с более длинными рядами наблюдений.

***Изменение гидрологических условий.*** Увеличение глубины оттаивания почвы и формирование несливающейся мерзлоты способствует увеличению фильтрации воды, особенно в летне-осенний период, что приводит к увеличению стока межени и потерям стока половодья [4, 8]. По данным гидропостов на средних (зональных) реках региона – Полуе и Пуре, с 1950-1960-х гг. общий годовой сток рек, также как и меженный, растет, при этом сток половодья практически не меняется, а максимальные расходы половодья снижаются [4]. Половодье является основным руслоформирующим событием в арктических широтах, именно оно определяет интенсивность процессов размыва берегов.

***Изменение эрозионных процессов.*** Сопоставление космических снимков системы GoogleEarth за последние десятилетия позволило установить образование двух новых оврагов в результате перехвата стока по склоновой ложбине долиной одного из малых притоков р. Васьеган (Рис. 1). Овраги удалены от дорог на 2-2,5 км, что позволило считать их естественными образованиями. Один из оврагов появился до 2003 г, второй – между 2005 и 2013 годами. На снимках 2013 и 2018 годов наблюдаются незадернованные борта оврагов и шлейфы вынесенных наносов в днище долины

притока, которые свидетельствуют об активности оврагов в эти годы. С 2020 года овраги стабилизировались и активности не проявляли.

Если в области распространения низкотемпературных многолетнемерзлых пород, появление оврагов часто связано с вытаиванием массивных подземных льдов [9], то в условиях прерывистого распространения высокотемпературных многолетнемерзлых пород, где мощные подземные льды вблизи поверхности редки, механизмы активизации овражной эрозии и их связь с климатическими изменениями не очевидны. Для выявления причин образования оврагов был исследован наиболее молодой из них. В 2025 году его длина по тальвегу составляла 85 м, ширина по бровкам 11 м, максимальная глубина 4 м, перепад высот между вершиной и устьем – 7 м.

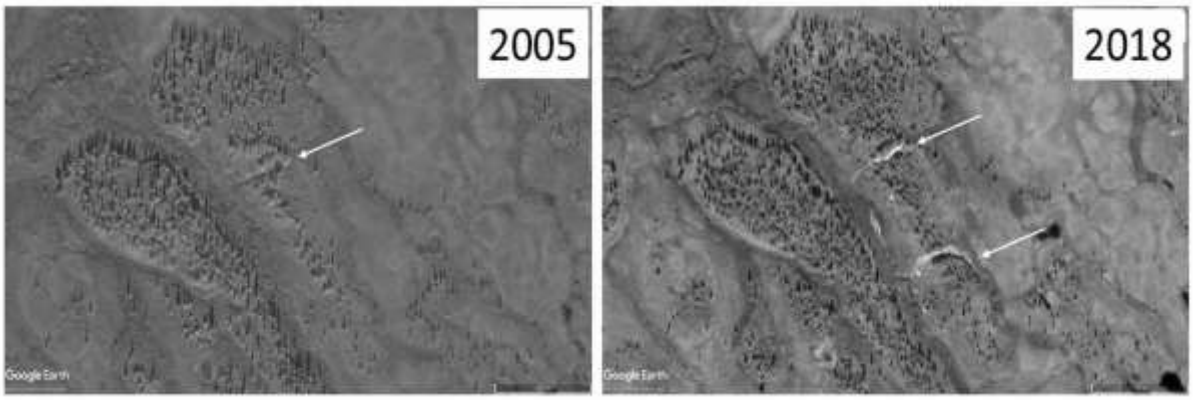



Рис. 1. Возникновение оврага в верховьях р. Васьеган на сопоставленных космических снимках GoogleEarth за 2005 и 2018 гг. (овраги показаны стрелками)

Борта оврага сложены мелкозернистыми субгоризонтально слоистыми пылеватыми песками с ярко выраженным прослоями и пятнами ожелезнения на глубине 1,5-2 м. По результатам георадиолокации, на склонах и междуречье вблизи оврага до глубины 4-5 м от поверхности, мерзлые (льдосодержащие) породы отсутствуют. Температура грунтовых вод, разгружающихся в тальвеге оврага в августе 2025 г. составляла – 10,3°С, что подтверждает отсутствие мерзлых пород на первом водоупорном горизонте.

Горизонты ожелезнения на глубине 1,5-2 м, повторяющие в целом рельеф дневной поверхности, маркируют реликтовые границы поверхности многолетнемерзлых пород, ранее служившей водоупором. С учетом выявленных на отдельных участках высоких темпов опускания кровли мерзлоты, вполне вероятно, что в начале 2000-х гг. мерзлота существовала и на этом участке, и понижение ее кровли могло стать причиной изменения направления надмерзлотного стока в сторону долины малого водотока и развитие суффозионного оврага. Возникновение оврагов могло быть также обусловлено локальным повышением поверхностного стока, вызванного резким снеготаянием, особыми условиями сезонного промерзания и оттаивания или спуском небольших озер в днищах ложбин.

***Изменение русел малых рек.*** Сопоставление космических снимков Key Hole 1968 г с современной космической съемкой системы GoogleEarth, позволило установить, что за этот период, совпадающий с периодом направленного повышения температуры воздуха, произошло зарастание песчаных отмелей и формирование низкой поймы на малой реке Васьеган в 4 км к северо-востоку от Салехарда (Рис. 2).

Зарастанию отмелей могло также способствовать снижение максимальных расходов половодья. Зарастание отмелей приводит к их превращению в низкую пойму, и дальнейшему накоплению на ней аллювия, вызывает сужение русла и является признаком снижения темпов горизонтальных деформаций [10].

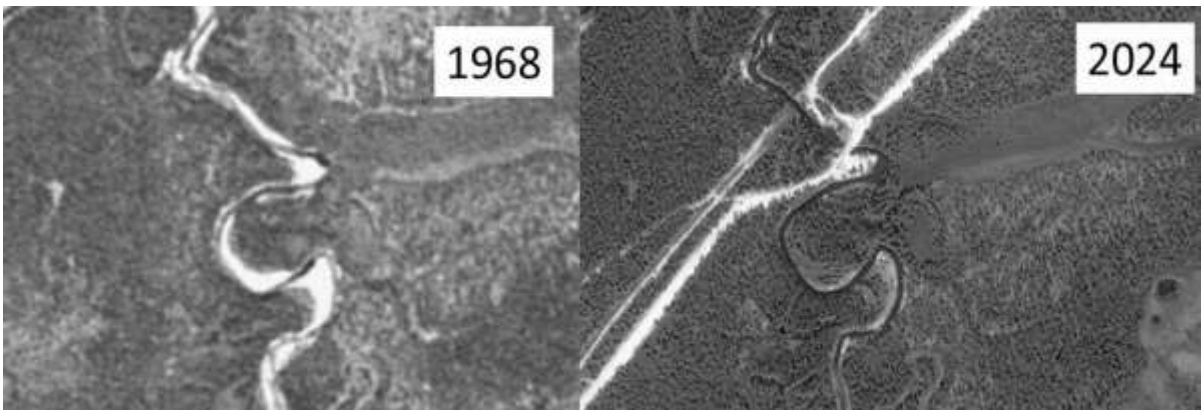


Рис. 2. Зарастание прирусловых отмелей на р. Васьеган на сопоставленных космических снимках Key Hole (1968 г.) и GoogleEarth (2024 г.)

При помощи радиоцезиевого датирования были оценены темпы аккумуляции наносов на низкой пойме р. Малой Аксарки, где молодая пойма образует специфические выступы в русле, придающие ему четковидное строение. На севере Западной Сибири основная масса цезия поступила в почву при ядерных испытаниях в открытой атмосфере [11]. Максимум выпадения цезия пришелся на 1963 г, что позволяет по его концентрации в отложениях определить положение поверхности на этот период и оценить толщину слоя накопившихся отложений. Анализ 11 проб, отобранных послойно на низкой пойме р. Малой Аксарки, показал, что максимальна концентрация цезия (запасы 263,4 Бк/м$^2$, удельная активность 3,2 Бк/кг) наблюдается на глубине 50-55 см от поверхности поймы, что позволяет принять этот уровень за поверхность суши на 1963 год. Таким образом, с 1963 по 2025 год накопилось 55 см наносов, т.е. средние за последние 62 года темпы аккумуляции наносов составляли около 0,9 см/год.

**Выводы**

Окрестности Салехарда являются областью существенных изменений климата, мерзлоты, растительности и флювиального рельефа за последние десятилетия. Наличие длительных рядов метео- и гидрологических наблюдений, данных наблюдений по скважинам 1970-х гг., разновременных материалов космической съемки, а также сохранение достаточных для датирования концентраций цезия-137, позволяет использовать этот регион в качестве модели для исследования изменения компонентов ландшафта и их взаимосвязей в условиях интенсивных климатических изменений. Представляется перспективным расширение географического охвата территории для анализа распространения зарастания отмелей на реках для выявления локального или регионального характера этого процесса, а также анализ его связи с изменением высоты половодья, составом наносов, характером растительных ассоциаций, заселяющих отмели. Для выявления причин возникновения оврагов, необходимы наблюдения за формированием поверхностного стока на водосборах в условиях увеличения глубины оттаивания почвы. Также предлагается расширить применение радиоцезиевго метода для определения возраста оврагов путем датирования аккумулятивных толщ конусов выноса.

**Благодарности**

Работы выполнены по темам Государственного задания Лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, кафедры криолитологии и гляциологии и Лаборатории геоэкологии Севера географического факультета МГУ.

***Литература***

1 Баулин В.В., Белопухова Е.Б., Дубиков Г.И., Шмелев Л.М. Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности. М.: Наука, 1967. – 214 с.

2 Справочно-информационный портал "Погода и климат". [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=ru&region=89 (дата обращения 12.01.2026)

3 Ландшафты Ямало-Ненецкого автономного округа в условиях климатических изменений. Т. 2. Под ред. Д.В. Черных. Салехард, СПб: ГеоГраф, 2025. – 196 с.

4 Опасные экзогенные процессы в Ямало-Ненецком автономном округе. под ред. С.Р. Чалова, Е.Д. Панченко, Р.А. Колесникова. Москва, Салехард, Тюмень, Экспресс. – 2025. – 104 с.

5 Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А. и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики. // Криосфера Земли. 2020. т. XXIV. – №2б.– С. 15–30.

6 Тарбеева А.М., Юров Ф.Д., Шеин А.Н., Перминова Е.А., Маслаков А.А. Современное состояние верхних горизонтов мёрзлых пород на фоновых участках вдоль автодороги «Салехард-Надым-Новый Уренгой» // Криосфера Земли (подана в печать).

7 Circumpolar Active Layer Monitoring Network-CALM: Long-Term Observations of the Climate-Active Layer-Permafrost System [электронный ресурс]. Режим доступа: https://www2.gwu.edu/~calm/data/north.htm (дата обращения 12.01.2026)

8 Streletskiy D.A, Tananaev N.I., Opel T. et al. Permafrost hydrology in changing climatic conditions: seasonal variability of stable isotope composition in rivers in discontinuous permafrost // Environmental Research Letters. – 2015. – Vol. 10. – N 095003. – P. 1-16.

9 Тарбеева А.М., Ефремов В.С., Лебедева Л.С., Шамов В.В. Эрозионные процессы на малых тундровых водосборах севера Якутии // Криосфера Земли. 2023. Т. 27. – №3. – С. 15–30.

10 Ielpi A., Lapôtre M.G.A., Finotello A., Roy-Léveillée P. Large sinuous rivers are slowing down in a warming Arctic // Nature Climate Change. 2023. – Vol. 13. – p. 375–381.

11 Нифонтова М. Г., Малафеев Ю. М. Содержание радионуклидов в мохово-лишайниковом покрове тундровых сообществ п–ва Ямал / Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Том XVI. – СПБ, «Гидрометеоиздат, 1996. – С. 121-126.

## ДИНАМИКА И ПРОГНОЗ МЕРЗЛОТНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В АНАДЫРЕ (ЧУКОТКА)

***О.Д. Трегубов, К.К. Уяганский***

*ФГБУН Северо-восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Магадан*

В числе актуальных проблем геокриологического мониторинга – современный тренд развития мерзлотно-климатических условий и анализ динамики криогенных процессов с позиций оценки их опасности для инфраструктуры населенных мест криолитозоны. В ряде регионов Восточной Сибири и Северо-Востока России в последние годы отмечена стабилизация климатических показателей и даже некоторое охлаждение климата и температуры почв [1]. При этом в природных мерзлотных ландшафтах на фоне снижения температуры тундровых почв и глубины сезонного протаивания отмечается усиление криогенных процессов: термокарста по современным повторно-жильным льдам (ПЖЛ); образование наледей подземных надмерзлотных вод таликовых зон [2]. Цель настоящего исследования и доклада попытаться разобраться с реакцией кровли многолетней мерзлоты на снижение темпов потепления и краткосрочное похолодание климата. Научная новизна исследования связана с сопоставлением и анализом данных наблюдений криогенных процессов в сопряженных природных и техногенных мерзлотных ландшафтах.

Объектами исследования являлись мерзлотные ландшафты Анадырской низменности, расположенной в низовьях рек Анадырь, Великая, Канчалан, которые впадают в Анадырский залив Берингово моря. В числе объектов: увалистые тундровые кочкарные, предгорные бугорковатые кустарниковые, озерно-болотные полигонально-жильные природные ландшафты и урболандшафт Анадырь. Территория расположена на границе субарктического морского и умеренного континентального климатов, в подзоне южных кустарниковых (ольховых) тундр. Диапазон колебаний среднегодовой температуры воздуха за последние 30 лет: от -9,3 (1999) до -3,7 (2019) °С. Амплитуда вариации годовой суммы осадков 347 мм: от 547 (2002) до 200 (2013) мм. Расчетные показатели потепления климата в Анадыре в XXI веке: среднегодовой температуры воздуха +1,5 °С, продолжительности теплого периода + 12 суток, суммы годовых осадков + 71 мм. Субарктический климат стал более гумидный: снежная относительно теплая для Чукотки зима сочетается с продолжительным пасмурным и холодным летом.

Анадырь и его окрестности расположены в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), мощностью до 150 м. Температура многолетней мерзлоты в зависимости от геологического и ландшафтного строения территории изменяется от -6 до -2 °С [3, 4]. Глубина сезонного протаивания меняется в ландшафтном профиле от 1,5 м на каменистых склонах до 0,4 м в озерно-болотных котловинах. Подземные льды представлены погребенными пластовыми морскими льдами, эпигенетическими повторно-жильными льдами в суглинках, супесях и торфах;

современными повторно-жильными льдами, линзами и пропластками сегрегационного льда переходного слоя. Природно-климатические условия оптимальны для развития термокарста, термоэрозии, солифлюкции, образования наледей надмерзлотных вод деятельного слоя и таликов. Термоабразия развивается по берегам Анадырского лимана. Дочетвертичный геологический разрез слагают алевролиты, черные сланцы верхнего мела, песчаная угленосная толща палеогена, вулканогенные породы палеогена и неогена, морские глины, пески и галечники миоцена. Осадочный чехол антропогена, который большей частью и слагает кровлю ММП, представлен морскими, ледниково-морскими и водно-ледниковыми отложениями позднего плейстоцена, склоновыми и озерно-аллювиальными отложениями голоцена.

Статус города Анадырь получил в 1965 году. С этого времени в городе ведется строительство главным образом крупнопанельных многоквартирных домов (МКД) по I принципу: на глубоком (8-20 м) свайном фундаменте с проветриваемым подпольем. С 1953 года по 2005 год в Анадыре снесено и утилизировано 480 построек различного типа в разной степени пострадавших от опасных криогенных процессов (сезонное пучение, термокарст). Это приблизительно 160% от числа существующих капитальных строений на настоящее время. Современная застройка Анадыря на 80 % создана в 80-х годах прошлого столетия путем строительства МКД по типовому проекту "Арктика". В настоящее время на площади города в 3 кв. км размещено 223 капитальных многоэтажных строений, из которых 175 МКД высотой в 4-5 этажей [5]. В период с 1991 по 2025 год в городе снесено 26 построек различных видов, что составляет 11,7% от современного числа зданий. Среди них наибольшее число ветхих 2-х этажных построек 60-х годов, а также 2 здания типового проекта "Арктика". Все строения были признаны аварийными в связи недопустимой деформацией элементов конструкции. Причина деформаций – неравномерная многолетняя и сезонная осадка фундаментов, вызванная термокарстом и сезонным пучением малозаглубленных фундаментов деревянных построек. В настоящее время в селитебной зоне одно здание признано аварийным, еще три других находятся под специальным наблюдением городских служб. Причиной повышенного внимания стало расширение и углубление на придомовой территории таликовых зон [5]. Аварийное здание пострадало от миграции в основание свайного фундамента криогалинных вод, которые вызвали разуплотнение и утрату грунтом несущих свойств.

Несмотря на то, что геокриологические исследования в Анадырской низменности начаты были еще в 1935 году, системный мониторинг температуры ММП отсчитывается с 1991 года, а мониторинг глубины протаивания деятельного слоя и температуры почв с 1994 года. Контрольная скважина глубиной более 20 м находится в 15 км на юго-запад от городской черты в пределах увалистой кочкарной кустарничково-мохово-пушицевой тундры. Температура грунтов измеряется с помощью логгеров Hobo Onset на глубине 3, 5, 10 и 20 м. Наблюдения сезонно-талого слоя и криогенных процессов ведутся на трех площадках, представляющих ландшафтное разнообразие Анадырской низменности и удаленных от города на 22-26 км. Площадки размером 100х100 м разбиты в рамках международной программы мониторинга деятельного слоя CALM: Онемен (R9 cape Rogozhny, 1994) – вершина тундрового увала, кочкарные тундры; Дионисий (R11 Dionisiy, 1996) – горное подножье, бугорковые тундры; Круглая (R45 Kruglaya, 2010) – днище озерно-болотной котловины, полигонально-жильные тундры. Измерения глубины протаивания осуществляются с 25 августа по 10 сентября с помощью металлического щупа длинной 120 см по сети 10х10 м. Температура почв измеряется с применением логгеров Hobo Onset на глубинах 0,15; 0,25-0,3 и 0,45-0,5 м. В окрестностях каждой из площадок наблюдаются криогенные процессы: Онемен – термоабразия и термокарст с образованием термоцирков и оврагов; Дионисий – термоэрозия и наледеобразование; Круглая – термокарст и криогенное заболачивание.

В Анадыре системный геокриологический мониторинг начат существенно позже, чем наблюдения природных мерзлотных ландшафтов. Круглогодичные наблюдения температуры грунта на глубине 1, 3, 5 и 10 м в проветриваемом подполье МКД, находящегося в стабильных геокриологических условиях начаты в 2014 году. До этого производились разовые измерения температуры грунта в скважинах, расположенных по периметру и в проветриваемом подполье различных зданий, наблюдались явления наледеобразования и термокарста. В 2021 году проведено георадиолокационное профилирование селитебной зоны Анадыря, составлена первая картосхема таликовых зон [6]. При производстве геофизических работ использовались георадары Око-2 и Око-3 с антенными блоками АБ-400 МГц и АБ 250/700 МГц. В 2023 году с целью обоснования системы геотехнического мерзлотного мониторинга геофизическим профилированием охвачены близлежащие промышленные зоны и село Тавайваам, входящее в ГО Анадырь. В этом же году был запущен опытный сегмент автоматизированной системы геотемпературного мониторинга из 6 скважин,

расположенных в различных геокриологических условиях, как по периметру зданий, так и на открытой местности в границах таликовых зон. Длина термокос 10,5 м, 3 датчика установлены на глубинах 1, 3, 5 и 10 м, съем и передача измерений каждые 6 часов. Система автоматизированного мониторинга температуры грунтов оборудуется термокосами и логгерами ООО "Русгеотех" (https://www.rgtekh.ru/?ysclid=mmr1yahql2907175414). В основу настоящего доклада положены результаты геокриологического мониторинга, а также материалы непрерывных наблюдений температуры грунта в скважинах опытного сегмента.

Динамику мерзлотно-климатических условий в природных мерзлотных ландшафтах за весь период наблюдения представляют графики среднегодовой температуры воздуха, температуры многолетней мерзлоты, глубины сезонного протаивания (Рис. 1, 2). Рост температуры ММП на глубине 20 м отличает поступательно-возвратный и ступенчатый характер с единичными выбросами, продолжительностью 1-3 года. С 2022 года наблюдается понижение температуры, которое достигло уровней 2009-2014 и 1998 годов. Объяснение конфигурации температурной кривой дают колебания среднегодовой температуры воздуха и глубин сезонного протаивания (См. рис. 2). Здесь, несмотря на межгодовые колебания температуры и глубины протаивания, отмечается их рост в интервалах 1997-2007 и 2010-2019 годов. Современное снижение глубины сезонного протаивания в зависимости от типа ландшафта наблюдается с 2016-2019 годов, среднегодовой температуры воздуха – с 2019 года.

О динамике мерзлотно-климатических условий в городской среде можно судить по данным наблюдений температуры грунта в скважине, расположенной в подполье МКД (периметр свайного фундамента, северная экспозиция), (Рис. 3). Рост среднегодовой температуры грунта на глубине 3-10 м прекращается в 2018 году. Для глубины 1 м максимум температуры зафиксирован 2019 г. Уменьшение глубины сезонного протаивания начинается в 2018 г., с 2021 г. глубина протаивания стабильна: 0,6-0,8 м. Температура грунта в слое годового теплооборота уменьшается в интервале 2018-2021 гг. и далее остается неизменной.

Рис. 1. Динамика температуры многолетней мерзлоты на глубине 20 м в тундровом ландшафте Анадырской низменности (измерения 25-30.08)

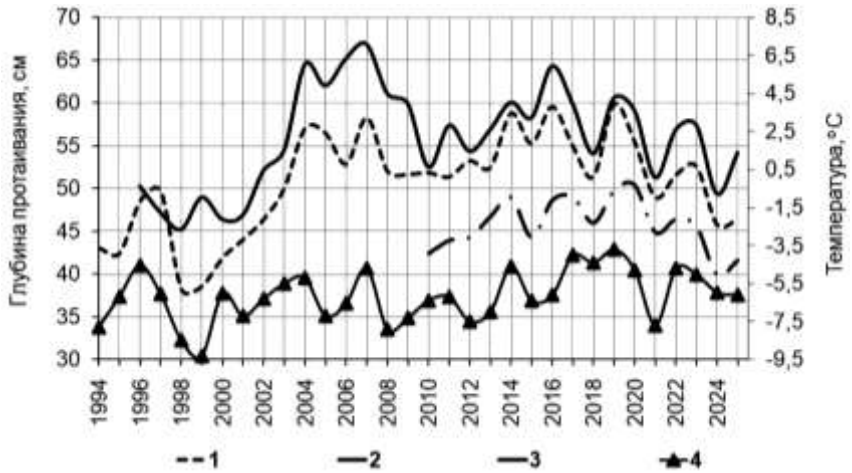



Рис. 2. Динамика сезонного протаивания деятельного слоя в Анадырской низменности.
Площадки мониторинга: 1 – Онемен; 2 – Дионисий; 3 – Круглая. 4 – среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции "Анадырь"

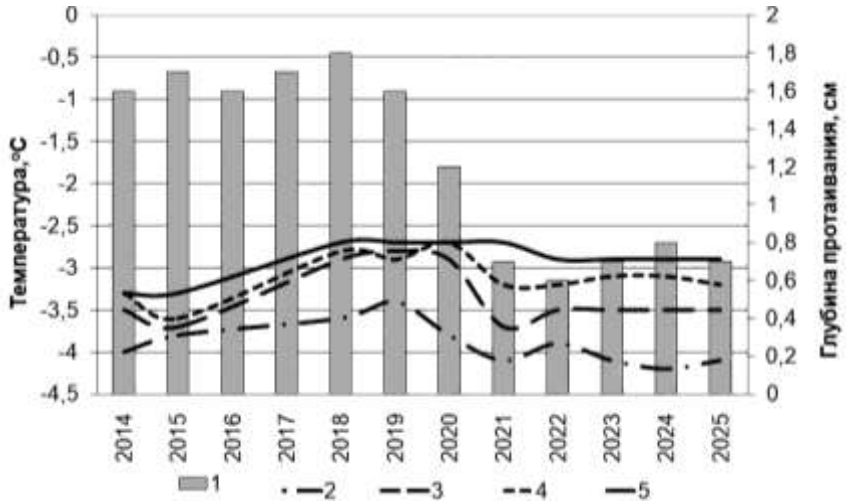



Рис. 3. Динамика сезонного протаивания и температуры грунта в подполье МКД: 1 - глубина протаивания. Среднегодовая температура грунта на глубине: 2 - 1 м, 3 - 3 м, 4 - 5 м, 5 - 10 м.

Таким образом, в природных и антропогенных ландшафтах с 2019 года наблюдается смена тренда потепления климата и деградации мерзлоты на похолодание и стабилизацию мерзлотных условий. Однако сделать однозначное заключение, что происходящие изменения не являются аналогом ситуации 2007-2013 годов, когда наблюдалось краткосрочное уменьшение глубины протаивания и температуры многолетней мерзлоты пока затруднительно (См. рис. 1-2). Сравниваемые периоды отличает большее современное сокращение глубины протаивания, затухание процессов термоабразии, усиление термокарста и наледеобразования в природных ландшафтах. Во всяком случае, происходящие изменения позволяют уточнить характер и степень реакции геокриологических условий на охлаждение климата, что очень важно и чего из-за недостатка данных не было сделано в 2007-2013 годах.

Для уточнения реакции мерзлотных условий в Анадыре на краткосрочное похолодание нами были проанализированы межгодовые изменения температуры грунта в 2023-2025 годах, полученные в рамках испытаний сегмента из 6 скважин сети мерзлотного мониторинга ГО Анадырь. Рассмотрим временные ряды температуры грунта в скважинах на 4-х уровнях глубины подробно. Местоположение скважин можно уточнить по адресу зданий, указанных на электронной карте города (https://yandex.ru/maps/11458/anadyr/?ll=177.511940%2C64.737343&z=16).

Скважина Б-18 (периметр МКД, запад, ул. Беринга 18). Максимумы и минимумы температуры (°С): 1 м +4/-15; 3 м -1,3/-7,8; 5 м -2,3/-5,6; 10 м -3,1/-3,6. Межгодовая температура на глубине 1 м без изменений. На глубинах 3 и 5 м летний максимум без изменений, зимой рост температуры +0,6 и +0,3 °С. На глубине 10 м летом охлаждение -0,1, зимой рост температуры +0,1 °С. Мощность сезонно-талого слоя (СТС) 1,6 м без изменений.

Скважина С-1 (периметр МКД, юг, ул. Строителей 1). Максимумы и минимумы температуры (°С): 1 м +6/-12,5; 3 м -0,8/-5,4; 5 м -1,4/-3,8; 10 м -2,5/-2,8. Межгодовая температура на 1, 3 и 5 м без изменений. На глубине 10 м летом и зимой охлаждение -0,25 °С. Мощность СТС 2,1 м без изменений.

Скважина Э-20 (периметр МКД, север, ул. Энергетиков 20). Максимумы и минимумы температуры (°С): 1 м +3,4/-11; 3 м -1,4/-6,4; 5 м -2,3/-4,8; 10 м -2,8/-3,2. Межгодовая температура на 1-5 м без изменений. На глубине 10 м летом и зимой охлаждение -0,1 °С. Мощность СТС 1,4 м изменений нет.

Скважина Ю-17 (периметр МКД, восток, ул. Южная, 17). Максимумы и минимумы температуры (°С): 1 м +3,3/-11; 3 м -1,2/-5; 5 м -1,9/-3,7; 10 м -2,6/-3,8. На глубине 1 м летом рост, а зимой понижение температуры на 1 °С. На глубине 3 и 5 м летом без изменений, зимой рост температуры +0,25 и +0,1 °С. На глубине 10 м летом и зимой понижение температуры на 0,05-0,1 °С. Мощность СТС 1,3 м увеличение за год 0,2 м.

Скважина Р-4 (в 10 м на север от ул. Рультытегина 4). Максимумы и минимумы температуры (°С): 1 м +4,1/-16,8; 3 м -1,2/-7,4; 5 м -2/-4,8; 10 м -2,5/-2,9. Межгодовая температура на глубине 1 м летом без изменений, зимой понижение на 1,7 °С. Межгодовая температура на 3-5 м без изменений. На глубине 10 м понижение максимумов и минимумов температуры летом -1, зимой -2 °С. Мощность СТС 1,7 м уменьшение за год на 5 см.

Скважина Т-13 (в 80 м на юг от ул. Тевлянто, 13). Максимумы и минимумы температуры (°С): 1 м +6,9/-10; 3 м -0,5/-3,2; 5 м -0,8/-1,5; 10 м -1,3/-1,4. Межгодовая температура на глубине 1 м летом без

изменений, зимой рост +6 °С. На глубине 3 и 5 м летом без изменений, зимой рост температуры +4 и +0,7 °С. Мощность СТС 2,5 м, без изменений.

В сравнение с контрольной скважиной (См. рис. 3) инженерно-геокриологические условия описанных горных выработок отличает разнообразие, которое определяется разной удаленностью скважин от таликовых зон и зданий, геологическим строением территории. Наиболее близки территориально и геокриологически к контрольной скважине условия С-1 и Э-20. Несмотря на большую мощность СТС, температура деятельного слоя и нижележащих горизонтов стабильна. Наблюдается понижение температуры на подошве слоя годового теплооборота (10 м) за счет промерзания снизу. Также промерзание снизу зафиксировано для Р-4, Ю-17. При этом для Р-4 характерно интенсивное промерзание сверху с небольшим уменьшением глубины протаивания, а для Ю-17 увеличение за год глубины протаивания на 15%. Обе эти скважины расположены в месте бифуркации таликов вблизи зданий оснащенных СОУ. Наиболее знаковой является ситуация с Т-13, которая расположена на границе широкой магистральной таликовой зоны приуроченной к погребенному оврагу. Здесь с началом зимнего промерзания сверху вниз наблюдается критическое повышение температуры грунта. В ходе бурения Т-13 в интервале 5-10 м вскрыты пластично-мерзлые грунты, содержащие капельножидкую влагу и кристаллы льда. Предполагается, что по мере промерзания обводненного талика возрастал криогенный напор, который препятствовал переходу жидкой фазы подземных вод в лед. Критическое давление привело к усилению фильтрации, проникновению подземных вод в дисперсные грунты на флангах таликовых вод и растеплению их. Следы подобного явления неожиданно были обнаружены в скважинах Б-18 и Ю-17, удаленных от границ небольших таликов на 30 и 40 м соответственно. Косвенным подтверждением существования механизма криогенного расширения таликовых зон стало, зафиксированное ранее по данным разовых измерений температуры в скважине (март, 2022) быстрое промерзание пластично-мерзлых грунтов с -1,5 до -2 °С после прорыва надмерзлотных вод с образованием наледи.

Таким образом, для геокриологической обстановки Анадыря при смене режима потепления на похолодание климата характерны следующие криогенные процессы:

1. В инженерно-геологических условиях благоприятных для строительства эксплуатации зданий по I принципу: уменьшение глубины сезонного протаивания до начальных значений (1-1,5 м), восстановление исходной температуры грунта в слое годового теплооборота и сокращение его мощности за счет промерзания (охлаждения) грунтов снизу.

2. В границах обводненных таликовых зон длительное сохранение мощности сезонно-талого слоя, талых и охлажденных пластичномерзлых грунтов в слое годового теплооборота до локализации образования и стока надмерзлотных вод. Расширение таликов в зимний период за счет криогенного напора и деградация (растепление) мерзлых грунтов в слое годового теплооборота. Здесь следует ожидать усиление термокарста по погребенным подземным льдам, наледеобразования и криогенного пучения.

3. Для оснований фундаментов зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических, криогидрогеологических и технических условиях реакция мерзлотных условий на похолодание климата трудно прогнозируема, так как индивидуально определяется взаимодействием тепловых полей таликов, фундаментов проветриваемого подполья и СОУ. В зоне риска требуется проведение комплексного мерзлотно-геофизического обследования придомовой территории в ведение геотемпературного мониторинга [7].

4. В природных условиях при охлаждении климата ожидается восстановление геокриологической обстановки в автономных ландшафтах без существенных изменений рельефа. В озерно-болотных ландшафтах за счет усиления термокарста при осадке поверхности восстановление мерзлотных условий будет сопровождаться изменением микрорельефа поверхности. В транссубаквальных условиях предгорий ожидается мозаичный характер распределения участков скорости и степени восстановления исходных параметров ММП сопровождаемый изменениями рельефа и гидросети.

***Литература***

1. Федоров-Давыдов Д.Г., Трегубов О.Д., Маслаков А.А. и др. Динамика температурного режима и глубины протаивания почв Северной Якутии и Чукотки”, раздел 3.4 / Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: арктическая зона, мерзлотные почвы – будущему России (сельское и лесное хозяйство)». – Т.4. – 2024. – С. 145-187.

2. Трегубов О.Д., Уяганский К. К. Мониторинг криогенных процессов в Анадырской низменности: состояние, проблемы и перспективы / Сб. тезисов докладов всероссийской конференции "Проблемы криосферы Земли" – Пущино: ИФХиБПП РАН, – 2025. – С 101-102.

3. Чукотка: Природно-экономический очерк. – М. Изд-во: "Арт-Литэкс", – 1995. – 370 с.
4. Трегубов О.Д., Уяганский К.К., Нутевекет М.А. Мониторинг мерзлотно-климатических условий Анадырской низменности // География и природные ресурсы. – 2020, – № 2. – С. 143–152.
5. Tregubov, O.D.; Uyagansky, K.K. Substantiation of the Monitoring Network of Talik Zones in Urbanized Permafrost Areas Based on GPR Profiling Data (Anadyr, Chukotka). Urban Sci. – 2024, – 8, – 94. https:// doi.org/10.3390/urbansci8030094
6. Трегубов О.Д., Уяганский К.К. Надмерзлотный водоносный горизонт в селитебной зоне Анадыря по данным георадиолокации (Чукотка) / Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» – М.: МГУ им М.В. Ломоносова, – 2022. – С. 337-343.
7. Трегубов О.Д. Применения сейсмоакустического метода при оценке надежности свайного фундамента в зоне протаивания многолетней мерзлоты // Основания, фундаменты и механика грунтов. № 4, 2025. С. 14-18.

## ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОНИТОРИНГА МЕРЗЛОТЫ

***Б.А.Трифонов[1], С.Ю. Милановский[1,2]***
*[1]Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, г.Москва*
*[2]Институт физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН, г.Москва*

Проблема мониторинга состояния мерзлоты в условиях глобальных климатических изменений, становиться все более актуальной для России, где 65% ее территории находится в мерзлом либо частично-мерзлом состоянии [1, 2]. Риски обусловленными деградацией мерзлоты - это угроза устойчивости промышленных и гражданских объектов, их эксплуатации и экологии [3].

Предложения по организации геокриологического мониторинга обсуждаются на совещаниях разного уровня, например на Круглых столах: "Организация государственной системы мониторинга криолитозоны" 03.04.2026 [https://gece.moscow/2026], "Концепция мониторинга вечной мерзлоты"24.05.2024(https://aif.ru/society/ecology/dannye-o-vechnoy-merzlote-eksperty-obsudili-sozdanie-gossistemy-monitoringa) и на заседание Бюро ОНЗ РАН 03.03.2026, (https://onznews.wdcb.ru/mar26/v-ran-obsudili-monitoring-vechnoj-merzloty.html). Выступая на Бюро ОНЗ РАН, М. Н. Железняк отмечал, что действующая система «Государственного мониторинга состояния многолетней мерзлоты», требует методической доработки и расширения комплекса наблюдений. По его мнению, требуется разработка федеральной программы «Мониторинг вечной мерзлоты РФ» и научное сопровождение хозяйственной и иной деятельности на территории криолитозоны. Отсутсвие единой государственной программы комплексного изучения мерзлоты отмечено в монографии [1], где наиболее полно были рассмотрены различные аспекты будущей программы включая и геофизику. Отметим, что в комплексе обсуждаемого мерзлотоведами мониторинга мерзлоты пока не затрагивается вопрос о мониторинге влиянии деградации мерзлых пород на изменение локального **сейсмологического отклика** геологической среды в сейсмоактивных зонах, ни о средне- и долго-временном прогнозе этого отклика. В то же время, крупные компании эксплуатитрующие промышленные объекты в таких зонах уделют внимание этому вопросу и включают сейсмологические наблюдения в комплекс геотехнического мониторинга [4]. Новосибирскими сейсмиками проводятся исследования верхней (инженерной) части разреза основанные на изучении резонансных характеристиках микросейсм Vp и Vs волн [5], в том числе и на мерзлотных объектах [6]. Широкому кругу вопросов сейсмического мониторинга состояния антропогенных объектов в северных широтах посвящена диссертация Г.Н. Антоновской[7]. Важные результаты были получены исследователями по изучению состояния и свойств мерзлого массива на объектах транспортной инфраструктуры [ 8 -11]. Среди российских работ следует отметить многолетние исследования сейсмического режима криолитозоны Б.М. Седова[12] и В.И. Джурика [13, 14].

Известно, что деградация мерзлых дисперсных пород сопровождается изменением их физических характеристик связанных с фазовым переходом "лед-вода". При этом меняются упругие и демпфирующие характеристики грунтовой толщи, что отражается на ее отклике на сейсмологическое воздействие (site effect) - значениях пиковых ускорение колебания поверхности (PGA), частотном составе колебаний (Sa-спектр реакции) и характер затухания колебаний(поглощения энергии) в приповерхностном слое. Очевидно, что оценки сейсмической опасности в сейсмоактивных районах распространения многолетнемерзлых пород приобретает все более важное значение для оценки рисков связанных с изменением климата и антропогенными воздействиями приводящими к

деградации мерзлоты на различных пространственных масштабах. На наш взгляд, это обстоятельство должно учитываться при обосновании организации и ведения инженерно-сейсмологического (**сейсмического)** мониторинга так и для фонового мониторинга с элементом прогноза для сейсмически активных зон мерзлоты. Базовыми составляющими для организации такого мониторинга будут являтся скоростные(упругие), плотностные, демпфирующие характеристики мерзло-талой среды в пределах ее 30м "инженерного" слоя, либо 100м слоя для особо ответсвенных объектов. Очевидно, что наряду с традиционным картами общего сейсмического районирования(ОСР) в баллах все большое значение приобретает модельный подход предполагающий расчет физических характеристик движения грунта. В работе [15] отмечена "острая необходимость создания акселерографической сети (PGA) в России для составления в перспективе более надежных карт ОСР".

Согласно А.С. Алешину[16] - "Модель позволяет физически адекватно оценить реальную ситуацию. Каждый модельный случай уникален, т.е. обладает совокупностью присущих ему параметров, и потому представляется возможность произвести расчеты сейсмических воздействий на основе физических представлений, основанных на строгих количественных законах. Модель всегда некая идеализация реальности, бесконечно сложной и потому всегда отличной от любого приближения к ней. Но в рамках модели можно использовать точные соотношения и потому в любом случае результаты моделирования представляют существенный интерес".

В случае геокриологического мониторинга принято говорить о ведения фонового мониторинга и организации и ведения геотехнического мониторинга. Фоновый мониторинг и долгосрочный прогноз состояния мерзлоты для сейсмоактивных территорий уместно рассматривать совместно с прогнозными картами бальности(ОСР) либо картами пиковых ускорений(PGA)[15]. Очевидна тенденция к росту потенциальной балльности либо PGA при переходе пород в талое состояние. Заметим, что имеющиеся прогнозные карты ОСР территории России в настоящее время не учитывают фактор деградирующей мерзлоты в сейсмоактивных районах.

Как было отмечено, прогногные оценки сейсмического отклика основанные на его моделировании требуют знания скоростных(упругих), плотностных, демпфирующих характеристик мерзло-талой среды. Для конкретного момента времени эти характеристики будут определятся вещественным составом пород, температурой, степенью их цементации в мерзлом и талом состоянии, газо-водонасыщенностью, составом подземных вод, латеральной и глубинной неоднородностью разреза. Эти характеристики необходимо рассматривать и во временной области если речь идет **о мониторинге и прогнозе.**

На заседание Бюро ОНЗ РАН А. В. Брушковым было отмечено, что существующий "геотехнический мониторинг на предприятиях и фоновый мониторинг Росгидромета не включают составление прогнозов. Методики мониторинга не обеспечивают получение параметров, необходимых для прогноза". А ведь именно прогноз состояния мерзлоты важен для оценки рисков, связанных с ее деградацией. Прогноз состояния мерзлоты в глобальном масштабе не возможен без климатического прогноза, а в случае локальных геотехнических оценок необходимо знание величины и динамики антропогенной нагрузки [1].

Геофизические исследования мерзло-талых массивов позволяют получить представление о пространсвенном положении мерзлых и талых областей об их скоростных и электрических характеристиках, а в случае повторных измерений и об изменениях этих характеристик.[17]. Анализируются сейсмические критерии выделения талых и мерзлых пород с использованием Vp и Vs [18]. В сочетании с данными о плотности пород и их демпфирующих характеристиках эта информация позволяет проводить моделирование сейсмического отклика. Многообразие скоростных разрезов мерзло-талых сред связанных сезонной протайкой активного слоя, деградирующей мерзлотой, наличием внутримерзлотных таликов, латеральной неоднородностью разрезов создает ситуацию, когда модель сейсмического отклика должна учитывать все эти обстоятельства [19].

В докладе будут представлены результаты модельных исследований прогнозной реакции грунтовой толщи на сейсмические воздействия в условиях криолитозоны – мерзлых и талых грунтов и их комбинаций. По результатам исследований выполнен анализ изменения сейсмических свойств и сотрясаемости массива мерзло-талых грунтов при землетрясении. Для различных вариантов сейсмогеологических моделей (СГКМ) на основе математического моделирования получены расчетные оценки изменения сейсмического эффекта при воздействии высокочастотного и низкочастотного сигналов. С точки зрения сейсмологии зона талика занимает особое место в разрезе, которая характеризуется пониженными скоростными (инверсионный скоростной разрез), частотными и механическими свойствами. Талик является одним из ключевых факторов при региональном

изменении состояния мерзлоты под воздействием климатического и антропогенного влияния. По этой причине анализу моделей с таликами уделено особое внимание. Как показали исследования авторов, сейсмическая реакция грунтового мерзлого массива содержащего зону талика, определяется положением границ и свойствами талика по отношению к другим слоям многолетнемерзлых пород(ММП) в массиве, а также соотношением мощностей талых и мерзлых слоев при тех же значениях упругих характеристик и затуханий сейсмических волн [20].

Исследования показали, что в сейсмической реакции участка криолитозоны заметную роль также играет мощность его активного слоя, меняющаяся под воздействием природно-техногенных факторов.

Для территории Билибинской АЭС авторами изучалось изменение сейсмического эффекта при отепляющем действии реакторных блоков АЭС, которое привело к оттаиванию многолетней мерзлоты за более чем 35 лет ее работы [21]. Образовалась чаша оттаивания в трещинноватом триасовом массиве песчаников, алевролитов и аргиллитов к моменту исследования в 2012 году на глубину 55 м. При этом приращение сейсмической интенсивности (ΔI), рассчитанное в диапазоне периодов 0,05÷0,20с от возможных местных землетрясений, составляет относительно поверхности многолетнемерзлой толщи ΔI=+0,27 балла. Эта величина может увеличится еще через 10 лет до ΔI=+0,40 баллов при прогнозной глубине оттаивания 65 м. Проанализированные сейсмические свойства грунтовых комплексов, слагающих территории исследования показали динамику изменения максимальных значений ускорений Amax расчетных акселерограмм: Amax=10,1 см/с$^2$ при глубине оттаивания 35 м через 15 лет эксплуатации, Amax=11,02 см/с$^2$ при глубине оттаивания 55 м за 36 лет и Amax=12,0 см/с$^2$ при глубине оттаивания 65 м за 46 лет относительно участка с сохранившимися в летний период многолетнемерзлыми грунтами (Amax=9,1 см/с$^2$). Те же закономерности наблюдаются в полученных значениях спектров реакции (Samax).

Результаты численного моделирования позволяют обоснованно подходить к решению задач сейсмического микрорайонирования по оценке и прогнозу сейсмических условий на территориях со сложным инженерно-геокриологическим строением.

***Литература***


1 Мониторинг вечной мерзлоты. — М.: «Академический проект», 2024. – 468 с.

2 Сергеев Д.О., Ю.В. Станиловская, Г.З. Перльштейн и др. Фоновый геокриологический мониторинг в Северном Забайкалье. // Криосфера Земли. – 2016. – Т. XX. – № 3. – С. 24–32

3 Геокриология. Характеристики и использование вечной мерзлоты. В 2 т. Т. II / С. А. Харрис, А. В. Брушков, Г. Чэн; под ред. А. В. Брушкова; — Москва, Берлин: Издательство «Директ-Медиа», 2020. – 362 с.

4 Макарычева Е.М., Кузнецов Т.И. Системы геотехнического мониторинга магистральных нефтепроводов в криолитозоне / Проблемы криосферы Земли [Электронное издание]: сборник тезисов Всероссийской научной конференции (Пущино, Россия, 12-16 мая, 2025 г.) / отв. ред.: А.В. Лупачев, А.А. Абрамов. – Пущино: ИФХиБПП РАН, 2025. – С. 122-123.

5 Колесников Ю. И., Федин К. В. Прямое определение резонансных свойств верхней части разреза по микросейсмам: натурный эксперимент // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 3. С. 5-21.

6 Оленченко В.В., Какуля В.А., Марилов О.К., Федин К.В. Выявление признаков опасных бугров пучения на территории центрального Ямала по геофизическим и геохимическим данным. / / Проблемы криосферы Земли [Электронное издание]: сборник тезисов Всероссийской научной конференции (Пущино, Россия, 12-16 мая, 2025 г.) / отв. ред.: А.В. Лупачев, А.А. Абрамов. – Пущино: ИФХиБПП РАН, 2025. – С. 83-84.

7 Антоновская Г. Н. Сейсмический мониторинг состояния антропогенных объектов и территорий их размещения, включая Крайний Север. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Архангельск – 2018. – 47 с.

8 Rossi M., Dal Cin M., Picotti S., Gei D., Isaev V.S., Pogorelov A.V., Gorshkov E.I., Sergeev D.O., Kotov P.I., Giorgi M and Rainone M.L. Active Layer and Permafrost Investigations Using Geophysical and Geocryological Methods—A Case Study of the Khanovey Area, Near Vorkuta, in the NE European Russian Arctic. // Front. Earth Sci. – 2022. V.10. – Article № 910078. – P. 1-22

9 Harris Stuart A. Tibetan Railroad: Innovative Construction on Warm Permafrost in a Low-Latitude, High-Elevation Region. S.D. Brunn (ed.), Engineering Earth. Chapter 43. – Springer Science+Business Media B.V.–2011. – P.747-765

10 Wu Q., Zhang T., and Y. Liu. Thermal state of the active layer and permafrost along the Qinghai-Xizang (Tibet) Railway from 2006 to 2010. // The Cryosphere. – 2012. – №6. – P.607-612.

11 Yang Z.J., Dutta U., Xu G., Hazirbaba K. Effects of Permafrost and Seasonally Frozen Ground on the Seismic Response of Transportation Infrastructure Sites. // Alaska University Transportation Center Fairbanks & Alaska Department of Transportation Research, Development, and Technology Transfer Fairbanks – 2010. – 82 p.

12 Седов Б.М. Сейсмические исследования в районах многолетней мерзлоты. – М.: Издательсво «Наука», 1988. – 184 с.

13 Джурик В.И., Серебренников С.П. Опыт оценки техногенной и сейсмической опасности при строительстве объектов инфраструктуры в горных районах Сибири. // The scientific heritage. – 2020. – № 55. – С. 51-54.

14 Джурик В.И., Серебренников С.П., Ескин А.Ю., Усынин Л.А., Брыжак Е.В., Шагун А.Н. Инженерно-сейсмологическое обеспечение безопасности строительства линейных сооружений в сейсмоактивных районах Южной Якутии с учетом деградации мерзлоты // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. Иркутск: Изд-во Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет. – 2011. – Т. 4. – № 1. – С. 60-78.

15 Гусев А.А. О принципах картирования сейсмоопасных регионов Российской Федерации и нормирования сейсмических нагрузок в терминах сейсмических ускорений. // Инженерные изыскания. – 2011. – №9. – С.18-38.

16 Алешин.А.С. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. – М.: Издательство "Научный мир", 2017. – 302 с.

17 Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А., Владов М.Л., Зыков Ю.Д., Неклюдов В.В., Оленченко В.В., Пушкарев П.Ю., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2022. – № 6. – С. 141-151.

18 Скворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // Криосфера Земли. – 2014. – Т. 18. – № 2. – С. 83-90.

19 Котов П. И., Агапкин И. А., Владов М. Л., Жусупбеков А. Ж. Обзор корреляционных зависимостей между сейсмоакустическими и геотехническими характеристиками мерзлых грунтов. // Строительство на многолетнемерзлых грунтах. – 2023. – №2. – С. 27-32.

20 Трифонов Б.А.. Милановский С.Ю., Несынов В.В. Модельные исследования реакции мерзлоталых сред на сейсмологические воздействия // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2025. – Т. 52. – № 1. – С. 101-119.

21 Трифонов Б.А., Милановский С.Ю., Несынов В.В. Особенности проведения сейсмического микрорайонирования на мерзлоте // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2023. – Т. 50. – № 4. – С. 106-114.

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ПОДМОСКОВЬЕ, СВЯЗАННЫЕ С СЕЗОННЫМ ПРОМЕРЗАНИЕМ ГРУНТОВ.

***Тюрин А.И.***
*кафедра геокриологии МГУ*

Если спросить у простого обывателя **«есть ли в московской области процессы и обусловленные ими явления, которые связаны с сезонным промерзанием грунтов»,** то, в лучшем случае, те, кто связан со строительством элементарных инженерных сооружений, например заборов, ответит удовлетворительно. Не вдаваясь в подробности, вам объяснят, что опорные столбы необходимо закапывать глубже сезонного промерзания. И это правильно. Мой научный руководитель диссертационной работы Николай Федорович Полтев, человек с практическим мышлениям, или, как говорят – «с крестьянским умом», рассуждал на эту тему следующим образом.

***«При закладке фундамента небольшого домика, типа дачи, на него все равно будут действовать силы пучения или выпучивания, «работающие» в слое сезонного промерзания. Если сезонное промерзание большое, то, чем на большую глубину мы закапываем фундамент, тем сильнее он будет подвергаться силам пучения. Значит напрашивается вывод – надо закапывать***

***на меньшую глубину, а лучше укладывать фундаментные блоки прямо на поверхности, если она близка к горизонтальной».***

И в чем он неправ? Есть сведения, что при раскопке старинных усадеб стало неожиданностью, что их фундамент заглублен всего на 30 сантиметров. Практически это сопоставимо с мощностью культурного слоя. Таким образом, одним из процессов, который связан с сезонным промерзанием в Подмосковье, является выпучивание твердых предметов, как заглубленных человеком, так и больших глыб, находящихся в слое сезонного промерзания. Мало того, выпучиваясь к поверхности, глыбы одновременно перемещаются вниз по склону в результате так называемой криогенной десерпции, то есть периодического изменения объема промерзающего грунта и его протаивании. Эти процессы медленные и мы их практически не замечаем. Однако, в окрестностях небольшого городка Переславль-Залесский в Ярославской области, в национальном парке у Плещеева озера, лежит загадочный Синий камень («Синь-камень»). Сюда его около 30 тысяч лет назад притащил ледник со Скандинавских гор. Общий вес камня около 12 тон и размеры примерно 3.0 на 2.6 метра (рис.1).

Рис.1 Синь-камень на Плещеевом озере. (Фото из свободных источников)

С ним народ связывает всякие небылицы, приписывая чудотворные действа, но самым неопровержимым является одно – камень постепенно движется вниз по склону. Причины движения те же – это криогенная десерпция, которая усиливается тем, что в период сезонного промерзания под камнем формируется линза льда, приподнимая его перпендикулярно склону и опуская вертикально под действием силы тяжести при протаивании. Линза льда под камнем может формироваться по принципу или аналогу «стебелькового льда». Для этого есть все предпосылки. Камень лежит на влажном грунте и при отрицательных ночных температурах он также приобретает температуру воздуха. Обладая большой «хладоемкостью» под камень мигрирует вода, намораживаясь на нем снизу в виде щетки льда. При неустойчивых суточных температурах в дневное время камень приобретает положительную температуру, при этом полностью или частично разрушается линзочка льда под ним. Камень по принципу криогенной десерпции, а она здесь до наступления устойчивых отрицательных температур «работает» суточно (ночь-день), достаточно интенсивно испытывает поступательные движения вниз по склону.

Районы Московской области в силу мягких климатических условий до сих пор не рассматривались с позиций возможностей образования «стебелькового льда». Для этого больше подходят районы Якутии в пределах пояса полярных пустынь. Однако, доцент кафедры геокриологии Сергей Николаевич Булдович практически сделал открытие, обнаружив линзы стебелькового льда под растительным покровом (рис.2).

Рис. 2. Стебельковый лед под растительным покровом (Фото С.Н.Булдовича)

В отличие от «классического» механизма формирования стебелькового льда под камнями, резко охлаждающимися до отрицательных температур и лежащими на увлажненной поверхности, в данном случае плотный растительный покров при переходе температур на нем в область отрицательных значений, создает эффект, аналогичный твердому телу, к которому интенсивно мигрирует влага, создавая щетки стебелькового льда. Судя по фотографии С.Н.Булдовича, мощность стебелькового льда под торфянисто-растительным покровом может достигать 10 сантиметров и более при последовательном наращивании ледяных щеток. На фотографии виден фрагмент первичной щетки, не успевшей до конца протаять при нагревании растительного покрова днем. Стебельковый лед под растительным покровом увидеть практически невозможно, не раскопав его, но наверняка многие его «слышали», проходя по хрустящей траве во время первых заморозков.

**Роль стебелькового льда под растительным покровом – явление негативное, губящее культурные насаждения и сильно увлажняющее поверхность почвы при его протаивании.**

На Звенигородской биостанции МГУ многие годы кафедра геокриологии геологического факультета МГУ проводит учебную геокриологическую практику для студентов 4-го курса инженерно-геологического потока. Практика проходит во второй половине января, когда зима полностью вступает в свои права. В основу практики заложен ландшафтно-ключевой метод геокриологической съемки, разработанный еще при заведовании кафедрой ее основателем Владимиром Алексеевичем Кудрявцевым. Во время летнего периода практики здесь выделяются различные микрорайоны, а в зимний период в пределах каждого микрорайона проводится комплекс изысканий, результаты которых могут переносится на остальные аналогичные ландшафты района.

Погодные условия в районе Звенигородской биостанции из года в год бывают разными. В какие-то годы завалит всю территорию снегом так, что во время снегомерной съемки в оврагах приходится перемещаться по грудь в снегу. При этом сглаживаются морфологические детали рельефа поверхности. Бывают зимы совершенно без снега, когда его можно найти только в тех же оврагах, чтобы показать хотя бы принцип проведения снегомерной съемки.

Поверхность 1 н/т в предзимний период имеет коричневый цвет увядшей травы с какими-то кочками, которые привыкли относить почему-то к творчеству земляных муравьев. Возможно, это связано с тем, что внешне они напоминают обычные небольшие муравейники. Зима 2025/26 года заставила нас взглянуть на происхождение этих «кочек» по-иному. Уже заканчивался январь, второй месяц зимы, с устойчивыми морозами, позволяющими промораживать незащищенные снегом участки территории. Поскольку снега выпало умеренное количество, заполнившее пониженные участки поверхности, а сами кочки с редкой сохранившейся растительностью были обнажены (рис.3, 4) Анализ существующей ситуации позволил сделать следующее объяснение формирования этого необычного микрорельефа. Отпрепарированные снегом кочки однозначно напоминают бугристо-кочкарниковый рельеф на периферии заболоченных участков Якутии и Забайкалья, в котором активное участие принимает миграция влаги под выпуклые участки поверхности при их промерзании. Возможен ли этот механизм в данном случае и объясняется он так. Поверхность

террасы покрыта достаточно равномерным слоем густой растительностью, но встречаются одиноко стоящие и несколько произрастающих из одной точки высоких и прочных стеблей. С наступлением отрицательных температур воздуха снежный покров сразу же ложится неравномерным слоем на поверхность террасы. Густая растительность, занимающая основную часть поверхности, погребается под снегом в виде слоя с большим объемом воздуха. Таким образом, происходит усиление теплоизоляционного свойства снежного покрова, поскольку «подушка» травы также является своего рода теплоизолятором.

Рис. 3. Земляные кочки биокриогенного происхождения на поверхности высокой поймы реки Москвы в районе Звенигородской биостанции МГУ (22.01.26 г.).

Многолетние исследования в данном районе показывают, что эта часть 1 н/т в течение всего зимнего сезона практически совсем не промерзает. Неравномерная мощность снежного покрова по площади связана с тем, что высокие и прочные стебли растений не погребаются снегом и остаются на поверхности, а вокруг них, как и вокруг больших деревьев, в результате ветрового завихрения, формируются открытые участочки, которые промерзают. Под них происходит миграция влаги, изначально создавая небольшие по площади пятачки положительной формы, которые ежегодно прогрессивно увеличиваются в высоту и в ширину. На рис.3 отчетливо видно, что даже одиночная былинка растения способствует начальному формирования промерзающей кочки. Минеральный состав кочек аналогичен подстилающим породам. Таким образом, формирование загадочных кочек взаимосвязано с перераспределением снежного покрова травой, создающей обнаженные участки, подвергающиеся промораживанию с миграцией под них влаги.

Рис.4. Поверхность первой надпойменной террасы левого борта реки Москвы, сплошь покрытая загадочными кочками (на втором плане)

## СВЯЗЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАПОЧВЕННЫХ ПОКРОВОВ С ЛАНДШАФТАМИ

***А.А. Фалалеева***
*МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

С количественной точки зрения теплофизические параметры напочвенных покровов рассматриваются как исходные данные для расчета среднегодовой температуры грунтов. Однако в связи с недостатком исследований, связанных с теплофизическими свойствами почвенно-растительного слоя [1], подбор и введение данных параметров является отдельной задачей при моделировании.

В монографии Ю.Л. Раунера [2] была приведена методика экспериментального изучения растительных покровов как составляющих радиационного и теплового баланса. Примеры теплофизических свойств горных пород и напочвенных покровов криолитозоны отражены в монографии Р.И. Гаврильева [3]. В статье А.В. Брушкова с соавторами [4] приводится методика измерения теплофизических свойств покровов в ходе натурных обследований и зависимости изменения теплофизических свойств в связи с пожарами. Обобщенные значения коэффициентов теплопроводности наиболее характерных мохово-лишайниковых и дерновых покровов по В.П. Чернядьеву и А.В. Павлову приводятся в [5].

В рамках полевых работ на территории криолитозоны автором были проведены исследования по методике, указанной в [4], дополнительно были проведены лабораторные исследования для определения влажности и количества органического вещества в образцах напочвенных покровов.

В табл. 1 представлены теплофизические характеристики ландшафтов Восточно-Европейской равнины.

Таблица 1

Характеристика ландшафтов Восточно-Европейской равнины и теплофизические свойства напочвенных покровов (статистически обработанные)

| Типы ландшафтов | Степень увлажнения | Напочвенный покров | Теплопроводность напочвенного покрова летняя (λл, ккал/м*ч*$^0$С) | Теплопроводность напочвенного покрова зимняя (λз, ккал/м*ч*$^0$С) | Термическое сопротивление напочвенного покрова летнее (Rл $м^2$*ч*$^0$С /ккал) | Термическое сопротивление напочвенного покрова зимнее (Rз ($м^2$*ч*$^0$С /ккал) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Северотундровые* (типичная тундра) | | | | | | |
| Разнотравно-моховые с карликовой березкой, плакоры | Достаточно увлажненные | Мощный моховой покров, преимущественно сфагнум до 20 см с кустарничками брусники и водяники, лиственный опад карликовой березки | 0,38 | 0,76 | 0,26 | 0,53 |
| Кустарничково-лишайниковые и мохово-лишайниковые аллювиальные равнины | Слабо увлажненные | Значительный моховый покров до 10 см (ягель) с кустарничками брусники, черники, багульника, редкой осокой | 0,11 | 0,22 | 0,45 | 0,9 |
| *Южнотундровые* | | | | | | |
| Ивняково-кустарничковые с лишайниково-моховым покровом аллювиальные равнины | Увлажненные | Ивняк с лишайниково-моховым покровом до 10 см, преимущественно ягель, кустарнички голубики, брусники, водяники | 0,28 | 0,56 | 0,18 | 0,36 |
| Болота, полигональные торфяники, | Переувлажненные | Мощный моховой покров до 10 см, преимущественно зеленый мох, сфагнум, кустарнички брусники, осока | 0,06 | 0,12 | 0,83 | 1,67 |
| *Бореальные северотаежные* | | | | | | |
| Сосняк, песчано- | Сухие | Мохово-лишайниковы | 0,24 | 0,48 | 0,31 | 0,63 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| морские, озерно-ледниковые равнины | | й покров мощностью до 15 см с кустарничкам и багульника, голубики, черники, морошки | | | | |
| Разреженные еловые леса с березой, плакоры | Слабо увлажненные | Мохово-лишайниковый покров мощностью до 10 см с кустарничкам и багульника, голубики, черники, морошки | 0,12 | 0,24 | 1,07 | 1,25 |

***Литература***

1 Новоприезжая В. А. Моделирование температурного режима грунтов на льдонасыщенных ландшафтах межаласья Центральной Якутии / В. А. Новоприезжая, Н. А. Федоров // География и краеведение в Якутии и сопредельных территориях Сибири и Дальнего Востока: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения С.Е. Мостахова, Якутск, 30 мая 2020 года. – Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2020. – С. 75-83. – EDN WFTISU.

2 Раунер Ю.К. Тепловой баланс растительного покрова. – Ленинград: Вып. ГИДРОМЕТИЗ, 1972. –212 с.

3 Гаврильев Р. И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. – Новосибирск: Изд-во СО, 1998. 280 с.

4 Brouchkov A. и др. Thermal conductivity of soils in the active layer of eastern Siberia // Permafr. Periglac. Process. 2005. Т. 16. № 2. С. 217–222.

5 Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. – М: «Геоинфо», 2016. 512 с.

## ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУПНОБУГРИСТЫХ ТОРФЯНИКОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ SENTINEL (НА ПРИМЕРЕ ПРИРОДНОГО ПАРКА «НУМТО»)

***А.В. Фахретдинов*[1,2]**

*[1]Институт проблем освоения Севера, Тюменский научный центр СО РАН, г. Тюмень*

*[2]Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

Бугристые торфяники широко распространены в южной криолитозоне Западной Сибири и выполняют ряд важных экологических функций: поддержание стабильности многолетнемёрзлых пород и углеродного баланса, сохранение биоразнообразия, удержание влаги и загрязнений [1]. Современные изменения климата способствуют снижению устойчивости данных болотных геосистем, что проявляется в разрушении торфяных бугров, активизации криогенных процессов [2]. Это требует мониторинговых наблюдений за состоянием температурного режима и растительного покрова мёрзлых торфяников и предусматривает, в первую очередь, проведение инвентаризационных исследований по их выявлению. Успешное решение такой задачи возможно при использовании данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые позволяют на основе спектрально-отражательных свойств земной поверхности классифицировать природные комплексы на различных таксономических уровнях, включая низшие (виды урочищ).

Картографирование таёжных болот региона показало, что доля мёрзлых бугристых торфяников составляет лишь 3% [3]. Однако выделяются территории с преобладанием указанных микроландшафтов в структуре болот, к которым относится Природный парк «Нумто». Здесь

расположен один из самых южных массивов мёрзлых заозеренных торфяников в регионе, формирующих совместно с немерзлыми олиготрофными болотами ландшафтный облик данной местности [4].

В пределах Парка проведены ряд исследований, где отражены карты пространственного расположения бугристых торфяников [5–7]. В работе [8] показаны результаты разделения крупно- и плоскобугристых типов торфяников при анализе спутниковых снимков сверхвысокого разрешения (менее 3 м). Крупнобугристые комплексы, занимая сравнительно меньшую площадь, характеризуются наибольшей уязвимостью к температурным изменениям. Сложность визуального определения крупных бугров на спутниковых изображениях и малая доступность снимков в максимальном качестве обуславливают поиск оптимальных методов их распознавания при использовании мультиспектральной съёмки относительно меньшего разрешения, что и определило цель данного исследования.

Ключевой участок, площадью 150 км$^2$, находится в юго-восточной части Природного парка «Нумто», на северо-западном побережье одноименного озера (рис. 1). Данная территория относится к северотаёжной подзоне и расположена на границе двух болотных зон – бугристых (мёрзлых) и олиготрофных (немёрзлых) сфагновых болот. В ландшафтной структуре доминируют озерно-болотные комплексы (63%), представленные в основном плоскобугристыми торфяниками (высота бугров 0,5–1 м) [9]. Крупнобугристые торфяники (высота бугров 3–4 м) разбросаны на значительном расстоянии друг от друга, часто граничат с ложбинами стока и долинами рек, либо приурочены к периферии автоморфных лесных геосистем [10, 11]. Водораздельные пространства также заняты другими типами болотных микроландшафтов: олиготрофные лесные (сосново-сфагново-кустарничковые), мохово-лесные, моховые, мохово-травяные, комплексные (грядово-мочажинные и грядово-озерковые), мезотрофные и эвтрофные [9]. Леса имеют ограниченное распространение (около 20%) и характерны для наиболее сухих и дренированных участков, преобладающая лесообразующая порода – сосна, реже встречается кедр, меньшую площадь занимают лиственница и ель. Из лиственных пород доминирует береза [4].

Для геоинформационного определения крупнобугристых торфяников были задействованы летние медианные композитные изображения (июль–первая половина августа), сформированные по материалам мультиспектральной спутниковой съёмки Sentinel-2 (пространственное разрешение 10 м) за период 2017–2015 гг. в плагине Google Earth Engine (GEE). Такой метод создания единого растра позволяет получить значения с минимальным влиянием облачности. Кроме этого, в работе была использована цифровая модель рельефа (ЦМР) ArcticDEM (разрешение 2 м) (источник данных: https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/), приведенная к разрешению снимков Sentinel-2. В качестве индикационных параметров применялись данные вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), отражающего количество фотосинтетически активной биомассы, и индекса влажности NDWI (Normalized Difference Water Index), характеризующего содержание влаги на растительном покрове, а также карта уклонов поверхности, рассчитанная по материалам ЦМР. Учитывалось среднее значение индексов за выбранный период (2017–2015 гг.). Эталонные величины рассматриваемых параметров крупных бугров, местоположения которых выявлены в ходе наземных полевых обследований, легли в основу математического выражения для создания маски данных природных комплексов. Вычисление производилось в расширении «калькулятор растров» программного комплекса (ПК) QGIS 3.36. Для визуального отображения крупнобугристых торфяников внутри ландшафтной структуры исследуемой территории осуществлялось наложение границ рассчитанного растра на изображение, полученное при использовании полуавтоматического метода классификации алгоритмом “Minimum Distance” (MD) в модуле SCP (Semi-Automatic Classification Plugin) той же ГИС-оболочки. Для обучения формировались выборки (группы однородных пикселей, относящиеся к распознаваемому классу), которые верифицировались по данным полевых ландшафтных описаний (август, 2024 г.). Итогом управляемой классификации стало выделение природных комплексов в пределах основных типов ландшафтов (болотные, лесные, лесоболотные), а также водных поверхностей (рис. 1). На завершающем этапе выполнялась оценка точности проведенной классификации (в %) и векторизация растра.

Классификация показала, что значительную часть территории исследования занимают водные объекты (50,1%). Среди природных комплексов доминируют плоскобугристые торфяники (27,2%). Общая точность выделения классов составила 75%. Размещение участков крупнобугристых торфяников определяется спектральными показателями в пределах значений по данным составленного выражения (1). Отличительными особенностями данных типов торфяников, по сравнению с плоскобугристыми, являются: бóльшие значения абсолютной высоты поверхности и,

соответственно, крутизны склонов, и количества фитомассы, обусловленное густым напочвенным покровом с преобладанием *Ledum palustre*, относительно меньшая степень увлажнения, связанная с отрывом бугров от грунтового питания за счёт превышения над уровнем прилегающих болот. Для наглядности приведены спектральные маркеры плоскобугристых торфяников по выборке (n = 550), рассчитанные при помощи инструмента «зональная статистика» (2).

(3,5 <= i <= 7) и (0,73 <= NDVI <= 0,85) и (–0,80 <= NDWI <= –0,64) (1)

(0,01 <= i <= 1,4) и (0,4 <= NDVI <= 0,58) и (–0,62 <= NDWI <= –0,44) (2)

где i – уклон поверхности в %.

Анализ построенной карты выявил, что потенциальные местонахождения крупнобугристых торфяников соответствуют характерным для их расположения биотопам, согласно [10–12]. Исходя из полученных результатов, для протяженных комплексов бугров типично присутствие по берегам крупных озёр, что было отмечено при осмотре на местности и подтверждает наблюдения [9]. Близость к водным объектам и свойственная локализация на надпойменных террасах и в тыловых частях пойм связаны с наличием источников влаги для роста бугров [13].

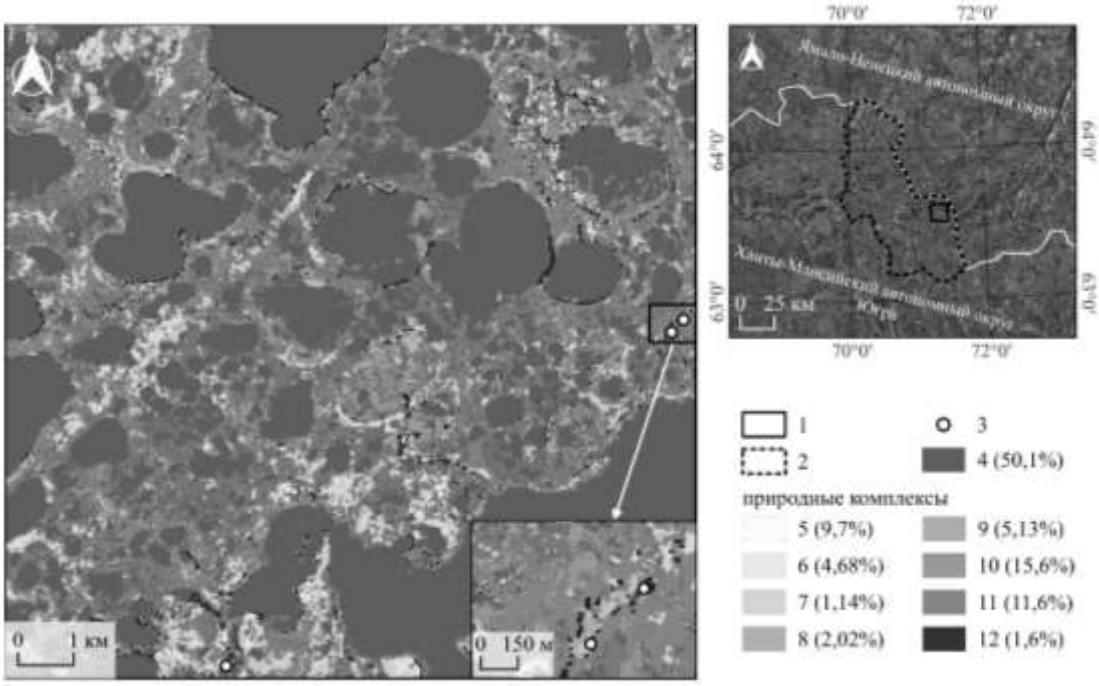



Рис. 1. Расположение исследуемой территории и её классифицированное изображение (в скобках указана площадь, занимаемая каждым классом; тональность классов показана с 20% прозрачностью для возможности отображения крупных бугров). 1) границы участка исследования; 2) границы природного парка «Нумто»; 3) местоположения крупнобугристых торфяников, согласно наземным полевым обследованиям; 4) водные объекты; природные комплексы: 5) междуречные сосновые кустарничково-лишайниковые леса; 6) приозёрные берёзовые травяно-кустарничковые заболоченные редколесья и пойменные елово-кедровые, с примесью берёзы, травяно-кустарничково-зеленомошные леса; 7) олигомезотрофные травяно-осоково-сфагново-гипновые переувлажненные болота; 8) грядово-мочажинные болотные комплексы с чередованием ерниково-кустарничково-сфагновых гряд и осоково-сфагновых обводненных мочажин; 9) хасырейные травяно-осоково-сфагновые обводнённые болота; 10) плоскобугристые мерзлые ерниково-кустарничково-дикраново-лишайниковые торфяники центральных частей водоразделов; 11) плоскобугристые мерзлые кустарничково-лишайниково-сфагновые торфяники окраин водоразделов; 12) крупнобугристые мерзлые сфагново-кустарничковые, локально с берёзой, торфяники

В целом, доля крупнобугристых торфяников составляет менее 2% по отношению к плоскобугристым комплексам, что меньше значения по данным [8], определенного для юго-центральной части Парка в верховьях р. Казым. Различия в результатах объясняются степенью распространения данных болотных геосистем, которые встречаются реже в районе расположения оз. Нумто. Дальнейший сбор данных о крупнобугристых торфяниках и расширение перечня учитываемых параметров для их поиска может способствовать более точному установлению границ их размещения и распознаваемости среди болотных массивов.

***Литература***

1. Московченко Д.В., Губарьков А.А., Фахретдинов А.В. Температурный режим торфяников Западной Сибири вблизи южной границы распространения многолетнемёрзлых пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 160–168. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4456

2. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А. и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // Криосфера Земли. – 2020. – Т. 24. – № 2. – С. 15–30. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30)

3. Терентьева И.Е., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф. и др. Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2020. – Т. 84. – № 6. – С. 920–930. DOI: 10.31857/S2587556620060102

4. Валеева Э.И., Московченко Д.В., Арефьев С.П. Природный комплекс парка «Нумто». – Новосибирск, 2008. – 280 с.

5. Фахретдинов А.В. Проявление современных изменений климата в спектральных характеристиках растительности парка «Нумто» // Современное состояние и перспектива развития сети особо охраняемых природных территорий в промышленно развитых регионах: Материалы II Всероссийской конференции, посвященной 25-летию природного парка «Нумто»: сборник научных статей. – Екатеринбург: Общество с ограниченной ответственностью «Ассорти», 2022. – С. 125–130.

6. Minayeva T.Y., Markina A.V., Sirin A.A. et al. Connecting biodiversity and human dimensions through ecosystem services: The Numto Nature Park in West Siberia // Ambio. – 2021. – DOI: 10.1007/s13280-021-01625-8.

7. Moskovchenko M. Application of machine learning techniques for wetland type mapping in the Numto Nature Park (Western Siberia) // Earth Science Informatics. – 2025. – Vol. 18. – No. 1. – P. 107. – DOI: 10.1007/s12145-024-01654-3

8. Московченко Д.В., Фахретдинов А.В. Крупномасштабное картографирование мёрзлых торфяников на юге криолитозоны Западной Сибири // Географический вестник. – 2025. – № 1(72). – С. 174–184. – DOI: 10.17072/2079-7877-2025-1-174-184

9. Московченко Д.В., Глазунов В.А., Тигеев А.А. Типология болотных комплексов природного парка «Нумто» // Современное состояние и перспектива развития сети особо охраняемых природных территорий в промышленно развитых регионах: Материалы межрегиональной конференции, посвященной 20-летию природного парка «Нумто»: сборник научных статей. – Белоярский: Нижневартовский государственный университет, 2017. – С. 44–47.

10. Матышак Г.В., Богатырев Л.Г., Гончарова О.Ю., Бобрик А.А. Особенности развития почв гидроморфных экосистем северной тайги Западной Сибири в условиях криогенеза // Почвоведение. – 2017. – № 10. – С. 1155–1164. – DOI 10.7868/S0032180X17100069

11. Шишконакова Е.А., Аветов Н.А., Толпышева Т.Ю., Тарлинская А.А. Растительная индикация термокарстовых образований бугристых болот в южной части парка Нумто (Западная Сибирь) // Социально-экологические технологии. – 2019. – № 1. – С. 27–57. – DOI: 10.31862/2500-2961-2019-9-1-27-57.

12. Козин В.В. Тип местности болотный крупнобугристых торфяников // Югория: энциклопедия Ханты-Мансийского автономного округа: в 4 томах. Том 3. – Ханты-Мансийск: Издательский дом «Сократ», 2000. – С. 189.

13. Бердников Н.М. Бугры пучения в различных ландшафтах бассейна реки Надым // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16. – № 3. – С. 81–86.

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МЕРЗЛОТНО-ЛАНДШАФТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЯКУТИИ

***Федоров А.Н.***

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

***Введение.*** Ландшафты Севера представляют собой своеобразные, легко ранимые и медленно восстанавливаемые природные комплексы. Суровый климат, вечная мерзлота и низкая биологическая продуктивность являются основными причинами уникальности этих ландшафтов. Взаимоотношение мерзлоты и ландшафтов весьма широко применялось в геокриологическом картографировании. В.Ф. Тумель, И.Я. Баранов, В.А. Кудрявцев считали ландшафтный метод одним из основных методов геокриологического картографирования. При этом они опирались на функциональные связи между

характеристиками ландшафта и мерзлоты, которые явились основой для индикации мерзлотных условий.

Важность изучения взаимосвязи мерзлоты и ландшафтов связана с охраной природы на Севере. Устойчивость ландшафтов на Севере во многом зависит от стабильности мерзлотных условий [1]. Льдистость и температура мерзлых пород, глубина деятельного слоя, криогенные процессы оказывают сильное влияние на функционирование ландшафтов. Целостность природной системы, обеспечиваемая функциональными связями между компонентами, определяет использование внешних, морфологических черт ландшафтов (в основном сочетаний рельефа и растительности) в качестве индикаторов мерзлотных условий. Ландшафтные разработки в основном используются в инженерно-геокриологическом и геокриологическим картографировании.

Теоретической основой мерзлотно-ландшафтных исследований послужили широко известные разработки советских физико-географов – ландшафтоведов (Солнцев, Исаченко, Мильков, Сочава и другие). Особое место в развитии теории мерзлотного ландшафтоведения принадлежит разработкам Е. С. Мельникова [2], посвященным таксономии и классификации природно-территориальных комплексов (ПТК) в зоне вечной мерзлоты. В последние годы весомый вклад в развитии мерзлотно-ландшафтных исследований и изучении динамики мерзлотных условий сделали Д. С. Дроздов и др. [3], Н. В. Тумель и Л. И. Зотова [4], Г. Г. Осадчая [5], и др.

Мерзлотный ландшафт понимается как относительно однородное природное образование, функционирующее под воздействием криогенеза, с определенными, закономерными только для него сочетаниями мерзлотных характеристик [6]. Мерзлотные ландшафты являются составной частью ландшафтной сферы Земли, где верхняя часть литосферы представлена вечной мерзлотой.

Основной целью доклада является ознакомление с методикой и результатами мерзлотно-ландшафтных исследований в Якутии для познания особенностей природной среды и их динамики под воздействием антропогенных нарушений и современного изменения климата.

***Материалы и методы.*** Научные проблемы, решаемые касательно познания природы мерзлоты и мерзлотных ландшафтов, весьма широко представлены в литературе и фондовых материалах Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, начиная с 1940-х годов. Это касается разномасштабных мерзлотных карт, динамики мерзлотных форм рельефа и температурного режима, взаимоотношения мерзлоты и таликов, мониторинга мерзлоты, теплобалансовых исследований мерзлотных экосистем и т.д. До 1980-х годов в исследованиях природной среды применялся ландшафтно-индикационный метод, на основе геоморфологического районирования [7]. При картографировании мерзлотных поясов в горных областях использовались высотные ландшафтные пояса [8]. Эти работы сопровождались дешифрированием аэроснимков, которые стали доступны с середины 1940-х годов в связи со сплошным топографическим картографированием Северо-Востока СССР.

Материалы ландшафтных исследований в Якутии широко стали появляться с 1980-х годов. В первую очередь это коснулось изучения пространственного разнообразия мерзлотных ландшафтов и их характеристик, которые воплощались в составлении карт. На картах путем установления криоиндикационных свойств ландшафтов – льдистости, температуры многолетнемерзлых пород (ММП), мощности деятельного слоя и распространения криогенных процессов были дифференцированы ландшафты с одинаковыми сочетаниями мерзлотных характеристик.

Криоиндикационный метод является основным методом изучения мерзлотных ландшафтов. Изучение мерзлотных ландшафтов обеспечивается полевой съемкой и описаниями, дешифрированием аэро- и космических снимков. Таксономия и классификация мерзлотных ландшафтов была составлена с учетом мерзлотных критериев [6]. В детальных мерзлотно-ландшафтных исследованиях на уровне фаций и урочищ в качестве дополнительных критериев выделения используются температура грунтов и мощность деятельного слоя, в среднемасштабных исследованиях наряду с температурой грунтов используется криогенное строение ММП и их объемная льдистость. В мелкомасштабных исследованиях наряду с наряду с широтно-зональными и высотно-поясными почвенно-растительными сообществами используются климатические параметры, в том числе индексы промерзания и протаивания. В последние годы в криоиндикации мерзлотных условий используются современные методы интерпретации космических снимков – NDVI, MDMI, LST и другие.

Мониторинговые наблюдения за динамикой мерзлотных ландшафтов проводятся почти повсеместно, однако все они имеют разные цели и задачи. Поэтому программа наблюдений бывает разной. Наиболее полные исследования проводятся на стационарах с метеорологическими, теплобалансовыми и мерзлотными наблюдениями (станции Остров Самойловский, ПГО Тикси,

Спасская Падь, Нелегер и др.). Результаты мерзлотно-ландшафтных исследований стали использоваться в ГИС-моделировании. Имеющийся опыт моделирования показывает, что картографические интерпретации могут быть весьма полезны для оперативной оценки мерзлотной ситуации для исследователей.

***Мерзлотные ландшафты как объект исследования.*** Около четверти площади земной поверхности заняты ландшафтами, литогенной основой которых являются многолетнемерзлые породы. В России они занимают около 65% территории. Эти ландшафты в основном занимают высокоширотные и высокогорные местоположения, отличаются суровыми природными условиями, и для них характерно развитие специфических криогенных процессов и явлений. Изучение мерзлотных ландшафтов является основой для природоохранных геокриологических исследований, ориентированных на изучение устойчивости территорий к техногенным воздействиям [1].

В условиях вечной мерзлоты развитие ландшафтов, их трансформация или восстановление после нарушения во многом зависит от свойств ММП – термических условий, криогенного строения и льдистости, мощности сезонно-талого и сезонномерзлого слоев (СТС и СМС). Ведущий характер криогенного фактора в северных ландшафтах определяется спецификой природной среды северных регионов, в первую очередь наличием льда в литогенной основе и фазовыми переходами воды при промерзании-протаивании. Роль криогенного фактора в функционировании и дифференциации ландшафтов Севера требует определенный пересмотр некоторых вопросов таксономии, классификации и методики картографирования. В связи с этим такие параметры природных объектов, как характер распространения ММП, их температура, криогенное строение и льдистость, мощность СТС – СМС предлагаются в качестве критериев для классификации и картографирования мерзлотных ландшафтов [2, 6].

М.К. Гаврилова [9] в свое время определила, какие климатические параметры – средняя годовая температура, средние температуры самого холодного месяца, индексы промерзания и протаивания характерны для ландшафтов сплошного, прерывистого и островного распространения мерзлых пород. Результаты исследований А.И. Попова [10] о самостоятельном типе литогенеза – криолитогенезе и Е.М. Катасонова [11] о криолитогенных формациях стали основой для выделения мерзлотных ландшафтов по криогенному строению и льдистости грунтов (например, едомный, аласный, предгорно-ледниковый и т.д.). Растительный покров хорошо отражает распределение температуры пород и мощности деятельного слоя [12]. Роль биогенного фактора существенна в функционировании и развитии мерзлотных ландшафтов.

***Картографирование мерзлотных ландшафтов.*** Первой ландшафтной картой районирования Якутии является работа В.С. Михеева и П.Д. Павлова [13], основанная на ранних физико-географических районированиях СССР Н.И. Михайлова, Ю.П. Пармузина. Монография И.С. Васильева «Закономерности сезонного протаивания грунтов в Восточной Якутии» [14] по сути является мерзлотно-ландшафтной работой, хотя не были использованы ландшафтные методы и классификации. Особую ценность имеет составленная И.С. Васильевым «Карта протаивания грунтов Восточной Якутии» масштаба 1:2 500 000, которая представлена в виде карты-вкладки к монографии. Основным методом построения этой карты было наложение двух слоев – геолого-генетических комплексов с определенным составом грунтов из 23 единиц и растительных группировок из 20 единиц. Карта прекрасно отражает как широтно-зональную, так и высотно-поясную дифференциации растительности и мощности деятельного слоя. Эту работу можно считать первой мерзлотно-ландшафтной работой в Якутии.

Далее мерзлотно-ландшафтные исследования стали проводиться регулярно. Монография «Мерзлотные ландшафты зоны освоения Лено-Алданского междуречья» [15] стала одной из первых работ по мерзлотно-ландшафтным исследованиям в Якутии. Монография была посвящена мерзлотным ландшафтам и была написана по материалам полевых исследований вдоль зоны освоения железной дороги Томмот – Нижний Бестях (Якутск). Каждому из десяти выделенных ландшафтных районов присущи относительно однородные сочетания типов (подтипов) местности. К монографии была прикреплена карта-вклейка «Ландшафтно-криоиндикационная карта зоны освоения Лено-Алданского междуречья» от г. Томмота до г. Якутска с выделением типов (подтипов) местности и районов с таблицей мерзлотно-ландшафтных характеристик.

В конце 1980-х – начале 1990-х годов в Институте мерзлотоведения была составлена Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР масштаба 1:2 500 000 [16] с большой Пояснительной запиской «Мерзлотные ландшафты Якутии» [17]. На карте были отражены 22 типа местности по геолого-геоморфологическим и 26 типов (подтипов) ландшафтов по биоклиматическим признакам. Типы местности – межаласный, аласный, моренный, зандровый, низкотеррасовый, ледниково-долинный,

плакорный, склоновый и т.д. отличались стратиграфо-генетическими комплексами, криогенными структурами и объемной льдистостью поверхностных отложений. Типы (подтипы) ландшафтов характеризовались относительно одинаковыми характеристиками климата – индексами промерзания и протаивания, типами растительности и их продуктивностью. Методом наложения типов местности и типов (подтипов) ландшафта были систематизированы температуры грунтов и мощность деятельного слоя. Карта и пояснительная записка стали хорошим справочным материалом для интересующихся мерзлотными и ландшафтными условиями Якутии.

Наряду с Мерзлотно-ландшафтной картой Якутской АССР масштаба 1:2 500 000 было составлено большое количество мерзлотно-ландшафтных карт разного масштаба на осваиваемые территории Якутии. Масштабы карт изменялись от детальных до среднемасштабных и мелкомасштабных. Крупномасштабные карты отражали мерзлотно-ландшафтные условия на таксономическом уровне фаций и урочищ, среднемасштабные карты – на уровне типов (подтипов) местности и мелкомасштабные карты с наложением типов местности и типов ландшафта.

В 2018 г. вышеупомянутая Мерзлотно-ландшафтная карта была обновлена в связи с получением новых мерзлотных данных, качественных космических снимков и изменением технологии картсоставления – переходом на ГИС-технологии. На новой Мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия) масштаба 1:1 500 000 частично были изменены классификационные построения, как по типам местности, так и типам (подтипам) ландшафтов – группам растительности [18]. Было выделено 20 типов местности, основным отличием стало то, что типы местности не различали на равнинные и горные, когда стратиграфо-генетические комплексы поверхностных отложений одинаковы. Вместо типов (подтипов) ландшафтов использовались растительные группировки для лучшего показа контрастности температуры грунтов и мощности деятельного слоя. Всего количество групп растительности – 36. В легенде карты отражено 145 мерзлотных ландшафтов – сочетаний типов местности и растительных группировок, по сравнению с 87 мерзлотными ландшафтами на карте 1991 г. Данная карта явилась одной из основ составления Геокриологической карты Республики Саха (Якутия) [19].

***Изучение динамики и эволюции мерзлотных ландшафтов*** получило достаточно широкое развитие в Якутии. Одним из наиболее характерных исследований динамики мерзлотных ландшафтов является изучение стадий развития термокарстовых форм рельефа. На применимость якутских названий в классификации стадий развития термокарста впервые обратили внимание А. И. Ефимов и Н. А. Граве [20]. Они отметили, что первоначальные термокарстовые просадки в дальнейшем своем развитии переходят в «иё», более просевшие западины, где канавки между буграми заполнены водой. Следующей стадией развития термокарста является «дюёдя» – озерко в термокарстовой западине с невысокими берегами и бугристым днищем, со временем «дюёдя» превращается в сплошь заполненное водой провальное озеро с ровным илистым дном и обрывистыми берегами. Далее провальное озеро с испарением воды превращается в «алас». В дальнейшем П. А. Соловьев [7] дополнил эту классификацию термокарстовых форм рельефа.

Мерзлотно-ландшафтные условия хорошо применяются в палеогеографических исследованиях. Здесь хорошо прослеживается эволюция ландшафтов на протяжении длительного периода развития, когда одни ландшафтно-климатические условия сменялись другими. На севере Якутии с ландшафтной точки зрения четко определены периоды потепления, когда в Центральной Якутии и в современной тундровой зоне развивались лиственничные редколесья с примесью ели, и периоды похолодания, когда в современной лиственничной средней тайге были развиты кустарниковые тундры.

Мерзлотно-ландшафтные исследования значительную роль сыграли в изучении современной динамики природной среды при нарушениях, в первую очередь при лесных пожарах и вырубках лесов. Восстановительные сукцессии после нарушения четко отражают закономерное развитие мерзлотных условий. Были определены характеристики сукцессионных стадий развития мерзлотных ландшафтов и их продолжительность [21, 22]. В Центральной Якутии полное восстановление мерзлотного ландшафта после нарушения составляет 120-130 лет. Изучение сукцессионных стадий развития послужило основой для картографирования динамического состояния мерзлоты [23].

На стационаре Нелегер Института мерзлотоведения близ г. Якутска (Центральная Якутия) был проведен эксперимент со сплошной вырубкой лиственничного леса и изучен начальный этап восстановительной сукцессии с детальным изучением динамики мерзлотных условий (Федоров, Петров). Увеличение продуктивности биоты и эволюция биомассы (Усольцев, Швиденко) служит основой для изучения восстановления мерзлотных условий после нарушений, и для оценки влияния сукцессионных стадий на состояние мерзлотных ландшафтов. Наши наблюдения в Центральной

Якутии показывают, что в условиях современного потепления климата, сукцессии вызывают понижение температуры ММП [22].

Повышение температуры ММП при современном потеплении климата сильно зависит от мерзлотно-ландшафтных условий. Например, повышение температуры грунтов от средних многолетних значений больше в Арктической Якутии (до 2-3 $^{o}$C), чем в Центральной Якутии (0,5 $^{o}$C). В настоящее время, в условиях глобального потепления климата, отмечается более интенсивная реакция мерзлотных ландшафтов на ледовом комплексе и других сильнольдистых участках.

Основные выводы:

1) Выделение мерзлотного ландшафта как объекта исследования дополняет теорию ландшафтоведения. Параметры криогенного фактора были предложены в качестве критериев таксономии и классификации мерзлотных ландшафтов;

2) Развитие мерзлотно-ландшафтных исследований позволило создать картографирование на основе классификации мерзлотных ландшафтов. Были созданы разномасштабные мерзлотно-ландшафтные карты, которые отражают единство морфологических частей ландшафта и мерзлоты.

3) Взаимосвязь основных физико-географических компонентов и ММП позволяют мерзлотным ландшафтам быть изучения динамики и эволюции вечной мерзлоты.

Перспективы изучения мерзлотных ландшафтов в первую очередь будут связаны с оценкой устойчивости ММП и адаптации социально-экономических условий к современным изменениям климата и природной среды.

***Литература***

1 Браун, Дж. Нарушение поверхности и ее защита при освоении Севера / Дж. Браун, Н. А. Граве. – Новосибирск: Наука, 1981. – 88 с.

2 Мельников, Е.С. Научные основы и методы региональных инженерно-геологических исследований равнин криолитозоны (на примере Западной Сибири) / Е. С. Мельников: автореф. дис. … докт. геол.-минерал. наук. – М., 1985. – 44 с.

3 Дроздов, Д.С. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974-2008 годы) / Д.С. Дроздов, Н.Г. Украинцева, А.М. Царев, С.Н. Чекрыгина // Криосфера Земли. – 2010. – Т. XIV, № 1. – С. 22– 31.

4 Тумель, Н. В., Зотова Л. И. Геоэкология криолитозоны / Н. В. Тумель, Л. И. Зотова: Учебное пособие. – Географический факультет МГУ, 2014. – 244 с.

5 Осадчая, Г. Г. Мерзлотные ландшафты Большеземельской тундры как основа рационального природопользования / Г. Г. Осадчая: автореф. дис. … докт. геогр. наук. – Ухта, 2018. – 35 с.

6 Федоров, А.Н. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования / А. Н. Федоров. – Якутск, 1991. – 140 с.

7 Соловьев, П. А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья / П. А. Соловьев. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 144 с.

8 Некрасов, И. А. Криолитозона Северо-Востока и юга Сибири и закономерности ее развития / И. А. Некрасов. – Якутск,1976. – 246 с.

9 Гаврилова, М. К. Современный климат и вечная мерзлота на континентах / М. К. Гаврилова. – Новосибирск: Наука,1981. – 112 с.

10 Попов, А. И. Криолитогенез как зональный тип литогенеза / А. И. Попов // Проблемы геокриологии. – М.: Наука ,1983. – С.35–43.

11 Катасонов, Е.М. Криолитогенные отложения, их мерзлотно-формационные комплексы / Е. М. Катасонов // Проблемы геокриологии. – М.: Наука, 1983. – С. 162–169.

12 Тыртиков, А. П. Динамика растительного покрова и развитие вечной мерзлоты в Западной Сибири / А. П. Тыртиков. – М.: МГУ, 1974. – 198 с.

13 Михеев, В. С. Физико-географическое районирование / В. С. Михеев, П. Д. Павлов // Атлас Якутской АССР. – М.: ГУГК, 1981. – с.22.

14 Васильев, И. С. Закономерности сезонного протаивания грунтов в Восточной Якутии / И. С. Васильев. – Новосибирск: Наука, 1982. – 133 с.

15 Босиков, Н. П. Васильев И.С., Федоров А.Н. Мерзлотные ландшафты зоны освоения Лено-Алданского междуречья / Н. П. Босиков, И. С. Васильев, А. Н. Федоров. – Якутск: Институт мерзлотоведения АН СССР, 1985. – 124 с.

16 Федоров, А.Н. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР. Масштаб 1: 2 500 000 / А.Н. Федоров, Т.А. Ботулу, И.С. Васильев, С.П. Варламов, С.П. Грибанова и И.В. Дорофеев; [ред. П.И. Мельников]. – М.: ГУГК, 1991. – 2 л.

17 Федоров, А. Н. Мерзлотные ландшафты Якутии (Пояснительная записка к Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР масштаба 1:2 500 000) / А. Н. Федоров, Т. А. Ботулу, И. С. Васильев, С. П. Варламов, С. П. Грибанова, И. В. Дорофеев и др.; [ред. П. И. Мельников] – Новосибирск: ГУГК, 1989. – 170 с.

18 Fedorov A. N., Vasilyev N. F., Torgovkin Y. I., Shestakova A. A., Varlamov S. P., Zheleznyak M. N., et al. 2018. Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) at scale 1:1,500,000. Geosciences, 8, 465. DOI:10.3390/geosciences8120465.

19 Железняк М. Н. Методика составления современной геокриологической карты Якутии масштаба 1:1 500 000 / М. Н. Железняк, А. Н. Федоров, А. А. Шестакова, Я. И. Торговкин, Н. Ф. Васильев // География и природные ресурсы. – 2025. – Т. 45. – № S6. – С. 18-25.

20 Ефимов, А. И. Погребенные льды района оз. Абалах / А. И. Ефимов, Н. А. Граве // Социалистическое строительство. – Якутск, 1940. – № 10–11. – С. 65–78.

21 Варламов С. П. Постпирогенная динамика гидротермического состояния грунтов криоитозоны Якутии / С. П. Варламов, П. Н. Скрябин // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 5. – С. 105–110.

22 Fedorov A. N., Konstantinov P. Y., Vasilyev N. F., Shestakova A. A. 2019. The influence of boreal forest dynamics on the current state of permafrost in Central Yakutia, Polar Science, 22, UNSP 100483. https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.100483.

23 Шестакова, А. А. Картографирование мерзлотных ландшафтов с учетом сукцессий растительности (на примере Приленского плато) / А. А. Шестакова.: автореф. дис. … канд. геогр. наук – Якутск, 2011. – 20 с.

## ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ И МОНИТОРИНГ МЕРЗЛОТЫ

***В.З. Хилимонюк, Коренкова Е.С., С.Н. Булдович***

*МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, г. Москва*

**Введение**

Криолитозона представляет собой область распространения многолетнемёрзлых пород и занимает около 60–65% территории России. В обширных районах Крайнего Севера и Сибири инженерно-экологические изыскания имеют особую специфику, поскольку выполняются в условиях, где состояние природной среды и устойчивость сооружений во многом определяются геоккриологическими процессами. Многолетнемёрзлые породы содержат лёд, а их верхняя часть подвержена сезонному промерзанию и протаиванию, поэтому даже незначительные изменения теплообмена способны привести к изменению свойств грунтового основания, развитию опасных геокриологических процессов и нарушению устойчивости инженерных объектов [1, 3].

В современных условиях данная проблема приобретает особую актуальность в связи с климатическим потеплением и усиливающейся деградацией мерзлоты. Изменение температурного режима многолетнемёрзлых грунтов ведёт к просадкам, развитию термокарста, заболачиванию, деформациям поверхности, а также повышает вероятность аварий с серьёзными экологическими последствиями. В этих условиях инженерно-экологические изыскания в криолитозоне нельзя рассматривать только как стандартную процедуру оценки компонентов окружающей среды, поскольку без учёта состояния мерзлоты такая оценка оказывается неполной.

Основная проблема заключается в том, что действующая нормативная база недостаточно чётко отражает необходимость специального учёта геокриологических условий именно в составе инженерно-экологических изысканий. На практике экологическая часть изысканий ориентирована главным образом на оценку состояния почв, вод, растительности, загрязнения среды и других компонентов, тогда как мониторинг термодинамического состояния многолетнемёрзлых грунтов не закреплён как обязательный элемент. Между тем именно мерзлота в криолитозоне является важнейшим фактором, определяющим как устойчивость ландшафтов, так и безопасность строительства и эксплуатации объектов [2].

Показательно, что недоучёт мерзлотного фактора способен приводить не только к инженерным деформациям, но и к крупным экологическим нарушениям. Это особенно наглядно проявляется в случаях аварий на северных территориях, когда потеря устойчивости мерзлого основания становится причиной разрушения сооружений и загрязнения окружающей среды. Тем самым становится очевидно, что при инженерно-экологических изысканиях в криолитозоне необходимо рассматривать

мерзлоту не как фоновое условие, а как один из ключевых элементов природной и техногенной системы.

Цель доклада состоит в том, чтобы показать специфику инженерно-экологических изысканий в криолитозоне и обосновать необходимость включения мониторинга состояния многолетнемёрзлых грунтов в программу таких работ. В связи с этим в докладе рассматриваются особенности криолитозоны как района инженерного освоения, анализируются существующие нормативные ограничения, а также показывается, почему учёт температурного режима грунтов, глубины сезонного протаивания и общего состояния мерзлого основания должен стать обязательной частью инженерно-экологических изысканий.

**Нормативная база и существующие ограничения**

Нормативное регулирование инженерно-экологических изысканий в криолитозоне основано на нескольких документах, каждый из которых затрагивает лишь отдельные стороны проблемы. В результате мерзлотные условия в целом учитываются, однако единое и однозначное требование по обязательному мониторингу температурного состояния многолетнемёрзлых грунтов именно в составе инженерно-экологических изысканий отсутствует.

Основным документом, регламентирующим инженерно-экологические изыскания для строительства, является СП 502.1325800.2021. Он предусматривает комплексное изучение природных условий территории, включая климат, рельеф, геологическое строение, опасные процессы, состояние компонентов окружающей среды, а также почвы, растительность, животный мир, водные объекты, ландшафтную структуру и историю использования территории. Тем самым СП 502.1325800.2021 задаёт широкий круг рассматриваемых факторов, однако его акцент сделан прежде всего на экологических компонентах среды и последствиях хозяйственного освоения. Прямого требования мониторинга термофизического состояния мерзлоты в документе нет; для районов с особыми условиями лишь предписывается учитывать специальные нормативные документы, но необходимость систематических наблюдений за температурным режимом многолетнемёрзлых грунтов прямо не закреплена [8].

СП 446.1325800.2019, посвящённый инженерно-геологическим изысканиям, учитывает мерзлотный фактор значительно полнее. Для районов распространения многолетнемёрзлых пород он требует получения данных об условиях их залегания, льдистости, прочностных, деформационных и теплофизических свойствах, развитии криогенных процессов, а также о надмерзлотных и подмерзлотных водах. Кроме того, документ предусматривает прогноз опасных геокриологических процессов и рекомендации по мониторингу. Однако и здесь мониторинг рассматривается главным образом как мера, сопровождающая строительство и эксплуатацию, а не как обязательная часть инженерно-экологических изысканий на предпроектной стадии. Иными словами, СП 446.1325800.2019 подробно определяет, какие сведения о мерзлоте необходимо получать, но не решает вопрос об обязательном включении температурного мониторинга в программу инженерно-экологических работ [6].

Наиболее близок к рассматриваемой теме СП 493.1325800.2020, регулирующий инженерные изыскания в районах распространения многолетнемёрзлых грунтов. В части инженерно-экологических изысканий он прямо требует учитывать мерзлотные условия: фиксировать состояние грунтов, их сплошность, мощности сезонно-талого и сезонно-мёрзлого слоёв, льдистость, глубину и характер залегания многолетнемёрзлых грунтов. Тем самым документ вводит геокриологические характеристики в состав инженерно-экологических изысканий в криолитозоне. Однако и в этом случае речь идёт в основном о фиксации параметров при обследовании территории, тогда как прямого требования организовывать мониторинг температурного состояния мерзлоты как обязательный элемент инженерно-экологических изысканий не содержится. В перечне дополнительных и специальных работ упоминается экологический мониторинг компонентов окружающей среды, но не специальный температурный мониторинг многолетнемёрзлых грунтов [7].

**Специфика криолитозоны и необходимость мониторинга мерзлоты**

Районы распространения многолетнемёрзлых пород требуют особого подхода к инженерно-экологическим изысканиям, поскольку мерзлота здесь выступает не только как геологическое основание сооружений, но и как важный элемент природной среды. Её состояние во многом определяет рельеф, гидрологический режим, влажность и свойства почв, структуру растительного покрова и, в целом, устойчивость ландшафтов. Поэтому любые изменения мерзлотных условий затрагивают не только инженерную, но и экологическую составляющую освоения территории. Деградация многолетнемёрзлых пород сопровождается развитием термокарста, просадок, заболачивания и перестройкой экосистем, а потеря льда и прочности мерзлых грунтов приводит к

деформациям фундаментов, зданий и линейных сооружений, повышая вероятность техногенных аварий, в том числе с загрязнением окружающей среды [3, 4, 5].

Именно поэтому мониторинг мерзлоты следует рассматривать как необходимую часть инженерно-экологических изысканий в криолитозоне. Это связано с тем, что процессы протаивания и перераспределения льда носят инерционный характер и нередко продолжаются уже после окончания строительства, тогда как деформации могут проявляться спустя значительное время после первоначального воздействия. В таких условиях без систематических наблюдений трудно достоверно прогнозировать как изменение геокриологических условий, так и связанные с ними экологические последствия. Мониторинг должен включать контроль температурного режима грунтов, глубины сезонного протаивания и промерзания, а также состояния основания на всех стадиях освоения территории — от проектирования до строительства и эксплуатации. Только такой подход позволяет своевременно выявлять неблагоприятные тенденции, оценивать устойчивость природных и техногенных систем и принимать превентивные инженерные и природоохранные меры.

**Практические примеры последствий**

Практические примеры показывают, что недоучёт мерзлотных условий способен приводить не только к инженерным деформациям, но и к серьёзным экологическим последствиям. Одним из наиболее показательных случаев является авария в Норильске 29 мая 2020 г., когда вследствие просадки свайного основания резервуара, связанной с изменением состояния мерзлых грунтов, произошла разгерметизация и разлив более 20 тыс. т дизельного топлива. Этот случай наглядно продемонстрировал, что отсутствие своевременного контроля за состоянием мерзлого основания может привести к крупномасштабной техногенной аварии с тяжёлым экологическим ущербом.

Не менее показателен пример полигонов твёрдых коммунальных отходов в криолитозоне. Действующие нормативные требования к их размещению и эксплуатации носят общий характер и не учитывают в достаточной мере специфику многолетнемёрзлых грунтов. В частности, при выборе площадок не всегда принимаются во внимание высокая неоднородность мерзлотных условий, наличие несквозных таликов в логах и оврагах, а также тепловое воздействие самого полигона на грунты основания. Между тем в теле полигона формируется устойчивый очаг повышенных температур, что может вызывать протаивание мерзлоты, образование таликов и создавать условия для миграции фильтрата и загрязняющих веществ в подземные, в том числе подмерзлотные, водоносные горизонты. При этом наблюдения обычно ограничиваются контролем грунтовых и поверхностных вод по периферии объекта, тогда как температурный режим грунтов в основании полигона и в зоне его влияния, как правило, не отслеживается.

Приведённые примеры показывают, что игнорирование мерзлотного фактора при инженерно-экологических изысканиях повышает риск как аварий на объектах инфраструктуры, так и долговременного негативного воздействия на окружающую среду. Именно поэтому учёт геокриологических условий и мониторинг состояния многолетнемёрзлых грунтов должны рассматриваться как необходимая часть оценки экологической безопасности в криолитозоне.

**Предложения по совершенствованию подхода**

В связи с выявленными ограничениями действующей нормативной базы представляется целесообразным дополнить программы инженерно-экологических изысканий в криолитозоне обязательным учётом геокриологических параметров. Речь идёт не только о фиксации распространения многолетнемёрзлых грунтов, но и о систематическом учёте их температурного состояния, мощности мерзлой толщи, параметров сезонно-талого и сезонно-мёрзлого слоёв, льдистости, а также наличия таликовых зон. Такой подход позволил бы уже на предпроектной стадии более полно оценивать устойчивость территории и возможные экологические последствия её освоения.

Принципиально важным представляется нормативное закрепление необходимости мониторинга термодинамического состояния многолетнемёрзлых грунтов в составе инженерно-экологических изысканий. В условиях криолитозоны именно температурный режим грунтов во многом определяет развитие опасных геокриологических процессов, изменение несущей способности основания и вероятность последующих деформаций. Поэтому мониторинг мерзлоты следует рассматривать не как дополнительную рекомендацию, а как обязательный элемент инженерно-экологического сопровождения строительства в районах распространения многолетнемёрзлых пород.

Кроме того, целесообразно предусматривать создание системы наблюдательных точек, функционирующих на всех стадиях освоения территории — в период изысканий, строительства и эксплуатации. Такие наблюдения должны включать контроль температуры грунтов, глубины сезонного протаивания и промерзания, а также состояния основания. Речь должна идти не только о

разовых измерениях в отдельных скважинах, но и о долговременной системе наблюдений, позволяющей своевременно фиксировать неблагоприятные тенденции и корректировать природоохранные и инженерные решения.

Наконец, представляется важным рассматривать экологический и геокриологический мониторинг как единый комплекс. В криолитозоне состояние мерзлоты непосредственно связано с устойчивостью ландшафтов, режимом поверхностных и подземных вод, миграцией загрязняющих веществ и общим состоянием экосистем. Поэтому оценка экологической безопасности должна включать не только наблюдения за традиционными компонентами окружающей среды, но и систематический контроль мерзлотных условий.

**Заключение**

Специфика инженерно-экологических изысканий в криолитозоне состоит в том, что экологический анализ должен быть дополнен обязательным учётом состояния и динамики многолетнемёрзлых грунтов. Без этого невозможно надёжно оценивать устойчивость территории, прогнозировать развитие опасных процессов и в полной мере учитывать инженерные и экологические риски. Поэтому геокриологический подход и мониторинг мерзлотных условий должны рассматриваться как необходимая часть инженерно-экологических изысканий в районах распространения многолетнемёрзлых пород.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова № АААА-А16-116033010094-4 «Теоретические основы геокриологического прогноза и картирования криолитозоны России»

***Литература***

1. Кудрявцев, В. А. и остали. Мерзлотоведение: краткий курс: учебное пособие / В. А. Кудрявцев, Н. Ф. Полтев, Н. Н. Романовский В ряде источников цитируется как «Кудрявцев, 1980». – Москва: Издательство Московского университета, 1981. – 240 стр.

2. О проблемах градостроительства в криолитозоне (на примере Якутска) / О. И. Алексеева, В. Т. Балобаев, М. Н. Григорьев и остали // Криосфера Земли. – 2007. – Том XI. – № 2. – Стр. 76-83.

3. Основы геокриологии. Часть 3. Региональная и историческая геокриология мира / ур. Э. Д. Ершов. – Изд-во МГУ. – Москва, 1998. – 575 стр.

4. Основы геокриологии. Часть 4: Динамическая геокриология / ур. Э. Д. Ершов. – Москва: Изд-во МГУ, 2001. – 688 стр.

5. Романовский, Н. Н. Основы криогенеза литосферы: Учебное пособие / Н. Н. Романовский. – Москва: Издательство МГУ, 1993. – 336 стр.

6. СП 446.1325800.2019. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. – Москва: Стандартинформ, 2019.

7. СП 493.1325800.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – Москва: Стандартинформ, 2020.

8. СП 502.1325800.2021. Инженерно-экологические изыскания для строительства. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 94 стр.

## КРИОГЕННЫЙ ФАКТОР ПРИ ФОРМИРОВАНИИ И ЛОКАЛЬНОМ РАЗРУШЕНИИ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ЗОН В МЁРЗЛЫХ ПОРОДАХ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

***А. Н. Хименков***

*Институт геоэкологии РАН, г. Москва*

**Введение**

Проблема газонасыщенных мёрзлых пород привлекает всё большее внимание исследователей. Это связано с многочисленными взрывами, при проведении буровых работ, колоссальными объёмами парниковых газов, поступающих в атмосферу с территорий, занятых криолитозоной, мощными естественными взрывными процессами, формирующими воронки газового выброса на северных территориях и арктическом шельфе. Предлагаемый доклад посвящен рассмотрению роли криогенного фактора в формирования газонасыщенных зон в мёрзлых породах на севере Западной Сибири.

**Формирование газонасыщенных зон в многолетнемёрзлых породах**

По своему генезису многолетнемёрзлые породы представлены преимущественно морскими осадками. Следовательно, для правильного понимания особенностей строения особенностей их строения, в том числе и газонасыщения, необходимо выяснить закономерности перехода субаквальных осадков в субаэральные. Формирование мёрзлых пород на севере Западной Сибири начинается в переходной зоне, где субаквальное морское осадконакопление постепенно заменяются континентальным субаэральным. Именно здесь морские осадки переходят в субаэральное положение и промерзают. Формирование многолетнемёрзлых пород начинается с момента смерзания немёрзлых субаквальных осадков с припайным льдом. На них начинает оказывать влияние мощное зимнее охлаждение. С этого момента, собственно, и начинается формирование сцементированных льдом многолетнемерзлых пород. На побережьях, сложенных рыхлыми отложениями, берег выдвигается в море в результате образования совершенно нового элемента — берегового бара. Рост баров приводит к появлению изолированных участков морского дна, на которых возникают лагуны. Формирование баров и лагун — обязательный этап развития "берегов поднятий". Лагуны, как правило, в центральной части сложены глинистыми осадками, которые ближе к берегу переходят в песчаные илы

Особенностью формирования ММП на севере Западной Сибири в среднем плейстоцене заключалась в том, что выход на поверхность участков морского дна и промерзание осадков происходило не в результате отступания береговой линии с юга на север. Сначала на поверхность выходили участки морского дна, далеко отстоящие от береговой материковой линии, сложенные как правило, глинистыми осадками. Специфика промерзания отдельных островов, выходящих из-под уровня моря приводит к отжатию грунтовых вод к их периферийной части. Распределение льдистости соответствует типичному распределению влажности в морских осадках. Завершается формирование монолитных мерзлых толщ, на фоне направленной регрессии (или тектонических движений) образуются серии морских террас, широко развитых в районах, прилегающих к Северному Ледовитому океану. На рис. 1. показано распределение суши и моря в разные периоды плейстоцена. Хорошо видно, что наиболее льдистые морские толщи приурочены к областям широкого распространения мелководий, изолированных и полуизолированных акваторий, далеко отстоящих от материковой береговой линии [1]. Понижение уровня моря и формирование III каргинской морской террасы привело к промерзанию водонасыщенных осадков криогенной концентрации внутригрунтовых, что определило образование большого количества пластовых залежей (рис. 2) [2]. Специфика палеогеографической обстановки каргинского времени состоит в том, что осадки многочисленных заливов и проливов залегали среди значительных территорий, сложенных мёрзлыми отложениями. В этих условиях формируется мёрзлый экран, являющийся ловушкой для УВГ перекрывающий выход углеводородных газов. Внутригрунтовые газы и соли отжимаются из области льдообразования и в конечном итоге концентрируются под пластовыми залежами. При эпигенетическом промерзании водонасыщенных морских осадков, происходит отжимает свободный воды и газа, вниз по разрезу, вглубь промерзающего массива.

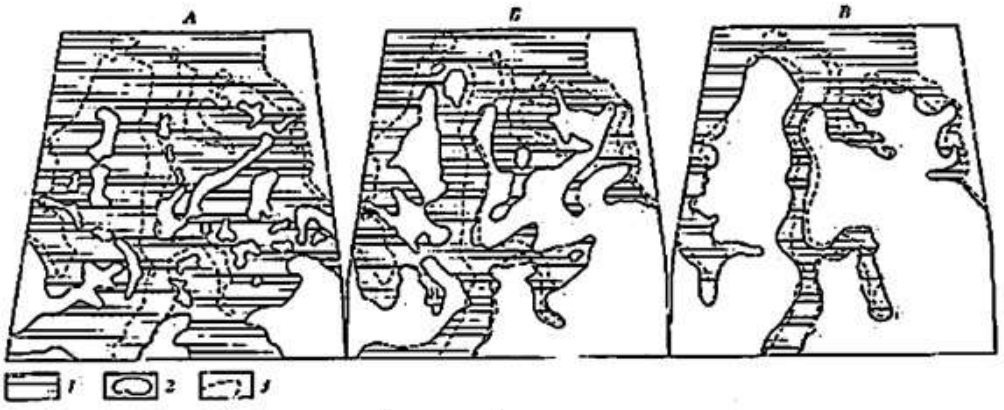



Рис. 1. Распределение суши и моря на севере Западной Сибири
А - максимум казанцевской трансгрессии; Б – максимум каргинской трансгрессии; В – конец каргинской трансгоессии; 1- море; 2 – суша; 3 – современная береговая линия [1].

**Некоторые показатели газонасыщенных зон в многолетнемёрзлых породах**

Особенностью геологического строения северных районов Западно - Сибирского нефтегазоносного бассейна и, в частности, Ямальской нефтегазоносной области является наличие в

верхней, надпродуктивной, части разреза, на глубинах от 15...30 до 260...270 м, пород, находящихся под действием избыточнот давления (геостатическое давление здесь преобладает над гидростатическим). Эго обусловлено быстрым накоплением осадков в течение позднего мела — олигоцена — антропогена с последующим их промерзанием в позднеказанцевскую эпоху до глубины 105...265 м и формированием толщи многолетнемерзлых пород (ММП) [3].

В качестве примера расссмотрим данные по строению мёрзлых пород Бованенковского ГКМ. Здесь практически все газовые проявления приурочены к оторфованным пылеватым пескам, встречающимся в разрезе мёрзлой толщи до глубин порядка 130 м. К песчаным слоям и линзам приурочены газопроявления различной интенсивности и продолжительности. Газ находятся в свободной форме или в виде газогидратов. Более 85% газопроявлений зафиксированы на глубинах порядка 60-80 м. Дебиты газовых выбросов колеблются от 50 до 14000 $м^3$/сут., при средних значениях порядка 800–1000 $м^3$/сут. В одной из скважин (64-П -2) в интервале 72-80 м запас газа был оценён в 490 тыс. $м^3$, а площадь газовой залежи в 80 тыс. $м^2$[4]. Газ в мёрзлых породах может содержаться в твёрдом виде в форме газогидратов. Вероятно, данное распределение концентрации газа связано с тем, что еще до промерзания в не промёрзших субаквальных осадках, над тектоническими газоносными наблюдается повышенное содержание газов, что было рассмотрено выше. Промерзание лишь зафиксировало это. Изучение газосодержания образцов, отобранных на Бованенковском ГКМ показало, что объем выделившегося при оттаивании кернов пород с повышенным содержанием газа значительно превышал объем свободного порового пространства. количество газа может превышать свободную пористость на 2-3 порядка [5], при этом показатель пористости может достигать 50% [6]. Это дает все основания полагать, что часть исследованных образцов содержит реликтовые газовые гидраты в поровом пространстве.

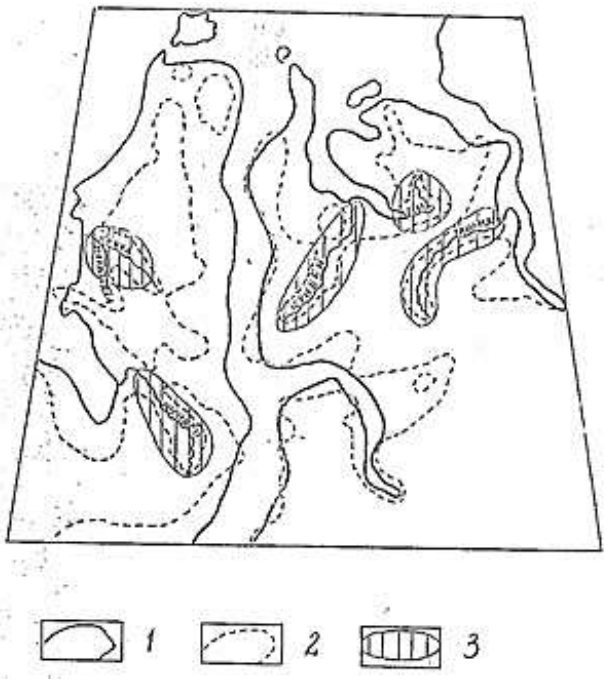



Рис. 2. Встречаемость массовых выходов пластовых льдов на севере Западной Сибири).
1-современная береговая линия; 2- граница береговой линии в максимум каргинской ингрессии; 3-районы с многочисленными пластовыми залежами [2]

**Локальное разрушение газонасыщенных зон в многолетнемёрзлых породах**

Следует отметить, что криогенный фактор является значимым не только для формирования газонасыщенных зон, но и при их локальном разрушении в ходе образования воронок газового выброса. Их общее количество выявленных и изученных к настоящему времени превысило 20. В отношении причин концентрации больших объёмов подземного газа, приводящего в конечном итоге к пневматическому взрыву сформировалось 2 позиции. В соответствие с первой, воронки газового выброса сформировались за счёт криогенной концентрации газа в ходе всестороннего промерзания озёрных таликов. Происходящие при этом, процессы аналогичны тем, что формируют основное количество бугров пучения существующих в криолитозоне [7, 8]. Проведённый анализ данных по криогенным образованиям воронок газового выброса, показывает, что подготовка пневматического взрыва отличается от традиционных представлений. Она проходит в твёрдом субстрате мёрзлых

льдистых грунтов и подземных льдов. В многолетнемёрзлых породах формировались локальные газонасыщенные зоны с повышенным давлением газа, под действием которого льдистые грунты выжимались вверх, с образованием бугров пучения. После того, как предел длительной прочности мёрзлой кровли был преодолён, происходит взрыв и формирование воронки [9]. Другая позиция базируется на выделении ведущей роли тектонических нарушений, по которым глубинный газ поступает в поверхностные слои мёрзлых пород [10, 11 и др.]. Данные по местоположению и строению воронок газового выброса показывает, отсутствие прямой связи данных образований с поступлением к ним газа по разломам. При этом, выходов глубинных газов в местах пневматических взрывов не обнаружено. А состав газов имеет поверхностное происхождение. Образованию воронок всегда предшествует рост бугров пучения. Авторы, придерживающиеся гипотезы о тектонической причине движения газов к поверхности считают, что и рост значительного количества бугров пучения связан с этой причиной. В доказательство приводятся данные показывающие наличие границ изменения геофизических параметров приуроченные к краевым частям бугров пучения, трактующиеся, как тектонические разломы [12]. Данный подход неочевиден и требует научного обоснования. Вертикальные границы приуроченные к буграм пучения, выделяемые по геофизическим данным, вполне обоснованно объясняются геокриологическими причинами. Бугры пучения представляют из себя ледяное тело, при своём росте продавливающее вмещающие породы. По краям растущего бугра пучения всегда развивается зона сдвиговых деформаций. Бугор пучения начинает развиваться на месте подозёрного талика. Граница талого и мерзлого грунтов всегда резкая. В сквозных таликах это будет вертикальная граница пронизывающая всю толщу многолетнемёрзлых пород. В случае несквозного талика расположенные под ним мёрзлые породы имеют более высокую температуру и соответственно свойства, отличающие их от окружающих мёрзлых массивов. В этом случае также формируется граница между высокотемпературной мерзлотой под таликом и окружающими мёрзлыми породами. Канадскими геофизиками, исследовавшими таликовые зоны под озёрами выявлено, что под ними формируются зоны пониженных скоростей в виде перевёрнутых конусов. Пониженные скорости объясняются авторами тем, что повышение температуры приводит к увеличению количества незамёрзшей воды и появлению газовых пузырьков и газовых каналов [12, Алан Тейлор [13] выделяет эти зоны, как ≪геофизические талики≫, которые в отличие от термальных таликов с положительной температурой являются мёрзлыми и при этом содержат значительное количество незамёрзшей воды. ≪Геофизические талики≫ имеют трубообразную форму и проникают в окружающие низкотемпературные многолетнемёрзлые породы на глубину до 200 и более метров. И если на пути растущей зоны растепения встретится горизонт метастабильных газогидратов или локальная газонасыщенная область с высоким давлением (газовый карман), то создаются условия для движения газа по этим каналам газовых флюидов к поверхности. В рамках геокриологии, методики выделения температурных границ, формы и размеров таликов, а также и зон растепления мёрзлых пород под озёрами разработаны. Они выделены и изучены в ходе многочисленных исследований. Эти границы останутся и при формировании бугров пучения. В этом случае, представления о необходимости тектонических разломов для миграции газа к поверхности излишни, их надо обосновывать, а не назначать.

**Заключение**

Криогенный фактор является определяющим при формировании и разрушении газонасыщенных зон в многолетнемёрзлых породах севера Западной Сибири.

***Литература***

1. Хименков А.Н., Брушков А.В. Океанический криолитогенез. - М.: Наука, 2003. - 335с.

2. Хименков А.Н. Формирование криогенного строения морских отложений: Автореф. дис. канд. г.–м. наук. - М.: ПНИИИС, 1985. - 24с.

Статьи

3. Бондарев В. Л., Миротворский М. Ю., Облеков Г. И., Шайдуллин Р. М., Гудзен В. Т. Геохимические методы при обнаружении и локализации залежей углеводородных газов (УВГ) в надпродуктивных отложениях газоконденсатных месторождений п-ва Ямал // Геология, геофизика разработка нефтяных и газовых месторождений. - 2005. - № 11. - С. 17-22.

4. Бондарев В.Л., Миротворский М.Ю., Зверева В.Б., Облеков Г.И., и др. Газохимическая характеристика надсеноманских отложений полуострова Ямал (на примере Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. - 2008. - № 5. - С.22-34

5. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т.2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения - .М.: Газпром Экспо. - 2013. – 423с.

6. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. - 1998. - Т. II. - № 4. - С. 42-50.

7. Баду Ю. Б., Никитин К. А. Бугры пучения на площади газоносных структур севера Западной Сибири // Криосфера Земли. - 2020. - Т. XXIV. - № 6. - С. 21–32.

8. Buldovich S.N., KhilimonyukV.Z., BychkovA.Y ., Ospennikov E.N., VorobyevS.A., Gunar A.Y ., Gorshkov E.I., Chuvilin E.M., Cherbunina M.Y ., Kotov P.I., Lubnina N.V., Motenko R.G., Amanzhurov R.M. Cryovolcanism on the earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal peninsula (Russia) // Scientific reports. - 2018. – Pp. 1-6.

9. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Воронки газового выброса как объект геокриологии (Часть 1) // Арктика и Антарктика. - 2025. - № 2. – С. 96-116.

10. Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // Арктика: экология и экономика. - 2021. - Т. 11. - № 1. - С. 51—66.

10. Chuvilin E., Sokolova N., Davletshina D., Bukhanov B., Stanilovskaya Ju., Badetz C., Spasennykh M. Conceptual Models of Gas Accumulation in the Shallow Permafrost of NorthernW est Siberia and Conditions for Explosive Gas Emissions // Geosciences. - 2020. - №10, - Pp. 1-13.

11. Буддо И. В. Мисюркеева Н. В., Шелохов И. А., Шеин А., Добрынина А. А., Смирнов А. С., Черных А. А., Шашкеева Л. П. Опыт комплексирования геофизических методов при изучении возможных проявлений флюидодинамических процессов в Арктике. Материалы первой российской конференции/ пос. Листвянка. - 2024. - С. 57-61.

12. Majorowicz J., Osadetz K., Safanda J. Models of Talik, Permafrost and Gas Hydrate Histories — Beaufort Mackenzie Basin, Canada. // Energies. - 2015. - №8. - Pp. 6740 – 6764.

13. Taylor A.E., Dallimore S.R. and Wright J.F. Thermal impact of Holocene lakes on a permafrost landscape, Mackenzie Delta, Canada. In: Kane D.L. and Hinkel K.M., (ed.), Ninth International Conference on Permafrost. -1998. - №2. –Pp. 1757-1762.

## ТЕРМОЦИРКИ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ: МОНИТОРИНГ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОПАСНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

***А.В. Хомутов, М.О. Лейбман, Е.А. Бабкина, Д.В. Бурдак, М.М. Данько***
*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень*

В типичной тундре полуострова Ямал широко распространены пластовые подземные льды [1]. На фоне сохраняющегося тренда повышения температур воздуха в Арктике [2] происходит активизация криогенных процессов в результате вытаивания пластовых льдов [3-5]. Согласно разработанной классификации [6, 7] с вытаиванием залежеобразующих подземных льдов из толщи многолетнемерзлых пород связана активизация криогенных оползней течения (КОТ) с последующим формированием соответствующих форм рельефа (КОТФР), как правило, представляющих из себя термоцирки.

С 2012 г. на фоне резкой климатогенной активизации КОТ [8], приведшей к значительному увеличению числа термоцирков на полуостровах Ямал и Гыданский [9], актуальным стали их мониторинг и картографирование опасности возникновения. В особенности это актуально на территориях, активно вовлеченных в хозяйственную деятельность при нефтегазовом освоении. В центральной части полуострова Ямал, где помимо одного из крупнейших разрабатываемых нефтегазоконденсатных месторождений – Бованенковского, существуют другие разведанные месторождения углеводородов и активно развивается транспортная инфраструктура, концентрация КОТФР достигает местами более 120 единиц в каждой гексагональной ячейке 30 на 30 км, специально размеченной для анализа распространения таких форм рельефа [10].

В центральной части полуострова Ямал основная работа по изучению термоцирков сосредоточена на территории научно-исследовательского стационара «Васькины Дачи» [11] на междуречье рек Се-Яха и Морды-Яха, представляющей собой холмисто-увалистую равнину с узкими водоразделами и длинными пологими склонами, расчлененную узкими долинами малых рек и водотоков, овражно-балочной сетью, озерами и хасыреями. Глубина расчленения казанцевской и салехардской равнин достигает 40–50 м. Около 60 % территории занято пологими склонами крутизной до 7°, склоны

крутизной от 7 до 50° занимают около 10 % площади, а оставшиеся 30 % приходятся на вершинные части увалов, поймы рек и озера. На водораздельных поверхностях активно морозобойное растрескивание пород с образованием повторно-жильных льдов на торфяниках, распространенных в седловинах, и песчаных и песчано-ледяных жил на вершинах. В литологическом строении принимают участие песчаные породы со значительным содержанием пылеватых частиц. Склоновые отложения характеризуются песчаным составом вблизи бровки. Вниз по склону они сменяются супесчаными и суглинистыми, а подстилаются глинистыми породами. Важнейшим компонентом криогенного строения являются пластовые льды, которые распространены практически повсеместно и на изучаемой территории вскрывались на глубинах от 4 до 25 м скважинами при проведении изысканий для строительства ж/д линии Обская–Бованенково. Глубина сезонного протаивания в среднем не превышает 1,5 м на слабозадернованных поверхностях вершин с песчаными породами и сильнозадернованных поверхностях с высокими кустами и 0,9–1,0 м на задернованных поверхностях плоских водоразделов и склонов преимущественно с суглинистыми породами [8]. По данным термометрических скважин средняя годовая температура пород на подошве сезонно-талого слоя изменяется от близких к нулю значений на задернованной поверхности с высокими кустами до –5,2 °С на незадернованной вершинной поверхности. На глубине 10 м в скважине на незадернованной поверхности с песчаными породами с 2011 по 2025 г. средняя годовая температура пород увеличилась с –6,2 до –5,1 °С.

Регулярный полевой мониторинг термоцирков, проводимый на территории стационара с 2012-2013 гг. [12], послужил основой для анализа активности термоцирков в первые несколько лет после пика их массового формирования [13]. Этот анализ позволил сделать вывод, что активность криогенного оползания в изучаемом районе повысилась за счет аномальных климатических условий весенне-летнего сезона 2012 г., а затем к 2018 г. постепенно пошла на спад.

Начиная с 2018 г., основным полевым методом мониторинга активности термоцирков является использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для аэрофотосъёмки высокого разрешения. Для фиксации положения бровок проводится БПЛА-съемка с последующим построением ортофотопланов в программе Agisoft Metashape Pro. Основным аналитическим параметром при мониторинге выступает площадь термоцирка и динамика отступания его бровки. Оценка ежегодного прироста площадей термоцирков проводится путем совмещения и сравнения ортофотопланов разных лет в ГИС-пакете ESRI ArcGIS. Это позволяет количественно оценить ежегодный прирост площадей и выделить периоды наиболее активного роста.

Продолженный в 2020-2021 гг. мониторинг с использованием модуля Digital Shoreline Analysis System (DSAS) в ГИС-пакете ESRI ArcGIS для обработки данных полевой БПЛА-съемки показал существенную скорость отступания бровок термоцирков, находившихся в период с 2017 по 2021 г. в стадии активного роста [14].

К 2025 г. 6 термоцирков были охвачены регулярным полевым мониторингом. Включены как наблюдаемые с 2012-2013 гг, так и более свежие термоцирки (ТЦ-2m, возникший и обнаруженный в 2020 г., и ТЦ-Э, обнаруженный в 2023 г.). Для обеспечения сопоставимости данных все используемые ортофотопланы за предыдущие годы (2021-2024 гг.), так же, как и материалы мониторинга 2025 г., построены на основе БПЛА-съемок, проводимых во второй половине августа.

Данные мониторинга за период 2019-2025 гг. представлены в таблице 1. Положение бровок за 2019-2025 гг. для наиболее активного склона с термоцирками и за 2020-2025 гг. для ТЦ-2m показаны на рисунках 1 и 2.

Таблица 1

Результаты мониторинга термоцирков за период 2019-2025 гг. [15]

| Год | Площадь термоцирков (прирост), м$^2$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ТЦ-2 | ТЦ-2m | ТЦ-4,4а | ТЦ-5 | ТЦ-5n | ТЦ-Э |
| 2019 | 7519 | - | 5068 | 8296 | 8864 | - |
| 2020 | 7669(+150) | 166 | 5541(+473) | 9295(+999) | 12191(+3327) | |
| 2021 | нд | 1569(+1403) | 5934(+393) | 10505(+1210) | 16877(+4686) | |
| 2022 | 7889(+220) | 1692(+142) | нд | нд | нд | |
| 2023 | нд | нд | 6462(+528) | 11456(+951) | 25388(+8511) | 345 |
| 2024 | 7914(+56) | 1819(+127) | 6512(+59) | 11616(+160) | 30596(+5208) | 425(+80) |
| 2025 | z | 1866(+37) | 6570(+58) | 11927(+311) | 34355(+3759) | 471(+46) |

*Примечание:* нд – нет данных, z – признан заросшим

Для термоцирков, сформировавшихся в 2012–2013 гг. (ТЦ-2, ТЦ-5), к 2025 г. наблюдается тенденция к стабилизации. Термоцирк ТЦ-5n (рис. 1) сохраняет максимальные среди всех наблюдаемых в настоящее время термоцирков темпы роста. К 2025 г. его площадь достигла 34,3 тыс. м$^2$. Ключевым индикатором активности является состояние ледяной стенки: в 2024–2025 гг. её протяженность превышала 600 м. ТЦ-2m (рис. 2) и ТЦ-Э продолжают развитие, но темпы умеренные, особенно по сравнению с ТЦ-5n.

Продолжение регулярных полевых и дистанционных наблюдений вплоть до 2025 г. [15, 16] показало, что процессы термоденудации в центральной части полуострова Ямал остаются активными и пространственно-неоднородными, как в связи с климатическими колебаниями, так и в связи с ландшафтно-геоморфологическими условиями района исследований.

В связи с этим был продолжен анализ активности термоцирков. Для определения стадий активности термоцирков за последние годы использованы две онлайн-мозаики: ©EsriWorldImagery на базе снимков Maxar/ Vantor (Vivid) 2023 и 2024 гг. и Google Earth Pro на основе данных ©2025 Airbus за 2025 г. В результате выявлено 17 новых термоденудационных форм в дополнение к зафиксированным ранее [13], из них 9 новых «полных» термоцирков, возникших к 2023/2024 гг., еще 2 – к 2025 г., и 6 новых «эмбриональных» (зарождающихся) термоцирков (5 – к 2023/2024 и еще 1 – к 2025 г.).

Рис. 1. Положение бровок термоцирков ТЦ-5, 5n и 5m: 1 – 2019, 2 – 2020, 3 – 2021, 4 – 2023, 5 – 2024, 6 – 2025 гг.

Подавляющее большинство современных термоцирков приурочено к берегам озер и хасыреев, реже – к берегам мелких термокарстовых озерков, и еще реже – к берегам рек и бортам оврагов, балок и ложбин стока. В ландшафтном отношении к берегам озер и озерных котловин примыкают в основном плоские пологие склоны с кочковатыми разнотравно-злаково-моховыми ивняками с участием ерника на суглинках и глинах (8, здесь а далее индексы ПТК согласно [17]) и вогнутые пологие оползневые склоны с поверхностями скольжения древних оползней с разнотравно-злаковыми ивняками на суглинках и засоленных глинах (10), в разное геологическое время переработанные термоденудационными процессами. К таким склонам приурочено большинство современных крупных термоцирков. Также достаточно распространены довольно крутые береговые

уступы, подвергающиеся термоабразионному воздействию озерной воды и эрозионному воздействию речной воды в пределах пологохолмистых субгоризонтальных водораздельных поверхностей с полигональными кустарничково-травяно-лишайниковыми тундрами с раздувами* на песках и супесях, местами с травяно-кустарниково-моховыми тундрами на супесях и суглинках (1) и плоских субгоризонтальных водораздельных поверхностей с травяно-кустарниково-моховыми тундрами на супесях и суглинках, с участками полигональных травяно-кустарниково-лишайниково-моховых тундр на песках и супесях (3). К верхним частям таких склонов приурочено значительное число современных небольших термоцирков и КОТ, в том числе на границах с оврагами, балками, ложбинами стока и по берегам мелких термокарстовых озерков.

Разрабатываемые в настоящее время принципы картографирования опасности возникновения термоцирков основываются на предложенной ранее методике ландшафтной индикации глубины залегания пластовых льдов [18], анализе активности термоцирков и результатах не прекращающегося мониторинга ключевых термоцирков в центральной части полуострова Ямал.

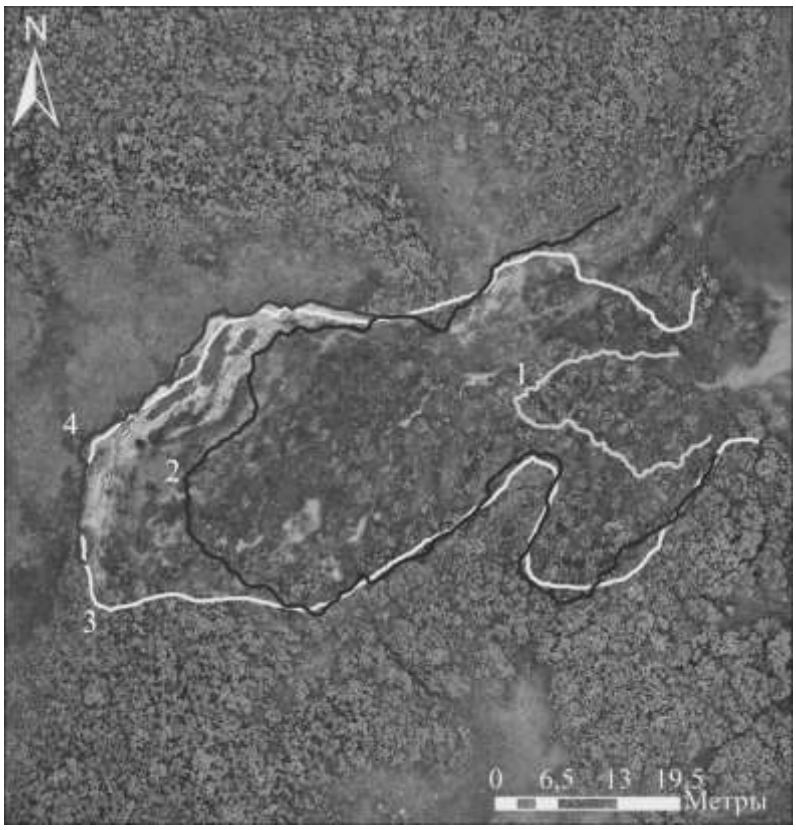



Рис. 2. Положение бровки термоцирка ТЦ-2n: 1 – 2020, 2 – 2021, 3 – 2024, 4 – 2025 гг.

Одним из наиболее значимых отличий подходов к картографированию опасности возникновения термоцирков от картографирования опасности возникновения криогенных оползней скольжения (КОС), предложенных ранее [17] является то, что даже в пределах зарастающих или уже стабильных термоцирков (как результата КОТ) и оползневых цирков (как результата КОС) могут вновь сойти КОТ при увеличении суммы положительных температур воздуха в сочетании с высокими летними осадками за счет достижения сезонным протаиванием кровли пластового льда. На этом и должна основываться классификация выделенных на ландшафтной карте природно-территориальных комплексов (ПТК) по опасности возникновения термоцирков.

Работа выполняется в ИКЗ ТюмНЦ СО РАН в рамках гос. задания Минобрнауки РФ (рег. № 126022618021-5).

***Литература***

1 Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. – М.: ГЕОС, 2002. – 246 с.

2 Переведенцев Ю.П., Васильев А.А., Гурьянов В.В., Мирсаева Н. А., Николаев А.А. Тенденции изменения основных климатических показателей на территории России в период 1976–2023 годов. – Метеорология и гидрология. – 2025. – №10. – С. 44-62.

3 Воскресенский К.С., Совершаев В.А. Роль экзогенных процессов в динамике арктических побережий. Динамика арктических побережий России. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – С. 35-48.

4 Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. – М.: Институт криосферы земли СО РАН. 2007. – 206 с.

5 Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., et al. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // Nature Geoscience. – 2016. – V.9(4). – P. 312-318.

6 Лейбман М.О. Криогенные склоновые процессы и их геоэкологические последствия в условиях распространения пластовых льдов: Автореф. дис. … д-ра геол.-мин. наук. – Тюмень. – 2005. – ИКЗ СО РАН. – 48 с.

7 Лейбман, М. О., Кизяков, А. И., Нестерова, Н. Б., Тарасевич, И. И. Классификация криогенно-оползневых форм рельефа для целей картографирования и прогноза // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2023. – Т.69. – №4. – С. 486-500.

8 Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факащук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. – 2019. – №4. – С. 99-109.

9 Нестерова Н.Б., Хомутов А.В., Лейбман М.О., Сафонов Т.А., Белова Н.Г. Инвентаризация термоцирков на Севере Западной Сибири по данным мозаики спутниковых снимков 2016–2018 годов // Криосфера Земли. – 2021. – Т.XXV. – №6. – С. 41-50.

10 Nesterova N., Tarasevich I., Leibman M. Khomutov A., Kizyakov A., Nitze I., Grosse G. High-resolution inventory and classification of retrogressive thaw slumps in West Siberia // Earth System Science Data. – 2025. – V.17. – P. 5707-5727.

11 Лейбман М.О., Хомутов А.В. Стационар «Васькины Дачи» на Центральном Ямале: 30 лет исследований // Криосфера Земли. – 2019. – Т.23. – №1. – С. 91-95.

12 Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., Khairullin R. Activation of Cryogenic Earth Flows and Formation of Thermocirques on Central Yamal as a Result of Climate Fluctuations / Advancing Culture of Living with Landslides: Proceedings of World Landslide Forum 4. – 29 May–2 June 2017. – Ljubljana, Slovenia. – V.5 Landslides in Different Environments. – P. 209-216.

13 Хомутов А.В., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А. Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2024. Т. 70. – №2. – С. 222–237.

14 Тарасевич И.И., Кизяков А.И., Лейбман М.О., Письменюк А.А., Нестерова Н.Б., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Динамика термоденудации на Центральном Ямале за 2017–2021 гг. // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып.9. – 2022. – С. 253-257.

15 Бурдак Д.В., Хомутов А.В., Данько М.М. Результаты полевого мониторинга термоцирков на Центральном Ямале в 2025 г. // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-запада России. – Вып.12. – 2025. – С. 270-275.

16 Тарасевич И.И., Лейбман М.О., Кизяков А.И., Нестерова Н.Б., Хомутов А.В. Распространение и динамика термоцирков на ключевом участке Центрального Ямала по материалам дистанционного зондирования // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2024. Т. 70. – №3. – С. 391-411.

17 Хомутов А.В., Лейбман М.О. Оценка опасности проявления криогенных оползней скольжения в тундре Центрального Ямала // Криосфера Земли. – 2016. – Т.XX. – №2. – С. 49-60.

18 Хомутов А.В., Лейбман М.О., Андреева М.В. Методика картографирования пластовых льдов Центрального Ямала // Вестник Тюменского государственного университета. – 2012. – №7 Науки о Земле. – С. 76-84.

## МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОТТАИВАЮЩЕГО ГРУНТА НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ЭШЕЛБИ

***М.Н. Царапов***

*Научно-производственное предприятие МГУ (Научный Парк МГУ), г. Москва*

К настоящему времени накоплен достаточно большой экспериментальный и теоретический материал по закономерностям развития осадок оттаивающих грунтов различного состава и строения, полученных на предложенном методе [1]. Метод основан на определении деформационных характеристик (коэффициентов оттаивания $A_{th}$ и сжимаемости $m_{th}$) оттаивающих грунтов в компрессионных условиях при соблюдении плоскопараллельного оттаивания.

Однако деформирование мерзлых грунтов при оттаивании представляет собой сложный термо-гидро-механический процесс [2,3,4]. Оттаивание мёрзлых грунтов сопровождается фазовыми переходами лёд → вода, при котором происходит изменение объёма поровой влаги и перераспределения напряжений в грунтовом скелете, а также процесс фильтрационной консолидации с повышенным давлением.

Традиционные феноменологические модели оттаивания основаны на эмпирических коэффициентах (коэффициент оттаивания $A_{th}$, коэффициент сжимаемости $m_{th}$), которые не учитывают микроструктурные особенности мёрзлого грунта — форму, размер и распределение ледяных включений.

Если рассматривать микромеханическую модель мерзлого грунта с точки зрения механики композитов, то оттаивающий мерзлый грунт можно представить, как трёхфазную композитную систему в следующем виде: матрица - грунтовый скелет, состоящий из минеральных частиц и незамёрзшей воды; включения - ледяные образования многообразной морфологии и поры как воздушные включения.

Поэтому для рассмотрения напряжённо-деформируемого состояния оттаивающего грунта предлагается применить фундаментальный инструмент микромеханики гетерогенных материалов называемым принципом Эшелби. Согласно этому принципу, напряжённо-деформированное состояние вокруг эллипсоидального включения в бесконечной упругой матрице может быть описано аналитически через тензор Эшелби $S$ [5]. Физический смысл тензора Эшелби состоит в описании связи между собственной деформацией $\varepsilon^*_{kl}$ (деформация, которую включение (лед) имело бы в свободном состоянии) и полной деформацией $\varepsilon_{ij}$ включения (льда) в матрице. Данные деформации связаны следующим соотношением:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}\varepsilon^*_{kl} \quad (1)$$

где $S_{ijkl}$ - тензор является фундаментальным в механике композитных материалов и позволяет рассчитывать эффективные упругие свойства гетерогенных сред.

Исследования были направлены на возможность применения микромеханической модели деформирования оттаивающего грунта на основе принципа Эшелби с учётом морфологии ледяных включений.

Для эллипсоидального включения с полуосями $a_1 \geq a_2 \geq a_3$ в изотропной упругой матрице компоненты тензора Эшелби определяются интегралами:

$$S_{ijkl} = \frac{1}{8\pi(1-\nu)}\int_0^\infty \left[\delta_{ik}\bar{I}_{jl} + \delta_{jk}\bar{I}_{il} + \delta_{il}\bar{I}_{jk} + \delta_{jl}\bar{I}_{ik} - \frac{2\nu}{1-2\nu}\delta_{ij}\bar{I}_{kl}\right]\frac{d\rho}{\Delta} \quad (2)$$

$$\Delta = \sqrt{(a_1^2+\rho)(a_2^2+\rho)(a_3^2+\rho)}$$

где $S_{ijkl}$ -тензор Эшелби; $a_1,a_2,a_3$ –полуоси эллипсоида; ρ –параметр интегрирования; ν - коэффициент Пуассона;

$\delta_{ik}$, $\delta_{jk}$ -символ Кронекера ($\delta_{ij}$=1\ при i=j; $\delta_{ij}$=0 при i≠ji); $\bar{I}_{jl}$- функции, зависящие от полуосей эллипсоида и параметра ρ; *i, j,k,l* - тензорные индексы, принимающие значения 1, 2, 3 (соответствуют осям координат $x_1,x_2,x_3$)

Интегралы $\bar{I}_j$ определяются как:

$$\bar{I}_{jl} = \frac{a_j^2 a_l^2}{(a_j^2+\rho)(a_l^2+\rho)} \quad (3)$$

или в более общем виде через эллиптические интегралы для диагональных компонент в виде:

$$\bar{I}_j = \int_0^\infty \frac{d\rho}{(a_j^2+\rho)\Delta} \quad (4)$$

Известно, что в строении мёрзлых грунтах встречается многообразие расположения ледяных прослоек, которые можно назвать ледяными включениями и могут иметь линзовидную, шлировую и множество других форм [6].

Таблица 1

Классификация ледяных включений по морфологии с учетом тензора Эшелби (по М.Н. Царапову)

| Тип | Форма включений | Аспектное отношение | Типичный размер, | Объёмная доля льда, |
|---|---|---|---|---|

| криотекстуры | | α | мм | % |
|---|---|---|---|---|
| Массивная | Сферы, эллипсоиды | 1–3 | 0.1–1.0 | 5–20 |
| Слоистая | диски, линзы | 0.01–0.1 | 1–50 (диаметр) | 20–50 |
| Сетчатая | цилиндры, жилы | 10–100 | 0.5–5 (диаметр) | 15–40 |
| Атакситовая | смешанная | переменное | различный | 30–70 |

$\alpha=a_1/a_3$— аспектное отношение.

В табл. 2 представлены согласно тензору Эшелби характерные формы включений В зависимости от соотношения осей и его связи с коэффициентом Пуассона для каждой оси.

Таблица 2

Компоненты тензора Эшелби для различных форм ледяных включений (по М.Н. Царапову)

| Форма включения | Соотношение осей | $S_{1111}$ | $S_{2222}$ | $S_{3333}$ |
|---|---|---|---|---|
| Сфера | $a_1=a_2=a_3$ | 7−5ν/ 15(1−ν) | 7−5ν/ 15(1−ν) | 7−5ν/ 15(1−ν) |
| Диск (линза) | $a_1=a_2\gg a_3$ | 13−8/ ν32(1−ν) | 13−8ν/ 32(1−ν) | 1−(1−2ν/ 2(1−ν) |
| Игла (шлир) | $a_1\gg a_2=a_3$ | 0 | 5−4ν/8(1−ν) | 5−4ν/8(1−ν) |
| Цилиндр | $a_1\to\infty$ | 0 | 5−4ν/ 8(1−ν) | 5−4ν/ 8(1−ν) |

Таблица 3

Численные значения компонент тензора Эшелби при коэффициенте Пуассона ν=0.35.

| Форма включения | $S_{1111}$ | $S_{2222}$ | $S_{3333}$ |
|---|---|---|---|
| Сфера | 0.524 | 0.524 | 0.524 |
| Диск (α=0.1) | 0.358 | 0.358 | 0.842 |
| Диск (α=0.01) | 0.347 | 0.347 | 0.962 |
| Шлир (α=10) | 0.012 | 0.458 | 0.458 |
| Шлир (α=100) | 0.001 | 0.481 | 0.481 |

При оттаивании ледяное включение претерпевает собственную деформацию, связанную с изменением объёма в результате фазовых переходов:

$$\varepsilon^{*}_{ij} = \varepsilon^{*}_{v}\delta_{ij}/3 \quad (5)$$

где объёмная деформация фазового перехода:

$$\varepsilon^{(m)}_{ij} = \frac{1+v}{3(1-v)}\varepsilon^{*}_{v}\delta_{ij} \quad (6)$$

Таблица 4

Деформации матрицы (минерального скелета) при оттаивании ледяных включений различной формы (по М.Н. Царапову)

| Форма включения | $\varepsilon_{11}^{(m)}/\varepsilon_v^*$ | $\varepsilon_{22}^{(m)}/\varepsilon_v^*$ | $\varepsilon_{33}^{(m)}/\varepsilon_v^*$ | Характер деформации |
|---|---|---|---|---|
| Сфера | 0.333 | 0.333 | 0.333 | Изотропное сжатие |
| Диск горизонтальный | 0.116 | 0.116 | 0.768 | Преимущественно вертикальное |
| Диск вертикальный | 0.442 | 0.116 | 0.442 | Преимущественно горизонтальное |
| Шлир вертикальный | 0.481 | 0.481 | 0.038 | Латеральное сжатие |
| Шлир горизонтальный | 0.019 | 0.481 | 0.481 | Вертикальное и латеральное |

Таблица 5

Вертикальная деформация оттаивания в зависимости от льдистости и криотекстуры

| Льдистость | Массивная $\varepsilon_{33}^{(th)}$, % | Слоистая $\varepsilon_{33}^{(th)}$, % | Сетчатая $\varepsilon_{33}^{(th)}$, % | Атакситовая$\varepsilon_{33}^{(th)}$, % |
|---|---|---|---|---|

| $i_{tot}$ | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0.10 | 0.33 | 0.81 | 0.10 | 0.47 |
| 0.20 | 0.66 | 1.63 | 0.20 | 0.94 |
| 0.30 | 0.99 | 2.44 | 0.30 | 1.42 |
| 0.40 | 1.32 | 3.25 | 0.40 | 1.89 |
| 0.50 | 1.65 | 4.06 | 0.50 | 2.36 |
| 0.60 | 1.98 | 4.88 | 0.60 | 2.83 |
| 0.70 | 2.31 | 5.69 | 0.70 | 3.30 |

Если рассмотреть выражение коэффициента оттаивания, выделяемого по методу Н.А. Цытовича, то данный параметр в парадигме предложенный модели (принцип Эшелби) связан с компонентой тензора деформаций следующим выражением с учетом [7]:

$$A_{th} = \varepsilon_{33}^{th} = f * \eta * (1 - S_{3333})^{-1} \frac{\varepsilon_v^*}{3}$$

где η=0.85 для дренируемых условий; η=0.95 для недренируемых условий, а параметр $f$ ( $0 \leq f \leq 1$) определяет концентрацию частиц в матрице при гомогенизации композитных материалов и расчете эффективных модулей упругости.

Если рассмотреть преимущество предложенного подхода на основе принципа Эшелби, то можно увидеть, что данная модель физически обоснованно связывает макроскопические деформации с микроструктурными параметрами, что даёт возможность учитывать анизотропию изменения деформационных свойств мёрзлых грунтов при оттаивании. Учёт влияния анизотропии на деформируемость, в свою очередь, даёт возможность прогноза неравномерных осадок при разноориентированной криотекстуре. Также преимуществом данного метода является определение минимум эмпирических параметров - для расчёта требуются только льдистость $i_{tot}$ и аспектное отношение α. В результате исследования предложенные следующая формула определения коэффициента оттаивания.

$$A_{th} = k(\propto) * \eta * i_{tot}$$

к(α) — структурный коэффициент, зависящий от аспектного отношения включений.

Таблица 6

Значения структурного коэффициента к(α)

| Аспектное отношение α | Форма включений | к(α) |
|---|---|---|
| 0.01 | Тонкие линзы | 0.078 |
| 0.05 | Линзы | 0.072 |
| 0.10 | Толстые линзы | 0.065 |
| 0.50 | Эллипсоиды | 0.045 |
| 1.00 | Сферы | 0.028 |
| 5.00 | Вытянутые сферы | 0.018 |
| 20.0 | Шлиры | 0.012 |
| 100.0 | Жилы | 0.008 |

В результате проведенных исследований предложена микромеханическая модель деформирования оттаивающего грунта на основе принципа эквивалентного включения Эшелби, связывающая макроскопические деформации с морфологией ледяных включений. Получены аналитические выражения для тензора деформаций оттаивания с учётом формы (аспектного отношения) и объёмной концентрации ледяных включений. Установлено, что форма ледяных включений существенно влияет на анизотропию осадок оттаивания. Аналитически определена связь компоненты тензора деформаций с коэффициентом оттаивания.

***Литература***


1 Цытович Н.А. Механика мёрзлых грунтов. — М.: Высшая школа, 1973. — 448 с.

2 Ершов Э.Д. Общая геокриология. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 682 с.

3 Комаров И.А. Термодинамика и теплофизика мерзлых пород. Уч. пособие для вузов / 2025. — 631 с.

4 Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2002. – 426 с.

5 Eshelby J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems // Proceedings of the Royal Society A. — 1957. — Vol. 241. — P. 376–396.

6 Mura T. Micromechanics of defects in solids. — Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1987. — 588 p.
7 Nemat-Nasser S., Hori M. Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials. — Amsterdam: Elsevier, 1999. — 810 p.

## ИЗОТОПНАЯ ИНДИКАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДЯНЫХ ЯДЕР ПИНГО (НА ПРИМЕРЕ БУГРА У САЛЕХАРДА)

***Ю.Н.Чижова[1], Ю.К.Васильчук[2]***
*[1] Институт географии РАН, г.Москва*
*[2] Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, г.Москва*

Лёд, содержащийся в ядрах бугров пучения, по своим изотопным характеристикам ($\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$) представляет собой ценный источник данных о криогенных процессах в многолетнемёрзлых породах. Несмотря на широкое распространение бугров пучения типа гидролакколит (булгуннях, пинго) в криолитозоне Западной Сибири – по оценкам Гросса и Джонса [1], здесь насчитывается более 1600 пинго, не считая многочисленных миграционных бугров (пальза) – их детальное изотопно-геохимическое изучение остается недостаточным. К настоящему времени опубликованы данные по трём объектам: пинго Песцовое [2, 3], пинго Мессояха-1 [4, 3] и буграм в долине р. Ерката-Яха [5].

Выявленное разнообразие изотопных профилей в ледяном ядре бугров пучения Западной Сибири ставит вопрос о том, что же определяет формирование этих криогенных форм рельефа. В этих условиях изучение даже одного нового бугра, особенно расположенного в иной мерзлотной обстановке, позволяет расширить представление о механизмах формирования и эволюции криогенных архивов региона.

Бугор пучения близ г.Салехарда (66°34′56″ с.ш., 66°45′56″ в.д.) расположен на третьей террасе р. Оби, в пределах ансамбля из нескольких бугров, окружающих два термокарстовых озера. Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород (ММП), имеющих в районе прерывистое распространение, составляет от –2 до 0°C [6]. Бурением в марте 2025 г. с вершины бугра на глубинах 1.75-11.1 м вскрыто ледяное ядро, состоящее из чередования прослоев чистого льда и минеральных горизонтов. На гл. 1.75 вскрыт мощный 15-сантиметровый ледяного прослой, подстилаемый прослоем мерзлого суглинка с массивной криогенной текстурой (мощность прослоя 0.6 м). Само выраженное ледяное ядра вскрывалось начиная с глубины 2.5 м. Изотопный анализ выполнен в Институте географии РАН на анализаторе Picarro L2130-i (точность 0.1‰ для $\delta^{18}O$ и 1‰ для $\delta^{2}H$).

Верхняя часть ядра (2.5–6.38 м) сложена двумя ледяными линзами, значения $\delta^{18}$ и $\delta^{2}H$ варьируют от −15.9 до −17.6‰ и от −116.7 до −127.4‰, соответственно. В зоне 1 слабо выражено изменение значений $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ с глубиной (рис. 1а), однако на изотопной диаграмме (рис. 1б) значения описываются линейным трендом с наклоном 7, что характеризует условия закрытой системы. В зоне 2 выражен общий тренд на уменьшение значений $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ с глубиной (с значительными вариациями) при выраженном тренде увеличения дейтериевого эксцесса – это классическое поведение изотопной системы кислорода и водорода воды при замерзании в закрытой системе. Наклон линии тренда для образцов зоны 2 = 6.3 (см. рис.1б), что соответствует расчетному рэлеевскому распределению в закрытой системе. Разные наклоны и разный тренд значений по глубине в зоне 1 и зоне 2 является отражением процессов промерзания: с разными скоростями образования льда в разные годы, и формированием сразу нескольких бугров в пределах одной котловины, вероятно, растущими одновременно из единого озёрного талика. Все это приводит к сложным путям миграции воды и высокой межгодовой изменчивости.

Нижняя часть (6.38 – 11.1 м) представлена переслаиванием льда и озёрного суглинка с наклоном линии $\delta^{2}H–\delta^{18}O$ = 7.57, типичным для открытой системы. Изотопный состав этого льда и характер связи $\delta^{2}H–\delta^{18}O$ близок водам р. Оби (база Arctic-GRO https://arcticgreatrivers.org/), что указывает на возможное гидравлическое соединение первоначально изолированного талика с региональной водоносной системой.

Салехардский бугор представляет ранее не описанный тип ледяного ядра: при его формировании закрытая система сменилась открытой, вероятно, через гидравлическое соединение с региональным водоносным горизонтом. В верхней части отмечается два разных паттерна распределения значений $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ с глубиной. На глубинах от 2.5 до 4.5 м слабо выражено изотопное обеднение с глубиной, что подразумевается при промерзании изолированных таликов в закрытой системе. Затем, на глубинах от 4.5 до 6.38 м более выражен тренд понижения значения с глубиной, но здесь также характерно не монотонное понижение, а выраженные вариации (см. рис. 1а). При этом прослои

чистого конжеляционного льда перемежаются сильнольдистым мерзлым суглинком. Все это свидетельствует об условиях промерзания и питания влагой. В самой верхней части (2.5-4.5 м) промерзание было вероятно быстрым, коэффициенты изотопного фракционирования не достигали равновесных значений. Вероятно, также кроме этого бугра, влага из таликовой зоны формировала ледяные ядра и других близкорасположенных бугров. В ходе промерзания скорости образования льда снизились, и лед на гл. 4.5-6.38 м лед более соответствует условиям закрытой системы, линия тренда на рис. 3 демонстрирует хорошую линейность. Вариации значений по глубине связаны с межгодовой изменчивостью как скоростей промерзания, так и с конкуренцией бугров за влагу. То есть можно сказать, что несмотря на соответствие условиям закрытой системы, в целом вся верхняя часть ледяного ядра (до гл. 6.38 м) демонстрирует межгодовую изменчивость значений $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ с глубиной и изменение наклона линии тренда $\delta^{2}H–\delta^{18}O$.

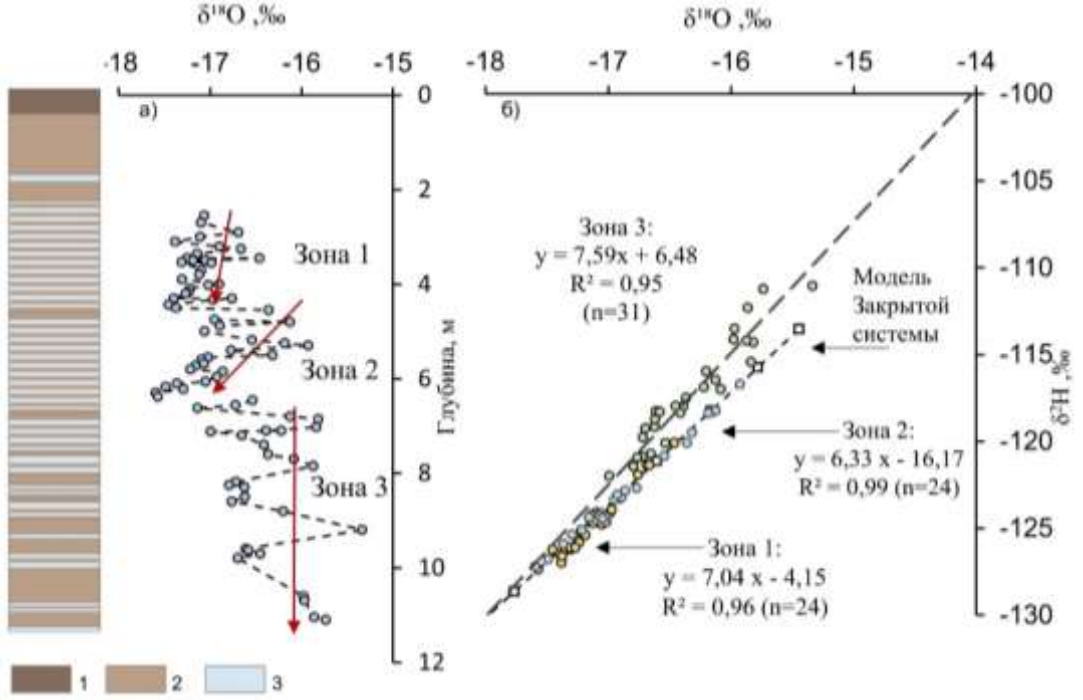



Рис. 1. Распределение значений $\delta^{18}O$ по глубине (а) и соотношение $\delta^{2}H$-$\delta^{18}O$ для льда из разных зон (б) в ледяном ядре булгунняха у г.Салехард: 1 – торф, 2 – суглинок, 3 – лед.

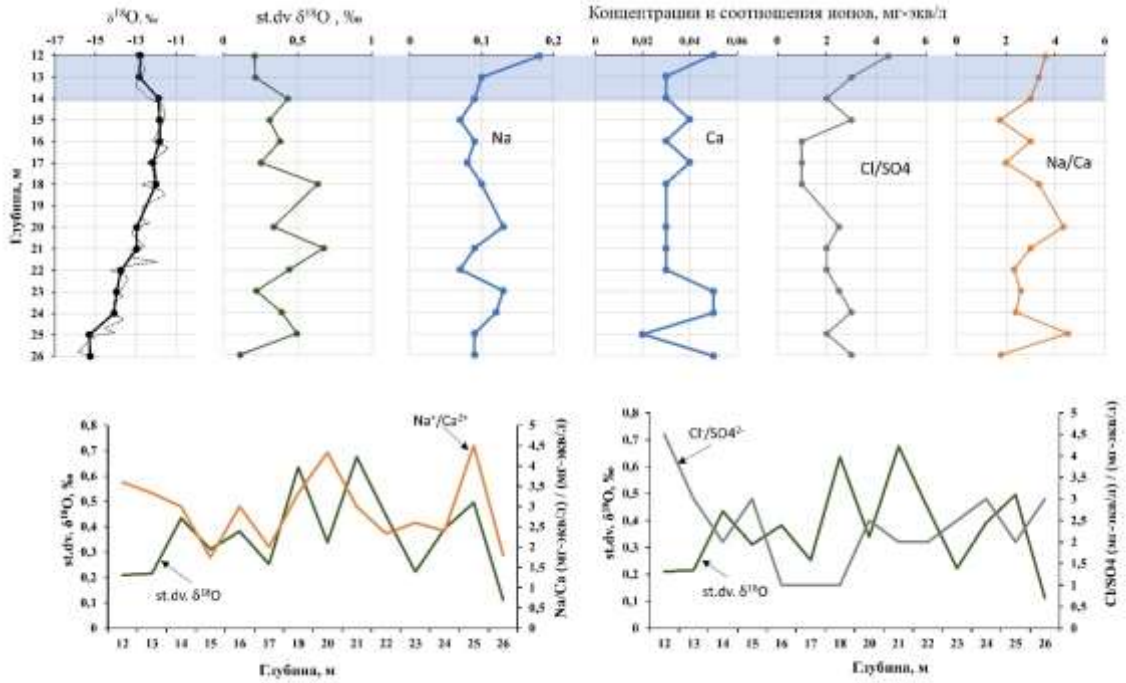



Рис. 2. Распределение по глубине величин $\delta^{18}O$, осредненных до шага 1образец/1 м, величина st.dv для

этого

значения $\delta^{18}O$, концентрации ионов натрия и кальция, а также двух базовых индексов - соотношения ионов $Cl/SO_4$ и Na/Ca

Мы связываем эти вариации значений $\delta^{18}O$ по глубине с неравномерным во времени процессом льдообразования. Такое же неравномерное и более того, неравновесное промерзание было отмечено нами для ледяного ядра пинго Песцовое [3]. Соотношение $\delta^2H$-$\delta^{18}O$ для образцов льда в ледяном ядре характеризует неравновесное промерзание в закрытой системе. Полученные недавно данные о содержании основных ионов в образцах ледяного ядра [7] позволяют подкрепить нашу гипотезу о неравномерном во времени промерзании. Химический анализ проб выполнен с шагом 1 м, изотопный анализ выполнялся с шагом около 25 см. Поэтому мы усреднили значения $\delta^{18}O$ и $\delta^2H$ таким образом, чтобы один метр ледяного ядра был представлен одним значением $\delta^{18}O$ (и $\delta^2H$). В этом случае величины $\delta^{18}O$ (и $\delta^2H$) демонстрируют монотонное понижений с глубиной, а для того, чтобы характеризовать неравномерность промерзания мы используем стандартное отклонение от среднего для каждого усредненного образца. Таким образом каждый метр ледяного керна представлен одним средним значением $\delta^{18}O$ (и $\delta^2H$) и стандартным отклонением (st.dv.) от среднего – т.е. «разбросом», который указывает на включение как слоев льда, сформированных в условиях медленного льдовыделения с большими изотопными сдвигами, так и слоев, сформированных в условиях быстрого образования льда с небольшими изотопными сдвигами, т.е. на степень межгодовой изменчивости скоростей льдообразования. Концентрации основных ионов были пересчитаны в мг-экв/л для того, чтобы рассчитать отношения Na/Ca и $Cl/SO_4$ в эквивалентной форме, отражающей не весовое, а зарядовое соотношение ионов, и избежать искажений, связанных с разной валентностью при интерпретации процессов промерзания. Мы полагаем, что захват ионов в лед связан с условиями промерзания – при быстром формировании льда концентрации растворимых ионов повышаются, при медленном – понижаются за счет эффективного отжатия. Так, например, для самой верхней части ледяного ядра, до глубины 15 м высокие концентрации ионов (голубая заливка в верхней части рис. 2) поддерживают быстрое промерзание с низкими коэффициентами изотопного фракционирования и соответственно, небольшими изотопными сдвигами относительно начальной воды [3].

Именно поэтому здесь наблюдается «обратный» тренд значений $\delta^{18}O$ льда – вместо понижения значений, незначительный рост с глубиной. Между st.dv.$\delta^{18}O$ и абсолютными концентрациями ионов как в мг/л, так и в мг-экв/л нет прямой линейной связи, что ожидаемо, так как химический состав измерен по всему метровому интервалу и усредняет вклад слоёв льда, сформированных быстрым промерзанием. Однако отношения ионов $Na^+/Ca^{2+}$ и $Cl^-/SO^{2-}{}_4$ демонстрируют слабые, но устойчивые тренды с st.dv.$^{18}O$ ($r_s$ = +0,48 и –0,44 соответственно), что поддерживает гипотезу о влиянии межгодовой изменчивости скоростей промерзания на изотопно-химическую структуру льда.

Важно подчеркнуть, что присутствие или отсутствие изотопной «пилы» в ледяных ядрах пинго не связано напрямую с температурным режимом многолетнемёрзлых пород. На примере ледяного ядра пинго-20 в Канаде [8] было показано, что в условиях низкотемпературной непрерывной мерзлоты формирование линейного изотопного профиля без значимых колебаний происходило при условии стабильного, монотонно затухающего поступления воды снизу. Изотопные характеристики ядра этого пинго демонстрирует эталонный случай равновесного рэлеевского фракционирования при стабильном промерзании сверху вниз в закрытой системе [9]. Напротив, изотопная «пила» в пинго Везер на Аляске и в пинго Песцовое [10], указывает на то, что водоснабжение фронта промерзания было импульсным, а скорости льдообразования менялись немонотонно во времени. Это наблюдение подтверждает, что главным фактором, контролирующим форму изотопного профиля, является не климатическая обстановка, а гидрологический режим талика и динамика его промерзания.

Динамика бугров пучения в основном связана с разрушением, которое происходит либо с поверхности, либо при подтоплении и снизу. В обоих этих случаях проникновение тепла с поверхностными или грунтовыми водами приводит к вытаиванию ледяного ядра и деградации бугра. Салехардский бугор впервые представляет случай прорыва замкнутого талика и его соединения с обширной системой грунтовых вод, который не привел к деградации. Наоборот, бугор продолжил свой рост за счет поступления гидравлических вод к фронту промерзания. Вероятно, это связано с обширным русловым таликом Оби: зимой в нем поднимается уровень грунтовых вод, но на фоне суровых климатических условий и промерзания сверху, эти воды участвуют в формировании ледяных ядер сезонных и многолетних бугров пучения.

Впервые получены изотопные данные, указывающие на смену гидрогеологических условий при формировании пинго. В отличие от обратимых смен открытого и закрытого режимов, известных,

например, для пинго на Шпицбергене [11], салехардский разрез демонстрирует однократный и необратимый переход от замкнутой системы к открытой региональной.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 25-27-00233.

***Литература***

1 Grosse G., Jones B.M. Spatial distribution of pingos in northern Asia // The Cryosphere. 2011. V. 5. № 1. P. 13–33.

2 Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Рогов В.В., Подборный Е.Е., Чижова Ю.Н. Новые данные о вариациях стабильных изотопов в ледяном ядре булгунняха на юге Тазовского полуострова // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 472. – № 4. – С. 466–470.

3 Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Ju.N., Budantseva N.A., Kurchatova A.N., Rogov V.V., Vasil'chuk A.C. Stable oxygen and hydrogen isotope compositions of the Messoyakha and Pestsovoe pingos as markers of ice core formation // Permafr. Periglac. Process. – 2021. – V. 32. – № 4. – P. 558–571.

4 Васильчук Ю.К., Курчатова А.Н., Буданцева Н.А., Рогов В.В., Чижова Ю.Н. Распределение стабильных изотопов кислорода и водорода в ледяном ядре булгунняха на юге Гыданского полуострова // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 488. – № 3. – С. 323–328.

5 Гутарева О.С., Иванов Е.В., Буддо И.В., Кононов А.М., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Шеин А.Н., Краев Г.Н., Смирнов А.С. Происхождение льдов бугров пучения в районе реки Ерката-Яха (п-ов Ямал) по результатам исследования изотопных соотношений δD и $\delta^{18}O$ // Geodynamics & Tectonophysics. – 2024. – Т. 15. – № 6. – С. 0800.

6 Грязнов О.Н., Абатурова И.В., Савинцев И.А., Емельянова И.А., Петрова И.Г., Стороженко Л.А. Инженерно-геологические условия долинных участков криолитозоны Ямало-Ненецкого автономного округа и их трансформация под влиянием техногенеза. – Екатеринбург: УГГУ, 2014. – 198 с.

7 Васильчук Ю.К. Концентрация основных растворимых ионов в ядре булгунняха на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха, юг Тазовского полуострова / Арктика и Антарктика. – 2025. – № 2. DOI: 10.7256/24538922.2025.2.74286

8 Mackay J. R. Seasonal growth bands in pingo ice // Canadian Journal of Earth Sciences. – 1990. – Vol. 27.– No.8. – P. 1115–1125.

9 Чижова Ю.Н., Васильчук Ю.К. Изотопная индикация условий образования ледяных ядер булгунняхов (пинго) // Лед и Снег. – 2018. – № 4. – С. 507–523.

10 Vasil'chuk Yu. K., Lawson D. E., Yoshikawa K., Budantseva N. A., Chizhova J. N., Podborny Y. Ye., Vasil'chuk A. C. Stable isotopes in the closed-system Weather Pingo, Alaska and Pestsovoye Pingo, northwestern Siberia // Cold Regions Science and Technology. – 2016. – Vol. 128. – P. 13–21.

11 Demidov V., Wetterich S., Demidov N., Schirrmeister L., Verkulich S., Koshurnikov A., Gagarin V., Ekaykin A., Terekhov A., Veres A., Kozachek A. Pingo drilling reveals sodium-chloride-dominated massive ice in Grøndalen, Spitsbergen // Permafr. Periglac. Process. – 2021. – V. 32. – № 4. – P. 572–586.

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ В Г. САЛЕХАРДЕ НА 2025 ГОД, ВОЗВЕДЁННЫХ ПО I ПРИНЦИПУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ, НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА

***А.Н. Шеин[1], А.А. Башкова[1,2], А.И. Синицкий[1], А.Н. Громадский[1], А.А. Гончаров[1]***

*[1] Научный центр изучения Арктики, г. Салехард*

*[2] Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень*

**Введение.** В последнее годы отмечается рост аварийности инфраструктурных объектов, особенно в районах со сложными инженерно-геологическими условиями и в районах распространения многолетнемёрзлых грунтов (ММГ). Климатические изменения [1] увеличивают риски для инфраструктуры, возведённой на этой территории ввиду деградации мерзлоты. Однако, большинство описанных в литературных источниках отказов, связанные с потерей надежности геотехнической системы «фундамент – грунты основания», были обусловлены либо просчетами проектировщиков или служб эксплуатации, либо некорректной оценкой её снижения вследствие теплового загрязнения грунтов основания [2].

Одним из показательных городов со сложными инженерно-геокриологическими условиями является Салехард, где требуется обеспечение надежности и долговечности зданий. Для решения этой проблемы в городе развивается система автоматизированного температурного мониторинга. В работе анализируются данные температурного мониторинга для оценки состояния зданий и сооружений в г. Салехард, возведённых по I принципу использования многолетнемёрзлых грунтов.

**Методы и материалы.** В Ямало-Ненецком АО для безопасной эксплуатации зданий и сооружений в зоне ММГ Научным центром изучения Арктики при поддержке правительства ЯНАО с 2018 г. разрабатывается система автоматизированного температурного мониторинга. Система содержит элементы – термометрические косы, интегрированные в информационную систему сбора и передачи информации «Ямал-Арктика», для первичного анализа, выгрузки и визуализации данных [3-6]. В систему включено уже более 50 объектов в г. Салехард, под которыми оборудовано свыше 370 термометрических скважин, где ведутся регулярные наблюдения.

Скважины системы оснащены термометрическими оборудованием до глубин 9-15 м – отметок, превышающих длину свай. Скважины оборудованы термометрическими косами производства ИП Кураков (г. Томск), ООО Русгеотех, НТП «Горизонт», ООО «Криолаб» с логгерами. Датчики до 5 м располагаются через 0.5 м, ниже – через 1 м. Логгеры автоматически записывают значения температур грунтов каждые 3 ч с погрешностью 0.1°С и отправляют на сервера производителей и затем аккумулируются в ИС «Ямал-Арктика». Ведётся постоянный анализ поступающих данных, а для специалистов и заинтересованных лиц предусмотрен доступ к ресурсу.

**Результаты и их обсуждение.** Анализ температур грунтов основания проводился для 53 объектов капитального строительства (ОКС), сеть мониторинга под каждым из которых состоит из 3-х и более термометрических скважин, за исключением двух зданий. Глубины для анализа выбраны в интервале 3-10 м, как наиболее рабочие и значимые для стабильности свайного фундамента: сезонно-талый слой не должен превышать 3 метров, а стандартная глубина заложения свай составляет 10 м.

На основе обработанных данных была составлена таблица 1 данных по исследуемым зданиям г. Салехард, где помимо года постройки и назначения здания представлены характеристики, рассчитанные для всех скважин каждого объекта на глубинах 3-10 метров за 2025 год:

- максимальное значение средних температур грунтов – аналог эквивалентной температуры грунтов Te в соответствии с СП 25.13330.2020 п. 7.2.6;
- среднегодовая температура грунтов;
- размах средних значений температур.

Годы постройки зданий, рассмотренных в работе (Таблица 1), разнятся от 1975 до 2017 г. При этом стоит сказать, если первый пятиэтажный жилой дом в Салехарде был построен в 1987 году, то массовая застройка многоквартирными капитальными домами началась только в конце 90-х годов прошлого столетия. Максимальные значение средних температур грунтов, рассчитанные для всех скважин каждого объекта на глубинах 3-10 метров за 2025 год варьируют для г. Салехард от -2.25°С до +1.7°С, среднегодовые значения – от -3.94°С до +0.67°С, размах средних значений – от 0.09°С до +6.05°С.

Таблица 1

Сводная таблица данных по исследуемым зданиям г. Салехард

| № п/п | Год постр. | Назначение здания | Te за 2025 г., все скважины на глубинах 3-10 м, ºС | Среднегодовая за 2025 г. по всем скважинам на глубине 3-10 м, ºС | Размах средних, все скважины, глубина 3-10 м в 2025 г., ºС |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2017 | Жилое | -0,74 | -2,69 | 4,70 |
| 2 | 2008 | Жилое | -2,25 | -3,58 | 3,16 |
| 3 | 2004 | Жилое | -1,28 | -2,35 | 2,68 |
| 4 | 2008 | Жилое | -1,12 | -2,17 | 2,85 |
| 5 | 1986 | Социальное | 0,78 | 0,24 | 0,87 |
| 6 | 2008 | Жилое | -0,89 | -1,79 | 2,33 |
| 7 | 2008 | Социальное | -1,81 | -2,39 | 1,23 |
| 8 | 2011 | Жилое | -1,36 | -1,79 | 1,01 |
| 9 | 1987 | Социальное | -0,38 | -0,45 | 0,17 |
| 10 | 1987 | Социальное | -0,42 | -0,46 | 0,09 |
| 11 | 2003 | Социальное | -0,65 | -0,93 | 0,60 |
| 12 | 2006 | Жилое | -1,42 | -2,83 | 3,36 |
| 13 | 1983 | Социальное | -0,55 | -0,65 | 0,26 |

| № п/п | Год постр. | Назначение здания | Те за 2025 г., все скважины на глубинах 3-10 м, ºС | Среднегодовая за 2025 г. по всем скважинам на глубине 3-10 м, ºС | Размах средних, все скважины, глубина 3-10 м в 2025 г., ºС |
|---|---|---|---|---|---|
| 14 | 2001 | Социальное, к.1 | -0,40 | -1,03 | 1,28 |
| 15 | 2001 | Социальное, к.2 | -0,73 | -1,70 | 2,38 |
| 16 | 2001 | Социальное, к.3 | -0,88 | -1,97 | 2,76 |
| 17 | 2004 | Социальное | -1,26 | -2,34 | 2,57 |
| 18 | 2003 | Социальное | -0,45 | -0,78 | 0,79 |
| 19 | 2006 | Социальное, к.2 | -1,11 | -2,73 | 3,82 |
| 20 | 2006 | Социальное, к.4 | -1,35 | -2,83 | 3,49 |
| 21 | 2013 | Социальное | -1,22 | -2,36 | 2,44 |
| 22 | 2006 | Жилое | -0,84 | -1,64 | 1,96 |
| 23 | 2004 | Жилое | -0,67 | -1,25 | 1,36 |
| 24 | 2004 | Жилое | -0,70 | -1,33 | 1,43 |
| 25 | 2004 | Жилое | -0,94 | -2,25 | 2,91 |
| 26 | 2005 | Жилое/Соц. | -1,14 | -2,51 | 3,12 |
| 29 | 2005 | Жилое | -1,20 | -2,58 | 3,33 |
| 30 | 2009 | Социальное, к.1 | -1,75 | -2,20 | 1,07 |
| 31 | 2009 | Социальное, к.2 | -1,93 | -2,92 | 1,99 |
| 32 | 1986 | Социальное | -1,75 | -2,20 | 1,07 |
| 33 | 2000 | Социальное | 1,70 | 0,67 | 1,61 |
| 34 | 2002 | Социальное | 0,95 | 0,29 | 1,05 |
| 35 | 2005 | Социальное | -0,72 | -1,48 | 1,90 |
| 36 | 1998 | Социальное | -1,34 | -1,78 | 0,95 |
| 37 | 2002 | Социальное | -0,87 | -2,27 | 3,23 |
| 38 | 2005 | Социальное | -0,88 | -1,25 | 0,86 |
| 39 | 2002 | Социальное | -1,36 | -1,90 | 1,25 |
| 40 | 2015 | Социальное | -0,41 | -0,49 | 0,23 |
| 41 | 2003 | Социальное | -0,75 | -1,29 | 1,43 |
| 42 | 2014 | Жилое, к.1 | -1,38 | -1,76 | 0,95 |
| 43 | 2014 | Жилое, к.2 | -1,45 | -2,04 | 1,37 |
| 44 | 2014 | Жилое, к.3 | -0,66 | -1,00 | 0,97 |
| 45 | 2010 | Жилое | -1,15 | -1,94 | 1,79 |
| 46 | 2008 | Социальное | -2,18 | -3,94 | 4,27 |
| 47 | 2016 | Социальное | -0,62 | -1,21 | 1,52 |
| 48 | 1975 | Социальное | -1,17 | -1,58 | 1,05 |
| 49 | 2017 | Жилое | -1,31 | -3,91 | 6,05 |
| 50 | 2004 | Социальное | -1,04 | -2,41 | 3,58 |
| 51 | 2004 | Жилое | -0,85 | -1,78 | 2,55 |
| 52 | 2004 | Жилое | -0,66 | -1,36 | 1,95 |
| 53 | 2000 | Жилое | -0,37 | -0,91 | 1,25 |

Ранее была показана возможность использования статистических характеристик данных температурного мониторинга грунтовых оснований объектов капитального строительства в качестве критериев эффективности работы системы термостабилизации грунтов: сезонно-охлаждающие устройства (СОУ) и проветриваемое подполье (ПП) [7-8]. С целью автоматизации и упрощения процесса выявления предкритических/критических ситуаций предложена «светофорная» визуализация статистических характеристик. Для ранжирования зданий было принято предельно допустимое значение температуры, равное -0.25°С, что соответствует температуре начала замерзания незасоленного глинистого грунта, по СП 25.13330.2020 таблица Б.1. В соответствии с этим красные тона отражают температуры грунтов с очевидным отклонением от принятого предельного значения (выше - 0.3°С), желтые – на грани допустимых (-0.3°С – - 0.5°С), оттенки зелёного имеют здания, среднемесячные температуры которых соответствуют норме (ниже - 0.5°С). При этом стоит понимать, что при приближении к жёлтой зоне каждый объект нужно анализировать индивидуально в соответствии с литологическим строением его грунтового основания, проектной документацией и режимом эксплуатации здания. Такая визуализация данных будет удобна и понятной для всех эксплуатирующих организаций.

Проведена визуализация рассчитанных для 53 ОКС и приведённых в таблице 1 статистических характеристик. На рисунках 1а представлен космоснимок территории г. Салехард с нанесёнными объектами мониторинга в виде круглых маркеров в цветовой гамме, отвечающей среднегодовым значениям температуры по всем скважинам ОКС на глубинах 3-10 м за 2025 год. При визуальном анализе, можно заметить, что повышенные значения температуры грунтов имеют три объекта (Рис. 1а, красные и оранжевые маркеры)- здания №№5, 33, 34 (см. Таблицу 1). Максимальное среднее значение температуры на глубинах 3-10 м за 2025 год здесь 0.78, 1.7 и 0.95°С соответственно, среднегодовые – +0.24, +0.67 и +0.29°С. Такие показания явно сигнализирует о талом состоянии грунтов в основании данных объектов. Одно из обозначенных зданий признано аварийным, где сейчас проходят мероприятия по стабилизации состояния грунтов; второе подлежит капитальной реконструкции, третье проходит детальное обследование для разработки плана мероприятий по стабилизации ситуации. Температурные характеристики грунтов остальных зданий находятся в пределах нормативных значений: максимальное среднее изменяется от -0.37°С до -2.25°С, среднегодовая – от -0.45°С до -3.97°С.

Дополнительно к анализу средних значений целесообразно рассматривать максимальные температуры на тех же глубинах. Это позволяет идентифицировать объекты с теплыми зонами, в том числе при удовлетворительных средних показателях, поставить их на особый контроль, анализировать динамику и причины аномалий с целью разработки мер по стабилизации.

Для оценки эффективности СОУ была рассчитана разность между средним максимальным и минимальным значениями температуры грунтов под каждым объектом – размах средних (см. Таблица 1). Эта характеристика показывает, насколько изменяются температуры грунтов за год на исследуемых глубинах. Ввиду того, что изменение температуры грунтов на глубинах 3-10 м по большей степени зависит от работы СОУ, поэтому величина размаха отражает эффективность работы СОУ. На рисунке 1б визуализирован размах средних значений для 53 ОКС, контролируемых в г. Салехард. Для этого были выбраны следующие пределы для раскраски маркеров: размах больше 1.2°С соответствует высокой эффективности работы СОУ – зелёные тона, от 0.6 до 1.2°С – слабоэффективная работа – жёлто-красные тона, меньше 0.6°С – неэффективная работа и красные тона. В красную зону попадают социальные объекты – здания №№9, 10, 13, 40, которые построены по I принципу, но без использования СОУ. Три из них построены в 80-е году, третье было заложено в 90-е, но достроено только в 2015. На этих ОКС температуры грунтов имеют предкритические значения. В желтой зоне присутствуют как относительно молодые здания, так объекты советского периода. В зелёную зону попадают все «молодые» объекты, возведённые после 2000 г.

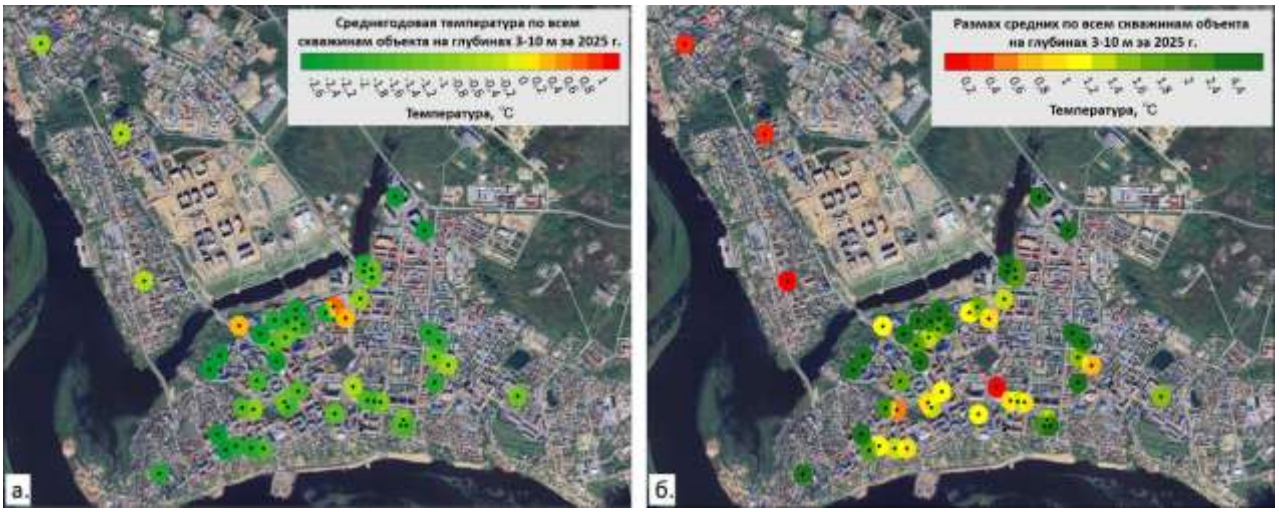



Рис. 1. Схема расположения объектов мониторинга г. Салехард на космснимке в цветовой гамме, отвечающей среднегодовым значениям температуры по всем скважинам (а) и размаху среднегодовой температуры грунтов по всем скважинам (б) каждого ОКС на глубинах 3-10 м за 2025 г.

В продолжение анализа, на рисунке 2 построено соотношения значений среднегодовой температуры грунтов по всем скважинам каждого ОКС на глубинах 3-10 м за 2025 год от года постройки здания. Общая тенденция вполне логичная – с уменьшением возраста повышается среднегодовая температура. Красные маркеры – это здания №№5, 33, 34 выделяющиеся на рис. 1а красным цветом и имеющие положительные температуры. По построенному линейному тренду можно оценить, что

критические температуры наступают через 50 лет вместе с потерей эффективности СОУ, что было проанализировано отдельно. На диаграмме (рис. 2) видно, что строительство в 90-е годы в г. Салехард практически не велось – из всей выборки ни один объект не был построен в это десятилетие.

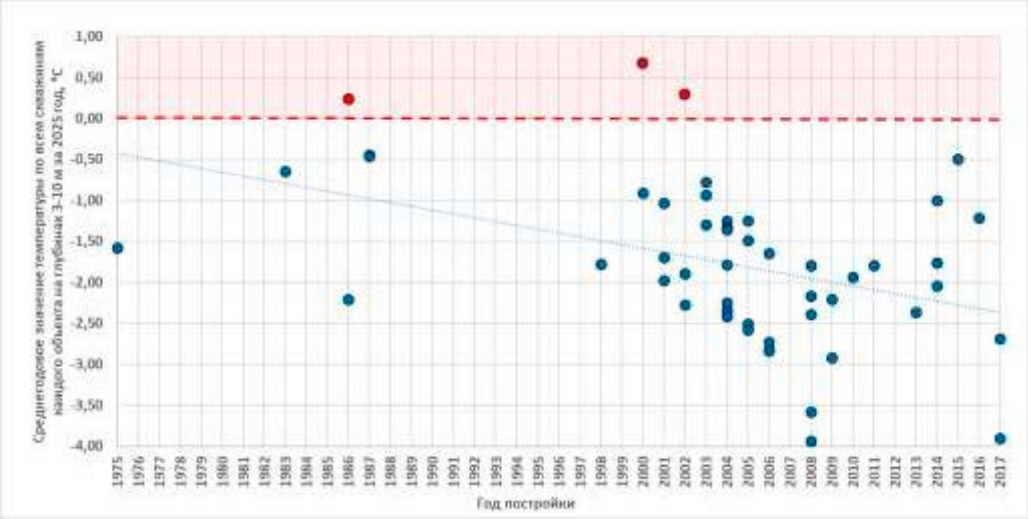



Рис. 2. График соотношения значений среднегодовой температуры грунтов по всем скважинам каждого ОКС на глубинах 3-10 м за 2025 год от года постройки здания

**Заключение.** Анализ данных температурного мониторинга зданий в г. Салехард показал, что среднегодовые температуры под контролируемыми зданиями на глубинах 3-10 метров не превышают -0.45°C, за исключением трёх зданий с критическими значениями – 5% от общего числа. Можно оценить, что критические температуры наступают через 50 лет вместе с потерей эффективности СОУ.

Описательная статистика может стать основой для предварительного анализа данных автоматизированного температурного мониторинга. Визуализация статистических характеристик позволяет наглядно представить данные температурного мониторинга, настроить интуитивно понятную, а перспективе и автоматизированную диспетчеризацию системы.

В дальнейшем планируется продолжить работы по анализу температурных значений грунтовых оснований ОКС, расположенных в г. Салехард, развивая критериальный подход для более надёжного прогнозирования возможных негативных изменений в несущей способности грунтов и вовремя на них реагировать. Наиболее перспективно рассматривать не только комплекс различных статистических характеристик, но и их динамику.

Опытная система автоматизированного мониторинга температуры грунтов оснований зданий в г. Салехарде является одним из перспективных примеров для применения в основных населенных пунктах Арктики. Разрабатываемая система предназначена для выявления на ранних этапах начавшиеся негативные изменения в несущей способности грунтов и вовремя на них реагировать. Кроме того, данные и результаты исследований планируется использовать для актуализации и разработки норм и правил строительства и эксплуатации зданий на мёрзлых грунтах, в том числе с учётом современных климатических изменений.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Ямало-Ненецкого автономного округа. Авторы благодарны специалистам участка инженерных изысканий ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики за создание мониторинговой инфраструктуры.

***Литература***

1 Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic / G. Malkova, D. Drozdov, A. Vasiliev [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 7. – DOI 10.3390/en15072311.

2 Попов А.П., Милованов В.И., Жмулин В.В. и др. Перспективы использования криогенного ресурса для строительства крупных центров добычи и систем транспорта газа в циркумполярных областях в случае подтверждения гипотезы о глобальном потеплении климата // Инженерные изыскания. – 2009. – № 10. – С. 18-37. – EDN LBDSPL.

3 System of automated geocryological monitoring (2025). - URL: https://monitoring.arctic.yanao.ru/ (Accessed 22 March 2026 in Russian)

4 Громадский А.Н., Арефьев С.В. и др. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномерзлых грунтов под зданиями г. Салехард // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 3(104). С. 17-21. DOI 10.26110/ARCTIC.2019.104.3.003.

5 Kamnev Y.K., Filimonov M.Yu., Shein A.N., Vaganova N.A. Automated Monitoring The Temperature Under Buildings With Pile Foundations In Salekhard. Geography, Environ-ment, Sustainability, 2021, Vol.14, No 4, p. 75-82 https://doi.org/ 10.24057/2071-9388-2021-021.

6 Башкова А.А., Шеин А.Н., Горелик Я. Б. Мониторинг грунтов основания здания на искусственном новообразований мерзлоты // Промышленное и гражданское строитель-ство. 2025. № 2. С. 41 - 51. doi: 10.33622/0869-7019.2025.02.41-51

7 Шеин А. Н., Башкова А. А. Статистические характеристики данных температурного мониторинга грунтовых оснований фундаментов зданий города Салехарда за 2018–2023 годы как основа для автоматизации процесса первичной обработки данных // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30, № 3. С. 58–69. DOI: 10.2109/2227-9245-2024-30-3-58-69.

8 Шеин А.Н. Характеристики температурного поля грунтовых оснований фундаментов зданий г. Салехард по данным мониторинга за 2024 г. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Международный научный конгресс, 15–17 мая 2024 г., Новосибирск: сборник материалов в 8 т. Т. 2: Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск: СГУГиТ, 2024. № 4. – С. 211-217. DOI 10.33764/2618-981X-2024-2-4-211-217

## МЕРЗЛОТНО-ПОЧВЕННАЯ ЛЕТОПИСЬ КАК НОВЫЙ ПАЛЕОАРХИВ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

***В.С. Шейнкман, С.Н. Седов***
*Институт криосферы Земли, ФИЦ ТюмНЦ СО РАН, Тюмень*

Палеокриологические летописи сегодня привлекают повышенное внимание различных научных групп, особенно тех, исследования которых касаются изучения природы на последних этапах плейстоцена. Ход этих этапов сопряжен с современностью и позволяет уверенно экстраполировать события в аспекте от прошлого к настоящему, и от настоящего к будущему, в том числе формируя прогностические сценарии развития криолитозоны. Такое внимание вполне объяснимо, поскольку подобные природные архивы содержат необходимую информацию об изменениях окружающей среды на разных хроносрезах, обеспечивая возможность детализировать их. В последние годы в арктической зоне Западной Сибири получены полновесные палеокриологические архивы для позднего квартера [2, 9] по ярусным полигонально-жильных льдам (ПЖЛ), а для юга Западной Сибири созданы полноценные палеолетописи на базе феномена памяти почв [10] – в этом ареале в их основу лег анализ лессово-почвенных серий [5].

Однако в зоне Субарктики Западной Сибири к югу от полярного круга отмеченные методики не применялись. Дело в том, что ПЖЛ, будучи емким носителем палеокриологической информации, в отмеченной зоне ныне не формируются, их ареал находится севернее полярного круга. Что касается области с лессово-почвенными сериями, она лежит гораздо южнее. Хотя почвенная память занимает весьма значимое место среди источников информации об эволюции природной среды [10], и известны почвенные серии, служащие важнейшими континентальными летописями климатических циклов квартера [15], на севере Западной Сибири подобные объекты не изучались. Причина – стереотип представлений о распространении здесь ледниковых покровов, и отсюда – превалирование идеи о бесперспективности поиска на данной территории палеопочв, в том числе криогенных – они не могли развиваться под толщей льда. В последние десятилетия произошёл пересмотр масштабов оледенений Евразии в сторону их уменьшения, по крайней мере – в позднем квартере в том числе получила развитие концепция об отсутствии в то время ледниковых щитов в Западной Сибири [18, 19]. Был обоснован подход и о нереальности покровного оледенения в данном регионе вообще [6, 11].

Следует пояснить, что стереотип ледниковой концепции долго был связан с тем, что до 1990-х гг. отмеченные модели предполагали покрытие региона льдом во все криохроны квартера [1, 4, 16]. Но появившиеся затем схемы ограниченного оледенения объясняли его проявление недостаточной влагообеспеченностью, что вступало в противоречие с общим характером развития природы в регионе. Если данная территория показывается свободной от ледников в криохрон МИС-2, то аналогичная ситуация должна была иметь место и в криохрон МИС-6, для которого предполагается

ее покрытие ледником [18, 19], поскольку в период МИС-1–МИС-6 глубина и объем криохронов и термохронов квартера на шкалах основных палеоклиматических летописей однотипны, что четко показано в сводке [17]. Ведь характер общей циркуляции атмосферы, определяющий питание и режим ледников, в квартере был один и тот же, и размеры ледников контролировались именно однотипной глубиной и длительностью криохронов [12].

Проблема также заключалась в том, что ранее поиски криогенных палеопочв не велись в данном ареале и в силу того, что процессы криолитогенеза обычно воссоздаются по самым выразительным, оставляемым ими в толще изучаемых пород следам, в первую очередь – по наиболее информативным из них, формируемым в ходе развития ПЖЛ [8]. Однако о реликтах ПЖЛ и связанных с ними явлений имелись по региону лишь редкие, полученные вблизи зоны современных ПЖЛ, данные середины прошлого века [3, 14]. Дело в том, что, хотя в прежние холодные эпохи в условиях холодного континентального климата Субарктики ПЖЛ должны были формироваться по всей ее территории, исследователям мешал все тот же стереотип покрытия в прошлом значительной части региона ледниковым щитом, под которым ПЖЛ не могли иметь место.

Так или иначе, из результатов проведенного авторами анализа следовало, что на рассматриваемой территории в отсутствие ледниковых покровов могли формироваться ландшафты, предполагающие в прошлом образование в их структуре почв, пусть и обедненных, специфического, в условиях холодной среды Субарктики, характера. Это послужило для авторов основой для поиска следов криогенного педогенеза, которые были ими обнаружены, а затем проанализированы и интерпретированы. В итоге, применив накопленный опыт в области палеокриологии и палеопочвоведения и проведя исследования в ареале от полярного круга до широтно-ориентированного течения р. Оби, авторы выявили реальность построения палеокриологической летописи нового типа – с учетом интеракции криогенных и криопедогенных явлений. В конечном результате были получены репрезентативные материалы для создания первой для севера Западной Сибири мерзлотно-почвенной летописи, на данном этапе – на хроносрезе позднего плейстоцена. Суть подхода авторов была сформирована следующим образом.

Если в регионе не было покровных оледенений, то с большой вероятностью реликты палеопочв должны сохраняться, и, как и в южносибирских палеолетописях, характеризовать теплые эпохи, хотя в данном случае это будут условно теплые, скорее прохладные, в субарктической среде, эпохи. Тогда как индикатором непосредственно холодных эпох выступят мерзлотные комплексы с чертами глубокого промерзания горных пород, характерного для рассматриваемого региона в криохроны квартера. На такой основе, собственно, и был поставлен вопрос о палеолетописях принципиально нового типа: почвенно-мерзлотных летописях севера Западной Сибири. Для его решения потребовалась разработка оптимальной стратегии поиска соответствующих объектов, причем – при параллельном, пока еще, существовании для холодных эпох разных моделей развития природы региона: с формированием концепций с его ледниковых покрытием и безледникового развития. В ходе проведенных исследований в рассматриваемом регионе идея нового подхода была авторами реализована. Расположение опорных участков, где были выявлены представительные криопедогенные комплексы (КПК) показано на рис. 1.

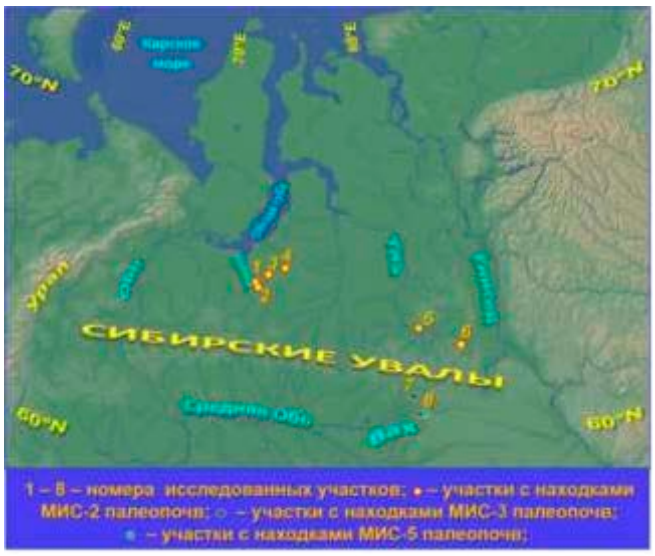


Рис. 1. Изучаемая территория и расположение исследованных опорных участков.

Отметим, что особые КПК были выделены при решении задачи о былой интеракции в толщах изучаемых отложений процессов криогенеза и педогенеза. Их следы, дополняя друг друга, отражают зашифрованную в памяти криогенных почв и в строении криогенных структур емкую палеокриологическую информацию. С одной стороны, это наборы характерных криогенных образований, ясно отслеживаемых в строении мерзлой толщи и служащих индикаторами ее былого промерзания. Наиболее представительны среди них псевдоморфозы по ПЖЛ, грунтовые жилы СТС, различные криотурбации и др. Первые отражают глубокое промерзание горных пород, другие из отмеченных – промерзание при более высокой температуре, еще не обеспечивающей возникновение ПЖЛ. С другой стороны, с палеокриогенными структурами тесно связаны в обоих случаях впервые обнаруженные авторами криогенные палеопочвы, в памяти которых заложена емкая информации о среде, в которой они развиты – криогидроморфные почвы, выделяющиеся тем, что они формировались на мерзлом базисе былого СТС. Их реликты неплохо распознаются на пространстве между жильными криогенными формами и в теле псевдоморфоз по ПЖЛ, поскольку педоседименты этих почв заполняли при таянии льда освобождаемое им пространство.

Наиболее древняя палеопочва, сформированная в термохрон МИС-5, обнаружена [13] в разрезе Белая гора (рис. 1, участок 8) в центре 35-м террасы на левом берегу р. Вах (рис. 2, а). Педокомплекс мощностью около 2 м отражает здесь многофазное развитие почвенного тела со сменой фазы лесного педогенеза последующей криогидроморфной фазой, обязанной своим развитием наличию в основании почвы многолетнемёрзлого водоупорного горизонта. U/Th-датировка LUU 1298TSD по материалу верхнего торфянистого горизонта дала величину 103+/-9/7 тыс. л. н., отражая минимальный возраст педокомплекса и соответствуя времени МИС-5c.

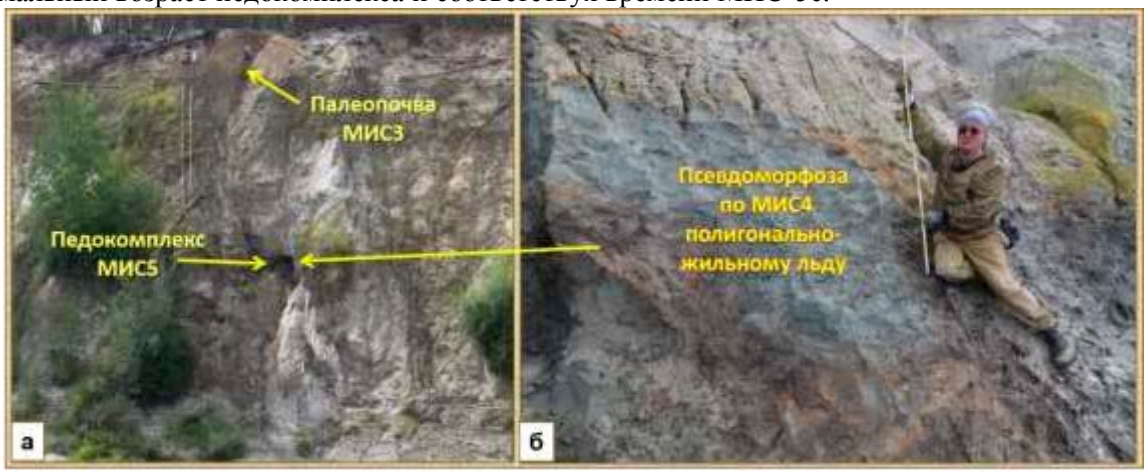



Рис. 2. Разрез Белая гора: а – общий вид, б – псевдоморфоза по МИС4 ПЖЛ, секущая педокомплекс МИС5. Фото из архива В.С. Шейнкмана

Предполагаем, что лесная фаза педогенеза связана с теплой подстадией МИС-5e, а более поздняя криогидроморфная фаза с последующими холодными подстадиями МИС-5 и переходом в стадиальный криохрон МИС-4 с тундровыми ландшафтами – с ним связано (рис. 2, б) рассечение педокомплекса эпигенетическими ПЖЛ, которые являются четким индикатором низкотемпературной криолитозоны. В данном случае, на рис. 2, б, проявление процессов криохрона МИС-4 ясно отражает псевдоморфоза по ПЖЛ, по холодным стенкам которого оползала во время таяния ПЖЛ криогидроморфная почва, заполняя освобождаемое льдом пространство. Связанные с каргинским, МИС-3, термоохроном палеопочвы обнаружены также обнаружены в разрезе Белая Гора (см. рис. 1, участок 8 и рис. 2, а). Также связанные с каргинским, МИС-3, термоохроном палеопочвы были обнаружены и изучены в разрезе Зеленый остров на р. Сабун (рис. 1, участок 7), и в разрезе Пюлькы в верховьях р. Таз (см. рис. 1, участок 7), который отображен на рис. 3, а.

В МИС-3, каргинское время, палеопочвы формировались в синкриогенном режиме параллельно с нарастанием аллювия в условиях средней силы промерзания горных пород – при их температуре выше значений, необходимых для формирования ПЖЛ. Об этом свидетельствует наличие по всей толще каргинских отложений небольших грунтовых жил СТС, которые образуются [8] при более высокой температуре криолитозоны, чем в случае ПЖЛ (рис. 3, б). Представлены каргинские, МИС-3, почвы профилями с ярко выраженным застойным оглеением. В их шлифах наблюдаются следы мерзлотных процессов: вызванные криотурбациями деформация гумусового горизонта, вовлечение

органических остатков в материал минерального горизонта и другие признаки криогенного структурообразования. Эти почвы являются продуктом криогидроморфного педогенеза на основании СТС – в условиях его неглубокого расположения. По органическому веществу палеопочв получена серия $^{14}$С-датировок в интервале 26–43 тыс. л. н. – их современными аналогами являются тундровые глеевые или мерзлотно-таёжные почвы холодных континентальных бореально-лесных областей [13].

Рис. 3. Разрез Пюлькы в верховьях р. Таз: а – общий вид разреза, б –фрагмент разреза с МИС-3, слоями; в, г – псевдоморфозы по МИС-2 ПЖЛ. Фото из архива В.С. Шейнкмана

Специфичны палеопочвы, связанные с потеплением в конце сартанского, МИС-2, криохрона. Они выявлены к северу от Сибирских Увалов (см. рис. 1, участки 1–6) также на былом основании СТС и в виде педоседиментов в заполнении псевдоморфоз по сартанским, МИС-2, ПЖЛ, куда они оползали во время таяния ПЖЛ. Это материал сильно оглеенных горизонтов с включениями гумусированных и оторфованных фрагментов. Псевдоморфозы хорошо выражены, свидетельствуя своей формой [7, 8/] об эпигенетическом, в МИС-2, промерзании, в условиях низкотемпературной криолитозоны, ранее сформированной МИС-3, каргинской, аллювиальной толщи (покрывающей север Западной Сибири), причем промерзание сопровождалось формированием ПЖЛ. Затем шел процесс их последующего таяния и замещения льда материалом палеопочв с междужильного пространства [13]. Так что речь вновь идёт о криогидроморфном педогенезе в тундровых ландшафтах и его связи с низкотемпературным криогенезом. Данные почвы формировались на основании СТС, были обеднены гумусом, но при таянии ПЖЛ гумусированные фрагменты скапливались на неровностях их стенок, образуя морфоны, сгустки темного цвета на былом окаймлении ПЖЛ. Оно сопряжено с основанием палеопочв (рис. 3, в, г), а по морфонам получен ряд $^{14}$С-датировок в интервале 17–9 тыс. л. н. – ряд из них показаны на рис. 3, г.

Подчеркнем: плейстоценовые палеопочвы во всех случаях контрастно отличались от современных поверхностных почв, представленных альфегумусовыми почвами – подзолами и подбурами, с яркими иллювиально-железистыми горизонтами и без признаков оглеения. В рамках рассматриваемого хроносреза эти почвы формировались на его завершающем этапе – во второй половине голоцена, как показало их датирование; этот процесс происходил в условиях свободного внутрипочвенного дренажа после оттаивания мерзлой толщи, причем ныне данные почвы глубокими клиньями внедряются в тело псевдоморфоз вдоль – по их оси (см. рис. 3, в, г).

Выявленные позднеплейстоценовые палеопочвы на севере Западной Сибири свидетельствуют, что на данной территории формировался педогенез, развивавшийся в течение основных периодов потепления климата: в термохроны МИС-5 и МИС-3 и в терминальную фазу криохрона МИС-2. Тогда как события криохронов четко фиксируют толщи с реликтами глубокого промерзания горных пород – с псевдоморфозами по ПЖЛ, фиксируемых в МИС-2 и МИС-4. Комплексы такого рода в

пределах одного разреза пока не выявлены, но авторами уже построена сводная региональная мерзлотно-почвенная палеокриологическая летопись на основе интеграции результатов по всем изученным профилям [22]. Ее корреляция со стратиграфическими колонками лёссово-почвенных серий сопредельных регионов [5] показывает наличие аналогов для всех основных палеопочвенных уровней.

Важно отметить, что во всех изученных палеопочвах преобладают признаки криогидроморфного педогенеза, которые отсутствуют только в лесной палеопочве МИС-5 Следовательно, за исключением тех почв, что образовались в голоцене и в термохрон МИС-5е, остальные палеопочвы формировались на мерзлом основании и представляют собой хорошо выраженные индикаторы былой мерзлоты, но образовавшейся при температуре выше значений, необходимых для развития ПЖЛ. Последние – индикатор глубокого низкотемпературного промерзания горных пород, условия образования которых резко контрастируют со средой, в которой формировались палеопочвы, т.е. толщи с ПЖЛ становятся соответствующим маркером. Таким образом, для позднего квартера севера Западной Сибири формируется репрезентативная, со своими маркерами, палеолетопись нового типа – палеокриологическая мерзлотно-почвенная летопись.

*Работа выполнена при поддержке финансирования в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2026-0027), осуществляемого Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН.*

***Литература***

1 Архипов С.А. Главные геологические события позднего плейстоцена (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. – 2000, т. 41, № 6. –С. 792-799.

2 Васильчук Ю.К., Плихт Й.В., Васильчук А.К., Юнгнер Х., Соннинен Э. Первые радиоуглеродные датировки сингенетических позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов // Доклады Академии наук. – 2000. – Т. 371. – С. 114-117.

3 Дубиков Г.И. Некоторые данные по климату верхнего плейстоцена на севере Западной Сибири // Изв. Академии Наук. Сер. геогр. – 1962. – № 6. – С. 80-85.

4 Земцов А.А. Геоморфология Западно-Сибирской равнины (северная и центральная часть). Томск: Издательство Томского госуниверситета. – 1976. – 344 с.

5 Зыкина В. С., Зыкин В. С. Лёссово-почвенная последовательность и эволюция природной среды и климата Западной Сибири в плейстоцене. – Новосибирск. – Гео. 2012. – 477 с.

6 Кузин И.Л. Мифы и реалии учения о материковых оледенениях. СПб.: Издательство СЗНИИ “Наследие”. – 2013. – 178 с.

7 Попов А.И., Розенбаум Г.Э., Тумель Н.В. Криолитология. М.: Изательство МГУ. – 1985. – 239 с.

8 Романовский Н.Н. Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск. – Наука. 1977. – 215 с.

9 Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Токарев, И.В. Реконструкция палеоклимата российской Арктики в позднем неоплейстоцене–голоцене на основе данных по изотопному составу полигонально-жильных льдов // Криосфера Земли. – 2015. –Т. XIX. – № 2. – С. 98–106.

10 Таргульян В. О., Бронникова М. А. Память почв: теоретические основы концепции, современное состояние и перспективы развития // Почвоведение. – 2019. – № 3. – С. 259–275.

11 Шейнкман В.С., Мельников В.П., Седов С.Н., Парначев В.П. Новые свидетельства внеледникового развития севера Западной Сибири в квартере // ДАН. География. – 2017. – Т. 477. – № 4. – С. 480–484.

12 Шейнкман В.С., Мельников В. П. Ледники Сибири как компонент криолитогенно-гляциальных геосистем // Криосфера Земли. – 2014. – Т. XVIII. – № 2. – С. 3–23.

13 Шейнкман В.С., Седов С.Н., Безрукова Е.В. Палеоэкология севера Западной Сибири в последнюю холодную эпоху плейстоцена: новые свидетельства и сценарии // Экосистемы: экология и динамика. – 2022. –Т. 6. – № 4. –С. 71-88

14 Шмелев Л.М. Следы криогенных явлений в четвертичных отложениях Западно-Сибирской низменности и их палеогеографическое значение // Четвертичный период Сибири. М.: – Наука. – 1966. – С. 429– 437.

15 Bronger A., Winter R., Sedov S.N. Weathering and clay mineral formation in two Holocene soils and buried paleosols in Tadjikistan: towards a Quaternary paleoclimatic record in Central Asia // Catena. – V. 34. – 1998. – P. 19-34.

16 Grosswald M. G., Hughes T. The Russian component of an Arctic Ice Sheet during the LGM // Quaternary Science Reviews. – 2002. – V. 21(1). – P. 121-146.

17 Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic δ18O Records // Paleoceanography. – 2005. – V. 20. – P. PA 1003

18 Möller P., Benediktsson Í.Ö., Anjara J., Ole Bennike O. et al. Glacial history and paleoenvironmental change of southern Taimyr Peninsula, Arctic Russia, during the Middle and Late Pleistocene // Earth Science Review. – 2019. – V. 196. – P. 409–428.

19 Svendsen J.I., Krüger L.C., Mangerud J. et al. Glacial and vegetation history of the Polar Ural Mountains in northern Russia during the Last Ice Age, Marine Isotope Stages 5–2 // Quaternary Science Review. – 2014. –V. 92. – P. 409–428.

20 Sheinkman V. Quaternary glaciation in North-Western Siberia – New evidence and interpretation // Quaternary International. – 2016. – V. 420. – P. 15–23.

21 Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh L., Bezrukova E. et al. A multiproxy record of sedimentation, pedogenesis, and environmental history in the north of West Siberia during the late Pleistocene based on the Belaya Gora section // Quatern. Res. – V. 99. – 2021. – P. 204-222.

22 Sheinkman V., Sedov S., Gravis A. et al. Permafrost evolution in Subarctic West Siberia since Marine Isotope Stage 3 evidenced by relics of cryogenic–cryopedogenic interaction // Permafrost, Periglacial Processes. – 2026. – 37. –P. 60–77

## ДИНАМИКА АРКТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ЕГО ОСВОЕНИЕ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫМИ ЛЬДАМИ И В ПОЗДНЕМ КВАРТЕРЕ

***В.С. Шейнкман, С.Н. Седов***
*Институт криосферы Земли, ФИЦ ТюмНЦ СО РАН, Тюмень*

Территория севера Западной Сибири представляет собой слабо расчлененную равнину (рис. 1), выполненную морскими и аллювиальными отложениями – в зависимости от степени проявления в соответствующих ареалах превалирующих в них процессов осадконакопления и рельефообразования. Есть авторы [4, 17, 21], которые считают, что некоторые формы рельефа в этом регионе являются реликтами древних ледников, но результаты исследований авторов [14, 15, 19] опровергают эту точку зрения. Вся рассматриваемая территория практически на всех этапах плейстоцена подвергалась, в различной степени, многолетнему промерзанию [3, 9], причем на формирование многолетнемерзлых пород (ММП) существенное влияние оказывало имевшее место в плейстоцене проявление возвратно-поступательной динамики Арктического бассейна и тектонических процессов, генерированных в его пределах в то время. Оно в значительной мере контролировало режим осадконакопления в регионе и определяло условия террасирования данной территории, степень которого довольно велика – на отображенной на рис. 1 карте ясно просматриваются пониженные и возвышенные поверхности выравнивания с перепадом высот, порой превышающим 100 м. Вопросы их происхождения затрагивают не только специфику промерзания горных пород на данной территории – они связаны и с продолжающимися спорами о том, как формировалась субарктическая зона Западной Сибири, в том числе – с дискуссией по проблеме древнего покровного оледенения региона, до сих пор предполагаемого некоторыми исследователями [17, 21], объясняющими расчлененность равнины его воздействием. В частности, возвышенность Сибирские Увалы принималась в этом случае за морену древнего ледника [4], но детальные, проведенные авторами исследования [14, 15, 18], подтвердили вывод [5], что в структуре этого образования отслеживается только комплекс аллювиальных осадков квартера, лежащих на основании дочетвертичных сорских отложений.

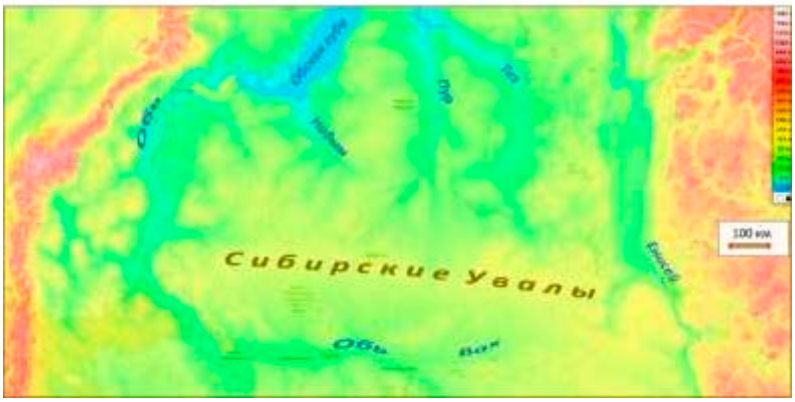



Рис. 1. Рельефная карта севера Западной Сибири (по https://ru-ru.topographic-map.com/map-pk6jmt/Россия)

В целом выполненные авторами наблюдения позволили получить репрезентативный массив новых данных и поставить вопрос о корректировке в данном регионе схем трансгрессивно–регрессивной динамики Арктического бассейна, влияющей на ход образования мерзлых толщ. Авторами было установлено, что в холодные эпохи позднего плейстоцена зона полигонально-жильных льдов (ПЖЛ), которые сегодня занимают [2, 3, 11] ареал к северу от 68º с. ш., продвигалась далеко на юг и расширялась до широтного течения Оби. Но южнее полярного круга ПЖЛ резко меняли свой характер: сингенетический тип у них сменялся эпигенетическим. Это означает следующее.

С одной стороны, присутствие ПЖЛ во всем данном ареале свидетельствует о нереальности развития на данной территории в криохроны плейстоцена ледниковых покровов, поскольку климатическая ритмика в формате потепление-похолодание имела на его протяжении схожие черты [16], а параллельное развитие ПЖЛ и наземного оледенения площадного характера несовместимо. С другой стороны – это говорит об отсутствии трансгрессивно–регрессивного воздействия Арктического бассейна, по крайней мере в позднем квартере, южнее полярного круга, поскольку ПЖЛ эпигенетического типа формируются [10] в субаэральных условиях на стабилизированной, в течение геологически длительного, времени поверхности. Иными словами, изучение ПЖЛ и оставляемых ими следов, отражающих среду, в которой они формируются, и тип осадконакопления в ней, могут при раскрытие истории и механизма их развития дать ответ на вопрос: насколько на севере Западной Сибири образование ПЖЛ связано с трансгрессивно-регрессивным воздействием Арктического бассейна. Так на былом дне моря и поймах впадающих в него рек (при повышении их базиса эрозии за счет наступания моря) при соответствующей температуре горных пород шло развитие ПЖЛ сингенетического типа. А вне морского бассейна синкриогенез возможен локально, в сходных условиях береговой зоны озер или на днище речных долин при активном пойменном накоплении аллювия, тогда как на геологически длительное стабилизированной поверхности в субаэральной среде ПЖЛ будут иметь принципиально иной – эпигенетический характер.

Как отмечено выше, сегодня на севере Западной Сибири ПЖЛ существуют за полярным кругом – севернее 68º с. ш., в ареале, приуроченном к прилегающей к арктическому побережью равнине, выполненной аллювиальными и морскими осадками. Там развиты низкотемпературные ММП, поскольку именно их среда имеет параметры, необходимые для образования ПЖЛ: в песках, например, которые на этой территории превалируют, температура ММП должна быть –5 ºС и ниже [10]. ПЖЛ здесь хорошо выражены как льды сингенетического типа, начавшие формироваться в первые криохроны позднего плейстоцена, и затем их развитие шло непрерывно, в том числе и на сравнительно теплых этапах МИС3 (каргинское время) и голоцена. Это ясно показали результаты временной привязки с существующих ПЖЛ и их изотопного исследования: льды все отмеченное время росли по типу клин-в-клин до современности, достигая высоты 20 м [2, 3, 11].

Суть нашей задачи состояла, таким образом, в том, чтобы выяснить, какой тип осадконакопления южнее зоны распространения современных ПЖЛ фиксируют следы былых льдов такого типа. В аспекте динамики Арктического бассейна мерзлотоведы обычно используют схемы [9], которые, в свою очередь, базируются на данных А.И. Попова [7] и Г.И. Лазукова [6]. Согласно им обширная морская трансгрессия имела место в среднем плейстоцене, захватывая север Западной Сибири до Сибирских Увалов (см. рис. 1) – до 60–61º с. ш. по [7] или чуть севернее, до 63-64º с. ш. – по [6], тогда как в позднем плейстоцене шло прогрессивное отступание Арктического бассейна, его граница была отодвинута за полярный круг, и затем данный тренд продолжался, сопровождаясь отдельными локальными трансгрессиями. Однако после публикации отмеченных работ прошло много времени, и в определенной мере они требуют корректировки. Это вопрос отдельного рассмотрения, и здесь

просто обозначим, что в ходе наших исследований следов дальних морских трансгрессий, до параллели ≈60º с. ш., не было обнаружено. Южнее полярного круга фиксировались только следы промерзания озерно-аллювиальной равнины, выполненной осадками разного возраста [16, 19, 20].

Показать, где в принципе и когда находилась граница морского воздействия, могло выявление области смены типов ПЖЛ и их датирование. В этом аспекте спорным, но важным для понимания раскрываемых явлений, становится вопрос о количестве врезов рек в данном районе, определяющих появление стабильных поверхностей. Касательно его нет общего мнения: порой выделяется до 8 эрозионных террас [5], им присваиваются различные индексы, и подобный разброс мнений отражает все еще недостаточную изученность процессов, формирующих террасы в регионе. Поэтому кратко отметим, что в районе полярного круга и южнее его здесь встречаются лишь террасы, тело которых сложено промерзавшим в прошлом аллювием, их формирование обусловлено расчленением озерно-аллювиальной равнины на морфоструктурные блоки [12], а причина подобного расчленения, на наш взгляд – освоение речной сетью линий разломов, возникших под воздействие тектонического сигнала со стороны Арктики [1]. Океаническая плита, двигающаяся из зоны спрединга хр. Гаккеля в юго-западном направлении [15], оказывает в данном случае давление на основание Западно-Сибирской континентальной плиты, и оно становится причиной появления разломов (рис. 2). Это процесс, предшествующий субдукции [13], и в нашем случае в пределах Западно-Сибирской плиты пока сказывается только давление на нее. Впоследствии, при развитии субдукции, океаническая плита начнет уходить под континентальную плиту, обусловливая иные проявления тектоники. Но на данном этапе развития территории реакция на отмеченное давление выражается в блоковых поднятиях разного масштаба, определяя явление клавишной тектоники вдоль обновленных в плейстоцене древних разломов – главных, субширотной ориентации, и оперяющих их – ориентированных перпендикулярно им. Как результат, блоки с одновозрастными отложениями оказываются подняты на разные гипсометрические уровни и в дальнейшем могут быть препарированы на этих уровнях воздействием одних и тех же, протекавших одновременно, криогенных процессов.

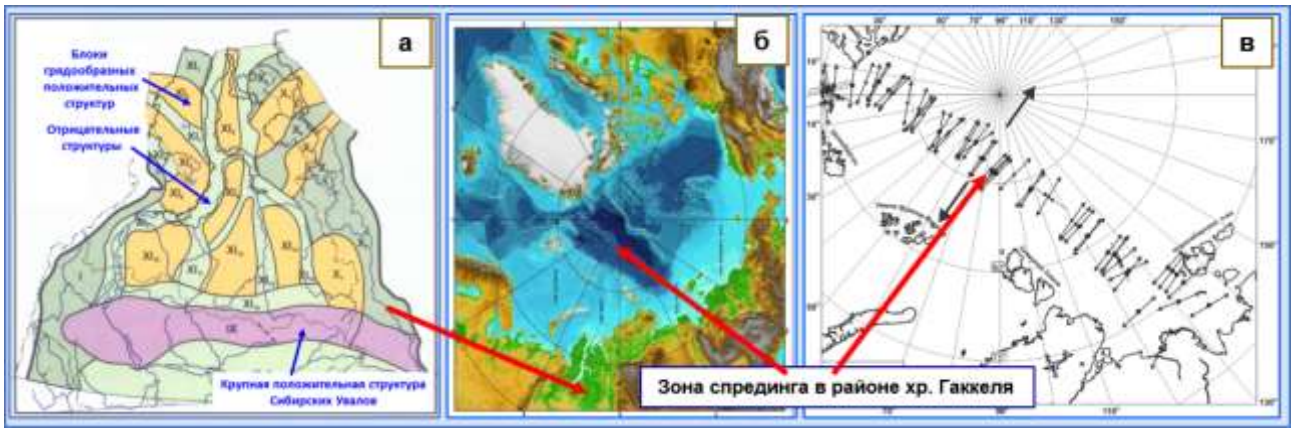



Рис. 2: а – упрощенная, на основе [12], схема расчленения севера Западной Сибири на морфоструктурные блоки; б –карта Арктического бассейна; в – положение хр. Гаккеля и зоны спрединга в его районе по [1]

Наиболее поднятый блок (см. рис. 2) – это как раз возвышенность Сибирские Увалы (средние отметки 120-140 м, максимальная – 285 м). На наш взгляд [15] здесь шла основная разгрузка напряжений давления на континентальную плиту; Сибирские Увалы считались [9] границей дальнего внедрения моря, но исследования [18, 19, 20] показали: возвышенность слагают осадки, представленные аллювием среднего и позднего квартера. В них не выявлено признаков присутствия морских вод, в том числе геохимическими методами, а верхняя ≈10-м пачка осадков представлена датированными МИС3, каргинскими, отложениями. Блоки, поднятые на сравнимую высоту, есть и намного севернее Сибирских Увалов, например – в низовьях р. Надым (рис. 3).

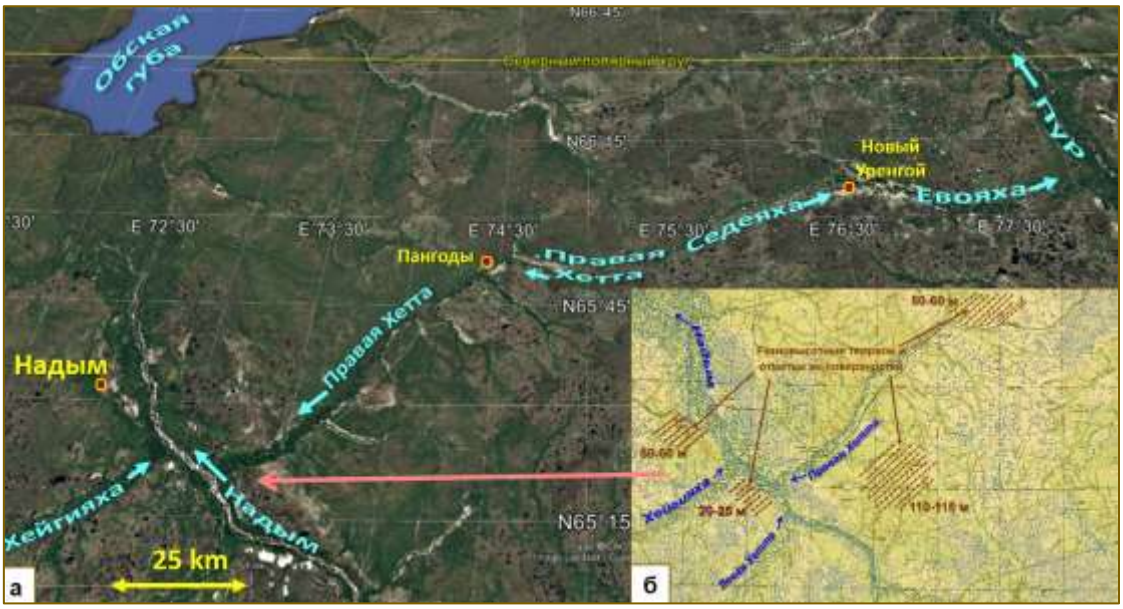



Рис. 3: а – низовья р. Надым на картосхеме на основе платформы Google Earth Pro;
б – фрагмент топографической карты того же района.

Надым течет (рис. 3, а) вдоль разлома, параллельного зоне спрединга хр. Гаккеля, а его притоки, р. Хейгияха и р. Правая Хетта – вдоль ориентированного перпендикулярно ему оперяющего разлома. Характерно, что вблизи слияния рек находятся эрозионные террасы на трех гипсометрических уровнях: с отметками поверхности 20-25 м, 50-60 м и 110-115 м, причем в их теле верхняя ≈10-м пачка осадков, как и в вышеописанном случае, представлена аллювием, отложенным в конце каргинского, МИС3, термохрона. Характерно и то, что накапливание аллювия шло тогда в синкриогенном режиме – в условиях промерзания горных пород при температуре несколько выше значений, необходимых для формирования ПЖЛ, но обеспечивающей развитие грунтовых жил сезонно-талого слоя (СТС). Такие жилы встречаются по всей высоте пачки МИС3, каргинских, отложений, фиксируя смещение СТС вверх по разрезу вслед за наращиванием аллювия. А в сартанский, МИС2, криохрон поверхностные отложения везде были преобразованы воздействием глубокого промерзания пород с участием ПЖЛ.

Иными словами, около 30 тыс. л. н. под воздействием клавишной тектоники равнина севера Западной Сибири, выполненная с поверхности МИС3, каргинским, аллювием, оказалась южнее полярного круга расчленена на поднятые на разную высоту блоки, на стыке которых вдоль обновленных древних разломов сформировалась современная речная сеть. Затем в течение сартанского, МИС2, криохрона субаэральная поверхность образованных террас была рассечена ПЖЛ, но эти льды были уже принципиально иного типа –эпигенетические, а не сингенетические, как на арктическом побережье.

Хорошо иллюстрирует данную схему рис. 4, отображающий ситуацию южнее полярного круга, менее чем в 1º по широте от него – в долине р. Хейгияха, левого притока р. Надым, в приустьевой части которого ясно просматриваются два уровня террас – с отметками поверхности ≈50 м (рис 4, а, б, в) и ≈25 м (рис. 4, г, д). В обоих случаях террасы сложены МИС3, каргинским, аллювием, а вблизи поверхности у них фиксируется сартанский, МИС2, криопедогенный горизонт: на глубине около 1 м от поверхности здесь на былом основании СТС лежит криогидроморфная палеопочва, сопряженная с окаймлением псевдоморфоз по сартанским, МИС2, ПЖЛ, которые своей ясно выраженной формой говорят о типе наследуемых ими ПЖЛ: они узкие в средней и нижней части, вверху резко расширяются, и вдоль контакта с вмещающей породой слои последней здесь отжаты вверх и в стороны; а над головками жил фиксируются уже несколько сглаженные валики выжимания. Всё это типично при развитии ПЖЛ в условиях стабилизации поверхности, которую они рассекают [8], и говорит об их эпигенетическом развитии. Учитывая, что данный участок лежит вблизи Обской губы, то низкая терраса с отметками поверхности ≈25 м в случае даже небольшой трансгрессии должна была бы залита морем, но следы эпигенетических ПЖЛ, рассекавших эту поверхность, свидетельствуют об обратном.

Рис. 4. Приустьевая часть долины р. Хейгияха: а, б, в– фрагменты и общий вид террасы с отметкой поверхности 50 м; г, д – фрагменты и общий вид террасы с отметкой 25 м; е –картосхема местности.
Фото из архива В.С. Шейнкмана.

Аналогичные структуры хорошо выражены и в самой близи полярного круга, в частности они были отслежены и изучены авторами в окрестностях г. Новый Уренгой в строении террас системы рек Седеяха – Евояха, долины которых лежат всего на полградуса по широте южнее полярного круга. Таким образом, в рассматриваемом ареале южнее полярного круга в плейстоцене формировалась зона вне трансгрессивно-регрессивного воздействия Арктического бассейна. В МИС3, каргинское, время, она была перекрыта накапливаемым синкриогенно аллювием, а в конце МИС3 его блоки под воздействием клавишной тектоники были подняты на разную высоту. Затем местность тектонически стабилизировалась, и в течение сартанского, МИС2, криохрона и в голоцене находилась в субаэральных условиях. Причем верхние слои тела образованных террас в холодное время сартанского, МИС2, криохрона, были подвергнуты воздействию низкотемпературного криогенеза и рассечены эпигенетическими ПЖЛ.

*Работа выполнена при поддержке финансирования в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2026-0027), осуществляемого Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН*

***Литература***

1 Арктический бассейн (геология и морфология). СПб.: ВНИИ Океангеология. – 2017. – 291 с.

2 Васильчук Ю.К., Плихт Й.В., Васильчук А.К., Юнгнер Х., Соннинен Э. Первые радиоуглеродные датировки сингенетических позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов // Доклады Академии наук. – 2000. –Т. 371. – С. 114-117.

3 Васильчук, Ю.К, Васильчук А.К. Мощные полигональные торфяники в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири // Криосфера Земли. – 2016. Т. – XX. – № 4. – С. 3–15.

4 Земцов А.А. Геоморфология Западно-Сибирской равнины (северная и центральная часть). Томск: Издательство Томского госуниверситета. – 1976. – 344 с.

5 Кузин И. Л. Геоморфология Западно-Сибирской равнины. СПб., изд-во Государственной полярной академии. – 2005. –176 с.

6 Лазуков Г.И. Плейстоцен территории СССР. М. – Высшая школа. –1989. –320 с.

7 Попов А.И. Сопоставление опорных разрезов четвертичных отложений севера Западной Сибири и Большеземельской тундры // Основные проблемы изучения четвертичного периода. М. – Наука. – 1965. – С. 76–88.

8 Попов А.И., Розенбаум Г.Э., Тумель Н.В. Криолитология. М. – Изд-во Московского госуниверситета. – 1985. –240 с.

9 Розенбаум Г.Э., Шполянская Н.А. Позднекайнозойская история криолитозоны Арктики и тенденции ее будущего развития. М. – Научный мир. – 2000. – 103 с.

10 Романовский Н.Н. Формирование полигонально-жильных структур. – Новосибирск. – Наука. – 1977. –215 с.

11 Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Токарев, И.В. Реконструкция палеоклимата российской Арктики в позднем неоплейстоцене–голоцене на основе данных по изотопному составу полигонально-жильных льдов // Криосфера Земли. – 2015. –Т. XIX. –№ 2. –С. 98–106.

12 Трофимов В.Т. Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты. М. – Изд-во Московского госуниверситета. – 1977. – 278 с.

13 Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. – М. – Научный мир. – 2001. – 606 с.

14 Шейнкман В.С., Мельников В.П., Седов С.Н., Парначев В.П. Новые свидетельства внеледникового развития севера Западной Сибири в квартере // ДАН. География. – 2017. – Т. 477. – № 4. – С. 480–484.

15 Шейнкман В.С., Мельников В.П., Парначев В.П. Анализ криогенных и тектонических процессов на севере Западной Сибири в плейстоцене с позиций криогетеротопии // Доклады РАН. – 2020. –Т. 494. – № 1. – С. 82-86.

16 Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic δ18O Records // Paleoceanography. – 2005. – V. 20. – P. PA 1003

17 Möller P., Benediktsson Í.Ö., Anjara J., Ole Bennike O. et al. Glacial history and paleoenvironmental change of southern Taimyr Peninsula, Arctic Russia, during the Middle and Late Pleistocene // Earth Science Review. – 2019. – V. 196. – P. 409–428.

18 Sheinkman V. Quaternary glaciation in North-Western Siberia – New evidence and interpretation // Quaternary International. – 2016. – V. 420. – P. 15–23.

19 Sheinkman V., Kurgaeva A., Sedov S., Bezrukova E. Multiphase cryogenesis and incipient paleosol development during MIS 2 in North-Western Siberia: Detailed chronostratigraphy, paleoenvironmental significance, and comparison with the global and European records // Quaternary International. – Vol. 686-687. – 2024. – P. 142–159.

20 Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh L. Bezrukova E., Dobrynin D., Timireva S., Rusakov A., Maksimov F. A multiproxy record of sedimentation, pedogenesis, and environmental history in the north of West Siberia during the late Pleistocene based on the Belaya Gora section // Quaternary Research. – 2021. – Vol. 99. –P. 204– 222.

21 Svendsen J.I., Krüger L.C., Mangerud J. et al. Glacial and vegetation history of the Polar Ural Mountains in northern Russia during the Last Ice Age, Marine Isotope Stages 5–2 // Quaternary Science Review. – 2014. –V. 92. – P. 409–428.

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСОВ ОБЩЕГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ПРОВИНЦИЯХ И ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ЯКУТИИ

***А.Г. Шепелев***

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

Климатические условия Якутии обуславливает медленное протаивание почвы в течение теплого периода, что не может не сказаться на мощности сезонноталого слоя, являющегося деятельным слоем с точки зрения протекающих в нем биохимических и физико-химических процессов, и одним из факторов, определяющих генерацию экосистемного органического углерода. Почвы северных широт являются ключевым компонентом глобального углеродного цикла, а регион с вечной мерзлотой покрывает 22% Северного полушария и содержит почти вдвое больше углерода, чем атмосфера. При этом запасы общего органического углерода (TOC) в разных климатических зонах России недооцениваются из-за сложной неоднородности [1] и ландшафтного разнообразия. Настоящее исследование посвящено оценке запасов TOC в почвенном покрове и многолетнемерзлых породах с дифференциацией по мерзлотно-ландшафтным провинциям Республики Саха (Якутия) [2] и основанных на учении ландшафтно-геохимическим систем [3], включающим 3 типа: элювиальные, транзитные и аккумулятивные. Исследования являются своевременными и насущными в контексте глобальных климатических изменений. Они восполняют критический пробел оценок по запасам углерода в одном из самых холодных регионов мира, обеспечивая научную основу для анализа рисков, связанных с таянием вечной мерзлоты.

Данные получены по результатам экспедиционных и аналитических исследований, выполненных сотрудниками Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова (ИМЗ СО РАН) на обширной территории Якутии. Недостающие данные оценок общего органического углерода (ТОС) для физико-географических зон Якутии получены из литературных источников и зарубежной базы данных углерода циркумполярных почв The Northern Circumpolar Soil Carbon Database (NCSCD / NCSCD v.2 - https://bolin.su.se/data/ncscd) в слое почвы 0–3 м [4–6]. Прямые измерения содержания ТОС в мерзлотных ландшафтах собраны в полевых условиях из почвенного покрова (деятельный слой) и отложений (защитный слой и многолетнемерзлые породы) до глубины 3 м. Определение содержания ТОС проводилось на газовом фазовом анализаторе Leco RC-612 в лаборатории криогенных ландшафтов ИМЗ СО РАН. Запасы углерода рассчитаны отдельно для каждого генетического горизонта, затем суммировались для получения общих запасов углерода в толще почвенного покрова и ММП. Расчёт запасов ТОС выполнен с использованием формулы (1).

$$S=X\times\rho\times H\times f, \quad (1)$$

где S – запасы углерода в почве и МПП, кг/м$^2$; X – содержание ТОС в почве и ММП, %; ρ – плотность сложения почвы и МПП, г/см$^3$; H – мощность генетического горизонта, см; f – доля фракции <2 мм в минеральном горизонте. Для определения в минеральных горизонтах доли мелкозема <2 мм образцы просеяны через сито с диаметром ячеек 2 мм. Его доля во всех минеральных слоях равнинных территорий составляет 100%, поэтому в формуле расчета запасов ТОС этот показатель не учитывался. В почвах с преобладанием фракции <2 мм присоединяется к формуле (1).

На основе мерзлотно-ландшафтной карты Якутии проведен многокомпонентный анализ картографирования ТОС в почве и многолетнемерзлых породах (ММП) 0–300 см масштаба 1:11 350 000 (рис. 1 и 2). Для составления карты запасов общего органического углерода (ТОС) охвачены все почвенные провинции Якутии с севера на юг: от арктотундровых, почв пятен, подбуров тундровых, горных примитивных, каменистых россыпей, тундровых глеевых, перегнойно-карбонатных, горных таёжных, гранузёмов, подбуров охристых, глеезёмов таёжных до мерзлотно-таёжных почв. В результате этого построены полигоны на всю территорию республики. Каждому полигону присоединены данные о запасах углерода по физико-географическим провинциям, полученные прямым способом в течение 10-летнего периода полевых исследований и по анализу литературного научного материала. Наибольшие запасы ТОС находятся в Эйикской водораздельно-маревой провинции (A.II.4) – 7,76 Гт, Оленекской увалистой провинции (A.II.3) – 6,63 Гт и Колымской озерно-термокарстовой провинции (B.III.2) – 5,94 Гт. Затем промежуточные запасы углерода распределены между провинциями следующим образом: Нижнеиндигирская озерно-термокарстовая (B.II.3) – 4,25 Гт, Вилюйская аласная (A.IV.3) – 3,96 Гт, Амгино-Алданская пологоувалистая (A.IV.7) – 3,78 Гт и Олекмо-Алданская увалистая (A.V.2) – 3,20 Гт. Наименьшие запасы характерны для гор Южной Сибири (Б) и провинций с преобладанием горных природных комплексов (A.III, B.IV, B.VI и B.VII). Здесь запасы ТОС изменяются в пределах от минимального 0,04 (B.IV.6) до максимального 1,74 (A.III.4) Гт. Равнинные мерзлотные ландшафты (тундровые, северотаежные и среднетаежные провинции) Якутии при меньшей площади покрытия (42%) обладают оптимальной секвестрацией ТОС в почве и ММП от 1,35 до 7,76 Гт.

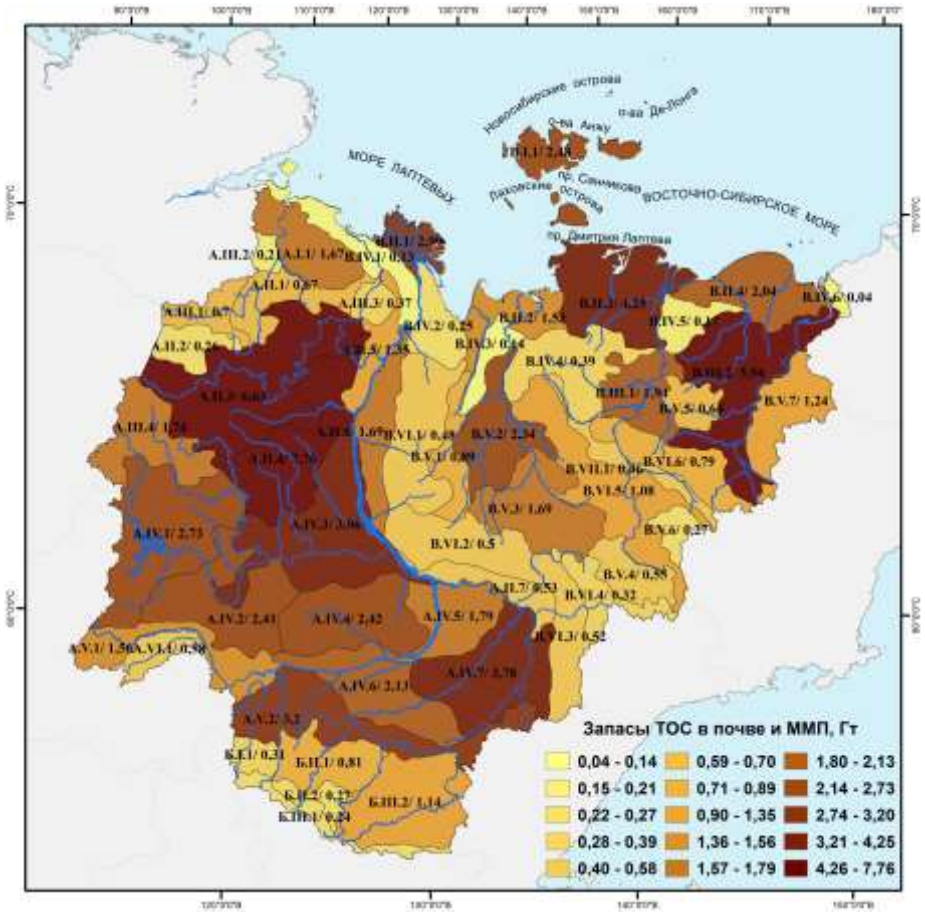



Рис. 1. Запасы ТОС в толще 0–300 см почвенного покрова (без учета подстилки) и МПП в мерзлотно-ландшафтных провинциях Республики Саха (Якутия), Гт

Примечание. Мерзлотно-ландшафтное районирование: А. Страна Средняя Сибирь: I. Группа тундровых провинций сплошного распространения ММП А.I.1 – Анабаро-Оленекская озерно-термокарстовая. II. Группа северотаежных провинций сплошного распространения ММП А.II.1 – Анабаро-Оленекская зандровая, А.II.2 – Аргасалинская зандровая, А.II.3 – Оленекская увалистая, А.II.4 – Эйикская водораздельно-маревая, А.II.5 – Нижнеленская северно-термокарстовая, А.II.6 – Приленская моренная, А.II.7 – Приалданская морено-зандровая. III. Группа провинций с горно-тундровыми и горно-редколесными природными комплексами сплошного распространения ММП А.III.1 – Анабарская плоскогорная, А.III.2 – Хара-Тасская плоскогорная, А.III.3 – Кыстыкская грядово-ступенчатая, А.III.4 – Верхневилюйская столово-останцовая. IV. Группа среднетаежных провинций сплошного распространения ММП А.IV.1 – Тунгусско-Ботуобинская ступенчато-грядовая, А.IV.2 – Средневилюйская пологоувалистая, А.IV.3 – Вилюйская аласная, А.IV.4 – Лено-Вилюйская пологоволнистая, А.IV.5 – Лено-Амгинская аласная, А.IV.6 – Лено-Алданская карстовая, А.IV.7 – Амгино-Алданская пологоувалистая. V. Группа среднетаежных провинций прерывистого распространения ММП А.V.1 – Нюя-Олекминская увалистая, А.V.2 – Олекмо-Алданская увалистая. VI. Группа среднетаежных провинций островного распространения ММП А.VI.1 – Приленская увалистая. Б. Страна гор Южной Сибири: I. Группа провинций с преобладанием горно-редколесных природных комплексов прерывистого распространения ММП Б.I.1 – Олекмо-Чарская низкогорная. II. Группа провинций с горно-таежными и горно-редколесными природными комплексами прерывистого распространения ММП Б.II.1 – Олекмо-Тимптонская плоскогорная, Б.II.2 – Чульманская плоскогорная. III. Группа провинций с преобладанием горно-редколесных и подгольцовых природных комплексов сплошного и прерывистого распространения ММП Б.III.1 – Становая среднегорная, Б.III.2 – Тимптоно-Учурская среднегорная. В. Страна Северо-Восточной Сибири: I. Группа провинций арктическо-тундровых островов сплошного распространения ММП В.I.1 – Провинция Новосибирских островов. II. Группа тундровых провинций сплошного распространения ММП В.II.1 – Дельта р. Лены, В.II.2 – Нижнеянская северо-термокарстовая, В.II.3 – Нижнеиндигирская озерно-термокарстовая, В.II.4 – Алазее-Колымская озерно-термокарстовая. III. Группа северотаежных провинций сплошного распространения ММП В.III.1 – Абыйская озерно-термокарстовая, В.III.2 – Колымская озерно-термокарстовая. IV. Группа провинций с преобладанием горно-тундровых природных комплексов сплошного распространения ММП В.IV.1 – Кряжи Прончищева и Чекановского, В.IV.2 – Хараулахская низкогорная, В.IV.3 – Куларская низкогорная, В.IV.4 – Полоусненская низкогорная, В.IV.5 – Кондаковско-Улахансисская низкогорная, В.IV.6 – Северо-Анюйская низкогорная. V. Группа провинций с преобладанием горно-редколесных природных комплексов сплошного распространения ММП В.V.1 – Приверхоянская моренная, В.V.2 – Янская плоскогорная, В.V.3 – Адыче-Эльгинская плоскогорная, В.V.4 – Оймяконская плоскогорная, В.V.5 – Алазейская плоскогорная,

B.V.6 – Нерская плоскогорная, B.V.7 – Юкагирская низкогорная. VI. Группа провинций с горно-тундровыми и горно-редколесными природными комплексами сплошного распространения ММП B.VI.1 – Орулганская среднегорная, B.VI.2 – Верхоянская среднегорная, B.VI.3 – Сетте-Дабанская среднегорная, B.VI.4 – Сунтар-Хаятинская среднегорная, B.VI.5 – Черская среднегорная, B.VI.6 – Момская среднегорная. VII. Группа провинций с преобладанием горно-редколесных и северотаежных природных комплексов сплошного распространения ММП B.VII.1 – Момо-Селенняхская межгорно-котловинная.

Основные запасы ТОС сосредоточены в районах распространения ММП сплошного типа, которые занимают 89,6% территории Якутии. В количественном выражении эти запасы составляют 77,5 Гт. Прерывистый тип ММП охватывает 9,6% площади и характеризуется запасами в размере 6,84 Гт. Островной тип ММП является наименее распространенным, охватывая лишь 0,8% площади, в нем аккумулировано 0,58 Гт.

В материалах (рис. 2) представлена карта запасов ТОС по типам местности и приуроченности к ландшафтно-геохимическим системам (табл. 1), которые составляют, Гт ТОС: маршевый (I) – 1,15, низкотеррасовый (II) – 10,56, средневысотный террасовый (III) – 2,91, межгрядово-низинный (IV) – 0,70, высокотеррасовый (V) – 0,77, древнетеррасовый (VI) – 0,53, межаласный (VII) – 10,07, аласный (VIII) – 4,17, моренный (IX) – 2,99, зандровый (X) – 1,23, приводораздельный элювиальный (XII) – 18,02, склоновый коллювиальный (XIII) – 6,92, склоновый делювиально-коллювиальный (XIV) – 7,25, склоновый делювиально-солифлюкционный (XV) – 14,95, слабодренированный маревый (XVI) – 1,19, ледниково-долинный (XVII) – 0,69, долинно-морской террасовый (XX) – 0,83. В трех типах местности запасы ТОС не оценивались в виду его низкого содержания: приводораздельный скальный (XI), ледниковый (XVIII) и тукуланный (XIX). С позиции ландшафтной геохимии, запасы ТОС закономерно распределяются по генетическим типам ландшафтов: наибольший пул сосредоточен в элювиальных ландшафтах (36,17 Гт, или 42,6%), несколько меньший – в транзитных (29,46 Гт, или 34,7%), а минимальный – в аккумулятивных (19,30 Гт, или 22,7%). Подобное распределение отражает доминирующие геохимические процессы – от выноса вещества в автономных условиях до его аккумуляции в подчинённых позициях.

Территория Республики Саха (Якутия) аккумулирует в почве и верхней кровле вечной мерзлоты 84,9 Гт ТОС. Равнинные провинции с площадью покрытия 60% хранят 66,3 Гт, из них на долю ледового комплекса (ЛК) приходится 41,5 Гт углерода или 63%. Горные провинции занимают площадь 40%, в которых содержится до 18,6 Гт или 22% от общих запасов всего депонированного углерода. Дифференциация запасов ТОС по типу распространения ММП показывает, что в провинциях сплошного развития ММП сосредоточено 77,5, прерывистого – 6,84 и островного – 0,58 Гт. Особенную уязвимость представляют мерзлотные ландшафты Якутии, развитые на ЛК. Их занимаемая площадь составляет 1 043 990 км$^2$ или 34% территории республики. К мерзлым толщам ЛК относятся следующие физико-географические провинции (всего 16): A.I.1, A.II.1, A.II.4, A.II.5, A.II.7, A.IV.3, A.IV.4, A.IV.5, B.I.1, B.II.1, B.II.2, B.II.3, B.II.4, B.III.1, B.III.2 и B.IV.1. Породы ЛК неустойчивы к изменению теплового режима грунтов, что обусловлено их повышенной льдистостью, достигающей до 90% занимаемого объема мерзлых отложений. При их деградации и потере части подземного льда высвободится неопределенное количество углерода в разных формах: от газообразных до водорастворимой фракции.

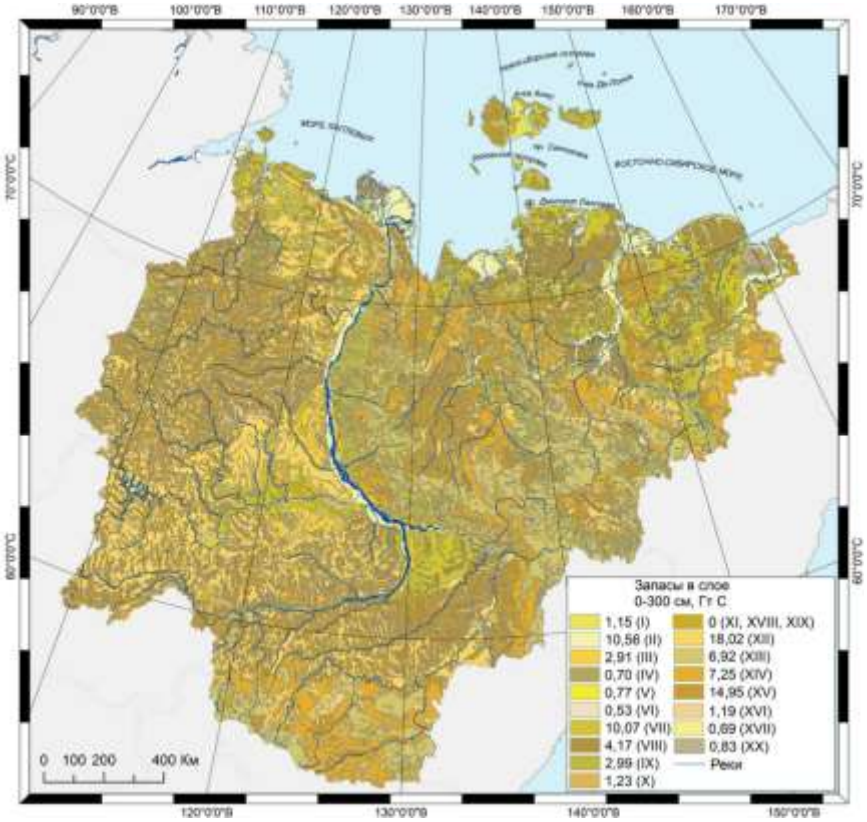



Рис. 2. Запасы ТОС в почве и многолетнемерзлых породах 0–300 см по типам местности и ландшафтно-геохимическим системам Республики Саха (Якутия)

Примечание. Типы местности: I – Маршевый, II – Низкотеррасовый, III – Средневысотный террасовый, IV – Межгрядово-низинный, V – Высокотеррасовый, VI – Древнетеррасовый, VII – Межаласный, VIII – Аласный, IX – Моренный, X – Зандровый, XI – Приводораздельный скальный, XII – Приводораздельный элювиальный, XIII – Склоновый коллювиальный, XIV – Склоновый делювиально-коллювиальный, XV – Склоновый делювиально-солифлюкционный, XVI – Слабодренированный маревый, XVII – Ледниково-долинный, XVIII – Ледниковый, XIX – Тукуланный и XX – Долинно-морской террасовый.

Таблица 1

Ландшафтно-геохимические системы: их взаимосвязь с типами местности и аккумуляцией ТОС

| № | Типы местности | Ландшафтно-геохимическая система | Позиция в рельефе | Площадь (кв. км) | % | Запасы, Гт |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | Гидрография | - | - | 31863,08 | 1,04 | 0,00 |
| I | Маршевый | Автоморфные (элювиальные) | элювиально-аккумулятивный | 18424,18 | 0,60 | 1,15 |
| II | Низкотеррасовый | Гидроморфные (супераквальный) | транзитно-аккумулятивный | 393746,35 | 12,84 | 10,56 |
| III | Средневысотный террасовый | Автоморфные (элювиальные) | элювиально-транзитный, элювиально-аккумулятивный | 81558,54 | 2,66 | 2,91 |
| IV | Межгрядово-низинный | Гидроморфные (супераквальный) | элювиальный, транзитный, аккумулятивно-элювиальный | 5405,79 | 0,18 | 0,70 |
| V | Высокотеррасовый | Автоморфные (элювиальные) | элювиальный | 11255,90 | 0,37 | 0,77 |
| VI | Древнетеррасовый | Автоморфные (элювиальные) | элювиальный | 3164,30 | 0,10 | 0,53 |
| VII | Межаласный | Автоморфные (элювиальные) | транзитный | 327184,81 | 10,67 | 10,07 |
| VIII | Аласный | Гидроморфные (супераквальный) | аккумулятивно-элювиальный | 99880,90 | 3,26 | 4,17 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| IX | Моренный | Автоморфные и гидроморфные | транзитный, аккумулятивный, аккумулятивно-элювиальный | 114221,22 | 3,73 | 2,99 |
| X | Зандровый | Автоморфные (элювиальные) | элювиальный, транзитно-элювиальный | 30468,97 | 0,99 | 1,23 |
| XI | Приводораздельный скальный | Автоморфные (элювиальные) | элювиальный | 25829,17 | 0,84 | 0,00 |
| XII | Приводораздельный элювиальный | Автоморфные (элювиальные) | элювиальный | 631754,14 | 20,60 | 18,02 |
| XIII | Склоновый коллювиальный | Полугидроморфные (транзитные) | транзитный | 303384,13 | 9,89 | 6,92 |
| XIV | Склоновый делювиально-коллювиальный | Полугидроморфные (транзитные) | транзитно-аккумулятивный | 290688,42 | 9,48 | 7,25 |
| XV | Склоновый делювиально-солифлюкционный | Полугидроморфные (транзитные) | транзитно-аккумулятивный | 630634,46 | 20,57 | 14,95 |
| XVI | Слабодренированный маревый | Гидроморфные (супераквальный) | аккумулятивный | 28303,43 | 0,92 | 1,19 |
| XVII | Ледниково-долинный | Полугидроморфные и гидроморфные | транзитный, транзитно-аккумулятивный | 20397,62 | 0,67 | 0,69 |
| XVIII | Ледниковый | Автоморфные (элювиальные) | элювиальный | 1516,01 | 0,05 | 0,00 |
| XIX | Тукуланный | Автоморфные (элювиальные) | элювиальный | 3439,65 | 0,11 | 0,00 |
| XX | Долинно-морской террасовый | Гидроморфные (супераквальный) | аккумулятивный | 12939,75 | 0,42 | 0,83 |
| Итог | | | | 3066060,82 | 100,00 | 84,94 |

Исследования выполнены в рамках базового проекта «Эволюция и устойчивость мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (рег. № 126020516688-9) и частично за счет реализации государственного проекта «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

***Литература***

1 Zubrzycki S., Kutzbach L., Grosse G. et al. Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta // Biogeosciences. – 2013. – Vol. 10, №6. – P. 3507–3524.

2 Fedorov A.N., Vasilyev N.F., Torgovkin Y.I. et al. Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) at scale 1:1,500,000 // Geosciences. – 2018. – Vol. 8, №12. – P. 465.

3 Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. – Смоленск: Ойкумена, 2002. – 288 с.

4 Tarnocai C., Canadell J., Mazhitova G. et al. Soil organic carbon stocks in the northern circumpolar permafrost region // Global Biogeochemical Cycles. – 2009. – Vol. 23. – GB2023.

5 Hugelius G., Tarnocai C., Broll G. et al. The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost regions. // ESSD. – 2013. Vol. 5. – P. 3–13.

6 Hugelius G., Bockheim J.G., Camill P. et al. A new data set for estimating organic carbon storage to 3 m depth in soils of the northern circumpolar permafrost region // ESSD. – 2013. – Vol. 5. – P. 393–402.

# ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ «МОСТИКА ХОЛОДА» В ЩЕБЕНОЧНОЙ СВАЕ

***Т.В. Шепитько[1], И.А. Артюшенко[1], Э.С. Гречищева[2], А.С. Ноздрачёв[1]***
*[1]Российский университет транспорта, г. Москва*
*[2] НИИОСП им. Н.М. Герсеванова - структурное подразделение АО «НИЦ «Строительство» г. Москва*

Для подтверждения корректности численных расчетов по теплофизическому моделированию взаимодействия щебеночной сваи с грунтом [1,2] и наличия возникновения в ней «мостика холода» Российским университетом транспорта совместно с НИИОСПом им. Герсеванова (АО НИЦ «Строительство») было выполнено физическое моделирование взаимодействия щебеночной сваи с мерзлом грунтом, представлена методика испытаний, показаны результаты возникновения «мостика холода» в щебеночной свае.

Статья подготовлена на основе исследований, выполненных в рамках гранта, предоставленного Министерством образования и науки в форме субсидии из федерального бюджета на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития, тема проекта «Анализ и разработка теоретических основ с исследованием и разработкой конструктивно-технологических решений по обеспечению эксплуатационной надёжности объектов транспортной инфраструктуры в условиях распространения многолетнемёрзлых грунтов», соглашение № 075-15-2024-559 от 25.04.2024.

Мостик холода – материал с более высокой теплопроводностью, по сравнению с другими материалами конструкции (например, щебеночная свая внутри грунтового массива), обеспечивающий локальное изменение температурного поля в грунтовом массиве и способствующий формированию зон пониженной температуры (например, вблизи сваи по сравнению с окружающим массивом грунта).

Физическое моделирование процессов взаимодействия конструктивного элемента - щебеночной сваи - с окружающим массивом грунта в контролируемых лабораторных условиях проводилось в специальном лотке цилиндрической формы, заполненном грунтом с заданными характеристиками [3-5].

Щебеночная свая представляет из себя щебень с заданными показателями влажности, который помещается в массив грунта посредством кругло-цилиндрической пластиковой трубы с внутренним диаметром 19,2 см в процессе подготовки лотковых испытаний.

Для создания щебеночной сваи в массиве репрезентативного грунта был выбран гранитный щебень фракции 20-40 мм в необходимом для испытаний количестве. Для него в лаборатории определены гранулометрический состав и полная влагоемкость грунта с целью определения влажности, которую необходимо обеспечить щебню при формировании щебеночной сваи в грунте. Характеристики щебня приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сводная таблица физических свойств щебня

| Лабораторный номер пробы | Содержание частиц, % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Влагоемкость минеральной части грунта, % | Полная влагоемкость щебня в массиве, % | Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Свыше 70 мм | 60 мм | 50 мм | 40 мм | 30 мм | 25 мм | 22,5 мм | 22,0 мм | 17,5 мм | 15,0 мм | 12,5 мм | 10,0 мм | 3,0 мм | 2,5 мм | 1,25 мм | 1,0 мм | 0,63 мм | 0,5 мм | 0,315 мм | 0,16 мм | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | --- | --- | --- | 3,2 | 28,3 | 26,7 | 15,8 | 9,8 | 3,2 | 1,6 | 1,2 | 0,43 | 0,94 | 0,05 | 0,06 | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,17 | 1,4 | 14,0 | Щебень |

На рисунке 1 показана сформированная в лабораторных условиях щебеночная свая в цилиндрической трубе.

Рис. 1. Формирование щебеночной сваи с помощью цилиндрической трубы

По результатам определения водонасыщения щебня установлено, что при формировании щебеночной сваи ему следует задавать влажность в размере 14%, чтобы обеспечить полное заполнение пор (рис. 2). В мерзлом грунте при промораживании лотка в щебеночной свае формируется лед-цемент, который по отношению к щебню выполняет связывающую функцию.

Рис. 2. Фрагмент модели щебеночной сваи в поперечном разрезе, вид сверху

*Методы и методика исследований*

Для лабораторных исследований использованы лотки цилиндрической формы (рис. 3) следующих габаритов: высота – 120-130 см; диаметр – 80 см. Материал лотков – пластик. В качестве таких лотков использовались бочки для жидкости, приобретенные в розничной продаже, от которых отпиливалась верхняя часть.

Перед подготовкой лотка на полу морозильной камеры смонтировано дно теплоизоляционного короба – лист теплоизоляции марки Пеноплекс площадью около 1 м$^3$ и толщиной 10 см, в центре которого был установлен лоток, в котором были установлены 3 термокосы в соответствии со схемой испытательного стенда, приведенной на рисунке 4.

Для фиксации положения термокос внутри лотка они крепились на деревянных направляющих осях, установленных на дне лотка.

Рис. 3. Цилиндрический лоток

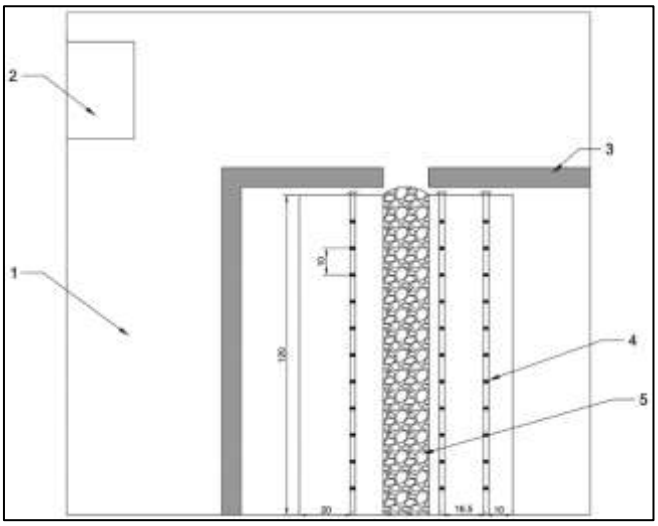



Рис. 4. Схема испытательного стенда для определения мостика холода: 1 – основное помещение холодильной камеры; 2 – воздухоохладитель основного помещения камеры; 3 – теплоизоляционный материал; 4 – датчик температуры; 5 – модель щебеночной сваи.

После завершения набивки грунта боковая поверхность лотка была обернута листом гибкой теплоизоляции толщиной 2,7 см. Далее были смонтированы вертикальные стенки короба из листов теплоизоляции Пеноплекс толщиной 10 см. Пустое пространство между лотком и внешним коробом заполнялось вырезанными фрагментами плиты Пеноплекса с заполнением зазоров монтажной пеной. Верхняя поверхность лотка обшита гибкой теплоизоляцией толщиной 2,7 см. В результате с окружающей средой контактировала только верхняя поверхность грунта и щебеночной сваи для формирования одностороннего промерзания грунтового массива. Все зазоры короба заполнялись монтажной пеной (рис. 5).

Испытания по определению наличия мостика холода проводились в морозильной камере. Для имитации природного промерзания грунта формировалось одностороннее промерзание при температуре окружающего воздуха минус 18 °С. На протяжении всего времени испытаний велось наблюдение за изменением температур - измерения температуры производились каждые 15 минут

при помощи 3-х термокос, расположенных на расстоянии 5, 11,5 и 21,5 см от боковой поверхности сваи (см. рис. 4).

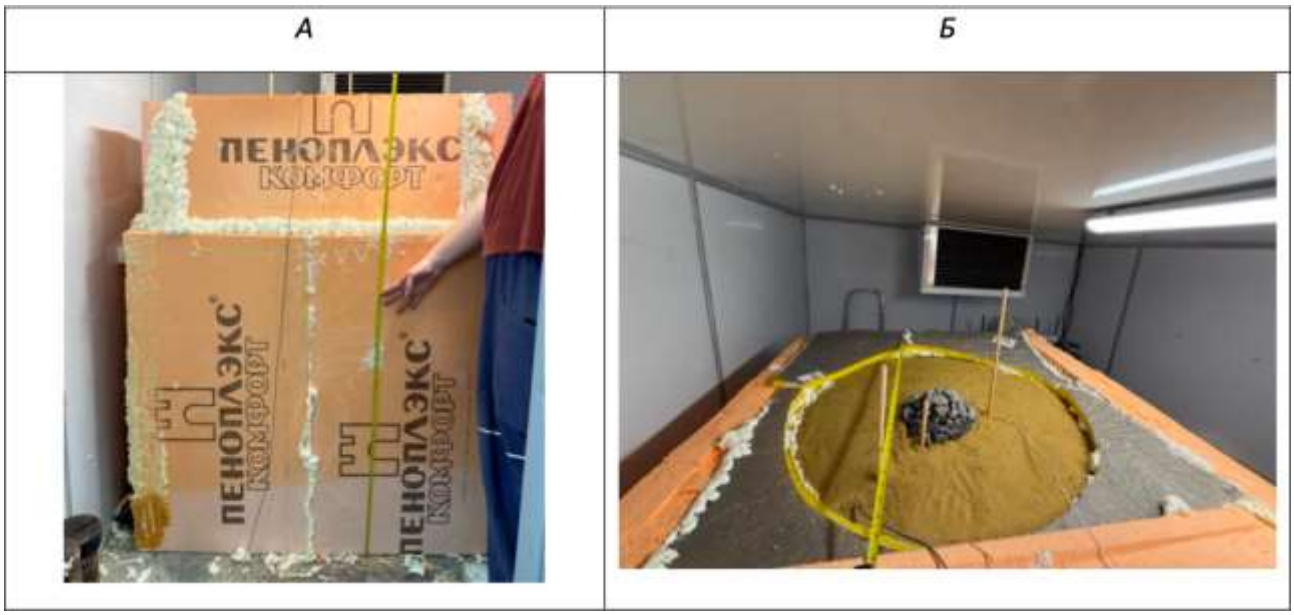



Рис. 5. Теплоизоляционный короб: А – вид сбоку, Б – вид сверху

Датчики температур в каждой термокосе располагаются с интервалами в 10 см, всего по 11 датчиков в каждой. Нижний датчик располагался на глубине 120 см, а верхний – на глубине 20 см от поверхности грунта. Точность измерения температур при этом составляет ±0,1 °С. Испытания продолжались до тех пор, пока на всех датчиках не было получено значение температуры минус 10 °С. После окончания испытаний была проведена камеральная обработка результатов, по результатам которой построены сравнительные графики температур по глубине, на основе которых оценивалось наличие «мостика холода».

Результаты анализа температур показали, что разница температур между поверхностью сваи и точкой внутри массива грунта максимальна у поверхности и минимальна у дна лотка. В зависимости от глубины положения датчика температуры, максимальная разница составила от 0,19 до 1,88 °С в песке, как это видно из рис. 6, и от 0,25 до 2,15 °С в суглинке (рис. 7). Значение разницы закономерно уменьшается с глубиной.

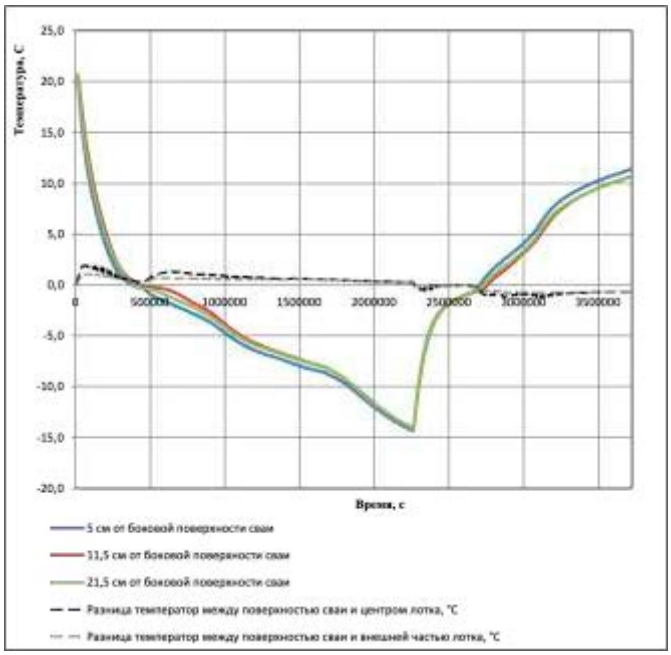



Рис. 6. График изменения температур грунта на глубине 20 см в песке

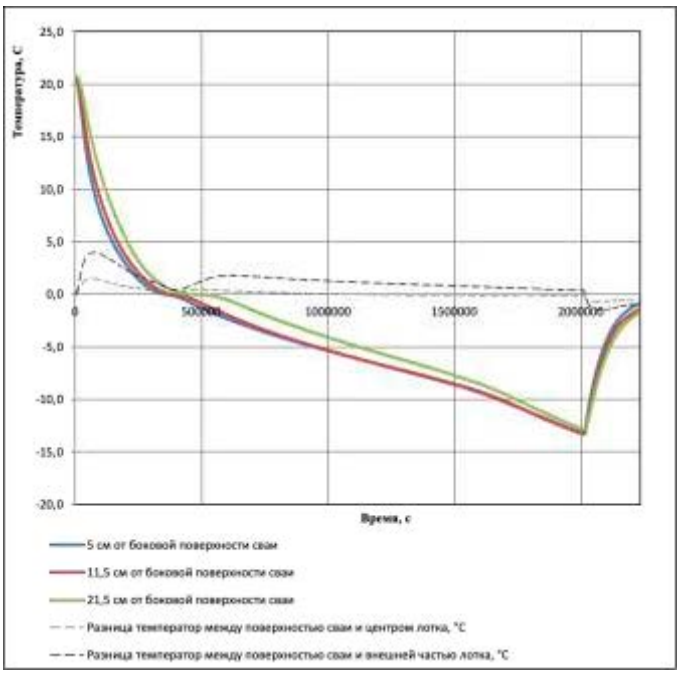



Рис. 7. График изменения температур грунта на глубине 20 см в суглинке

Анализ разницы температур на поверхности сваи и на удалении 21,5 см от нее (на краю лотка) показывает, что не во всех случаях температура на поверхности щебеночной сваи ниже, чем в грунте, находящемся на удалении, что свидетельствует о влиянии боковых условий и температуры среды, в которой находился испытательный лоток во время испытаний. Об этом также свидетельствует характер распределения температур по глубине: максимальный эффект наблюдается на дне лотка, который находится в контакте с металлическим полом морозильной камеры через слой теплоизоляции.

Тем не менее для верхних 60 см грунта и для граничной зоны лотка вполне достоверно фиксируется разница температур, свидетельствующая о том, что щебеночная свая является «мостиком холода».

В качестве дополнительного подтверждения наличия «мостика холода» зафиксировано время до наступления фазового перехода. Поскольку в граничной зоне велико влияние окружающих условий, то сравнение проводилось только для поверхности сваи и для точек на удалении 11,5 см от нее, то есть внутри грунтового массива в лотке. Для всех глубин и типов грунта установлено, что у поверхности сваи фазовый переход наступает раньше, чем внутри грунтового массива, что также свидетельствует о том, что щебеночная свая работает как «мостик холода».

***Литература***

1 Шепитько, Т. В. Влияние вертикальных столбов из щебня на криогенные процессы грунтов основания земляного полотна / Т. В. Шепитько, И. А. Артюшенко // Транспортные сооружения. – 2019. – Т. 6, № 4. – С. 9. – DOI 10.15862/10SATS419. – EDN ZCMKDC.

2 Артюшенко, И. А. Усиление основания земляного полотна вертикальными столбами из щебня на участках с многолетнемерзлыми грунтами: специальность 05.23.02 "Основания и фундаменты, подземные сооружения": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Артюшенко Игорь Александрович, 2020. – 175 с. – EDN EYPZMB.

3 ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.

4 ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

5. ГОСТ 30416-2020 Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.

## ПОДХОДЫ К СОСТАВЛЕНИЮ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЙ КАРТЫ ЯКУТИИ МАСШТАБА 1:1 500 000

***А.А. Шестакова***

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

На основе разработанных методики, легенды, использования материалов дешифрирования космоснимков (Landsat, Modis) и большого объема фактического материала, в том числе полученного в последние годы, составлена современная геокриологическая карта Якутии масштаба 1:1 500 000. Настоящее исследование представляет собой новую интерпретацию дифференциации многолетнемерзлых пород (ММП) для такого крупного региона, как Якутия. Использование в классификации картографируемого объекта сочетания двух факторов – геокриологического и ландшафтного – позволило более детально рассмотреть закономерности устройства природной среды и внести свой вклад в изучение природы и охраны окружающей среды Севера.

Фундаментальной основой для составления современной геокриологической карты Якутии масштаба 1:1 500 000 стала мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия) масштаба 1:1 500 000 [1]. На геокриологической карте отображены температура горных пород, мощность сезонно-талого слоя, литологический состав поверхностных отложений, их льдистость и характерные криогенные процессы (рис. 1). Основная часть этих характеристик была систематизирована в 145 типах сочетаний мерзлотных ландшафтов на мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия) м-ба 1:1 500 000 [1]. Обновление и дополнение геокриологических данных ведется на основе фондовых материалов Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН и современных литературных источников.

Ведущим методом отражения геокриологических характеристик на картах является раздельное отображение основных мерзлотных характеристик и показателей природной среды. Такой подход, разработанный В.А. Кудрявцевым и его учениками [2], позволяет не только получить по карте информацию о том или ином параметре мерзлой толщи и об их изменении по территории, но и понять закономерности формирования мерзлотных условий в зависимости от факторов природной среды. Отображенные на карте геокриологические характеристики представляют собой статические данные, которые могут послужить базовыми для изучения их динамики в изменяющихся условиях, климатических или антропогенных.

Температура горных пород и мощность сезонно-талого (сезонно-мерзлого в талых породах) слоя пространственно зависимы от сочетания геолого-геоморфологических и биогидроклиматических условий. В мерзлотно-ландшафтной карте [1] пространственные сочетания этих характеристик были получены при наложении (оверлее) типов местности и типов растительных группировок с использованием материалов дешифрирования космоснимков. Для улучшения читаемости карты из-за уменьшения слоев авторы представили их в одном сочетании наиболее характерных температур и мощности сезонно-талого (сезонно-мерзлого) слоев. Схожий прием обычно используется при составлении карт, отображающих мощность мерзлых пород и температуру грунтов [3-5].

Параметры мерзлотных характеристик грунтов на геокриологической карте даны в интервалах, показывающих средние минимальные и средние максимальные значения. Отображение на карте температуры мерзлых пород через 1 и 2 °С, а талых через 0,5 °С обусловлено необходимостью генерализации (обобщения) ввиду того, что территория Якутии не повсеместно обеспечена фактическими данными по температуре подстилающих пород.

На карте цветовым фоном выделены 11 единиц соотношений данных температуры грунтов и мощности деятельного слоя (рис. 2). Интенсивность цвета распределяется по принципу: чем ниже температура и меньше протаивание, тем холоднее (темнее) оттенок, а чем выше температура и больше протаивание, тем оттенок теплее (ярче). В выборе фона существенную помощь оказали цветовые градации ранее составленных авторами карт температуры грунтов.

Льдистость отложений коррелируется с генетическим (стратиграфо-генетическим) типом отложений, коренными породами, рельефом и составом поверхностных отложений. Были установлены общие закономерности пространственного распределения льдистости: наиболее льдистые отложения характерны для отложений аккумулятивного ряда, а наименее – для денудационного. Исследован и литологический состав отложений: в грубообломочных и песчаных – слабольдистые, а в суглинистых и торфянистых – сильнольдистые. На геокриологической карте разной направленностью штриховки или ее отсутствием показаны четыре градации льдистости: слабольдистые (менее 0,2 д. ед.), среднельдистые (0,2-0,4), льдистые (0,4-0,6) и сильнольдистые (0,6 и более) грунты [2]. Например, в грубообломочных отложениях показатель льдистости составляет до 0,2 д. ед., в тонкодисперсных грунтах он варьирует от 0,2 до 0,4 и в заторфованных – от 0,4 до 0,6 и выше.

Грунтовая (литогенная) составляющая (рыхлые поверхностные отложения мощностью 3–17 м) геокриологической карты, согласно ГОСТ 25100-95 [6], подразделяется на те же таксономические

единицы, что и талые грунты, и представлена дисперсными грунтами [7]. Всего в легенде карты выделено 18 разновидностей грунтов, характеризующихся различными сочетаниями в пределах типов местности (рис. 2).

Мощность ММП в основном зависит от внутриземного теплового потока, а также от среднегодовой температуры на глубине годовых нулевых амплитуд температуры и теплопроводности пород [3]. Основой для составления данного слоя стали геокриологические и геотеплофизические карты различных масштабов [3, 4, 8], мерзлотно-геотермические разрезы, геотермические измерения в опорных скважинах при геологоразведочных работах [3, 8–10]. При выделении границ использовались данные о температуре горных пород с учетом внутриземного теплового потока и теплофизических характеристик разреза. Применялся метод аналогий и ключевых участков, которыми представлены участки проведения геотермических исследований. На участках, где геотермические исследования не проводились, были использованы осредненные показатели геотермического градиента и характера температурной кривой для аналогичных участков с учетом геологического разреза и величины внутриземного теплового потока отдельных структур.

Распространенность территорий с криогенными процессами является одним из основных показателей оценки состояния криолитозоны. Развитие криогенных процессов тесно взаимосвязано с льдистостью отложений, так же, как и с поверхностными отложениями. Малая льдистость отложений предполагает ограниченное развитие криогенных процессов. На территории Якутии преимущественное распространение имеют криогенное выветривание, морозная сортировка, морозобойное растрескивание, пучение, криогенный крип, солифлюкция, термокарст, термосуффозия, термоэрозия и таяние льда.

Карты-врезки м-ба 1:10 000 000 – карта фактического материала, гидрогеологическая карта Якутии, карты мощности криогенной толщи и глубины залегания коренных пород – дополняют геокриологическую карту. Вышеперечисленные карты имеют свои оригинальные легенды, не повторяющие легенду основной карты (рис. 1).

Используя атрибутивную таблицу ГИС к современной геокриологической карте Якутии м-ба 1:1 500 000, можно получить следующую информацию о мерзлотных условиях исследуемой территории. Установлено, что в широтно-зональных ландшафтах температуры грунтов от –6 до –10 °С и ниже и наименьшие мощности сезонно-талого слоя (от 0,5 до 1,0 м) характерны для арктических тундровых ландшафтов на приморских низменностях и островах морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, что вполне объяснимо с учетом суровости климата. Здесь объемная льдистость грунтов (отношение объема льда к объему мерзлого грунта) варьирует в большинстве случаев в пределах 0,2-0,6 (местами выше), а мощность многолетнемерзлой толщи (ММТ) – от 400 до 600 м.

При переходе к северным редколесьям, которые распространены примерно до Северного полярного круга, температура грунтов варьирует от –4 до –8 °С при мощности СТС от 0,5 до 1 м, что подтверждается климатическими условиями, повышением средней годовой температуры и появлением устойчивой активной температуры в летнее время. Объемная льдистость изменяется в пределах 0,2-0,4, местами 0,6, мощность ММТ – от 300 до 600 м.

В условиях средней тайги на территории сплошного распространения ММП, до широтной полосы Ленск – Олекминск – Томмот – Чагда, температура грунтов изменяется от –2 до –4 °С, мощность СТС – 1,0-1,5 м, а в наиболее характерных в этом типе ландшафта лиственничных лесах может достигать 2,5 м. В условиях развития сосновых лесов температуры грунтов повышаются до 0…–1 °С, мощность СТС варьирует от 2,0 до 2,5 м, объемная льдистость отложений изменяется от 0,4 до 0,6 (редко выше), а мощность ММТ – от 200 до 500 м. В последние 2-3 десятилетия мерзлотные ландшафты здесь весьма неустойчивы в связи с потеплением климата, и антропогенное воздействие может вызвать интенсивное развитие негативных криогенных процессов. Так, в Центральной Якутии темпы просадок поверхности при развитии термокарста достигают до 10-15 см в год [11, 12]. Термокарсту подвержены открытые участки – преобразованные человеком ландшафты, сельскохозяйственные угодья, дороги, территории под линиями электропередач и газопроводов, а также селитебные пространства на сильнольдистых ММП. Многие поселения в Центральной Якутии находятся в катастрофическом положении из-за развития этого процесса.

В средней тайге в области распространения прерывистой и островной криолитозоны, южнее широтной полосы Ленск – Олекминск – Томмот – Чагда, положительные температуры грунтов до 0,5 °С и выше характерны для сосновых лесов с примесью ели и кедра. Наиболее низкие температуры грунтов до –1…–2 °С и СТС до 2-3 м развиты в лиственничных лесах. Объемная льдистость здесь составляет 0,2-0,4, местами менее 0,2, а мощность ММТ – от 50 до 200 м.

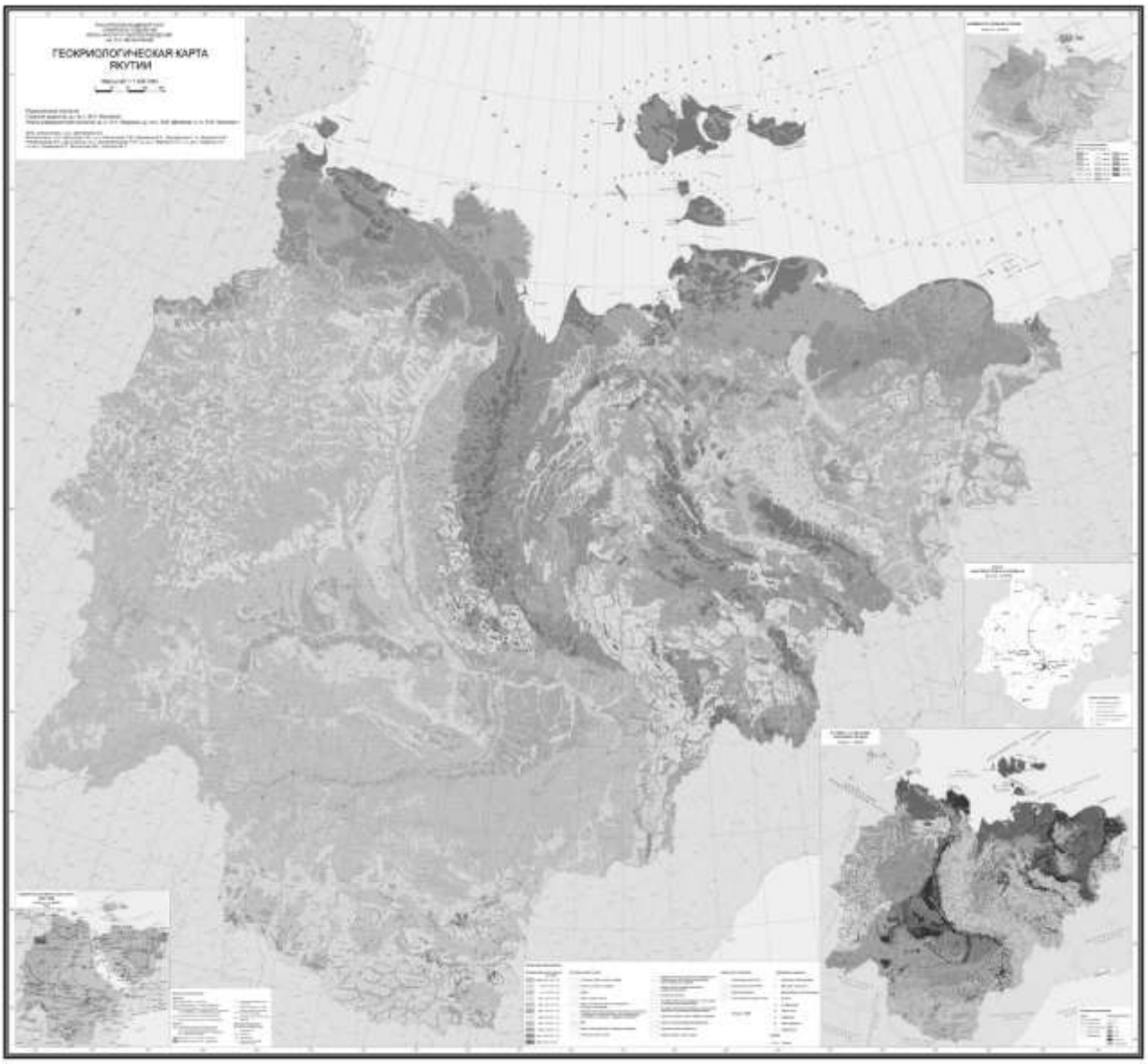



Рис. 1. Современная геокриологическая карта Якутии м-ба 1:1 500 000.

Рис. 1. Легенда современной геокриологической карты Якутии м-ба 1:1 500 000.

Интразональные ландшафты развиты в межгрядово-низинном типе местности, который встречается достаточно широко по всей Якутии. Здесь объемная льдистость составляет 0,2-0,4, местами до 0,6. В тундре и северных редколесьях этих типов ландшафтов имеет место некоторое повышение температуры грунтов по сравнению с плакорными, а в средней тайге с прерывистой и островной криолитозоной – понижение. В тундре распространены тундроболота полигонально-валиковые с температурой грунтов –6…–8 °С и СТС от 0,5 до 1,0 м, в северной тайге – мари с

лиственничными рединами (–4…–5 °С и СТС 0,5-1,0 м), в средней тайге – мари с лиственничными рединами (0...–1 °С и СТС 2,0-2,5 м).

В горных ландшафтах Северо-Восточной и Южной Якутии (от горных пустынь, занимающих самые высокие части горных хребтов, до горной тайги) отмечается четкое повышение температуры грунтов – от –8…–10 °С и ниже (СТС 0-0,5 м) до положительных значений в сосново-лиственничных лесах –0-0,5 °С и выше (СТС 2,5-3,5 м). В условиях горных редколесий и горной тайги характерны температурные инверсии, когда долинные и придолинные склоны имеют более суровые мерзлотные условия, чем расположенные выше по склону участки [4]. Такие участки обычно отличаются развитием заболоченных редколесий – марей. Мощность ММТ – 200-400 м.

Результаты количественного анализа закономерностей пространственного распределения и дифференциации геокриологических условий показали, что сезоннопромерзающие ландшафты с положительными температурами грунтов и с мощностью деятельного слоя 3,0-3,5 м занимают всего 2 % территории, высокотемпературные мерзлотные ландшафты (температура от 0 до –2 °С) с мощностью сезонно-мерзлого слоя от 1,5 до 3,0 м –18 %, среднетемпературные (от –2 до –4 °С и СТС 1,0-1,5 м) –16 %, низкотемпературные (от –4 до –6 °С и СТС 0,5-1,0 м) – 21 %, ландшафты с очень низкими температурами (ниже –6 °С и СТС 0-0,5 м) – 43 %.

Наибольшее распространение на рассматриваемой территории занимают ландшафты со слабольдистыми отложениями (менее 0,2) – 35,9 % и среднельдистыми (от 0,2 до 0,4) – 32,5 %. Льдистые ландшафты (0,4-0,6) характерны для 19,25 % рассматриваемой территории, сильнольдистыми ландшафтами (0,6 и более) занято 11,3 % территории.

Для ландшафтов со слабольдистыми грунтами характерно в основном только морозное выветривание. Наиболее опасные процессы, например, термокарст, развиваются в межаласном и приводораз-дельном слабодренированном (маревых) типах местности. В долинном и межгрядово-низинном типах местности распространены пучение и морозобойное растрескивание. Достаточно опасны с этой точки зрения также склоновый делювиально-солифлюкционный и горносклоновый делювиально-солифлюкционный типы местности, где получили развитие солифлюкция, отчасти термокарст и морозобойное растрескивание.

Необходимо отметить и некоторые сходства между Геокриологической картой СССР м-ба 1:2 500 000 [13], охватывающей Россию и сопредельные территории бывшего СССР и составленной современной геокриологической картой Якутии. На обеих отображены основные геологические и мерзлотные характеристики в виде отдельных слоев, что явилось прообразом современных ГИС. Такой методический и картографический прием позволил не только получать на каждом обособленном участке конкретные значения мерзлотных характеристик, но и анализировать причины их образования и существования в определенных природных условиях, отраженных на карте.

Геокриологическая карта Якутии составлена как основа для районирования в проведении геокриологического мониторинга и оценки устойчивости ММП к современному потеплению климата и антропогенным воздействиям. Для этого мы попытались отразить на карте льдистость отложений, температуру грунтов, сезонно-талого (сезонно-мерзлого) слоя с помощью ландшафтных классификационных построений. Это позволило нам показать температуры сезонно-талого (сезонно-мерзлого) слоя и льдистость на уровне типов местности (генетических типов поверхностных отложений) с учетом растительных группировок. На рассматриваемой карте мерзлотные условия представлены с большей детальностью, что позволяет оценить изменчивость мерзлотных условий в рельефе. В горных районах изменение температуры грунтов и СТС привязано к конкретным ландшафтным высотным поясам.

*Работа выполнена в рамках базового проекта СО РАН «Эволюция и устойчивость мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (Регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР: 126020516688-9).*

***Литература***

1 Fedorov A.N., Vasilyev N.F., Torgovkin Y.I., Shestakova A.A., Varlamov S.P., Zheleznyak M.N., Shepelev V.V., Konstantinov P.Y., Kalinicheva S.V., Basharin N.I., Makarov V.S., Ugarov I.S., Efremov P.V., Argunov R.N., Egorova L.S., Samsonova V.V., Shepelev A.G., Vasiliev A.I., Ivanova R.N., Galanin A.A., Lytkin V.M., Kuzmin G.P., Kunitsky V.V. Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) at scale 1:1,500,000 // Geosciences. – 2018. – Vol. 8. – DOI: 10.3390/geosciences8120465.

2 Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Романовский Н.Н., Кондратьева К.А., Максимова Л.Н., Чижов А.Б. Методика мерзлотной съемки: Учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. – 358 с.

3 Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 2005. – 227 с.

4 Некрасов И.А. Криолитозона Северо-Востока и Юга Сибири и закономерности ее развития. – Якутск: Кн. изд-во, 1976. – 248 с.

5 Соловьев П.А. Многолетняя мерзлота (криолитозона) // Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. – М.: ГУГК, 1989. – С. 27.

6 ГОСТ 52100-95. Грунты. Классификация. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 24 с.

7 Инженерно-геологическая карта Республики Саха (Якутия) масштаба 1:1 500 000 / Сост. В.Б. Спектор, Я.И. Торговкин, А.А. Шестакова, В.В. Спектор, Л.Д. Иванова, А.М. Черепанова (фонды ИМЗ СО РАН). – Якутск, 2013. – 2 л.

8 Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. – Новосибирск: Наука, 1991. – 193 с.

9 Железняк М.Н., Семенов В.П. Геотемпературное поле и криолитозона Вилюйской синеклизы. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2020. – 123 с.

10 Балобаев В.Т., Павлов А.В., Перльштейн Г.З., Володько Б.В., Вотякова Н.И., Гаврильев П.П., Девяткин В.Н., Демченко Р.Я., Железняк М.Н., Левченко А.И., Мандаров А.А., Оловин Б.А., Прокопьев
А.Н., Русаков В.Г., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Тишин М.И., Угаров И.С., Урицкий Ю.Ф., Фартыше в А.И., Шамшурин В.Ю., Шипицина Л.И. Теплофизические исследования криолитозоны Сибири. – Новосибирск: Наука, 1983. – 215 с.

11 Fedorov A.N., Gavriliev P.P., Konstantinov P.Y., Hiyama T., Iijima Y., Iwahana G. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia // Ecohydrology. – 2014. – Vol. 7, N 2. – P. 188–196. – DOI: 10.1002/eco.1378.

12 Saito H., Iijima Y., Basharin N.I., Fedorov A.N., Kunitsky V.V. Thermokarst development detected from high-definition topographic data in Central Yakutia // Remote sensing. – 2018. – Vol. 10. – P. 1579. – DOI: 10.3390/rs10101579.

13 Геокриологическая карта СССР. М-б 1:2 500 000 / Ред. Э.Д. Ершов. – Винница: Картопредприятие, 1996. – 16 л.

## ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К РАСЧЁТУ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА: ОТ ЭМПИРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ К АДАПТИВНЫМ МОДЕЛЯМ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

***А.А. Щербакова[1], А.Г. Алексеев[2]***
*[1] АО «НИЦ» Строительство, г. Москва*
*[2] МГСУ*

В условиях глобального изменения климата традиционные методы расчёта глубины промерзания деятельного слоя грунта теряют точность из-за учащения экстремальных погодных явлений и потепления в северных регионах [1]. Это требует актуализации расчётных подходов с учётом неравномерности данных мониторинга и антропогенного воздействия.

Цель исследования – проанализировать эволюцию методов расчёта глубины промерзания и определить направления их совершенствования для повышения точности прогнозов. Для этого прослежена смена методологических парадигм, выявлены ключевые проблемы современных методов, определены влияющие факторы и сформулированы предложения по актуализации нормативной базы с учётом данных Росгидромета [1] и современных исследований [2, 3].

Методы исследования включают историко-научный анализ[4], системный и междисциплинарный подходы (геокриология, климатология, теплофизика), сравнительный анализ нормативных документов (СНиП, СП) [5] и научных публикаций [2, 3, 6], а также сопоставление полевых данных с результатами моделирования.

Эволюция методологических подходов представлена в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, развитие методов шло от упрощённых линейных моделей к комплексным нелинейным системам. Современный этап (постнеклассический) требует интеграции климатических данных и адаптивных алгоритмов для учёта динамики криолитозоны.

Анализ показал, что на точность расчёта глубины промерзания влияют динамика снежного покрова (до 30 % вариативности), изменения растительного покрова (5–10 %), антропогенное

тепловое загрязнение (15–20 % в урбанизированных районах) и нелинейные эффекты фазовых переходов влаги в грунте [2]. Недоучёт этих факторов в традиционных моделях приводит к погрешности до 15–25 % в прогнозах.

Таблица 1

**Сравнительная характеристика методологических подходов**

| Этап | Период | Основные методы | Ограничения | Перспективы развития |
|---|---|---|---|---|
| Эмпирический | До XIX века | Практический опыт строительства, локальные наблюдения | Отсутствие теории, субъективность, локальность данных | Накопление данных, систематизация |
| Позитивистский | XIX - начало XX века | Сбор данных метеостанций, корреляционный анализ | Линейные зависимости, упрощённые модели | Стандартизация наблюдений, развитие теории |
| Теоретический | Середина XX века | Расчётные формулы (включая $d_f = d_0 \sqrt{M_t}$), стандартизация в СНиП | Статичность, средние значения, отсутствие обратных связей | Учёт дополнительных факторов, нелинейные модели |
| Системный | Конец XX века | Нелинейные модели, теплофизическое моделирование | Сложность расчётов, нехватка данных | Компьютерное моделирование, ГИС, интеграция данных |
| Постнеклассический | XXI век | Машинное обучение, ГИС, ДЗЗ | Неполнота данных, вычислительные затраты | Адаптивные модели, учёт антропогенных факторов |

*Примечание.* ГИС - геоинформационные системы; ДЗЗ - дистанционное зондирование Земли.

Исследование [3] подтверждает необходимость учёта региональной специфики: локальных микроклиматических условий (микрорельеф, экспозиция склонов), корректировки параметров для территорий с техногенной нагрузкой и использования данных автоматизированного мониторинга для верификации моделей.

Направления актуализации нормативного метода расчёта включают:

1. учёт динамики снежного покрова (ДЗЗ и метеостанции);
2. поправки на изменение растительного покрова (ГИС-анализ);
3. корректировку для урбанизированных территорий (антропогенное воздействие);
4. учёт влажности грунта и нелинейных эффектов влагопереноса (датчики влажности, теплофизическое моделирование);
5. актуализацию климатических параметров ($M_t$ ) по данным Росгидромета [1];
6. региональную дифференциацию коэффициентов с учётом микроклимата и техногенной нагрузки [3].

Практическая значимость работы состоит в возможности совершенствования строительных норм и правил (СП) [4, 5] с учётом динамики криолитозоны и климатических трендов [1]. Внедрение актуализированных подходов повысит надёжность проектирования инфраструктуры в районах вечной мерзлоты, поможет разработать программы геокриологического мониторинга [6] и спланировать дальнейшие научные исследования.

Выводы: эволюция методов расчёта отражает логику научного познания - от эмпирики к комплексному моделированию[4]. Выявленные факторы требуют актуализации нормативной методики [2, 4]. Для этого необходимы:

1. количественная оценка влияния факторов [2, 3];
2. разработка и верификация уточнённых моделей [2, 7];

3. создание региональных корректирующих коэффициентов [3, 6];
4. интеграция данных Росгидромета, ДЗЗ и автоматизированного мониторинга в инженерные методики [3, 7, 1].

Внедрение таких подходов обеспечит устойчивое развитие северных территорий РФ и надёжность эксплуатации инфраструктуры в криолитозоне.

***Литература***

1. Обзор состояния многолетней мерзлоты в Российской Федерации: ежегодное издание / Росгидромет. - Санкт Петербург: ФГБУ «ААНИИ», 2024. - 142 с. - ISSN 2658 4131.
2. Алексеев, А. Г. Современные подходы к расчёту глубины промерзания грунтов в условиях изменения климата / А. Г. Алексеев // Вестник НИЦ «Строительство». - 2025. - № 3. - С. 45–58.
3. Щербакова, А. А. Создание локальной системы анализа PermofrostPro для выявления состояния многолетнемёрзлых пород / А. А. Щербакова, А. А. Сарыбаева, О. Е. Пономарева // CASE IN: Сборник статей на основе решений кейсов Международного инженерного чемпионата. - Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачёва, 2024. - С. 21.1–21.5. - EDN VJLMLD.
4. Степин, В. С. Философия науки. Общие проблемы / В. С. Степин. - Москва: Гардарика, 2006. - 384 с.
5. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений / Госстрой СССР. - Москва: Стройиздат, 1983. - 56 с.
6. Дроздов, Д. С. Мониторинг криолитозоны: методы и результаты / Д. С. Дроздов, В. А. Дубровин. - Новосибирск: СО РАН, 2018. - 215 с.
7. Machine Learning in Geotechnical Engineering / Ed. by S. Laloui. - London: CRC Press, 2022. - 320 p.

**ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ**


Абакумов Е.В. 5
Абрамов А.Д. 5, 258
Агапкин И.А. 193
Алексеев А.Г. 9, 470
Алентьев Ю.Ю. 14
Андрюшин Д.С. 16, 81
Артюшенко И.А. 461
Ашпиз Е.С. 20
Бабкина Е.А. 24, 258, 429
Бадина С.В. 29
Баишев Н.Е. 281
Бакенов Х.З. 216
Балута В.И. 160
Баширова И.А. 32
Башкова А.А. 37, 357, 440
Бегич Я.Э. 240
Бердников Н.М. 41, 258
Бигеева Р.Б. 44
Богатова Д.М. 29
Богомолов В.Ю. 94
Бродт Л.В. 49
Брушков А.В. 52, 150, 236
Буданцева Н.А. 61
Булдович С.Н. 66, 193, 293, 297, 319, 422
Буравцев А.В. 44
Бурдак Д.В. 429
Бутаков В.И. 125
Быстров Н.В. 302
Ванштейн Б.Г. 233
Варыханов С.С. 160
Васильев А.А. 249, 258, 284, 345
Васильев А.Н. 70
Васильева А.Н. 74
Васильчук А.К. 76
Васильчук Ю.К. 61, 76, 437
Великин С.А. 81
Вен Ж. 393
Верхотуров А.Г. 86
Викулина М.А. 172
Винокурова Т.А. 160
Власенко Д.В. 91
Власов В.К. 94
Власова Ю.В. 326
Воропай Н.Н. 94, 97, 242
Гаврилов А.В. 99
Гагарин В.Е. 104
Гагарин Л.А. 281
Гао Ч. 393
Георгиевский Б.В. 361
Гончаров А.А. 37, 440
Горбунова А.А. 108
Гордиенко А.Н. 112
Горелик Я.Б. 37, 115,258
Гравис А.Г. 120, 249, 258
Гребенкин С.И. 125
Гречищева Э.С. 461
Григорьев Д.В. 129
Григорьев М.Н. 132
Громадский А.Н. 37, 440
Давыденко С.Ю. 343
Давыдов С.П. 302
Давыдова А.И. 302
Данилов К.П. 230
Данько М.М. 136, 258, 429
Дворников Ю.А. 233
Дежнико ва А.А. 104, 326
Дембовский И.Н. 137
Десткин Р.В. 141
Добрынин Д.В. 145
Долгополов Д.В. 246
Дроздов Д.С. 120, 150, 249, 258
Дубровин В.А. 150
Дугин И.В. 125
Дюкарев Е.А. 94
Дьякова Г.С. 155
Емельянова Л.В. 193, 293, 297
Ефименко С.В. 32
Ефимов Н.П. 202
Ермаков А.В. 159
Железняк М.Н. 150, 182
Жирков А.Ф. 160
Заболотник П.С. 164, 240
Задорожная Н.А. 168
Замолодчиков Д.Г. 256
Заплавнова А.А. 219
Земеров И.В. 115
Зимова Г.М. 302
Зотова Л.И. 172
Иванов Ю.Г. 81
Иванова Л.Г. 240
Калошина Ю.С. 272
Кандаков А.Ю. 176
Кашдан А.И. 180
Кершенгольц Б.М. 182
Кизяков А.И. 380
Киль А.О. 233, 254
Киреева Т.А. 189
Кирин П.В. 302
Кияшко Н.В. 189
Кобылкин Д.В. 97, 242
Комаров И.А. 186, 189, 351
Константинов П.Я. 191
Коренкова Е.С. 193, 422
Корниенко С.Г. 197
Корнилов Т.А. 202
Королев М.В. 207
Коростелёв Ю.В. 258
Котов П.И. 375
Кошурников А.В. 104
Крайнева О.В. 212

Крыленко И.В. 396
Ксяодонг Ву 5
Куваев В.А. 182, 215
Кудрявцев С.А. 216
Кузина З.Я. 219
Кузнецов К.В. 155
Кузнецов Т.И. 246
Кузьмин Г.П. 215
Кузякин Л.П. 254
Курбанов Р.Н. 74
Куть А.А. 223
Лазоренко О.Я. 276
Ларин С.И. 226
Ларина Н.С. 226
Лебедева Л.С. 230
Левочкина О.В. 233
Лейбман М.О. 24, 233, 258, 380, 429
Ли Ч. 236
Лисицына О.М. 5
Литовко А.В. 240, 389
Лукьянычева М.С. 74
Лыткин В.М. 74, 279
Макарова Н.В. 242
Макарычева Е.М. 246
Малахова В.В. 99
Малкова Г.В. 249, 258, 343
Мартиросян М.О. 254
Маслаков А.А. 254, 256, 396
Мельников А.Е. 223
Мельников В.П. 258
Местников В.В. 263
Местникова И.В. 263
Милановский С.Ю. 405
\Михайлов А.Ф. 240
Молокитина Н.С. 258
Морозов Н.А. 20
Мосенкис Ю.М. 268
Мотенко Р.Г. 91, 272, 276
Набережный А.Д. 240, 279
Набережный Д.Д. 279
Низамутдинов Т.И. 5
Никитин К.А. 186
Николаев А.И. 328
Николаева Е.С. 281
Николайчук Э.В. 125
Новосёлов А.А. 258
Ноздрачёв А.С. 461
Облогов Г.Е. 249, 258, 284, 345
Огонеров В.В. 281
Оленченко В.В. 219
Опокина О.Л. 258
Осипов В.П. 160
Осокин А.А. 289
Осокин А.Б. 150
Оспенников Е.Н. 293, 297, 375
Останин О.В. 155
Остарков Н.А. 150
Остроумов В.Е. 302
Оттева А.Ю. 304
Охлопков И.М. 182
Павлова Н.А. 189, 230
Паламарчук В.А. 308
Парамонов В.Н. 216
Пахунов А.В. 313
Петров Б.В. 323
Печенкин Т.В. 319
Пижанкова Е.И. 99
Плетнева К.А. 258
Пономарева О.Е. 120, 249, 258
Попова А.А. 326
Портнягин А.С. 328
Приходько Н.В. 49
Прокопенко И.Ф. 176
Прядилина А.В. 29
Разумовский Р.О. 16
Рачкова А.Н. 145
Решетников А.М. 258, 331
Ривкин Ф.М. 258, 336
Романис Т.В. 223
Рязанцев П.А. 339
Садуртдинов М.Р. 150, 258, 343
Салмин А.О. 20
Самохвалов Н.Д. 345, 380
Самсонова В.В. 279
Санников А.О. 125
Сахаров И.И. 216
Северин А.Н. 351
Седов С.Н. 445, 450
Семенов П.Б. 233, 254
Сергеев Д.О. 150, 309
Сивцев М.А. 160
Сиджонг Янг 5
Сидорова Т.А. 16
Сизов О.С. 353
Синицкий А.И. 37, 176, 357, 440
Ситар К.А. 361
Скапинцев А.Е. 351
Скворцов А.Г. 258, 343
Слагода Е.А. 258, 366
Слобожанина О.И. 125
Смирнов Ю.А. 389
Смульский И.И. 370
Сокасян В.Г. 375
Соколов А.В. 236
Соромотин А.С. 49
Стрелецкая И.Д. 254, 345, 380
Судакова М.С. 258, 345, 396
Сурин С.Д. 384
Сухова О.В. 145
Сыромятников И.И. 389
Сысолятин Р.Г. 393
Тарбеева А.М. 396

Тихонравова Я.В. 393
Трегубов О.Д. 400
Трифонов Б.А. 405
Турантаев Е.Е. 279
Тюрин А.И. 408
Устинова Е.В. 226
Устинова Т.В. 182
Уяганский К.К. 400
Фалалеева А.А. 412
Фахретдинов А.В. 414
Федоров А.Н. 417
Федоров-Давыдов Д.Г. 302
Фролов Д.М. 104
Халимьянов А.З. 120
Харламов И.Б. 182
Хилимонюк В.З. 193, 293, 297, 319, 422
Хименков А.Н. 104, 425
Хомутов А.В. 24, 136, 233, 258, 429
Христофоров И.И. 230
Царапов М.Н. 433
Царев А.М. 120, 258, 343
Цветков М.О. 339
Цзыни С. 361
Чеверев В.Г. 236
Черкашина А.А. 97
Чижова Ю.Н. 437
Чжан А.А. 164
Шабаев В.П. 302
Шапошников Г.И. 389
Шашурин М.М. 182
Шевчик Ф.А. 323, 351
Шеин А.Н. 37, 357, 440
Шейнкман В.С. 180, 258, 445, 450
Шепелев А.Г. 455
Шепитько Т.В. 461
Шестакова А.А. 465
Шестернев Г.Д. 86
Шестернев Д.Д. 86
Шиманов А.А. 189
Штефанов Ю.П. 176
Щербакова А.А. 470
Энтин А.Л. 336
Юров Ф.Д. 396

**СОДЕРЖАНИЕ**

Абакумов Е.В., Низамутдинов Т.И., Сиджонг Янг, Ксяодонг Ву. Микробиом криогенных почв различных регионов Евразии 5

Абрамов А.Д., Лисицына О.М. Проблемы естественно-исторического геокриологического прогноза 5

Алексеев А.Г. Геотехнический мониторинг в криолитозоне, как основной фактор обеспечения безопасной эксплуатации сооружений 9

Алентьев Ю.Ю. Гидрологический режим временных водотоков криолитозоны (Южная Якутия) 14

Андрюшин Д.С., Разумовский Р.О., Сидорова Т.А. Моделирование снежного покрова как ключевого фактора геокриологических условий района Енисейского Севера 16

Ашпиз Е.С., Салмин А.О., Морозов Н.А. Определение параметров влияния каменной наброски на температурный режим ММГ 20

Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Хомутов А.В. Зональность и динамика глубины протаивания в торфе вдоль биоклиматического градиента на севере Западной Сибири 24

Бадина С.В., Богатова Д.М., Прядилина А.В. Оценка риска термоэрозии в монетарном выражении (на примере автодорожной инфраструктуры Ямало-Ненецкого автономного округа) 29

Баширова И.А., Ефименко С.В. Уточнение границ таксономических единиц в пределах территории Ямало-Ненецкого автономного округа 32

Башкова А.А., Шеин А.Н., Горелик Я.Б., Громадский А.Н., Гончаров А.А., Синицкий А.И. Оптимизация режима работы проветриваемых подполий для обеспечения устойчивости фундаментов на деградирующей мерзлоте в Арктике (на примере г. Салехарда) 37

Бердников Н.М. Южная граница области распространения многолетнемерзлых пород при потеплении климата. Аспекты картографической визуализации с привлечением методов ГИС-анализа 41

Бигеева Р.Б., Буравцев А.В. О месте и роли геокриологии в национальной системе пространственных данных 44

Бродт Л.В., Приходько Н.В., Соромотин А.С. Влияние пирогенного фактора на мощность и температурный режим сезонно-талого слоя 49

Брушков А.В. Современные проблемы геокриологии 51

Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К. Аномалии изотопного состава датированных с применением AMS голоценовых повторно-жильных льдов на западном побережье Байдарацкой губы 61

Булдович С.Н. Особенности сезонного промерзания пород в Подмосковье в условиях современных климатических изменений 66

Васильев А.Н. Определение деформаций земной поверхности при изменении состояния многолетнемерзлых грунтов 70

Васильева А.Н., Лыткин В.М., Лукьянычева М.С., Курбанов Р.Н. О возрасте и параметрах мавринского ледниково-подпрудного озера в низовьях р. Лены 74

Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Развитие полигональных торфяников на восточном побережье Чукотского полуострова 76

Великин С.А., Андрюшин Д.С., Иванов Ю.Г. Оценка температурного состояния участка обходной фильтрации Вилюйской ГЭС в условиях криолитозоны с помощью моделирования 81

Верхотуров А.Г., Шестернев Д.Д., Шестернев Г.Д. Причины деформаций объекта культурного наследия федерального значения «церковь Успения Пресвятой Богородицы» в с. Калинино 86

Власенко Д.В., Мотенко Р.Г. Экспериментальная оценка влияния типа торфа на теплопроводность заторфованных нефтезагрязненных мерзлых глинистых грунтов 91

Власов В.К., Дюкарев Е.А., Богомолов В.Ю, Воропай Н.Н. Точность воспроизведения температурного режима многолетнемерзлых грунтов Тункинской котловины в модели TERM 94

Воропай Н.Н., Кобылкин Д.В., Черкашина А.А. Мониторинг температуры многолетнемерзлых почвогрунтов на территории юго-западного Прибайкалья 97

Гаврилов А.В., Малахова В.В., Пижанкова Е.И. О субмаринной мерзлоте северо-запада шельфа Восточно-Сибирского моря 99

Гагарин В.Е., Хименков А.Н., Фролов Д.М., Кошурников А.В., Дежникова А.А. Формирование строения мерзлых пород под воздействием внутренних динамических процессов 104

Горбунова А.А. Использование тепловых насосов для термостабилизации оснований зданий на многолетнемерзлых грунтах 108

Гордиенко А.Н. Радиационно-тепловой баланс и прогноз состояния инфраструктуры в криолитозоне 112

Горелик Я.Б., Земеров И.В. Мощность мерзлой толщи как фактор в прогнозе состояния пород при климатических изменениях 115

Гравис А.Г., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е., Халимьянов А.З., Царев А.М. Изменение геокриологических условий и формирование субаэральных надмерзлотных таликов в южной лесотундре Западной Сибири 120

Гребенкин С.И., Бутаков В.И., Николайчук Э.В., Дугин И.В., Слобожанина О.И., Санников А.О. Цифровая модель прогнозирования состояния многолетнемёрзлых пород 125

Григорьев Д.В. Определение электрических и акустических свойств супесчаных грунтов в процессе оттаивания 129

Григорьев М.Н. Потоки метана из субаквальных многолетнемерзлых и оттаивающих толщ в прибрежно-шельфовой зоне моря Лаптевых 132

Данько М.М., Хомутов А.В. Криогенные процессы по берегам озёр в северной части Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири 136

Дембовский И.Н. Автоматизация геотехнического мониторинга с применением численных 3D моделей температурного режима основания 137

Десяткин Р.В. Термокарстовая деградация почвенного покрова криолитозоны и первоначальные меры по снижению негативного влияния на проживание населения 141

Добрынин Д.В., Сухова О.В., Рачкова А.Н. Оценка пространственной структуры сезонно-талого слоя на основании данных мерзлотомеров и результатах дешифрирования данных дистанционного зондирования 145

Дубровин В.А., Брушков А.В., Дроздов Д.С., Железняк М.Н., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Остарков Н.А., Осокин А.Б. мониторинга вечной мерзлоты, как государственная система. Проблемы и пути решения. 150

Дьякова Г.С., Кузнецов К.В., Останин О.В. Каменные глетчеры бассейна реки Цаган-Гол, Монгольский Алтай 155

Ермаков А.В. Условия накопления морских осадков в юго-западной части Карского моря в позднеплейстоценовое-голоценовое время 159

Жирков А.Ф., Осипов В.П., Винокурова Т.А., Балута В.И., Варыханов С.С., Сивцев М.А. Генерация синтетических данных для повышения эффективности нейросетевых решений в геокриологии 160

Заболотник П.С., Чжан А.А. Основные факторы, влияющие на формирование температурного

поля в городе Якутске
164

Задорожная Н.А. Проявление криогенных процессов на островах Онекотан и Шумшу (Курильская гряда) 168

Зотова Л.И., Викулина М.А. Опыт преподавания дисциплин по геоэкологии криолитозоны на географическом факультете МГУ 172

Кандаков А.Ю., Штефанов Ю.П., Прокопенко И.Ф., Синицкий А.И. Технология монтажа охлаждающих устройств грунтов оснований посредством укрупнительной сборки в процессе их погружения под существующими зданиями и сооружениями в вентилируемых подпольях в условиях ограниченных по высоте пространств 176

Кашдан А.И., Шейнкман В.С. Численное моделирование приледниковых и постледниковых форм рельефа и механизм сохранения пластовых льдов в западном секторе Канадской Арктики (море Бофорта) 180

Кершенгольц Б.М., Железняк М.Н., Охлопков И.М., Шашурин М.М., Куваев В.А., Харламов И.Б., Устинова Т.В. Технологии использования уникального ресурса природного холода Северо-Востока евразийского сектора криолитозоны в целях сохранения биоразнообразия в глобальной повестке 182

Комаров И.А., Никитин К.А. Результаты разработки и применения комплексной методики прогноза температуры засоленных мерзлых пород полуострова Ямал 186

Комаров И.А., Шиманов А.А., Киреева Т.А., Павлова Н.А., Кияшко Н.В. Сравнительный анализ закономерностей криогенного метаморфизма криопэгов морского и континентального типа засоления при изменении термобарических условий 189

Константинов П.Я. Современные тренды средней годовой температуры приповерхностных горизонтов многолетнемерзлых пород в разных регионах Якутии 191

Коренкова Е.С., Емельянова Л.В., Хилимонюк В.З., Булдович С.Н., Агапкин И.А. Особенности пространственно-временного распределения снежного покрова на севере Красноярского края 193

Корниенко С.Г. Климатические изменения растительности и влажности почвы типичной тундры в районе Марресаля (п-ов Ямал) и их связь с деградацией мерзлоты 197

Корнилов Т.А., Ефимов Н.П. Из опыта искусственного охлаждения грунтов основания зданий с использованием холодильной установки на территории Якутии 202

Королев М.В. Комплексные исследования по определению технических причин аварии на примере одного из производственных объектов в северной климатической зоне 207

Крайнева О.В. Изменение глубины сезонного оттаивания на объектах нефтетранспорта в районах Крайнего севера 212

Куваев В.А., Кузьмин Г.П. Фазовый переход воды в лед как регенеративный источник тепла для пассивного отопления 215

Кудрявцев С.А., Сахаров И.И., Парамонов В.Н., Бакенов Х.З. Эксплуатация зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах Дальнего Востока 216

Кузина З.Я., Оленченко В.В., Заплавнова А.А. Определение глубины сезонного промерзания дорожного полотна на участке образования наледи по геофизическим данным 219

Куть А.А., Романис Т.В., Мельников А.Е. Закономерности криогенных преобразований в песках по данным лабораторного эксперимента 223

Ларин С.И., Ларина Н.С., Устинова Е.В. Уровни палеокриогенеза в аллювии нижнего Тобола и Ишима 226

Лебедева Л.С., Христофоров И.И., Данилов К.П., Павлова Н.А. Распространение надмерзлотных субаэральных таликов в Центральной Якутии по данным георадиолокации 230

Левочкина О.В., Ванштейн Б.Г., Дворников Ю.А., Киль А.О., Лейбман М.О., Семенов П.Б., Хомутов А.В. Механизм переноса вещества при развитии термоденудации на Центральном Ямале 233

Ли Ч., Чеверев В.Г., Брушков А.В., Соколов А.В. Влияние выбросов метана и его особых физических и химических свойств на глобальный климат за последние 20 лет 236

Литовко А.В., Набережный А.Д., Заболотник П.С., Иванова Л.Г., Бегич Я.Э., Михайлов А.Ф. Влияние теплоизолирующего слоя на глубину оттаивания в основании дорожных насыпей 240

Макарова Н.В., Воропай Н.Н., Кобылкин Д.В. Многолетняя мерзлота и социально – экономическое развитие юга Предбайкалья (Баяндаевский район) 242

Макарычева Е.М., Кузнецов Т.И., Долгополов Д.В. Мониторинг объектов трубопроводного транспорта в условиях криолитозоны (вчера, сегодня, завтра) 246

Малкова Г.В., Васильев А.А., Гравис А.Г., Дроздов Д.С., Облогов Г.Е., Пономарева О.Е. Мониторинг, моделирование и прогноз температурного режима криогенных ландшафтов в западном секторе АЗРФ 249

Мартиросян М.О., Кузякин Л.П., Стрелецкая И.Д., Маслаков А.А., Семёнов П.Б., Киль А.О. Метан в голоценовых полигонально-жильных льдах Восточной Чукотки и Нижнего Приобья 254

Маслаков А.А., Замолодчиков Д.Г. Результаты многолетнего мониторинга осадки оттаивающих пород на площадке научного полигона «Приморские равнины Восточной Чукотки» 256

Мельников В.П., Дроздов Д.С., Васильев А.А., Малкова Г.В., Горелик Я.Б., Лейбман М.О., Слагода Е.А., Ривкин Ф.М., Садуртдинов М.Р., Хомутов А.В., Опокина О.Л., Бабкина Е.А., Молокитина Н.С., Облогов Г.Е., Скворцов А.Г., Пономарева О.Е., Шейнкман В.С., Судакова М.С., Гравис А.Г., Решетников А.М., Плетнева К.А., Царёв А.М., Коростелёв Ю.В., Новосёлов А.А., Данько М.М., Абрамов Д.А., Бердников Н.М. Роль Института криосферы Земли в развитии криологии 258

Местникова И.В., Местников В.В., Местников В.В. Комбинированная свая с термостабилизатором с естественной и принудительной циркуляцией хладоносителя в криолитозоне 263

Мосенкис Ю.М. Строительство на невечномерзлых грунтах 268

Мотенко Р.Г., Калошина Ю.С. Свойства торфов бугра пучения в районе города Салехард 272

Мотенко Р.Г., Лазоренко О.Я. Теплофизические свойства заторфованных грунтов, загрязненных керосином 276

Набережный А.Д., Турантаев Е.Е., Набережный Д.Д., Самсонова В.В., Лыткин В.М. Снеговые отложения на территории застройки арктического поселка Тикси и их влияние на устойчивость зданий 279

Николаева Е.С., Гагарин Л.А., Баишев Н.Е., Огонеров В.В. Полевые и расчетные методы оценки объема наледного льда в бассейне р. Чульман (Южная Якутия) 281

Облогов Г.Е., Васильев А.А. Распространение и глубины залегания субаквальных многолетнемерзлых пород Карского моря 284

Осокин А.А. Динамика температурного режима многолетнемёрзлых грунтов в основаниях объектов обустройства месторождений полуострова Ямал в условиях климатических изменений 289

Оспенников Е.Н., Булдович С.Н., Емельянова Л.В., Хилимонюк В.З. Геокриологический мониторинг: содержание и технология проведния 293

Оспенников Е.Н., Хилимонюк В.З., Булдович С.Н., Емельянова Л.В. **Эколого-геокриологический мониторинг как основное направление экологических исследований в криолитозоне** 297

Остроумов В.Е., Федоров-Давыдов Д.Г., Шабаев В.П., Давыдов С.П., Давыдова А.И., Зимова Г.М., Кирин П.В., Быстров Н.В. Использование данных мониторинга теплового потока для оценки динамики теплового состояния грунтов 302

Оттева А.Ю. Криогенные процессы и устойчивость полигонов твёрдых коммунальных отходов в условиях резко континентального климата 304

Паламарчук В.А., Сергеев Д.О. Особенности температурного и влажностного режима верхней толщи эоловых отложений урочища Пески (северное Забайкалье) 309

Пахунов А.В. Технология всесезонной термостабилизации многолетнемерзлых грунтов с использованием возобновляемых источников энергии 313

Печенкин Т.В., Хилимонюк В.З., Булдович С.Н. Моделирование теплового взаимодействия подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах на примере Среднего Ямала 319

Петров Б.В., Шевчик Ф.А. Влияние температуры основания на вертикальные перемещения свайных фундаментов опор магистрального трубопровода участка МН "Заполярье - НПС "Пур-Пе" 323

Попова А.А., Власова Ю.В., Дежникова А.А. Практический опыт геокриологического мониторинга при строительстве 326

Портнягин А.С., Николаев А.И. О возможности создания хранилища природного газа в газогидратной форме в искусственных полостях, сформированных в толще многолетнемерзлых пород 328

Решетников А.М. Устойчивость гидратов природного газа в пористой среде при понижении давления и температуре ниже 273 К 331

Ривкин Ф.М., Энтин А.Л. Прогнозное моделирование ландшафтно-геокриологических условий 336

Рязанцев П.А., Цветков М.О. Шлировая криотекстура мёрзлых торфяников как фактор затухания георадарного сигнала 339

Садуртдинов М.Р., Судакова М.С., Скворцов А.Г., Царев А.М., Давыденко С.Ю., Малкова Г.В. Изучение геокриологического разреза с помощью комплекса геофизических методов 343

Самохвалов Н.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Стрелецкая И.Д. Многолетняя динамика сезонного протаивания и фитомассы в типичных тундрах Западного Ямала 345

Северин А.Н., Комаров И.А., Шевчик Ф.А., Скапинцев А.Е. Методика прогноза температурного режима грунтов под действием системы круглогодичной термостабилизации (на примере опытной площадки Звенигородской биостанции МГУ) 351

Сизов О.С. Закономерности пространственной локализации эоловых форм рельефа в криолитозоне Западной Сибири 352

Синицкий А.И., Шеин А.Н., Башкова А.А. Апробация методики по диагностике систем и устройств температурной стабилизации грунтов на капитальных объектах г. Салехард 357

Ситар К.А., Георгиевский Б.В., Цзыни С. Древние ледниковые отложения как критерий достоверности моделей тектонической эволюции земли (на примере докембрийских и фанерозойских отложений Африки и Ближнего Востока) 361

Слагода Е.А. Микротекстуры отложений в таберальных образованиях континетального обрамления Байдарацкой губы 366

Смульский И.И. Изменение инсоляции Марса за 1 млн. лет 370

Сокасян В.Г., Оспенников Е.Н., Котов П.И. Изучение характера и свойств снежного покрова г. Норильск и г. Дудинка 375

Стрелецкая И.Д., Кизяков А.И., Самохвалов Н.Д., Лейбман М.О. Ландшафтная индикация неглубоко залегающих пластовых льдов, полуостров Ямал 380

Сурин С.Д. Разработка мерзлой погребенной россыпи золота методом скважинной гидродобычи 384

Сыромятников И.И., Литовко А.В., Смирнов Ю.А., Шапошников Г.И. Опыт проведения геотехнического мониторинга автомобильных дорог на территории Якутии 389

Сысолятин Р.Г., Вен Ж., Гао Ч., Тихонравова Я.В. Метеорологические параметры сплошной криолитозоны Северо-Востока Евразии и восстановление рядов наблюдений методами машинного обучения 393

Тарбеева А.М., Маслаков А.А., Судакова М.С., Крыленко И.В., Юров Ф.Д. Влияние изменения климата и мерзлоты на эрозионные и русловые процессы в окрестностях г. Салехарда 396

Трегубов О.Д., Уяганский К.К. Динамика и прогноз мерзлотно-климатических условий в Анадыре (Чукотка) 400

Трифонов Б.А., Милановский С.Ю. Инженерно-сейсмологические аспекты мониторинга мерзлоты 405

Тюрин А.И. Геологические процессы и явления в Подмосковье, связанные с сезонным промерзанием грунтов 408

Фалалеева А.А. Связь теплофизических свойств напочвенных покровов с ландшафтами 412

Фахретдинов А.В. Геоинформационное определение крупнобугристых торфяников по данным спутниковых снимков Sentinel (на примере природного парка «Нумто») 414

Федоров А.Н. Основные направления мерзлотно-ландшафтных исследований в Якутии 417

Хилимонюк В.З., Коренкова Е.С., Булдович С.Н. Инженерно-экологические изыскания и мониторинг мерзлоты 422

Хименков А.Н. Криогенный фактор при формировании и локальном разрушении газонасыщенных зон в мёрзлых породах севера Западной Сибири 425

Хомутов А.В., Лейбман М.О., Бабкина Е.А., Бурдак Д.В., Данько М.М. Термоцирки полуострова Ямал: мониторинг и картографирование опасности возникновения 429

Царапов М.Н. Математический анализ деформирования оттаивающего грунта на основе принципа Эшелби 433

Чижова Ю.Н., Васильчук Ю.К. Изотопная индиксация формирования ледяных ядер пинго (на примере бугра у Салехарда) 437

Шеин А.Н., Башкова А.А., Синицкий А.И., Громадский А.Н., Гончаров А.А. Анализ состояния зданий в г. Салехарде на 2025 год, возведённых по I принципу использования многолетнемёрзлых грунтов, на основе данных температурного мониторинга 440

Шейнкман В.С., Седов С.Н. Мерзлотно-почвенная летопись как новый палеоархив позднего плейстоцена на севере Западной Сибири 445

Шейнкман В.С., Седов С.Н. Динамика Арктического бассейна на севере Западной Сибири и его освоение полигонально-жильными льдами и в позднем квартере 450

Шепелев А.Г. Пространственное распределение запасов общего органического углерода в физико-географических провинциях и ландшафтно-геохимических системах Якутии 455

Шепитько Т.В., Артюшенко И.А., Гречищева Э.С., Ноздрачёв А.С. Физическое моделирование возникновения «мостика холода» в щебеночной свае 461

Шестакова А.А. Подходы к составлению современной геокриологической карты Якутии масштаба 1:1 500 000 465

А.А. Щербакова, Алексеев А.Г. Эволюция методологических подходов к расчёту глубины промерзания грунта: от эмпирических наблюдений к адаптивным моделям в условиях изменения климата 470

Именной указатель 473

Материалы, не вошедшие в издание

В.И. Богоявленский, И.В. Богоявленский, А.В. Кишанков, Р.А. Никонов Основные результаты изучения взрывной дегазации, газонасыщенности и реликтовой субаквальной мерзлоты в Арктике 483

Научное издание

# Сборник докладов
# Седьмой конференции геокриологов России
# «Динамика природных условий в криолитозоне и геокриологический мониторинг»

**с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов**

**МГУ имени М.В. Ломоносова**
**9-10 июня 2026 г.**

Электронное научное издание сетевого распространения.
Адрес в сети Интернет https://bookonlime.ru/node/86046
Усл. печ. л. 60,38. Объем данных 13,0 Мб.
Опубликовано 01.06.2026.
Издательство «КДУ»: 8(495) 638-57-34.
www.kdu.ru; www.bookonlime.ru

**МАТЕРИАЛЫ, НЕ ВОШЕДШИЕ В ИЗДАНИЕ**

# ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ВЗРЫВНОЙ ДЕГАЗАЦИИ, ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ И РЕЛИКТОВОЙ СУБАКВАЛЬНОЙ МЕРЗЛОТЫ В АРКТИКЕ

**В.И.Богоявленский[1], И.В.Богоявленский[1], А.В.Кишанков[1], Р.А.Никонов[1]**
[1] Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН), г.Москва

В последнее десятилетие в ИПНГ РАН выполнены комплексные исследования на суше и прилегающем шельфе Арктики, связанные с природной и техногенной газоносностью и дегазацией верхней части разреза (ВЧР), анализом концентрации метана в атмосфере, распространением реликтовых субаквальных многолетнемерзлых пород (ММП - в разной степени сцементированные льдом породы) и криогенных газогидратов [1]. При этом использовались данные различных геолого-геофизических исследований, включая архивные и современные данные сейсморазведки, георадиолокации, эхолокации, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и с применением беспилотных летательных ап-паратов (БПЛА) [1]. Доклад посвящен основным результатам этих исследований.

В 2014 г. на полуостровах Ямал и Гыданский были обнаружены четыре гигантских кратера выбросов газа (рис. 1), а в последующие годы их количество многократно увеличилось [1-6]. В результате исследований ряда объектов обоснован газодинамический генезис образования гигантских кратеров в Арктике, подразумевающий формирование газонасыщенных полостей в массивах подземного льда, образование бугров пучения из льда и мерзлого грунта (кровля полости) с их последующим взрывом [3]. При этом на пяти объектах (С3, С11, С12, С21 и С23 в ГИС «АМО») наблюдениями процессов выбросов газа коренным населением были засвидетельствованы его самовоспламенения, что

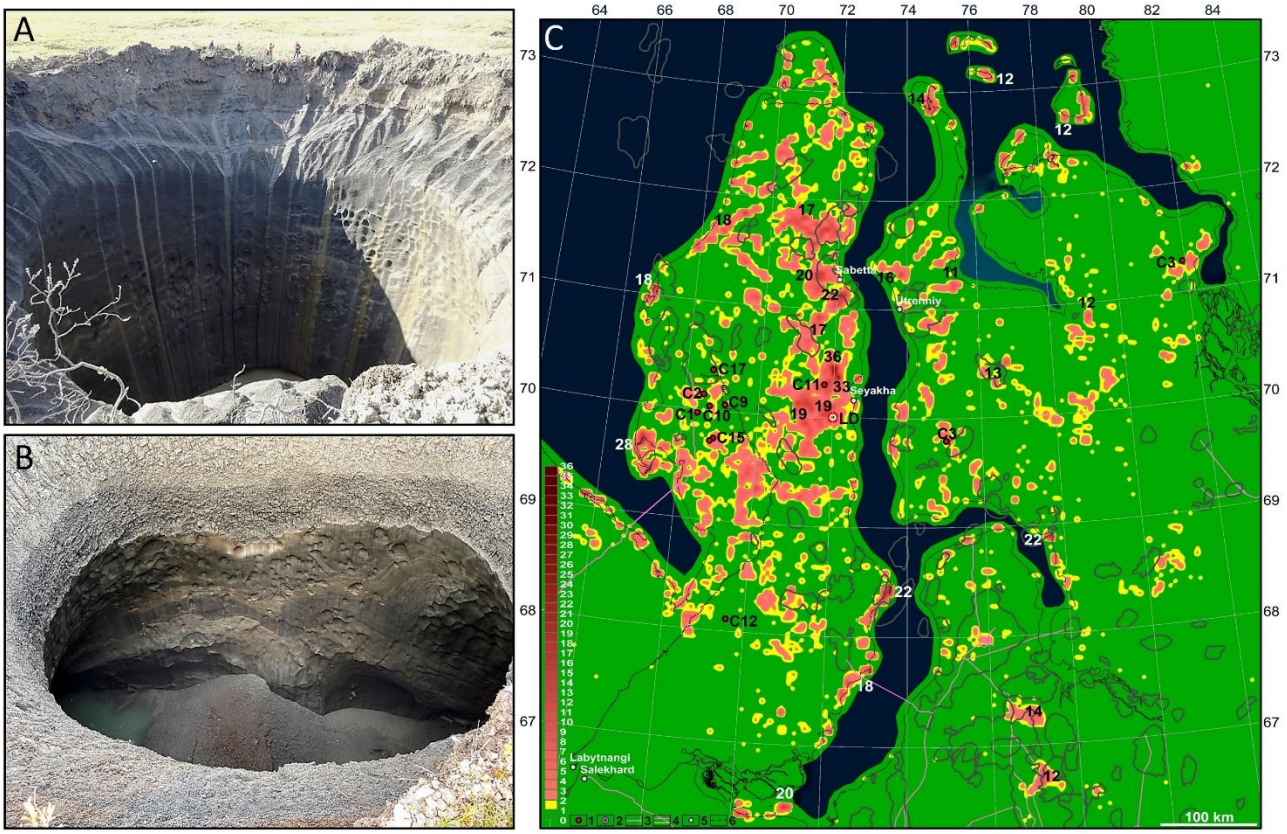



Рис. 1. Кратеры выбросов газа С1 и С17 (А, В) и картографическая схема распространения зон дегазации Земли на севере Западной Сибири (С). Обозначения на карте: 1 – кратеры выбросов газа на суше, 2 – озеро Открытие с кратерами, 3 – контуры месторождений углеводородов, 4 – газопроводы (розовые) и нефтепроводы (зеленые), 5 – города и поселки, 6 – железная дорога

На полуострове Ямал на ряде объектов произошедших взрывов газа и потенциально опасных бугров пучения ИПНГ РАН проводится мониторинг их развития по данным ДЗЗ и БПЛА, строятся цифровые модели, в том числе в виртуальной реальности (рис. 2) [1, 5, 6]. В результате мониторинга развития

бугров пучения С11, С17, С22 и С23 в 2011–2024 гг. с применением цифровых 3D-моделей, построенных на основе фотограмметрической обработки данных ДЗЗ (ArcticDEM и БПЛА), были установлены аномально высокие средние скорости их роста (до 44 см/год) за три-четыре года до взрывов, которые могут служить основным критерием выявления газовзрывоопасных бугров пучения [5, 6]. Мониторинговые исследования ряда объектов (Антипаютинский С3, Сеяхинский С11, Открытие и др.) показали продолжающиеся газогидродинамические процессы, свидетельствующие об открытости этой системы. На полуострове Ямал на дне термокарстовых озер обнаружены объекты, отождествляемые с грязевыми вулканами.

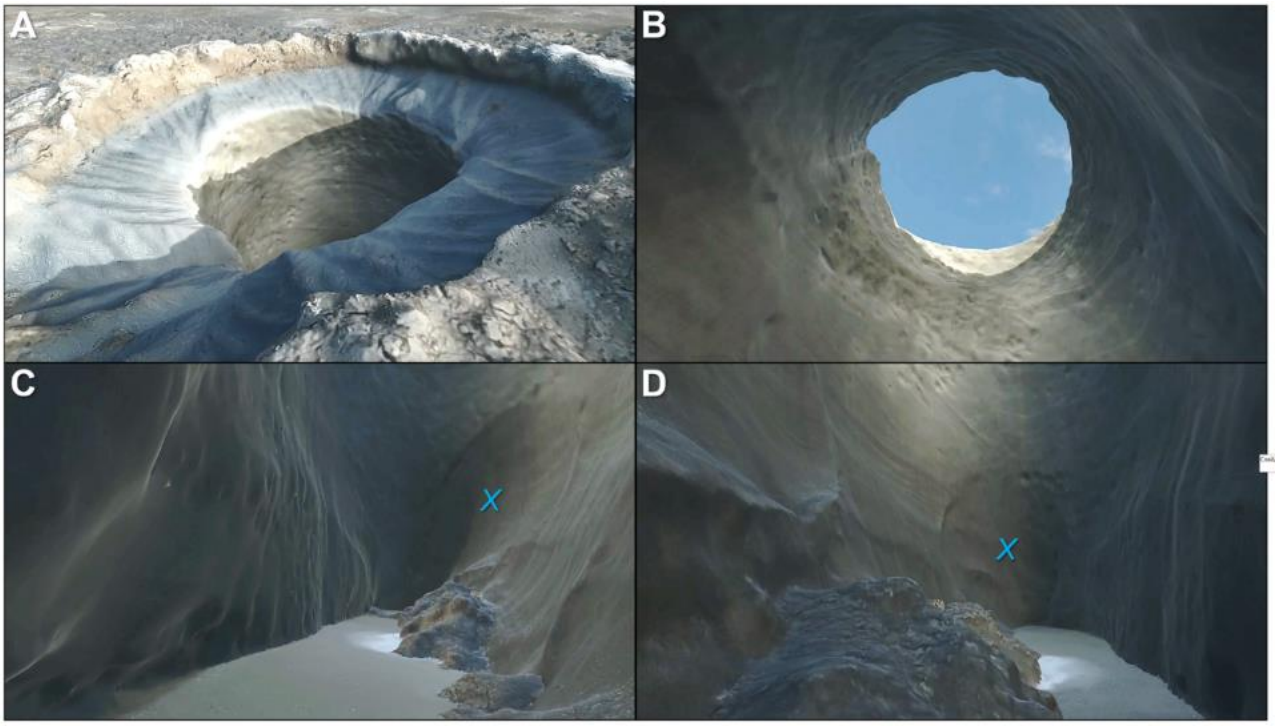



Рис. 2. Ямальский объект взрыва газа С23 в виртуальной реальности: виды с поверхности (A) и дна полости (B, C, D)

В 2019 г. были проведены комплексные геолого-геофизические исследования термокарстового озера Открытие, расположенного в центральной части полуострова Ямал и привлекшего особое внимание проявлениями взрывной дегазации с формированием на его дне гигантских кратеров диаметром до 40 м [1, 7]. При этом впервые была доказана способность мощных выбросов газа разбить ледовый покров озера толщиной 1–1,5 м, сформировать зоны его деструкции диаметром в десятки метров (по факту до 15–45 м) и разбросать крупные глыбы льда на удаления свыше 50 м от эпицентра взрыва. Подтверждены неоднократные многолетние подводные извержения (выбросы) газов со дна озер, рек и ряда морских заливов.

В 2014–2026 гг. был проведен широкий комплекс исследований дегазации в арктической части Западной Сибири на основе комплексного анализа данных ДЗЗ из космоса, вертолетов и БПЛА. При этом обнаружены 7783 зоны природной взрывной дегазации в виде многочисленных (десятки и сотни) кратеров/покмарок выбросов газа, в том числе 6300 зон на дне 4736 термокарстовых озер, 139 зон на дне 29 рек и 1344 зоны на мелководных участках Карского моря с Обской и Тазовской губами [1, 8]. Установлено, что наибольшая плотность распространения этих зон (см. рис. 1-С) обнаружена на полуострове Ямал в Нейтинско-Сеяхинском (33-36 на базе 25 км$^2$) и Сабеттинском (22) районах, а также в северной части залива Мутный (28), в Обской и Тазовской губах (22). Многие зоны дегазации расположены вблизи от инфраструктуры нефтегазовых промыслов, что несет угрозы их безопасному функционированию. Кроме того, зоны дегазации с покмарками обнаружены на полуостровах Югорский, Таймыр, в дельте Лены и в заливах континентальной суши и ряда островов Арктики. Наиболее вероятным генезисом образования зон с многочисленными покмарками являются прорывы газа, выделяющегося при диссоциации приповерхностных газогидратов, находящихся в метастабильном состоянии в зоне деградации ММП.

По данным ДЗЗ из космоса установлена однозначная региональная связь выявленных зон дегазации с районами повышенной концентрации метана в атмосфере, зафиксированными спектрометром

TROPOMI (спутник (Sentinel-5P). Выявлены сильные природные аномальные объекты в Арктике и сформулированы вероятные причины их образования из регионально угленосных отложений Тунгусского, Ленского и Таймырского бассейнов.

В 2017–2025 гг. впервые выполнен комплексный мегарегиональный анализ особенностей потенциальной газонасыщенности ВЧР шельфа морей Восточной Сибири, Чукотки и Аляски на основе данных сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ) АО МАГЭ и Геологической службы США (USGS). При этом по сейсмопрофилям протяженностью около 40 тыс. км в ВЧР выявлено 2086 потенциально газонасыщенных объектов (рис. 3), несущих угрозы при бурении и эксплуатации скважин [9]. Наибольшая плотность распространения этих объектов выявлена в морях Лаптевых, Чукотском, Беринговом и Бофорта, а в Восточно-Сибирском море она в 5–6 раз меньше, что связано различной тектонической активностью этих морей на поздних стадиях осадконакопления. На континентальном склоне выявлены признаки наличия залежей газогидратов (горизонт BSR – Bottom Simulating Reflector) [9].

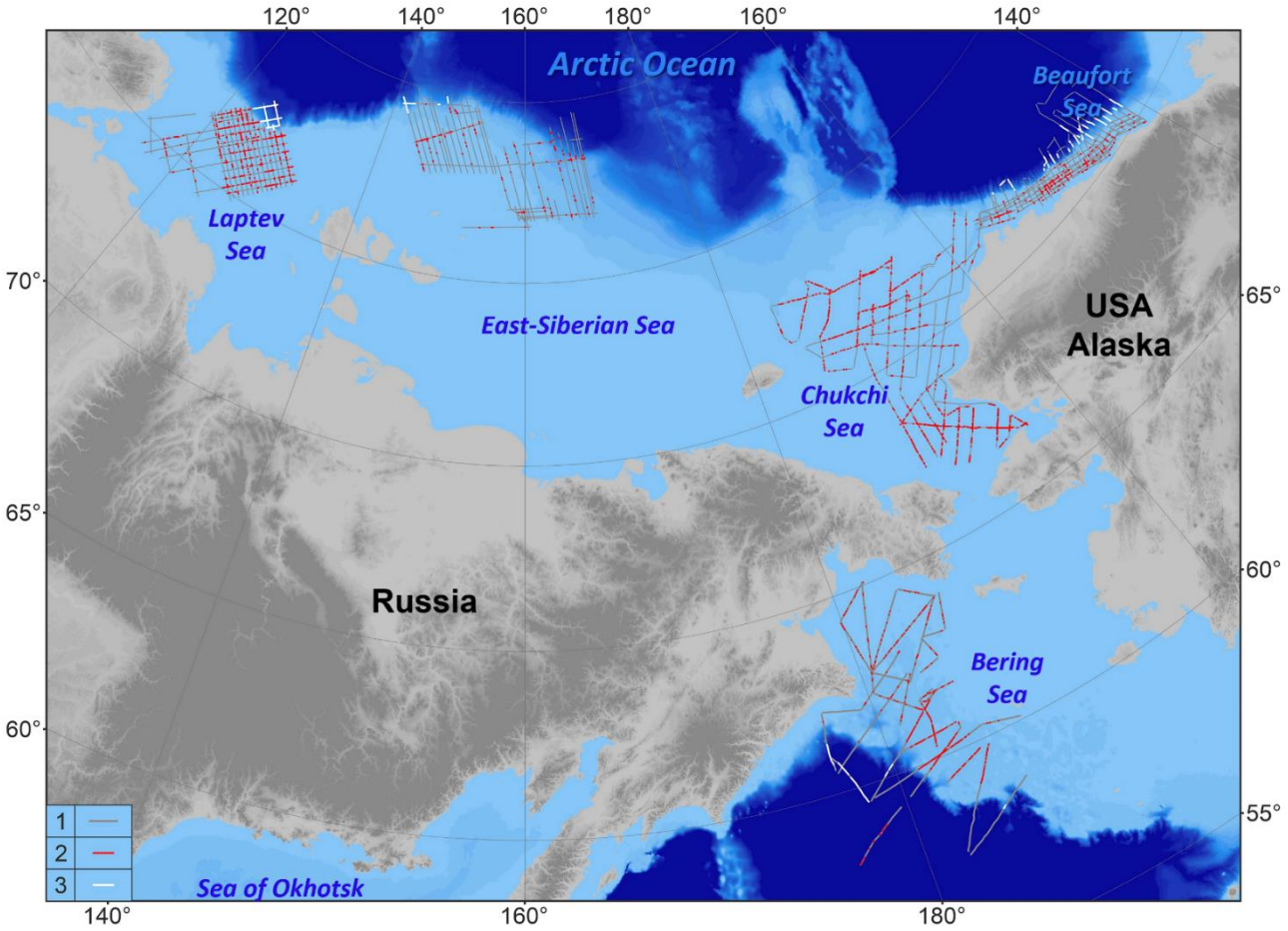



Рис. 3. Картографическая схема расположения сейсмопрофилей (1) с выделенными потенциально газонасыщенными объектами (2), газовыми гидратами (3).

При анализе свыше 50 тыс. км записей преломленных волн, зарегистрированных в первых вступлениях полевых сейсмограмм МОГТ АО МАГЭ, АО СМНГ и АО ДМНГ, выполнен прогноз распространения субаквальных реликтовых ММП с потенциальными криогенными газогидратами на арктическом шельфе России (моря Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское) площадью около 2,2 млн кв. км [1, 10-12]. При этом была получена новая информация, кардинально отличающаяся от данных Международной ассоциации по мерзлотоведению (IPA) и других результатов, в основном базирующихся на данных математического моделирования. Впервые установлено, что на большей части шельфа Восточной Сибири (около 58%) твердомёрзлые породы деградировали, что также сократило площадь возможного существования газогидратов (рис. 4). В значительной степени (около 77%) мерзлота деградировала на шельфе Восточно-Сибирского моря. В южной части Карского моря в основном сохранилась редкоостровная мерзлота, а в его северной части ММП не обнаружены [11]. ММП также не обнаружены в российской части Чукотского моря [12].

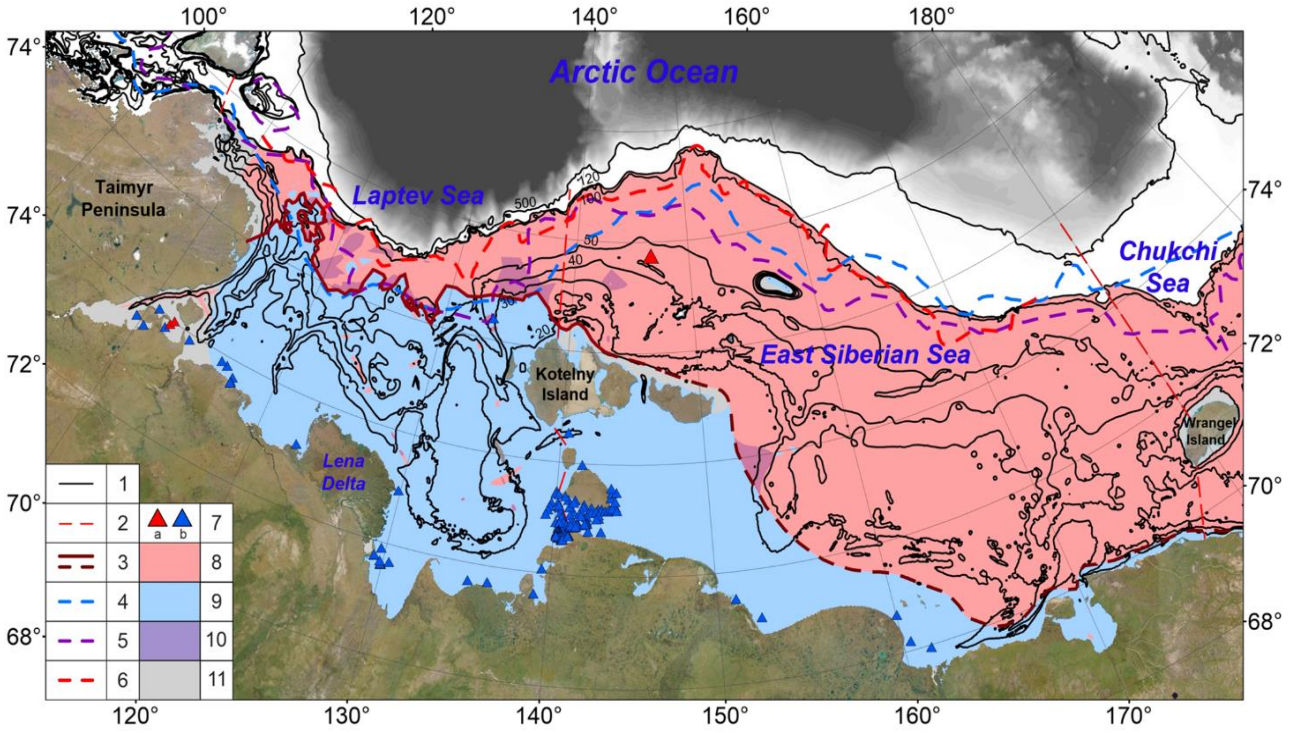



Рис.4. Распространение мерзлых и талых пород на шельфе Восточной Сибири по данным сейсморазведки методом преломленных волн. Обозначения: 1 – изобаты (м); 2 – границы морей; 3-6 – границы преимущественно мерзлых и талых пород: 3 – ИПНГ РАН, 4 – IPA / J.Brown et al., 2001, 5 – P.Overduin et al., 2019, 6 – N.Romanovsky, V.Tumskoy, 2011; 7 – отсутствие (a) и наличие (b) ММП по данным бурения скважин; 8 – зона преимущественного отсутствия ММП (талые породы), 9 – зона преимущественного существования твердомерзлых пород; 10 – зоны конечной стадии деградации мерзлоты; 11 – недостаток информации («серая зона»).

Полученные результаты способствуют повышению эффективности и безопасности поиска, разведки и разработки месторождений углеводородов на суше и шельфе Арктики. Данные о распространении ММП на шельфе Арктики также представляют большое значение для понимания районов распространения газа в свободном и гидратном состояниях для анализа климатических изменений при оценке объемов эмиссии парниковых газов. Часть результатов исследований внедрена в ООО «Газпром добыча Надым».

Работа выполнена по теме госзадания ИПНГ РАН «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения ресурсов углеводородов шельфа и сопредельной суши арктических и субарктических регионов России в условиях меняющегося климата» (№ 125020501403-7).

**Литература**

1. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Кишанков А.В. Геофизические методы обеспечения технологического суверенитета и национальной безопасности России в Арктике // Вестник РАН, 2024. – Т. 94. – №10. – С.896–914.

2. Богоявленский В.И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли. // Горная промышленность. – 2020. – №1. – С.97–118.

3. Богоявленский В.И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // Арктика: экология и экономика. – 2021. – Т. 11. – № 1. –С. 51–66.

4. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования // Арктика: экология и экономика. – 2021. – Т. 11. – № 3. – С. 362–374.

5. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. Мониторинг развития Дуплетного объекта взрыва газа С22 на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования Земли // Арктика: экология и экономика. – 2024. – Т. 14. – № 3. – С. 320–333.

6. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А., Гаврилов А.А. Аномально быстрый рост и взрыв Ямальского бугра газодинамического пучения С23 в 2020–2024 годах // Арктика: экология и экономика. – 2025. – Т. 15. – № 3. – С. 4–17.

7. Богоявленский В.И., Ерохин Г.Н., Никонов Р.А. и др. Изучение зон катастрофических выбросов газа в Арктике на основе пассивного микросейсмического мониторинга (на примере озера Открытие) // Арктика: экология и экономика. – 2020. – № 1 (37). – С. 93–104.

8. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. Взрывная дегазация Земли на севере Западной Сибири: суша и прибрежные части Карского моря // Арктика: экология и экономика. – 2025. – Т.15. – № 2. С.16–176.

9. Богоявленский В.И., Кишанков А.В. Опасные газонасыщенные объекты на арктическом шельфе Восточной Сибири, Дальнего Востока (Россия) и Аляски (США) // Арктика: экология и экономика. – 2024. – Т.14. – № 4. – С. 478–487.

10. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A. New Information on Subsea Frozen Ground in the Laptev and East Siberian Seas based on Seismic Data. // Doklady Earth Sciences. – 2025. – V. 521:11.

11. Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г., Рокос С.И. Новая информация о субаквальной мерзлоте в Карском море по данным сейсморазведки методом преломленных волн // Арктика: экология и экономика. – 2025. – Т.15. – №4. – С. 480–494.

12. Богоявленский В.И., Кишанков А.В. Широкомасштабное отсутствие реликтовых мерзлых отложений и газовых гидратов на шельфе Чукотского моря // Арктика: экология и экономика. – 2026. – Т. 16. – № 2. С. 168-180.