



Оценочный отчет

**Основные природные и социально-экономические
последствия изменения климата в районах распро-
странения многолетнемерзлых пород: прогноз на
основе синтеза наблюдений и моделирования**

GREENPEACE

Редактор: Анисимов О.А., д.г.н., Государственный гидрологический институт,
С.Петербург, Россия

Авторский коллектив:

Анисимов О.А., д.г.н., Государственный гидрологический институт, С.Петербург,
Россия

Белолуцкая М.А., к.г.н., Государственный медицинский университет, С.Петербург,
Россия

Григорьев М.Н., д.г.н., Институт Мерзлотоведения СО РАН, Якутск

Инстанес А., Ph.D., Консалтинговая компания «Instanes Consulting», Берген, Норвегия

Кокорев В.А., С.Петербургский Государственный университет, С.Петербург, Россия

Оберман Н.Г., д.г.-м.н., ЗАО Горногеологическая компания «МИРЕКО»,
Минеральные Ресурсы Коми, Сыктывкар, Россия

Ренева С.А., Государственный гидрологический институт, С.Петербург, Россия

Стрельченко Ю.Г., С.Петербургский Государственный университет, С.Петербург,
Россия

Стрелецкий Д., Университет Делавера, Ньюарк, США

Шикломанов Н.И., Ph.D, Университет Дж. Вашингтона, Вашингтон, США

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Структура отчета и методология написания	8
Вечная мерзлота: определение, факты и история исследований.	9
Моделирование вечной мерзлоты	13
Современные изменения климата и вечной мерзлоты	16
Региональный пример: Север Европейской части России	18
Региональный пример: побережья Арктических морей Восточной Сибири.	20
Экономика Арктики	25
Данные о населении Арктики и видах деятельности.	25
Промышленное производство и вклад в ВВП.	27
Инфраструктура.	29
Современные изменения вечной мерзлоты и их влияние на инфраструктуру.	31
Прогнозы. Как это делается?	40
Основные последствия таяния вечной мерзлоты в России	49
Прогноз геокриологических опасностей и рисков для инфраструктуры.	49
Возможности адаптации к прогнозируемым изменениям вечной мерзлоты: практические рекомендации для лиц, принимающих решения	53
Оценка возможного влияния эмиссии метана при деградации вечной мерзлоты на территории России на глобальный климат	58
Экономическая составляющая прогнозируемых изменений вечной мерзлоты	61
Заключение	75
Словарь	76
Список литературы	79

Предисловие

Глобальное изменение климата – кто только не говорит в наши дни об этой проблеме. Казалось бы, за более чем 10 лет, прошедшие с середины 1990-х, когда она вышла за рамки научных статей и дискуссий и стала предметом обсуждения политиков, ключевые вопросы влияния климата на природную среду, развитие экономики, благосостояние, здоровье и безопасность жизни населения, не раз обсуждались на различных научных и политических форумах, и по многим из них были выработаны согласованные позиции. Напомним лишь основные вехи этого процесса.

1990 г. – опубликован Первый оценочный доклад Межправительственной Группы Экспертов по Изменению Климата (МГЭИК), в котором впервые систематизированы научные взгляды на прогноз климата, оценку последствий потепления и меры по адаптации к предстоящим изменениям. Каждой из этих проблем был посвящен отдельный том доклада. Впервые механизмы международных научных и политических организаций были использованы для того, чтобы резюме доклада, в подготовке которого участвовали более тысячи ученых различных стран, было доведено до внимания политиков и лиц, принимающих решение. В прошедшие с тех пор 19 лет периодическая публикация таких докладов и обсуждение их результатов на международном научном и политическом уровнях стали традицией. Последующие доклады были опубликованы в 1995, 2001 и 2007 годах (<http://www.ipcc.ch/>). За эту деятельность МГЭИК в 2007 году была присуждена Нобелевская премия Мира, которую эта организация поделила с Албертом Гором. В настоящее время начата подготовка Пятого доклада МГЭИК, в июле 2009 г. состоялось первое совещание авторов по обсуждению его содержания. Публикация доклада намечена на 2014 год. Показательно, что несколько ранее в марте 2009 г. МГЭИК начала подготовку специального доклада об экстремальных климатических событиях и рисках, связанных с такими событиями. В одном из его разделов рассмотрена проблема таяния вечной мерзлоты и обусловленная этим опасность повреждения инфраструктуры, что является крайне актуальным для России.

2005 г. – опубликован Оценочный доклад о последствиях изменения климата в Арктике, более известный по своей англоязычной аббревиатуре ACIA. Этот доклад был подготовлен по инициативе *Арктического Совета*, объединяющего семь государств, включая Россию, часть территории которых расположены в Арктике. *Выделенные курсивом названия и термины подробно разъясняются в словаре, расположенном в конце отчета.* В 2008 году начата подготовка нового доклада, который должен быть опубликован в 2011 году.

В России важными вехами явились подготовка Росгидрометом следующих документов.

2005 г. - Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010-2015 года и их влияния на отрасли экономики России (Бедрицкий и др., 2008);

2008 г. – оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории России (Бедрицкий и др., 2008; Бедрицкий и др., 2008);

2009 г. – Министерство природных ресурсов РФ подготовило проект Климатической Доктрины Российской Федерации, в которой впервые сформулирована позиция страны по отношению к проблеме изменения климата, определены национальные приоритеты и задачи по адаптации.

Резюмируя, можно с уверенностью утверждать, что проблема изменения климата стала одной из ключевых в 21 веке, во многом благодаря тому, что мировому научному сообществу удалось перевести результаты и выводы многочисленных академических и прикладных исследований на язык, понятный широкой общественности, представителям бизнеса и лицам, принимающим политические решения. Огромную роль сыграло тесное взаимодействие с прессой, общественными и неправительственными экологическими организациями, без участия которых это было бы невозможно. Ключевым моментом, положившим начало новой эры в проблеме изменения климата, стало принятие в 1997 г. Киотского протокола, ограничивающего выбросы парниковых газов в атмосферу, который к 2009 г. ратифицировали 183 государств. Киотский протокол стал первым официальным свидетельством признания важности проблемы климатических изменений правительствами этих государств. Несмотря на то, что Протокол не был подписан

США и Австралией, эти две страны в последнее десятилетие сделали немало для того, чтобы увеличить энергоотдачу своих экономик путем внедрения новых технологий, которые позволили замедлить темпы роста выбросов парниковых газов, фактически продемонстрировав свою поддержку международных мер по ограничению потепления.

Казалось бы, в конце первого десятилетия 21 века достигнута ясность в понимании проблемы изменения климата и их последствий, определены глобальные приоритеты, выявлены наиболее уязвимые секторы экономики и регионы, в которых последствия будут наиболее значимы, намечены стратегии адаптации к таким изменениям и пути минимизации негативных последствий. В этих условиях целесообразность подготовки еще одного отчета, основным объектом внимания которого являются районы Крайнего Севера России, неочевидна и, по меньшей мере, требует комментариев. Чем же данный отчет отличается от опубликованных ранее?

В последние годы существенно сократилась дистанция между научным сообществом и лицами, принимающими политические решения на различных уровнях государственного управления. Эта, несомненно, позитивная тенденция, налагает дополнительную ответственность на научное сообщество, рекомендации которого могут относительно быстро отражаться на реальных политических решениях и непосредственно влиять на хозяйственную деятельность, природопользование, социальные и экономические условия. Практически ни одна крупная встреча политических лидеров развитых государств не обходится без обсуждения проблемы изменения климата, его последствий, а в ряде случаев и совместных мер по адаптации к происходящим и прогнозируемым изменениям. Научной базой для подготовки таких дискуссий и рекомендаций лицам, принимающим политические решения, часто служат выводы международных оценочных отчетов. Нерешенной проблемой, особенно в приложении к России, является то, что почти все такие отчеты методологически используют глобальный подход, рассматривая проблемы в направлении от общего к частному. В то же время конкретные последствия современных и предстоящих изменений климата проявляются прежде всего на региональном уровне, поэтому для выработки эффективной стратегии адаптации более адекватным было бы движение в обратном

направлении от частного через обобщение к общему. Всегда ли глобальные выводы международных отчетов, если посмотреть на них через «увеличительное стекло», отражают реалии конкретных стран, регионов, социальных групп? По ряду причин, одной из которых является немногочисленное представительство Российских экспертов при подготовке многих международных отчетов, применительно к России ответ на этот вопрос часто будет отрицательным. Можно привести достаточно много примеров, подтверждающих этот тезис. Так, широко цитируемые выводы Четвертого отчета МГЭИК (2007) о том, что даже небольшое дальнейшее увеличение температуры воздуха приведет к уменьшению водных ресурсов, сокращению сельскохозяйственной продукции, а при увеличении температуры более чем на 2 °С эти проблемы достигнут критического уровня, затронут миллионы людей во всем мире и потребуются немедленные действия по их решению, не соответствуют реальным условиям в России. В нашей стране наблюдается и прогнозируется увеличение стока большинства крупных рек, включая все реки Сибири, и более равномерное его распределение в течение года, разнонаправленные, в том числе и положительные, тенденции изменения климатообусловленной составляющей урожайности сельскохозяйственных культур в зерносеющих районах и расширение зоны устойчивого земледелия за счет смещения ее границы к северу (Бедрицкий и др., 2008).

Изменение климата несет с собой не только угрозы человечеству, но и открывает новые возможности. В настоящее время доминирующим словосочетанием, во многом благодаря средствам массовой информации, является «борьба с глобальным потеплением». Между тем, правильной постановкой вопроса является оценка баланса плюсов и минусов, идентификация наиболее уязвимых районов, секторов экономики и природных процессов, оценка неизбежных потерь и разработка путей их минимизации, с одной стороны, а с другой – выявление новых потенциальных возможностей и стратегий оптимального планирования природопользования, экономического и социального развития, адаптированных к новым климатическим условиям.

Открытым остается вопрос о том, в какой степени ключевые проблемы изменения климата, сформулированные в международных оценочных отчетах,

актуальны для России, как можно их ранжировать, выделив требующие первоочередного внимания на государственном уровне в нашей стране, насколько велика неопределенность современных прогнозов таких наиболее важных процессов и, наконец, можем ли мы предложить методологии количественных оценок климатообусловленных потерь или же выгод, прежде всего экономических, для основных последствий изменений климата на территории России.

В России некоторые из последствий изменений климата будут благоприятны. Помимо уже указанного выше улучшения водных ресурсов и агроклиматического потенциала ряда районов страны, можно назвать уменьшение суровости климата северных регионов и его положительное влияние на здоровье населения, сокращение отопительного периода, увеличение продолжительности навигационного периода на северных реках и по Северному морскому пути (Бедрицкий и др., 2008). Можно дискутировать по поводу того, насколько велики бонусы, связанные с такими изменениями, и всегда ли их можно безоговорочно назвать положительными, но несомненно то, что возможные негативные аспекты этих изменений, вероятнее всего, нельзя назвать доминирующими. Ограниченный объем и сроки подготовки этого документа не позволяют детально исследовать все перечисленные вопросы. Между тем, ряд последствий климатических изменений будут иметь отчетливо неблагоприятный характер, и на них, по мнению авторов отчета, нужно обратить первоочередное внимание. В России к таковым можно отнести климатообусловленное таяние вечной мерзлоты и связанные с этим социально-экономические последствия. Именно эти проблемы рассматриваются в данном отчете.

Структура отчета и методология написания

Отчет состоит из двух томов. Первый том представляет собой резюме, в котором кратко сформулированы основные выводы исследований, касающиеся последствий изменений климата в районах распространения вечной мерзлоты на территории России, он также содержит иллюстрации и карты. Второй том является подробным отчетом, который содержит анализ результатов оригинальных разработок авторского коллектива и обзор научных статей по данной тематике. Уровень

изложения материала обеспечивает научную доказуемость всех выводов отчета, по этой причине не все его разделы представляют собой «легкое чтение» для неподготовленного читателя. Поскольку по проблеме изменений климата и их последствий в России существуют различные мнения, авторы считают необходимым придерживаться научного стиля изложения и довести до читателей, помимо выводов, также и методологию, на основе которой они были получены.

При составлении отчета основу составили данные Российских и зарубежных публикаций по вопросам, которые он затрагивает. При написании ряда разделов также использовались оригинальные разработки авторов, в том числе результаты моделирования вечной мерзлоты. При изложении вопросов, слабо представленных в научных публикациях (к ним относится оценка экономического ущерба от изменений вечной мерзлоты), авторами использовался метод экспертных оценок и консультаций с ведущими Российскими и зарубежными специалистами в рамках проводившихся в период подготовки отчета научных конференций. Весь картографический материал, представленный на различных рисунках, был подготовлен с использованием ГИС технологий и современных методов пространственного обобщения географической информации. Все данные имеют точную географическую привязку, приложение к отчету содержит электронные версии рассчитанных карт в форматах, пригодных к использованию в геоинформационных системах. В большинстве расчетов на картах использовалась стандартная регулярная сетка с шагом 0.5° по широте и долготе, что и следует принимать за пространственное разрешение представленных данных.

Вечная мерзлота: определение, факты и история исследований.

Вечная мерзлота распространена на территории 22.8 млн. км², занимая около 24% суши в северном полушарии, в том числе более 60% территории России (Zhang et al., 2000). Вечная мерзлота встречается не только в *Арктике* и *суб-Арктике*, но и за их пределами в высокогорных районах с холодным климатом (см. рис. 1).

Основными параметрами вечной мерзлоты являются ее среднегодовая температура, глубина залегания нижней границы (вертикальная мощность), а также мощность сезонно-талого слоя (СТС). Практический интерес, особенно при

строительстве сооружений, представляет также *льдистость* мерзлых пород, от которой в наибольшей степени зависит величина их просадки при оттаивании.

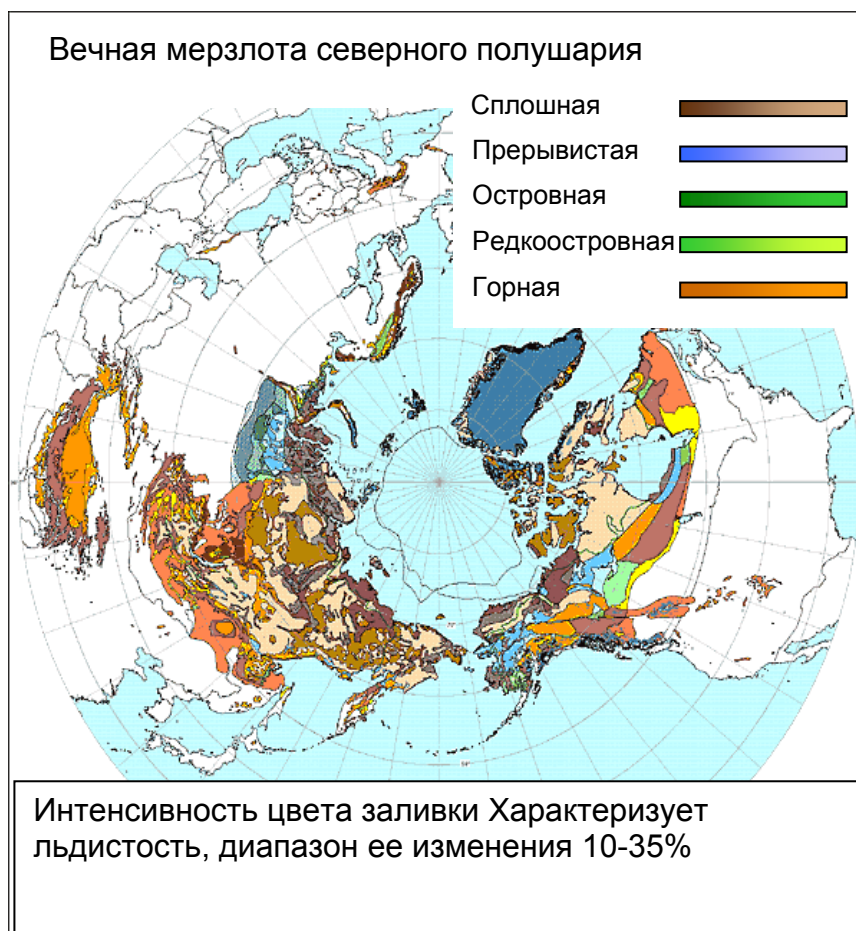


Рисунок 1. Распространение вечной мерзлоты в северном полушарии. Карта подготовлена Международной Ассоциацией Мерзловедения на основе обобщения данных наблюдений, см. nsidc.org/data/docs/fgdc/ggd318_map_circumarctic/brown.html

Наибольшей вертикальной мощности, до 1500 м, вечная мерзлота достигает в центральных районах Сибири и в Якутии. Более характерные величины составляют 100 – 800 м в зоне сплошного распространения, 25-100 м в зоне прерывистого и 10-50 м – островного распространения. Диапазон среднегодовой температуры грунта у поверхности в этих зонах составляет, соответственно, $-8^{\circ}\text{C} \sim -13^{\circ}\text{C}$, $-3^{\circ}\text{C} \sim -7^{\circ}\text{C}$, и $0^{\circ}\text{C} \sim -2^{\circ}\text{C}$. Годовые колебания температуры быстро затухают с глубиной и ощущаются лишь до глубины 10-12 м (Гаврилова, 1981; Zhang et al., 2000).

Уже в 17 веке вечная мерзлота упоминается как природный феномен в отчетах Якутских губернаторов царю Российской Империи. История развития исследований вечной мерзлоты в России, охватывающая период с 17 века до середины 20 века достаточно полно документирована и изложена в публикации (Shiklomanov, 2005). Наблюдения за вечной мерзлотой в России – самые продолжительные в мире и берут начало в XIX в. В 1837 г. в Якутске впервые были проведены измерения температуры в Шергинской скважине. Скважина, носящая имя служащего Русско-Американской компании Ф. Шергина, имеет длительную историю. Первоначально её планировали как колодец, и по указу якутского губернатора Кракова в 1685–1686 гг. она была вырыта до глубины 30.5 м. Докопаться до воды так и не удалось, но уже в то время, задолго до появления работы И. Гмелина в 1752 г., которого многие зарубежные исследователи считают первооткрывателем вечной мерзлоты, стало понятно, что она распространена на большой территории не только у поверхности, но и на значительной глубине. Через 150 лет, в 1828 г. Шергин организовал работы по углублению скважины, но в 1837 г. они были остановлены на отметке 116.4 м, поскольку и там грунт был мёрзлым. Во время своей экспедиции по Сибири в 1844 г. А. Миддендорф установил термометры на различных глубинах внутри скважины и организовал периодические (2–5 раз в месяц) измерения, которые продолжались вплоть до XX в. Эти измерения послужили основой для построения Г. Вильдом в 1882 г. термической модели, при помощи которой впервые было приближённо определено положение южной границы криолитозоны России (рис. 2, Вильд, 1882).

Новый этап изучения вечной мерзлоты связан с созданием в 1950-х гг. Якутским институтом мерзлотоведения нескольких геокриологических стационаров. На них проводили детальные термические наблюдения, измерения глубины сезонного таяния, определяли теплофизические свойства грунтов, а также изучали влияние ландшафтных факторов – растительности, снежного покрова, состава почвы и различных искусственных воздействий (расчистка снега, удаление растительности и верхнего органического слоя почвы) – на оттаивание/промерзание грунтов. Описание методики измерений, применявшейся в различные годы, и анализ некоторых из полученных результатов можно найти в публикациях (Павлов, 1983; Павлов, 1997; Павлов и др., 2002). В этот период были получены параметрические зависимости,

связывающие температуру и глубину сезонного таяния с климатическими характеристиками для различных почвенных и ландшафтных условий (Павлов, 1983).



Рис. 2. Приближенное положение границы распространения вечной мерзлоты в России, рассчитанное Г. Вильдом в 1882 г. по упрощенной термической модели. Оттенками бирюзового цвета обозначены современные области сплошной, прерывистой и островной вечной мерзлоты. На карте также указаны годы основания наиболее старых поселений в Русской части криолитозоны. (См. <http://www.permafrost.su>)

В середине 1990-х гг. была создана международная сеть мониторинга глубины сезонного оттаивания вечной мерзлоты (более известна по англоязычной аббревиатуре CALM), которая в настоящее время включает 168 площадок в Северном полушарии, в том числе более 20 площадок на территории России. Ежегодные измерения проводятся на площадках размером 1×1 км или же 100×100 м в узлах регулярной сетки через каждые 100 (или 10) м, в итоге на каждой площадке получается выборка из 121 значения. В задачи этой программы входит изучение пространственной и временной изменчивости мощности СТС в различных

ландшафтных условиях. Многолетние измерения проводятся по стандартизированной методике, которая подробно изложена в работе (Brown et al., 2000). Результаты постоянно обновляются в интернете на странице <http://www.udel.edu/Geography/calm/>. В настоящее время CALM является основным источником данных о межгодовой изменчивости вечной мерзлоты, на основании которых можно изучать её отклик на изменения климата. Полезную информацию можно также получить, анализируя данные измерений температуры почвы на глубинах до 3.2 м на метеостанциях (Frauenfeld et al., 2004), однако в отличие от данных CALM, эти точечные измерения не дают представления о естественной мелкомасштабной изменчивости глубины сезонного таяния и не всегда репрезентативны в отношении ландшафтных условий и растительности.

В контексте глобального изменения климата важно понимание того, что данные, получаемые в результате наблюдений, являются единственным достоверным источником сведений о воздействии этого процесса на вечную мерзлоту. Именно поэтому было уделено много внимания описанию современной сети наблюдений за вечной мерзлотой и методам измерений с тем, чтобы даже скептически настроенные читатели, не принимающие на веру многие утверждения, могли обратиться к первоисточникам, самостоятельно воспроизвести многие важные результаты и сделать собственные выводы. Не менее важно реалистично представлять себе возможности математических моделей вечной мерзлоты, на основе которых осуществляют пространственные обобщения проводимых на отдельных небольших участках наблюдений и строят прогнозы на будущее.

Моделирование вечной мерзлоты

По мере накопления данных наблюдений математические модели вечной мерзлоты развивались и становились более совершенными. Серьёзные шаги были сделаны в 1970-х гг. на кафедре геокриологии географического факультета МГУ. Разработанный в тот период В.А. Кудрявцевым (Кудрявцев и др., 1974) полуэмпирический расчётный метод до сих пор находит широкое применение в решении многих задач, в том числе инженерной геокриологии. Приблизительно в это

же время в Канаде была создана первая физически полная динамическая модель вечной мерзлоты (Goodrich, 1982).

В 1990-х гг. образовалось новое направление, основной задачей которого стала разработка оптимальных по уровню сложности расчётных схем, пригодных для использования в гидродинамических моделях климата. Главный акцент был сделан на описании воздействия климата на состояние вечной мерзлоты, при этом многие важные геокриологические процессы не учитывались, равно как и влияние неклиматических (ландшафтных, гидрологических и т.п.) факторов. Несмотря на указанные недостатки, в рамках этих исследований были разработаны модели и методы пространственно-распределённых расчётов, при помощи которых были построены карты *«климатически обусловленного» распространения вечной мерзлоты* континентального и циркумполярного масштаба. Такие карты выделяют территории, на которых, согласно модельным расчетам, могут встречаться многолетнемерзлые породы. Надо отметить, что эти карты не всегда правильно описывают границы криолитозоны, поскольку наличие или же отсутствие вечной мерзлоты в каждом конкретном месте помимо климатических условий определяется также и рядом иных факторов, прежде всего почвой и растительностью. Модели разной сложности были разработаны в Росгидромете в Государственном гидрологическом институте (Анисимов, Нельсон, 1998; Анисимов и др., 1999) и в Главной геофизической обсерватории (Малевский-Малевич и др., 2000, 2005), а впоследствии в РАН в Институте вычислительной математики (Дымников и др., 2005) и в Институте физики атмосферы (Аржанов и др., 2007). Аналогичные исследования проводились в США, прежде всего в лаборатории моделирования вечной мерзлоты университета Фэрбенкса, Аляска (Nicolsky et al., 2007; Sazonova, Romanovsky, 2003) и в университете Колорадо (Lawrence, Slater, 2005; Zhang et al., 2005).

При помощи моделей неоднократно предпринимались попытки воспроизвести наблюдаемые изменения вечной мерзлоты. Были получены оценки площади распространения, глубины оттаивания и температуры многолетнемерзлых пород для территории России (Гарагуля, Ершов, 2000; Гречищев, 1997; Малевский-Малевич и др., 1999, 2000, 2007; Малевский-Малевич, Надежина, 2002; Павлов, 1997), отдельных её регионов (Sazonova et al., 2004) и всего Северного полушария (Анисимов и др.,

1999; Аржанов и др., 2007; Павлова и др., 2007; Anisimov, Nelson, 1997; Anisimov et al., 1997; Lawrence, Slater, 2005). Модельные расчёты обычно проводятся с использованием регулярной сетки, в узлах задаются характерные значения параметров климата, растительности и почвы, принимаемые за средние по соответствующей пространственной ячейке. Наилучшее разрешение, которое удалось достичь, составляет 0.5° по широте и долготе; более детальные расчёты лимитированы отсутствием входных данных высокого разрешения.

Принципиальным недостатком большинства моделей было то, что до последнего времени они развивались самостоятельно и вне рамок классической геокриологии, основанной на систематизации и обобщении комплекса мерзлотных, ландшафтных и почвенных наблюдений. Отчасти этим, хотя в большей степени недостатками конкретной модели, можно объяснить полученный и явно противоречащий эмпирическому опыту прогноз американских авторов, предполагающий почти полное исчезновение вечной мерзлоты до конца XXI (Lawrence, Slater, 2005). Этот сенсационный прогноз привлек внимание многих средств массовой информации, в особенности зарубежных, которые неоднократно писали, со ссылкой на эту работу, о предстоящих необычайно высоких темпах таяния вечной мерзлоты. Между тем, специалистам с самого начала были очевидны существенные упущения этой модели, не учитывающей огромную термическую инерцию многолетнемёрзлых пород, в силу которой их таяние всегда запаздывает за потеплением и продолжается многие десятки и сотни лет. Нереалистичность модели проявлялась также и в том, что в ней рассматривался лишь верхний слой грунта толщиной 3.2 метра. Показательно, что сами авторы сенсационного прогноза в дальнейшем существенно пересмотрели свои результаты, и в более поздней публикации представили другой прогноз (Nicolisky et al., 2007). Этот пример подтверждает необходимость постоянно соотносить результаты математического моделирования с эмпирическим опытом. Такую возможность дают современные наблюдения за динамикой криолитозоны.

Современные изменения климата и вечной мерзлоты

Наблюдаемая современная динамика вечной мерзлоты на территории России во многом обусловлена имевшими место на протяжении всего XX столетия изменениями климата, и прежде всего температуры воздуха. В работах (Анисимов и др., 2007; Груза и др., 2006) по данным наблюдений на 455 метеостанциях были рассчитаны вековые региональные тренды изменения температуры, а также тренды за несколько последних десятилетий. В 1900–2004 гг. тренды в среднем по России составили 1.1 °C, 1.7° C и 0.6 °C за 100 лет для среднегодовой, зимней и летней температуры воздуха с заметными региональными различиями. Максимальными тренды среднегодовой и зимней температуры были вне области распространения вечной мерзлоты. В летний период на значительной части криолитозоны в Приуралье, в Западной Сибири, на Чукотке и в Приморье тренды были выше среднего, достигая 0.9–1.1 °C за 100 лет. В последние несколько десятилетий они значительно возросли. Так, в 1970–2004 гг. средние по всей территории России значения трендов средней годовой, зимней и летней температуры воздуха составили, соответственно, 0.38 °C, 0.51 °C и 0.32 °C за 10 лет (Анисимов и др., 2007). Помимо сезонных, имеются ярко выраженные региональные различия. Так, в Приамурье тренд зимней температуры за последние 35 лет достигает 0.8 °C/10 лет. В то же время на севере Дальнего Востока произошло понижение зимней температуры до –0.4 °C/10 лет при том, что осенью и весной там же отмечается сильное повышение температуры до 0.6–0.8 °C/10 лет.

Увеличение температуры воздуха на территории России сопровождалось увеличением осадков, особенно в зимний период, что привело к увеличению высоты снежного покрова. Сравнение данных за 1991–2005 гг. с нормой за 1961–1990 гг. показало увеличение высоты снега на 20–40 мм на севере Европейской территории России, до 60 мм в Западной Сибири, в Приморье и на Камчатке и чуть меньшее увеличение до 20 мм в Якутии и в Восточной Сибири; при этом продолжительность снежного периода повсеместно сокращалась. Поскольку снежный покров оказывает отопляющее воздействие, увеличение его высоты усилило влияние наблюдаемого современного потепления на температуру почвы, в том числе и в области распространения многолетнемерзлых пород.

Данные наблюдений указывают на практически повсеместное увеличение среднегодовой температуры верхнего слоя вечной мерзлоты с 1970-х гг. Оно составило 1.2–2.8 °С на севере Европейской территории России, 1.0 °С на севере Западной Сибири, 1.5° С в Центральной Якутии и около 1.3° С в Восточной Сибири. В работе (Израэль и др., 2006) получены выводы о положительных тенденциях среднегодовой температуры почвы по данным наблюдений на 22 станциях, в основном на севере Восточно-Европейской равнины. Значительно большее число метеостанций было использовано в работе (Чудинова и др., 2003), однако только за период с 1969 по 1990 г., не охватывающий наиболее сильные современные изменения температуры почвы. Анализ данных до 2006 г. по полной сети станций указывает на то, что в слое почвы до 80 см повышенные значения трендов 0.2–0.6 °С за 10 лет наблюдаются на севере Европейской территории России, в Сибири и на Дальнем Востоке.

Эти изменения, несомненно, обусловлены глобальными процессами, поскольку на севере Аляски также происходило потепление, причем много более сильное. С начала 20 столетия до 1980х годов температура верхнего горизонта мерзлых пород увеличилась на 2 – 4 °С, (Анисимов, 1999; Lachenbruch, Marshall, 1986; Osterkamp, Romanovsky, 1999) а в последующие 20 лет до 2002 года еще в среднем на 3 °С (Nelson, 2003). На северо-западе Канады верхний слой вечной мерзлоты за последние два десятилетия стал теплее на 2 °С (Majorowicz, Skinner, 1997). В особенности большой интерес представляют данные “аномальных” областей, где на фоне глобального климатического потепления продолжительное время преобладали тенденции похолодания. К таковым относится северо-восток Канады. Примечательно, что с середины 1990х годов и в этой области температура верхнего слоя мерзлых пород увеличилась почти на 2 °С (Nelson, 2003), что подтверждает точку зрения, согласно которой происходящие изменения обусловлены глобальным потеплением.

Достаточно масштабное и почти повсеместно наблюдаемое атмосферное потепление и отмечаемый на многих метеостанциях рост температуры почвы должны были бы вызвать синхронное увеличение мощности сезонно-талого слоя. Однако наблюдения на специализированных площадках, расположенных в различных зонах вечной мерзлоты, отмечают это не везде. Причин здесь может быть несколько. Во-

первых, мощность СТС связана с температурой воздуха сложной зависимостью, она определяется не только средними величинами, но и годовым циклом температуры. Во-вторых, она зависит от меняющихся ландшафтных факторов, например, от растительности (Анисимов, Белолуцкая, 2004; Shur et al., 2005). Мелкомасштабная изменчивость неклиматических факторов оказывает большое влияние на локальные параметры состояния вечной мерзлоты, а в области островного и прерывистого её распространения часто служит решающим обстоятельством, обуславливающим наличие или отсутствие многолетнемёрзлых пород. Таким образом, точечные измерения температуры грунта на глубинах до 3.2 м на метеостанциях могут быть нерепрезентативны в отношении вечной мерзлоты, поскольку не отражают влияния меняющихся неклиматических факторов.

Информация о том, чем обусловлены наблюдаемые изменения состояния вечной мерзлоты, крайне важна, поскольку в модельных прогнозах движущим фактором является лишь изменение климата, а иные возможные причины, как правило, игнорируются, при этом без какого-либо серьезного обоснования. Изучению динамики неклиматических факторов в процессе потепления долгое время уделялось недостаточное внимание, и какие-либо сценарии для них в континентальном и глобальном масштабе отсутствуют.

Обсуждая проблему влияния изменений климата на вечную мерзлоту нужно принимать во внимание, что наряду с общими для всей криолитозоны закономерностями имеются и региональные особенности. Ниже приводятся два примера, один из которых относится к северо-западной части криолитозоны России, а второй – к восточной части ее Арктического побережья.

Региональный пример: Север Европейской части России

На севере Европейской территории России (ЕТР) имеется обширная сеть наблюдений за состоянием вечной мерзлоты, на которой, в отличие от организованной в начале 1990х годов международной сети циркумполярного мониторинга, наблюдения проводились в период 1970-2005. Многие специализированные наблюдения проводились различными геологоразведочными учреждениями и до недавнего времени эти данные были практически недоступны для

научного использования. Здесь представлены обобщения данных, собранных горнодобывающей компанией «Минеральные Ресурсы КОМИ» (ООО МИРЕКО), полученные за 35 лет. Эти данные представляют большой интерес, поскольку они охватывают весь период потепления конца 20 века и позволяют проследить динамику изменения состояния многолетнемерзлых грунтов (см. рис. 3). Сам район севера ЕТР также весьма интересен, поскольку здесь компактно представлены все виды вечной мерзлоты, т.е. области сплошного, прерывистого и островного распространения, значительный спектр биоклиматических условий, равнинные территории и предгорья Урала. Немаловажно, что имеются подробные данные о составе слагающих вечную мерзлоту пород.



Рис. 3. Динамика вечной мерзлоты севера ЕТР за период 1970-2005 г. 1 – область распространения по состоянию на 2005 г. 2 – Часть островной криолитозоны, протаявшей на всю мощность или частично за 1970-2005 г. 3 – часть зоны сплошного распространения вечной мерзлоты (по состоянию на 1970 г.), ставшая зоной прерывистого распространения к 2005 г. 4 – талики мощностью более 15 м., возникшие за рассматриваемый период. 5 – величина углубления существовавших ранее таликов. 6-9 – различные типы грунтов, суглинистые, песчаные, торфяные, скальные. 11 – геокриологические стационары. (Оберман, Шеслер, 2009).

Данные, представленные на рисунке 3, свидетельствуют о том, что за 35 лет произошло существенное сокращение площади приповерхностной вечной мерзлоты, имевшиеся ранее острова мерзлого грунта в наиболее южных районах полностью протаяли (Оберман, Шеслер, 2009). Южная граница ее распространения сместилась к северу на 30-40 км в Печорской низменности, и значительно больше – до 80 км,- на равнинах Приуралья. Помимо этого возникли многочисленные новые и углубились ранее существовавшие *талики*, в том числе и в зоне, где ранее наблюдалось сплошное распространение мерзлоты. Это позволяет говорить о смещении к северу границ зон сплошного и прерывистого распространения вечной мерзлоты на 15-20 км в равнинной тундре и на многие десятки километров в Приуралье и в горах Пай-Хоя. Данные мониторинга указывают также на почти повсеместно повышение температуры вечной мерзлоты, которое в отдельных районах на глубинах 10-15 м достигало 1-1.5 °С, и на активизацию термокарста.

Эти наблюдения согласуются с произошедшим за последние 35 лет потеплением в регионе, что указывает на возможность прогноза состояния вечной мерзлоты при помощи математического моделирования.

Региональный пример: побережья Арктических морей Восточной Сибири.

Среди многочисленных последствий климатического потепления в районах распространения вечной мерзлоты особое место занимает разрушение берегов Арктических морей и островов. Существуют различные типы берегов, наиболее подвержены различного рода разрушительным процессам те из них, которые содержат большие включения льда, так называемые *ледовые комплексы*. В последнее десятилетие по наблюдениям, проводимым в центральной части моря Лаптевых, произошло увеличение скорости разрушения и отступления берегов в 1.5-2 раза по сравнению со среднемноголетней нормой. Несомненно, что значительный вклад в это внесло увеличение глубины сезонного оттаивания прибрежных участков и сокращение морских льдов, вследствие чего возросла штормовая активность, которая играет главную роль в разрушении берегов. Льдистые морские берега, протяженность которых составляет более трети побережья Восточной Сибири, в

настоящее время отступают со скоростью от 0,5 до 25 м/год. Влияние разрушительных процессов уже испытывают на себе населенные пункты, коммуникационные линии, средства навигационного обеспечения морского транспорта и другие объекты. Отмечены разрушения домов, кладбищ, геодезических знаков, навигационных и других береговых объектов. Особую экологическую опасность в этой связи представляет утеря радиоизотопных термоэлектрических генераторов – источников питания маяков. Несмотря на то, что предпринимаются значительные усилия по обеспечению их нормативной эксплуатации, своевременной замене и надлежащей утилизации выработавших срок службы устройств, имеются случаи их утери, как при транспортировке (падение с тросов крепления при транспортировке вертолетами), так и из-за оттаивания и разрушения грунтов, на которых они установлены, с последующим их сползанием и смывом в море.

Немаловажен и геополитический аспект данной проблемы. Ежегодно только лишь в Восточной Сибири Россия теряет более 10 км² прибрежной суши, а по всему побережью Арктики – до 30 км². Сокращается площадь многих Арктических островов, некоторые малые острова, как, например, легендарная «Земля Санникова», исчезли, буквально растворившись в океане, в течение прошедшего столетия (рис. 4). Фотографии на рисунках 5-7 иллюстрируют современные процессы разрушения берегов арктических морей и то, как это влияет на прибрежную инфраструктуру.

Разрушаемые берега морей Восточной Сибири продуцируют большое количество берегового обломочного материала (в среднем 152 млн. тонн/год) и органического углерода (4 млн. тонн/год), поступающих в арктический бассейн и превышающих суммарный береговой вынос во все остальные арктические моря. По обломочному материалу их вклад составляет 55% от того, что дает все Арктическое побережье России, по органическому углероду 69%. Масса обломочного материала, поступающего из берегов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, почти в три раза превосходит региональный твердый сток рек. При этом *ледовый комплекс* побережий морей Восточной Сибири является важнейшим источником берегового потока наносов, его доля в потоке наносов из берегов всех арктических морей составляет 42%, а по органическому веществу – 66%.



Рис. 5. Отступление береговой линии острова Муостах в море Лаптевых. На фоне аэрофотоснимка 1951 года нанесено положение береговой линии по состоянию на 2007г. Даже визуальный анализ показывает, что остров быстро разрушается, и его, несомненно, ждет участь ряда исчезнувших арктических островов.

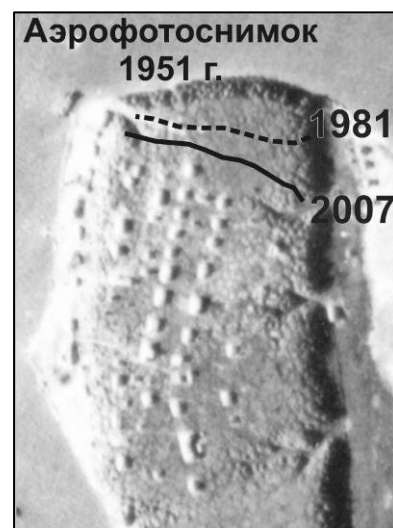
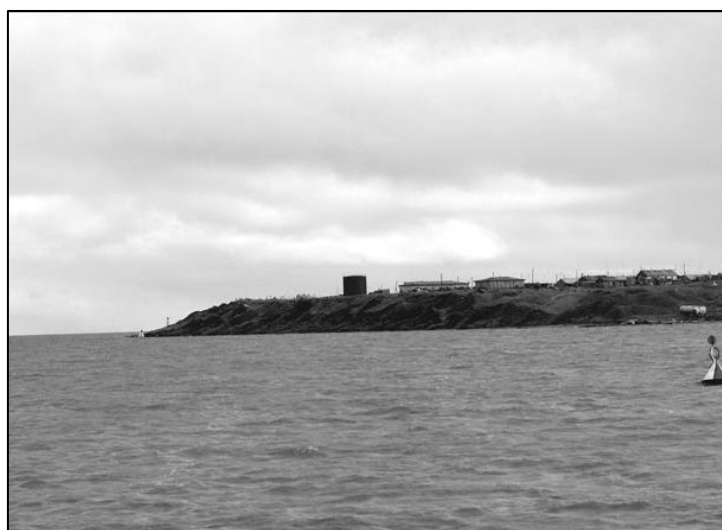


Рис. 6. Быстро разрушающийся льдистый берег вблизи поселка Быков Мыс, расположенного на Быковском полуострове, море Лаптевых. Справа - аэрофотоснимок 1951 г., на котором показано последовательное отступление вглубь суши береговой линии к 1981 и 2007 г. В настоящее время она проходит в непосредственной близости от построек и сооружений, которые изначально находились на значительном удалении от моря.



Рис. 7. Навигационный знак «Ванькин», вертикально сползший вниз и впоследствии разрушенный. Южный берег острова Большой Ляховский, Восточно-Сибирское море. Фото М. Григорьева.

Наступление моря на сушу провоцирует активизацию негативных процессов даже на большом удалении от берега. Происходит быстрое развитие оврагов и провалов, интенсифицируются оползни, разрушаются склоны. Эти сопутствующие разрушению и отступанию берегов процессы представляют большую опасность для инфраструктуры, поскольку они охватывают значительные площади, распространяясь с высокой скоростью вглубь суши.

До недавнего времени из-за недостатка информации прогнозирование скорости разрушения арктических берегов было затруднено. В настоящее время накоплен достаточный массив данных о многолетних трендах динамики берегов. Это позволяет предсказать, когда береговые сооружения должны быть перемещены вглубь суши или предложить своевременные меры для их защиты.

Ожидается, что отмечаемое в Арктике потепление климата и сокращение площади льдов приведет к активизации штормовых условий и ускорению отступания берегов, а также к усилению выноса из берегов на шельф обломочного материала, в том числе органического углерода. Углерод, высвобожденный из вечной мерзлоты, является дополнительным источником парниковых газов – метана и углекислого газа.

Экономика Арктики

Вечная мерзлота играет огромную роль в экономике, землепользовании, строительстве, а также в жизненном укладе людей на Крайнем Севере. По этой причине важность ее изучения в контексте происходящих климатических изменений очевидна для всех арктических государств. Менее ясно, насколько этот вопрос актуален на глобальном уровне, т.е. могут ли изменения вечной мерзлоты в Арктике повлиять на мировые процессы, и если да, то каковы механизмы и сила такого влияния. Для ответа на этот вопрос необходимо определить место, занимаемое Арктическими регионами в системе мировых экономических и социальных отношений, а также роль, которую они играют в глобальных природных системах. В этом разделе приводятся некоторые из основных социально-экономических показателей, характеризующих современное состояние арктических регионов.

Данные о населении Арктики и видах деятельности.

Численность населения, постоянно проживающего в *Арктике* составляет около 4 млн. человек. С учетом *суб-арктической области*, непосредственно прилегающей к Арктике, население составляет чуть менее 10 млн. чел., или около 0.16% населения планеты, в том числе по странам:

Таблица 1. Население суб-арктических регионов по состоянию на 2002 г. (Duhaime, Caron, 2006)

Страна	Численность населения	% от всего Арктического населения	% от численности населения данной страны
Канада	111 546	1.1 %	0.4 %
Острова Фаро	47 000	0.5 %	100.0 %
Финляндия	645 272	6.5 %	12.4 %
Гренландия	56 000	0.6 %	100.0 %
Исландия	289 000	2.9 %	100.0 %
Норвегия	465 200	4.7 %	10.1 %
Россия	7 144 000	72.1 %	5.0 %
Швеция	508 973	5.1 %	5.7 %
США	648 280	6.5 %	0.2 %
ВСЕГО	9 915 271	100.0 %	

В *Арктической тундре* расположены около 370 деревень и поселков, более 80% из них находятся в береговой зоне Арктических морей. В Российской части Арктики имеются города с населением более 100 тыс. человек, крупные речные порты, развитая городская, транспортная и промышленная инфраструктура, в то время как в зарубежной Арктике наиболее распространено компактное проживание людей в небольших поселках и коммунах. Индустриальные центры Российской Арктики с указанием численности населения и преобладающих видов деятельности, а также структура занятости населения по различным видам деятельности приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Индустриальные центры в Российской Арктике

Регион	Город	Население	Основные виды производства
Мурманская область	Мурманск	473 000	Морской порт,
	Северодвинск	66 000	судоремонт
	Кандалакша	54 000	судостроение
	Апатиты	89 000	алюминий
	Кировск	43 000	apatиты
	Мончегорск	68 000	apatиты
	Оленегорск	47 000	никель
	Ковдор	31 000	железо
	Заполярный	23 000	железо
	Никель	22 000	никель никель
Республика Коми	Воркута	117 000	уголь
	Ухта	61 000	уголь
Ямало-Ненецкий округ	Уренгой	105 000	газ
	Надым	52 000	газ
Таймырский автономный округ	Норильск	169 000	Никель, медь, кобальт, цветные металлы
Республика Саха - Якутия	Якутск	200.000	уголь
	Нерюнгри	70.000	золото
	Алдан	25.000	алмазы
Чукотский автономный округ	Анадырь	11.000	Золото, уголь, цветные металлы
Магаданская область	Магадан	107.000	Золото, серебро, цветные металлы

Таблица 3. Структура занятости населения в Российской Арктике (McDonald et al., 2006)

Вид деятельности	Число занятых, тыс. чел.	% от общего числа занятых
Сельское и лесное хозяйство	159	4.1
Промышленное производство	907	23.7
Строительство	370	9.7
Транспорт и связь	443	11.6
Торговля и обществ. питание	518	13.5
Образование	388	10.1
Медицина	285	7.5
Иные услуги	352	9.2
Иные виды производства	406	10.6
Всего по Российской Арктике	3828	100.0

Промышленное производство и вклад в ВВП.

По состоянию на 2003 г. в стоимостном выражении вклад всех Арктических районов в мировую экономику составил 0,44%, или 225 млрд. долларов США. Примерно такой же вклад (222 млрд.) дает экономика Малайзии при населении 25 млн. человек и Швейцарии (237 млрд.) при населении 7.4 млн. человек. Около 62% вклада всей Арктики в мировую экономику (140 млрд. долларов США) обеспечила ее Российская часть (Duhaime, Caron, 2006).

Среднегодовой доход на одного жителя в Арктике, выраженный в долларах США, варьирует от 19500 в Гренландии до 49000 на Аляске. В Российской Арктике он составляет около 20000, т.е. почти вдвое выше среднего по всей России дохода, который составляет около 9000.

В России 5% населения, проживающего в Арктических районах, обеспечивают 11% общей продукции всей страны, главным образом за счет добычи невозобновляемых ресурсов. Ни в одной из Арктических стран нет столь большого различия между долей населения и создаваемой им долей национального продукта (McDonald et al., 2006).

На Арктику приходится около 10.5% мировой добычи нефти и 25.5% газа. В России около 93% природного газа и 75% нефти добываются в арктических регионах,

в стоимостном исчислении это дает до 70% годового экспорта страны (Ильичев и др., 2003).

Подтвержденные запасы нефти и газа в неосвоенных месторождениях, расположенных в Арктике составляют, соответственно, 5.3% и 21.7% мировых резервов. Почти все разведанные арктические газовые месторождения и 90% нефтяных находятся в Российской части Арктики. Наибольшее из них – Штокмановское месторождение в Баренцовом море, обнаруженное в 1988 году, но до сих пор не освоенное, содержит около 3200 млрд. м³ газа (Lindholt, 2006).

Широко распространена точка зрения о том, Российская Арктика является сырьевым придатком экономики и прочие виды деятельности занимают в ней пренебрежимо малую долю. Данные, приводимые в таблице 4, показывают, что это не так. Топливная индустрия в действительности дает чуть более трети валового внутреннего продукта (ВВП), остальной вклад обеспечивают иные виды экономической деятельности и, прежде всего, строительство, образование и медицина, трубопроводный транспорт и торговля.

Таблица 4. Валовой продукт, создаваемый в различных секторах экономики Российской Арктики (по состоянию на 2002 г.) (McDonald et al., 2006)

Вид деятельности	ВВП, млн. руб.	% от общего ВВП Российской Арктики
Сельское хозяйство	12345	1.0
Лесное хозяйство	7258	0.6
Пищевая промышленность	13618	1.0
Деревообработка	29526	2.3
Топливная индустрия	475040	36.4
Химическая промышленность	5622	0.4
Черная металлургия	4856	0.4
Цветная металлургия	52190	4.0
Строительство	173671	13.3
Трубопроводный транспорт	95575	7.3
Торговля	84274	6.5
Образование и медицина	113261	8.7
Электроэнергетика	57711	4.4
Иные услуги	148088	11.4
Иные виды производства	30633	2.4
Всего по Российской Арктике	1303688	100.0

Инфраструктура.

Россия обладает наиболее развитой по сравнению с другими арктическими странами *инфраструктурой* в районах распространения *вечной мерзлоты* (рис. 8). Помимо нескольких городов с численностью населения более 100 тысяч, здесь имеются автомобильные и железные дороги, аэропорты, способные принимать крупные авиалайнеры, речные и морские порты на крупных реках и на Арктическом побережье, протяженные линии электропередач, единственная в мире Билибинская атомная электростанция, построенная на вечной мерзлоте и разветвленная сеть трубопроводов, общая протяженность которых только лишь в Сибири превышает 350 тысяч километров (Анисимов, Лавров, 2004).

Режимы эксплуатации объектов инфраструктуры в криолитозоне и за ее пределами значительно различаются. Как правило, сооружения на вечной мерзлоте имеют меньший расчетный срок эксплуатации в силу того, что они подвержены более интенсивному износу, в том числе и за счет изменений вечной мерзлоты, в особенности при ослаблении ее несущей способности, которая уменьшается при увеличении температуры грунта. Типичные расчетные сроки эксплуатации некоторых из объектов инфраструктуры в криолитозоне приведены в таблице 5.

Таблица 5 Типичные расчетные сроки эксплуатации объектов в криолитозоне

Дороги с покрытием	15 - 20 лет
Трубопроводы	30 лет
Дома с фундаментом	30 - 50 лет
Железные дороги	50 лет
Мосты и тоннели	75 - 100 лет

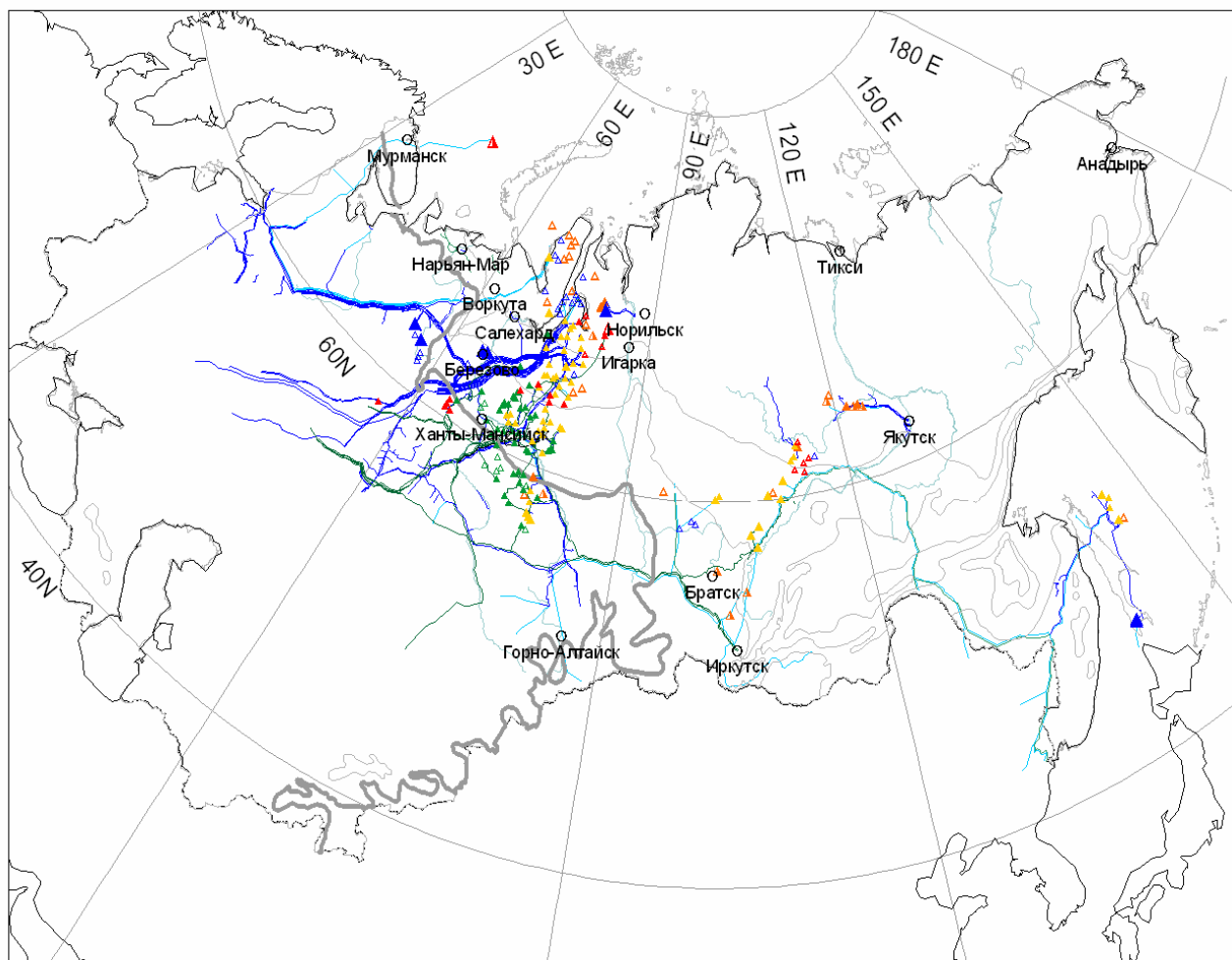


Рис. 8. Нефтегазовая инфраструктура криолитозоны России. Треугольниками на карте отмечены основные месторождения природного газа (голубой), газоконденсата (желтый), нефти (зеленый), нефтегазовые (красный); такими же цветами обозначены соответствующие трубопроводы. Границы различных типов вечной мерзлоты (сплошная, прерывистая, островная) обозначены тонкими контурными линиями; утолщенной серой линией обозначено положение юго-западной границы распространения вечной мерзлоты на территории России.

Современные изменения вечной мерзлоты и их влияние на инфраструктуру.

Изменение климата приводит к увеличению температуры вечной мерзлоты, при этом интенсифицируются неблагоприятные геокриологические процессы, влияющие на устойчивость сооружений. Отчасти из-за этого, хотя также и из-за иных факторов, связанных с условиями эксплуатации, в последние 2 десятилетия значительно возросло число аварий и повреждений объектов инфраструктуры в криолитозоне. В Западной Сибири ежегодно происходит около 35 тысяч аварий на нефте- и газопроводах, около 21% из них вызваны механическими воздействиями и деформациями (Анисимов, Белолуцкая, 2002). На нефтяных месторождениях одного лишь Ханты-Мансийского АО происходит в среднем 1900 аварий в год. Причиной аварий являются неравномерная осадка грунта при таянии вечной мерзлоты, или же выдавливание опор и фундаментов при промерзании. Вблизи Уренгоя был отмечен подъем секции трубопровода на 1.5 м в течение одного года. На поддержание работоспособности трубопроводов и ликвидацию их деформаций, связанных с изменениями вечной мерзлоты, ежегодно тратится до 55 млрд. рублей.

Есть основания утверждать, что естественные неравномерные *термокарстовые осадки* земной поверхности послужили одной из причин крупнейшей в мире наземной аварии на нефтепроводе Возей–Головные сооружения (республика Коми) в 1994 г. (Оберман, 2007). В результате множественных (до 6) разрывов трубы произошел разлив около 160 тысяч тонн нефтесодержащей жидкости. Мониторинг опытного неэксплуатируемого 45-километрового надземного трубопровода, выполненный институтом ПечорНИПИнефть, показал, что даже сезонные неравномерные термокарстовые осадки земной поверхности вызывают многочисленные аварийные ситуации. Из-за неравномерных просадок грунта, вызванных таянием вечной мерзлоты, газопровод Василково–Нарьян-Мар вынуждены были реконструировать уже через несколько лет после начала его эксплуатации. Причиной было то, что проектировщики учли только влияние газопровода на мерзлоту, но не учли воздействие на неё изменяющихся климатических условий.

Деструктивному воздействию при таянии вечной мерзлоты подвергаются не только трубопроводы, но и другие сооружения. Обследование показало, что в Норильском промышленном районе около 250 сооружений имели существенные деформации, связанные с ухудшением мерзлотных условий в последнее десятилетие; около 40 жилых домов были снесены или планируются к сносу.

Показательны результаты мониторинга состояния полотна Северной железной дороги, проводившегося в период 1970-2001 г. На участке Сейда-Воркута величина ежегодной термокарстовой просадки грунта под полотном увеличилась с 10 – 15 см в середине 1970х годов до 50 см в 1995 г., этому сопутствовало увеличение среднегодовой температуры воздуха в среднем на 3-4 °С, с – 6 ... -7 °С до -3 °С. Особенно заметны были проявления сильного потепления на рубеже двух столетий. Всего лишь за три года, с 1998 по 2001 г., общая протяженность участков с ежегодными весенними термокарстовыми просадками грунта под полотном железной дороги увеличилась в полтора раза, с 10 км почти до 15 км.

Весьма показательны результаты мониторинга состояния жилого фонда Воркуты. Климатические условия в Воркуте, по сравнению со многими другими городами и населенными пунктами Крайнего Севера, менее суровы, и встречаются обширные участки, на которых вечная мерзлота отсутствует. Это позволяет сравнить состояние жилых построек на вечной мерзлоте и вне ее. Результаты обследования большого количества жилых домов вне области распространения вечной мерзлоты указывают на то, что их состояние и степень износа близки к расчетным показателям, заложенным при проектировании и строительстве. Совершенно иная картина для домов, построенных на вечной мерзлоте. Фактическая степень их износа в 4-6 раз выше, чем расчетная; многие здания деформированы, находятся в аварийном состоянии и подлежат сносу или же требуется их капитальный ремонт. Два таких дома показаны на рисунки 9.



Рис. 9. Слева - расселенный дом в аварийном состоянии, подлежащий сносу. Ул. Варгашор, 14, Воркута. Справа - фрагмент дома по ул. Лермонтова, 13 в Воркуте после проведения ремонтно-восстановительных работ. Часть оконных проемов была заложена кирпичной кладкой, видны два пояса укрепляющих стальных стяжек над первым и четвертым этажами. (Фото Н.Б. Кокунова)

Зачастую здания приходят в негодность после 6-10 лет эксплуатации при нормативном сроке 50 лет. Примечательна приуроченность катастрофических деформаций зданий в Воркуте к 1980-м годам, характеризовавшимся заметным повышением температуры мерзлоты в регионе.

Аналогичные процессы происходят и в других городах Крайнего Севера России. В период с 1990 по 1999 г. число зданий, получивших различного рода повреждения из-за неравномерных просадок фундаментов, увеличилось по сравнению с предшествующим десятилетием на 42% в Норильске, на 61% в Якутске и на 90% в Амдерме. В Якутске за период с начала 1970х годов число таких зданий превысило 300 (Анисимов, Белолуцкая, 2002).

В районе г. Якутска вертикальная толща вечной мерзлоты достигает 250–350 м. В естественных условиях глубина сезонно-талого слоя (СТС) составляет в среднем

1,5–1,7 м для суглинков, 1,6–2,0 м для супесей и 2,0–2,5 м для песков. Основными криогенными процессами на территории Якутска являются просадки из-за *термокарста*, морозобойное растрескивание, морозное пучение, заболачивание и подтопление. Активизация этих процессов неблагоприятно сказывается на функционировании городской инфраструктуры. В последние десятилетия отмечается расширение площадей распространения деструктивных криогенных процессов. Это выражается в разрушении дорожных покрытий и коммуникаций, деформациях насыпей, фундаментов сооружений, увеличении зон заболачивания. Именно обводнение является одним из наиболее неблагоприятных факторов, влияющих на потерю устойчивости грунтов оснований и несущих конструкций. Причем происходит обводнение как пресными, так и минерализованными подземными водами – *криопэгами*. В результате этого в середине 1990х годов аэропорт Якутска пришел в аварийное состояние, поскольку значительная часть окружающей его территории, в том числе в непосредственной близости от взлетно-посадочной полосы, оказалась в зоне подтопления (Алексеева и др., 2007).



Рис. 11. Карта современной застройки Якутска на 2003 г. с нанесенными областями распространения засоленных грунтов (1,2), зданиями, находящимися в аварийном состоянии (3), и границами исторической городской застройки 1821г. (4) и 1908 г. (5) (Алексеева и др., 2007).

В Якутске сформировался большой фонд жилых и общественных зданий, построенных с применением различных конструктивных решений фундаментов и оснований (см. план города на рис. 11). По данным Департамента жилищно-коммунального хозяйства администрации Якутска, число каменных строений составляет около 3000, в том числе 968 жилых домов. Состояние жилого фонда признано катастрофическим. Начиная с 1970 г. в городе произошло более 20 случаев крупных обрушений каменных зданий постройки 1950–1960 гг. Так, в 1999 г. произошло обрушение угловой части здания на одной из центральных площадей города (рис. 12). Подобные обрушения частей зданий происходили и в последующие годы. На рисунке 13 показано одно из недавних событий 2009 г., когда обрушилась часть здания, принадлежащего Геологоразведочному управлению.

Причиной обрушения зданий в большинстве случаев является ослабление несущей способности вечной мерзлоты. Однако преждевременным было бы делать вывод, что виной тому – глобальное потепление, хотя несомненно, что и оно сыграло определенную роль, усилив имевшие место деструктивные процессы. Анализ, проведенный органами городского управления с привлечением научных институтов, показал, что проблемы устойчивости инженерных сооружений на территории Якутска связаны главным образом с их неудовлетворительным проектированием, строительством и эксплуатацией, и лишь в малой степени обусловлены климатическим потеплением. Множество неклиматических факторов, среди которых можно указать на ошибки проектирования фундаментов, засоление и минерализация грунтов из-за утечек сточных вод, отсутствие сети ливневой канализации, сами по себе вызывают деградацию мерзлых оснований, фундаментов зданий и сооружений, а климатическое потепление лишь усиливает эти процессы.

Подчеркнем, что не только в Якутске, но и во всех регионах Крайнего Севера России ошибочным было бы объяснять все наблюдаемые разрушения зданий и сооружений на вечной мерзлоте только лишь изменением климата. В каждом конкретном случае необходим тщательный анализ всех действующих факторов, поскольку в приведенной статистике значительную роль играет и неправильная конструкция сооружений, а также нарушение режима их эксплуатации.



Рис. 12. Обрушение угла здания в центральной части г. Якутска, 1999 г. (Фото М.Н. Григорьева) (Алексеева и др., 2007).



Рис. 13. Обрушение части здания Геологоразведочного управления в г. Якутске, 2009 г. (Фото М.Н. Григорьева)

Антропогенные и техногенное воздействие на вечную мерзлоту способны сами по себе вызвать деструктивные процессы и привести к повреждению расположенных на ней сооружений, при этом изменение климата усиливает их влияние. Иллюстрацией может служить обрушение секции жилого дома в июне 2001 г. в поселке Черский, расположенном в верхнем течение р. Колымы (рис. 14). Из-за периодических утечек воды из систем водо- и теплоснабжения и сточных вод началось развитие термокарста под фундаментом здания. Повышение температуры воздуха, произошедшее в конце 1990х годов, способствовало ускорению этого процесса, что и привело в результате к обрушению части здания. Весьма вероятно, что при отсутствии протечек воды из инженерных сетей этого не случилось бы, т.е. в данном случае ключевую роль сыграло однонаправленное совместное воздействие всех, в том числе и неклиматических, факторов. Пример аварийной ситуации с жилым домом в Дудинке, которая не имеет отношения к изменению климата и возникла из-за разрушения опорных элементов фундамента показан на рисунке 15.



Рис. 14. Обрушившаяся в результате ослабления фундамента секция здания в поселке Черский. Фото В.Е. Романовского.



Рис. 15. Жилой дом в аварийном состоянии в Дудинке. Обследование выявило, что причиной просадки стало эрозионное разрушение железобетонных свай основания. Фото В.Гребенец.

Важным аспектом проблемы устойчивости сооружений на вечной мерзлоте является экологическая безопасность. Годами в арктическом регионе росло загрязнение окружающей среды стойкими органическими соединениями и другими вредными веществами, которые накапливались в толще мерзлых пород. С ростом температуры они могут попасть из льда и вечной мерзлоты в среду обитания

человека. При потеплении климата и *деградации мерзлоты* возрастает опасность поступления токсичных веществ из мест захоронения химических и радиоактивных отходов. Это относится к местам расположения хранилищ радиоактивных отходов на Новой Земле, к накопителям отходов Норильского комбината, содержащих сульфаты, хлориды меди, никеля и другие токсичные вещества (см. рис 16). Большую опасность представляют скотомогильники, расположенные на вечной мерзлоте, в связи с возможностью распространения вирусов опасных заболеваний и проникновения их в водоносные горизонты при оттаивании вечной мерзлоты.

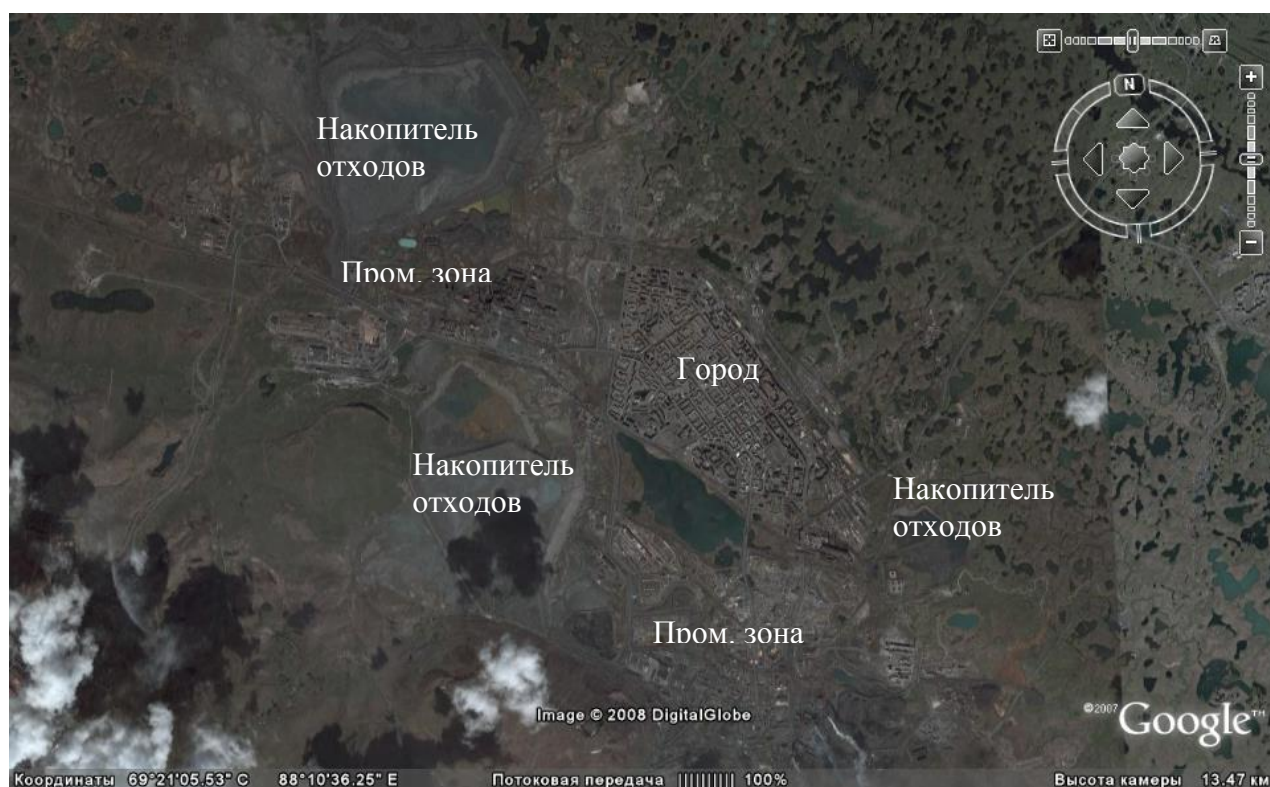


Рис. 16. Спутниковый снимок г. Норильска, на котором отчетливо видны окружающие город накопители отходов, содержащие токсичные вещества. (Фото Google).

При таянии вечной мерзлоты значительно возрастает береговая эрозия. Она еще более усиливается из-за сокращения длительности ледового периода и связанного с этим удлинением периода волнового воздействия на берега Арктических морей. Это представляет угрозу для портов, танкерных терминалов и других промышленных объектов. Существует реальная угроза нефтехранилищам Варандея, расположенным на берегу Печорского моря.

Прогнозы. Как это делается?

На первый взгляд, качественная картина изменения вечной мерзлоты в условиях глобального потепления представляется достаточно ясной. Более высокая температура воздуха как в зимний, так и в летний период вызовет увеличение температуры мерзлых грунтов и глубины *сезонно-талого слоя* (СТС). Этому же будет способствовать прогнозируемое увеличение высоты снежного покрова. Как известно, снег оказывает обогревающее воздействие, увеличивая температуру поверхности почвы и сглаживая резкие температурные колебания. Влияние увеличения осадков в летний период неоднозначно. Вода и лед проводят тепло лучше, чем сухая почва, поэтому увеличение влажности и льдистости почвы приводит к росту теплооборотов как в теплый, так и в холодный период года. Вместе с тем, значительная часть тепла расходуется на испарение и фазовые переходы, и однозначную зависимость между увеличением влажности почвы и мощностью СТС установить сложно.

На периферийных участках криолитозоны по достижении некоторых критических пределов изменений климата произойдет отрыв мерзлых толщ от поверхности, над ней образуются *талики*, мощность которых со временем будет увеличиваться. Аналогичные процессы могут иметь место не только вблизи южной границы, но и на отдельных участках в зонах прерывистого и даже сплошного распространения многолетнемерзлых пород, где местные условия способствуют глубокому сезонному оттаиванию. В результате произойдет сокращение площади распространения приповерхностной вечной мерзлоты, часть ее начнет таять как снизу, так и с поверхности и перейдет в реликтовую форму (сохранится лишь начиная с некоторой глубины), а там, где она по-прежнему будет достигать поверхности,

увеличится глубина сезонного оттаивания. Такой сценарий в общих чертах подтверждается имевшими место на протяжении 20 века *регрессиями* и *трансгрессиями* вечной мерзлоты, следовавшими с некоторым запозданием за периодами потепления 30х годов и похолодания 50х.

Описанные выше процессы можно формализовано описать в математической модели, которая позволит по заданным внешним параметрам (температура воздуха, осадки, тип почвы и ее теплофизические свойства и т.п.) рассчитать характеристики состояния вечной мерзлоты, а именно ее среднегодовую температуру и глубину сезонного оттаивания (мощность СТС). Эти характеристики и их изменения во времени далее можно использовать для оценки интенсивности термокарста, устойчивости фундаментов различных сооружений, тем самым прогнозируя возможные последствия таяния вечной мерзлоты. Именно на таком методе основаны все имеющиеся прогнозы.

Вместе с тем вопрос о точности модельных прогнозов состояния вечной мерзлоты во многом остается открытым по следующим основным причинам.

Во-первых, даже если предположить, что модели абсолютно точно воспроизводят поведение вечной мерзлоты в меняющихся условиях, сохраняется неопределенность прогнозов будущего климата, в особенности на региональном уровне. При большом разнообразии климатических сценариев, полученных при помощи моделей общей циркуляции, все они существенно различаются в оценке будущего климата, и в настоящее время нет достаточных оснований отдать предпочтение какому-либо одному из них. В такой ситуации обычно проводят расчеты с использованием нескольких различных сценариев (ансамбля), при этом получается не одна, а ряд равновероятных различающихся оценок будущего состояния вечной мерзлоты. В данном отчете также был использован этот ансамблевый метод.

Во-вторых, меняющиеся неклиматические факторы могут оказывать столь же сильное влияние на вечную мерзлоту, как и климат при том, что в отличие от климата, сколько-нибудь обоснованных сценариев изменения этих факторов, например, растительности, до настоящего времени не создано. Это является серьезной проблемой, которую еще предстоит решить. На данном этапе можно лишь

приблизленно оценить влияние этих факторов, предположив, что по мере развития потепления будет происходить смещение зон растительности, сокращение площади тундры и продвижение к северу границы леса. Каждый из *биомов* оказывает свое уникальное воздействие на вечную мерзлоту, которое можно оценить на основе современных данных и впоследствии учесть в расчетах.

И, наконец, из-за неоднородности почвенных условий, растительности, перемещаемого ветром снежного покрова, топографии, в особенности при наличии южных и северных склонов, параметры вечной мерзлоты обладают значительной изменчивостью даже на относительно небольших, порядка сотен метров, пространственных масштабах, что увеличивает неопределенность прогнозов на локальном уровне. Все указанные обстоятельства необходимо принимать во внимание при интерпретации модельных расчетов.

Расчеты по модели вечной мерзлоты проводились с использованием пяти климатических сценариев CGCM2, CSM-1.4, ECHAM4/OPYC3, GFDL-R30c и HadCM3; все они использовали сценарий эмиссии парниковых газов B2. Эти пять климатических моделей, разработанные в США, Канаде, в Германии и Англии, были признаны лучшими для оценки изменений климата в суб-арктической области, поскольку они с наименьшей погрешностью описывают наблюдавшиеся на протяжении 20 века региональные тренды. Описание климатических сценариев можно найти на веб-страницах МГЭИК (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>; <http://igloo.atmos.uiuc.edu/IPCC/>). Отметим, что в части прогнозируемых изменений вечной мерзлоты, сценарий GFDL является «средним» из всех рассмотренных. Сценарии ECHAM4/OPYC3 и CSM-1.4 предсказывают в среднем по криолитозоне большее увеличение мощности СТС и температуры грунта, а сценарии CGCM2 и HadCM3 – несколько меньшее, чем сценарий GFDL, при этом имеются заметные региональные различия.

Расчеты проводились для криолитозоны всего Северного полушария, полученные оценки площади распространения вечной мерзлоты приведены в таблице 6. На ближайшие 25-30 лет различия между сценариями незначительны, что позволяет сделать некоторые общие выводы. К 2030 году общая площадь приповерхностной вечной мерзлоты может сократиться на 10%-18%, при этом нужно помнить о том, что, оторвавшись от поверхности, многолетнемерзлые породы могут еще долгое время (несколько десятилетий) сохраняться в более глубоких слоях. К середине столетия площадь распространения может сократиться на 15%-30%, при этом в России южная граница вечной мерзлоты сместится к северо-востоку на 150-200 километров. В относительном выражении наиболее сильно сократится зона

сплошного распространения ММП, на 14%-25% к 2030 г. и на 19%-52% к середине 21 века (см. таблицу 6). Оценивая эти результаты, необходимо учитывать, что фактически вечная мерзлота подстилает лишь часть площади, указанной в таблице 6, тем большую, чем выше ее сомкнутость.

Таблица 6. Расчетные значения общей площади вечной мерзлоты и зоны сплошного распространения (сомкнутость более 90%) многолетнемерзлых пород (млн. км² и % от современной) для 2030г. и 2050г. по пяти прогнозам климата.

Прогноз	Общая площадь		Площадь зоны сплошного распространения вечной мерзлоты	
	2030г.	2050г.	2030г.	2050г.
ECHAM-4	22.30	19.31	9.37	7.25
	82%	71%	75%	58%
CSM-1.4	23.72	21.94	9.83	8.19
	87%	81%	79%	66%
GFDL-R30c	24.11	22.38	10.19	8.85
	89%	82%	82%	71%
HadCM3	24.45	23.07	10.47	9.44
	90%	85%	84%	76%
CGCM2	24.24	23.64	10.69	10.06
	89%	87%	86%	81%

На рисунке 17 показаны последовательные изменения положения границ сплошного, прерывистого и островного распространения вечной мерзлоты. Эти результаты наглядно демонстрируют, что общая площадь вечной мерзлоты будет сокращаться главным образом за счет зоны ее сплошного распространения. При том, что зоны прерывистого и островного распространения будут смещаться к северу и северо-востоку, изменение их площади будет не столь заметным.

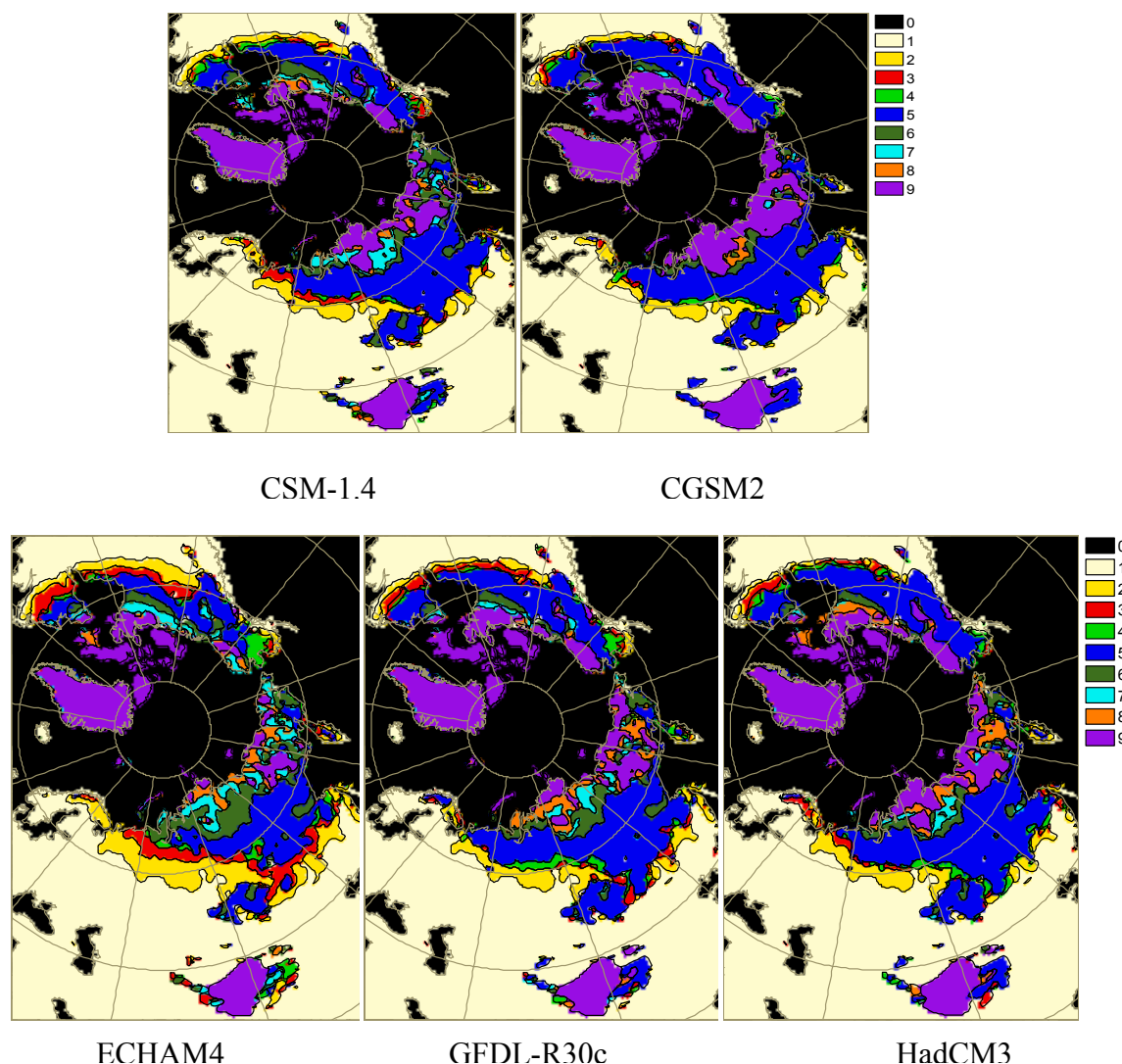


Рис. 17. Прогнозируемые по пяти климатическим сценариям последовательные изменения зон сплошной, прерывистой и островной вечной мерзлоты к 2030, 2050 и 2080 гг. 0 – океан; 1 – территория вне области распространения ММП; 2-4 – зона протаивания ММП островного распространения к 2030, 2050 и 2080 г. 5 – область от современной границы сплошного распространения ММП до прогнозируемой к 2080 г. южной границы криолитозоны. 6-8 – области сплошного распространения ММП, которые перейдут в зону прерывистого распространения к 2030, 2050 и 2080 гг. 9 – область сплошного распространения ММП к 2080 г.

На участках *деградации* в южной периферийной зоне будет происходить таяние островов мерзлоты. Поскольку здесь мерзлые толщи обладают небольшой мощностью (от метров до десятков метров), за время порядка нескольких десятилетий возможно полное оттаивание большинства островов мерзлоты. В наиболее холодной северной зоне, где вечная мерзлота подстилает более 90% поверхности, будет главным образом увеличиваться мощность СТС. Здесь также могут возникать и развиваться крупные *талики*, главным образом под водными объектами, с отрывом кровли мерзлоты от поверхности и сохранением ее в более глубоких слоях. Промежуточная зона будет характеризоваться прерывистым распространением мерзлых пород, сомкнутость которых будет уменьшаться в процессе потепления, а мощность СТС расти.

Интерпретируя эти результаты, следует иметь в виду условность границ, однозначно определить положение которых практически невозможно. Разделение на зоны обычно проводится на основе расчетного «почвенно-мерзлотного» индекса, который представляет собой отношение сумм отрицательных температур на поверхности почвы к суммарному годовому теплообороту за холодный и теплый периоды. Эмпирическим путем посредством сравнения значений этого индекса с имеющимися геокриологическими картами различного географического масштаба было установлено, что изолинии со значениями 0.50, 0.60 и 0.67 приблизительно соответствуют южным границам островной, прерывистой и сплошной криолитозоны. При всей условности такого определения границ, в настоящее время это единственный способ дать прогноз их местоположения в условиях изменения климата. По этой причине карты, полученные расчетным путем, могут указывать на наличие островной вечной мерзлоты в ряде периферийных районов, где она фактически отсутствует. Это свидетельствует лишь о том, что по климатическим показателям там имеются условия для ее существования, но локальные факторы, не учитываемые в модельном расчете, препятствуют этому. С учетом сказанного, получаемые по модельным расчетам карты более уместно называть картами «климатообусловленного» распространения вечной мерзлоты, которое может несколько отличаться от реального. Очевидно, что такие карты циркумполярного масштаба нельзя непосредственно использовать для каких-либо инженерных расчетов, их основное назначение состоит в том, чтобы дать представление о цельной пространственной картине происходящих изменений. Более детальные оценки регионального уровня требуют привлечения дополнительной информации, а для инженерных расчетов требуются также и сведения об используемых технологиях и материалах, например, о материале и глубине отсыпки грунта при возведении строительства.

Повсеместно прогнозируется увеличение глубины сезонного оттаивания (см. рис. 18-20). Наибольшие относительные изменения ожидаются вблизи арктического

побережья, хотя если измерять их в абсолютном приращении, они могут быть невелики, порядка первых десятков сантиметров к концу столетия, в то время как в области прерывистого распространения мерзлоты увеличение СТС может составить метр и более.

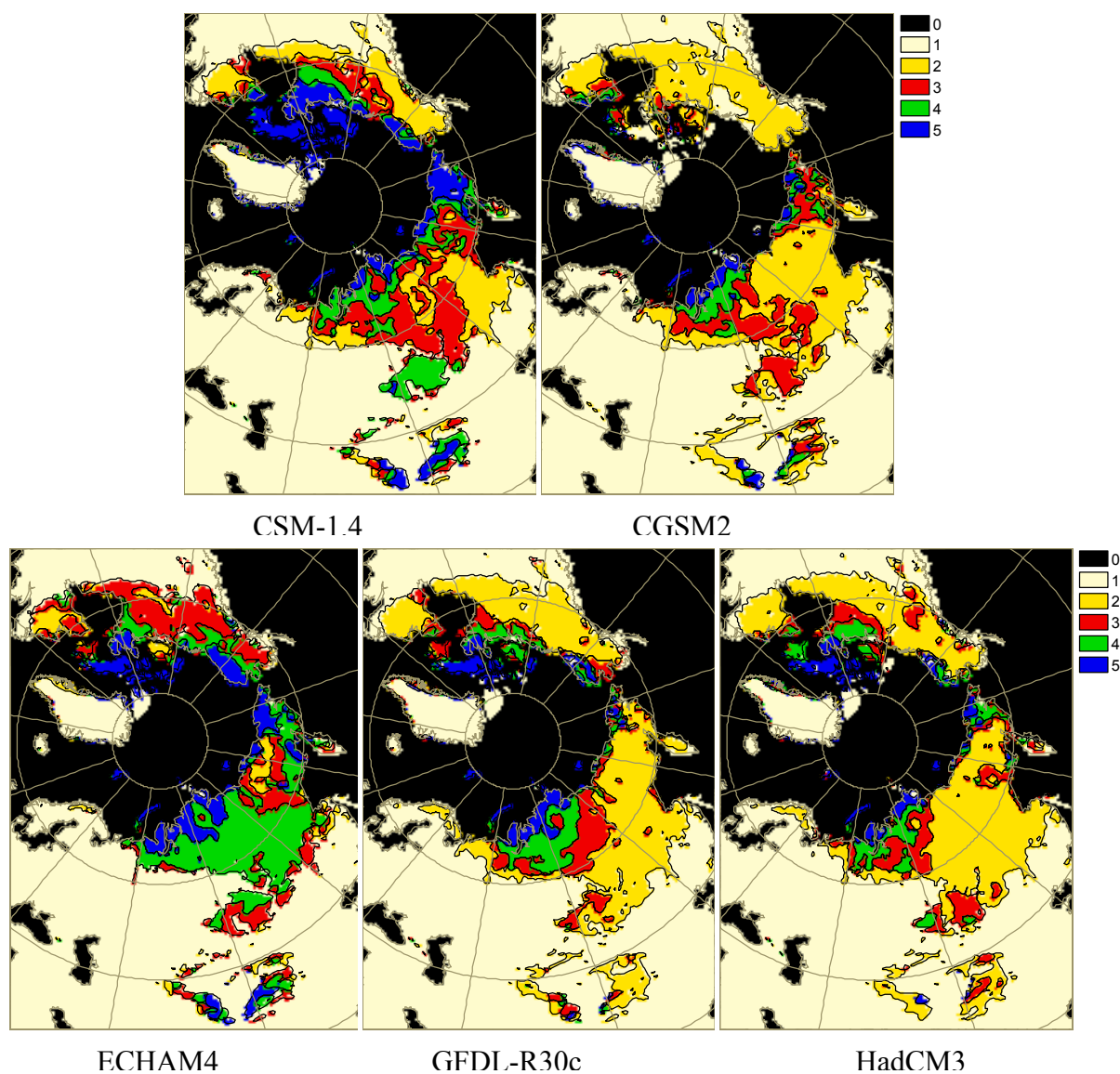


Рис. 18. Прогнозируемое по пяти климатическим сценариям увеличение мощности СТС к 2030 г., в процентах от современной. 0 – океан; 1 – территория вне области распространения ММП; 2 – увеличение СТС менее 20%; 3 – увеличение на 20%-30%; 4 – увеличение на 30%-50%; 5 – увеличение более чем на 50%.

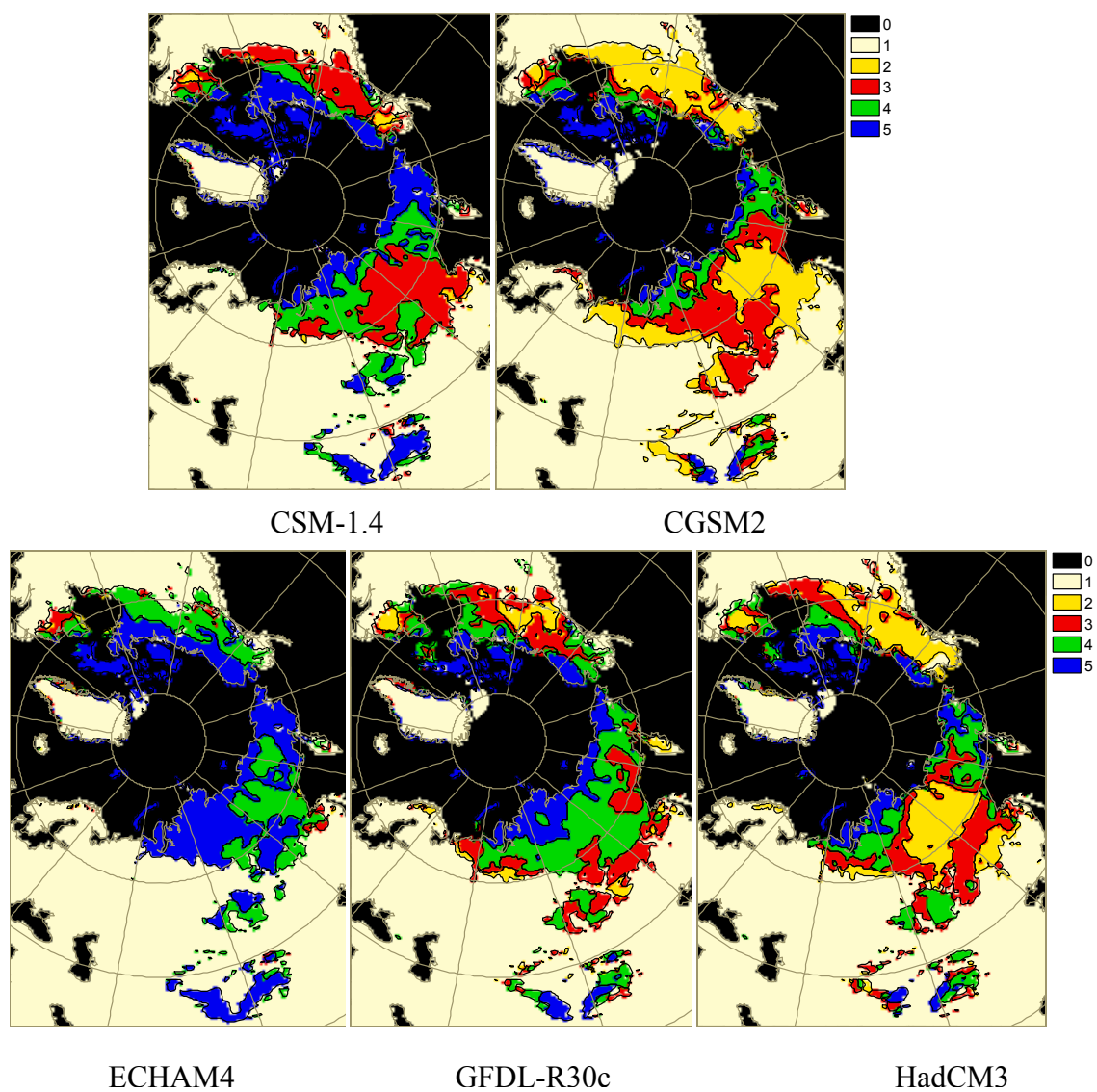


Рис. 19. Прогнозируемое по пяти климатическим сценариям увеличение мощности СТС к 2050 г., в процентах от современной. 0 – океан; 1 – территория вне области распространения ММП; 2 – увеличение СТС менее 20%; 3 – увеличение на 20%-30%; 4 – увеличение на 30%-50%; 5 – увеличение более чем на 50%.

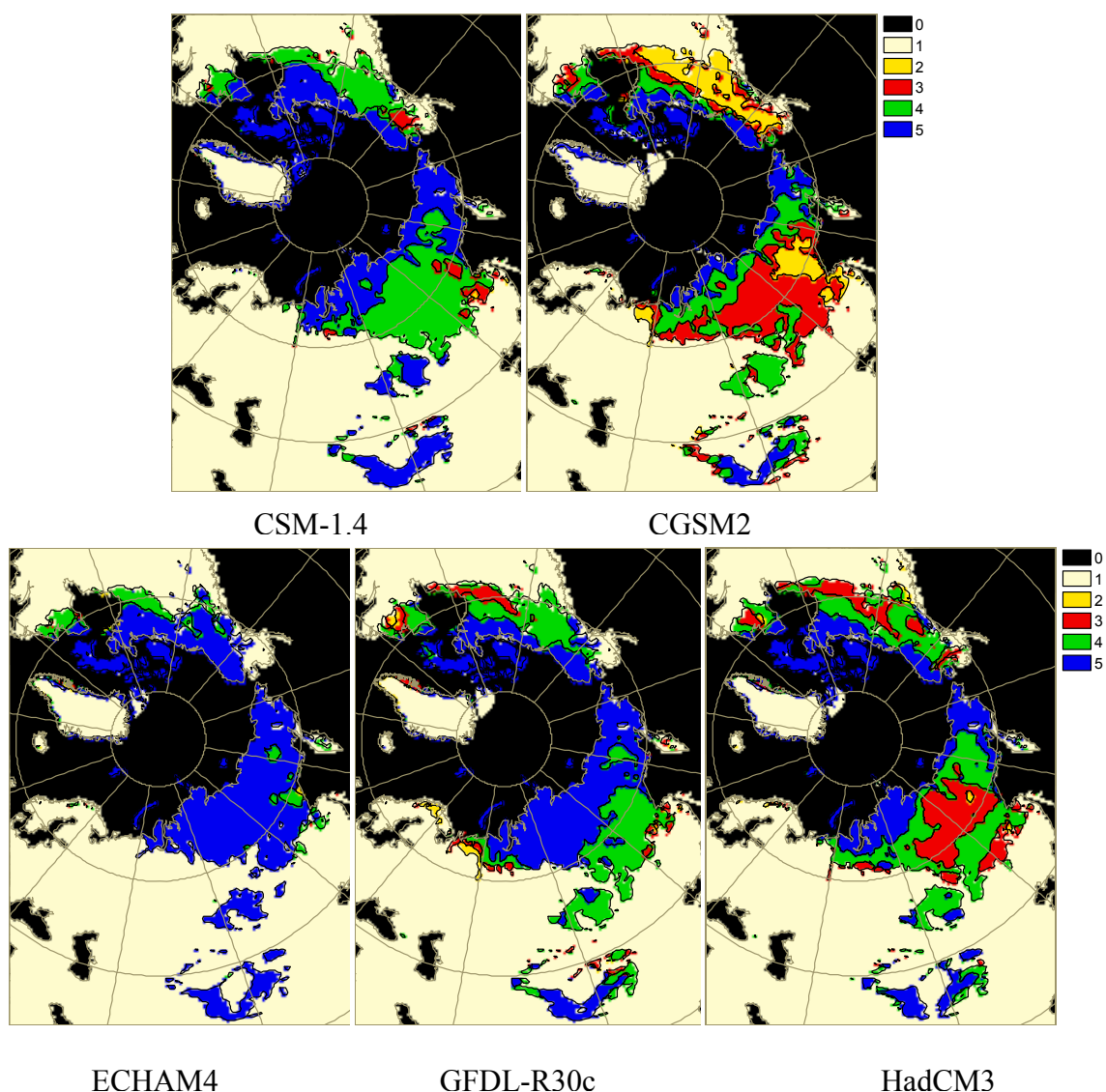


Рис. 20. Прогнозируемое по пяти климатическим сценариям увеличение мощности СТС к 2080 г., в процентах от современной. 0 – океан; 1 – территория вне области распространения ММП; 2 – увеличение СТС менее 20%; 3 – увеличение на 20%-30%; 4 – увеличение на 30%-50%; 5 – увеличение более чем на 50%.

Подводя итог полученным результатам, можно отметить, что они значительно различаются в пространственных деталях в зависимости от выбора климатического сценария, при том, что все они указывают на предстоящее сокращение площади вечной мерзлоты и увеличение мощности СТС.

Основные последствия таяния вечной мерзлоты в России

Существуют две основные проблемы, связанные с таянием вечной мерзлоты. Одна из них уже упоминалась, это воздействие на инфраструктуру, в результате которого значительная ее часть может оказаться под угрозой. Но есть и вторая проблема, которая часто упоминалась как в научных дискуссиях, так и в средствах массовой информации. Это возможное усиление парникового эффекта за счет увеличения эмиссии парниковых газов, особенно метана, при таянии вечной мерзлоты. Некоторые авторитетные издания, такие как ВВС, писали даже о «метановой бомбе» в многолетнемерзлых болотах Западной Сибири, которая может сделать глобальный климат еще теплее. Можно ли спрогнозировать такие последствия *деградации вечной мерзлоты*, какие для этого используются методы, и каковы полученные результаты,- об этом пойдет речь в последующих разделах.

Прогноз геокриологических опасностей и рисков для инфраструктуры.

Оценки геокриологических опасностей для инфраструктуры должны учитывать изменения основных параметров вечной мерзлоты в условиях будущего климата, в частности то, насколько они будут отличаться от условий, заложенных в расчете конструкций. Для выявления областей, наиболее подверженных геокриологическим опасностям в связи с предстоящим изменением климата был разработан достаточно простой метод, основанный на применении расчетного индекса:

$$I_r = \Delta Z \times W \times S$$

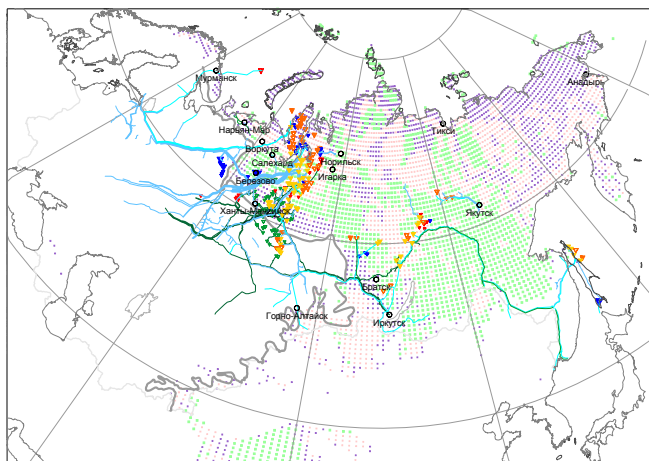
Здесь I_r - индекс геокриологической опасности, ΔZ – относительное изменение глубины сезонного протаивания вечной мерзлоты, рассчитанное для заданного прогноза климата и выраженное в долях от современной нормы; W – процентное содержание льда в мерзлом грунте, S – коэффициент, учитывающий засоленность грунтов. Вероятность развития деструктивных геокриологических процессов

приобретает наибольшую величину в случае, когда мерзлый грунт содержит большое количество льда и солей, и предстоящее изменение климата вызовет значительное увеличение глубины сезонного протаивания. В таких районах возможны осадки оттаивающего грунта за счет интенсивного термокаста. Изменение температуры грунта, которое является главным фактором, влияющим на его несущую способность, неявно учитывается при расчете изменения глубины оттаивания.

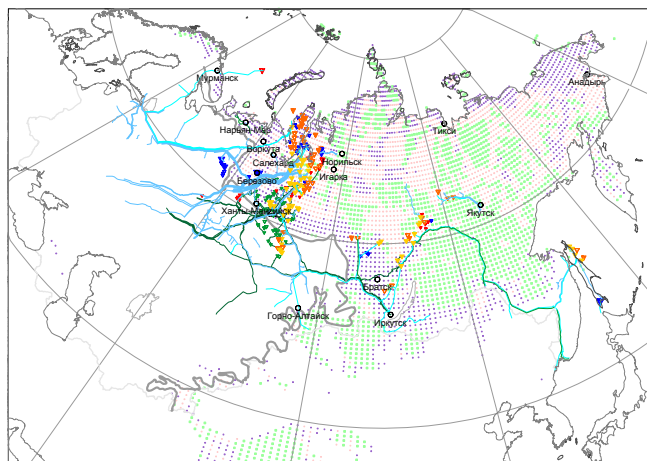
Модельные прогнозы состояния вечной мерзлоты позволяют рассчитать значения индекса геокриологической опасности для различных климатических сценариев и построить соответствующие карты. Такие карты, рассчитанная по пяти различным сценариям для середины 21 века CGCM2, CSM-1.4, ECHAM4/OPYC3, GFDL-R30c и HadCM3, показаны на рисунке 21.

Весь диапазон расчетных значений индекса был разбит на три категории, к которым отнесены области с малой (зеленая точечная заливка), средней (светло желтая) и большой (сиреневая) вероятностью развития деструктивных геоморфологических процессов, связанных с деградацией вечной мерзлоты. Несмотря на видимые различия, определяемые особенностями климатических сценариев, имеются и некоторые общие черты пространственного распределения индекса. Так, на всех картах можно выделить несколько характерных областей.

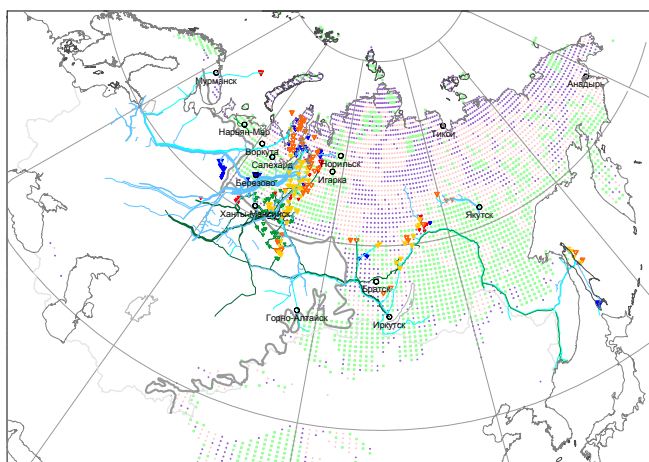
На трех из пяти карт можно выделить юго-западную область с наибольшими значениями индекса. Она занимает значительную часть островной вечной мерзлоты, простираясь полосой вдоль границы криолитозоны от севера ЕТР через Тюменскую область к Байкалу. В этих районах высокая опасность для инфраструктуры обусловлена интенсивным таянием островов вечной мерзлоты, большинство которых исчезнет к середине столетия. Между тем на юге Сибири и Якутии все сценарии, за исключением одного (ECHAM4) дают низкое значение индекса опасности.



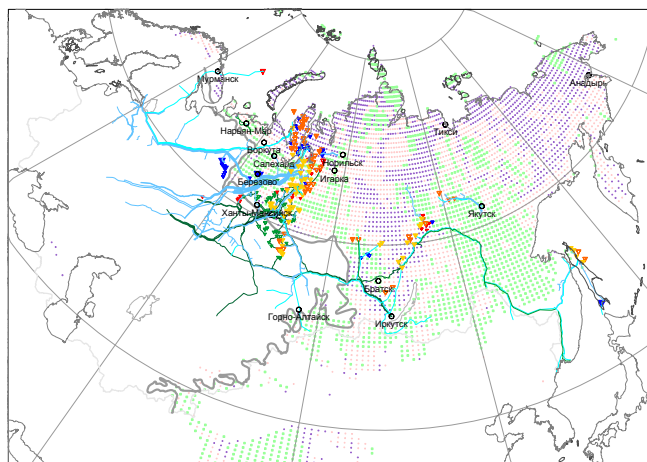
CGCM2



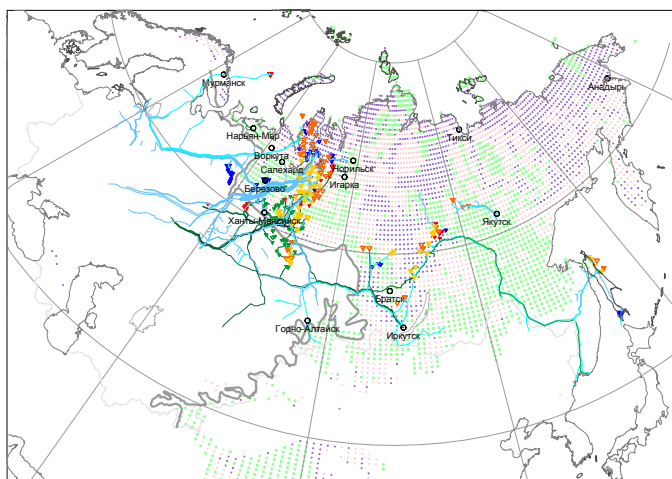
ECHAM4/OPYC3



GFDL-R30c



HadCM3



CSM-1.4

Рис. 21. Индекс геокриологической опасности для криолитозоны России, рассчитанный для середины 21 века по пяти климатическим сценариям.

Северная область высокого геокриологического риска охватывает большую часть арктического побережья от Карского моря на западе до Чукотского моря на востоке, при этом три сценария указывают на то, что она проникает далеко вглубь континента в виде больших островов в центральной Сибири и в Якутии. В этой области вечная мерзлота в основном сохранится, и опасность связана главным образом с тем, что мощность СТС и температура мерзлых грунтов значительно возрастут и превысят допустимые пределы, заложенные в расчете конструкций, которые проектировались и были построены в прошедшие несколько десятилетий без учета климатических изменений. Прогнозируемое ослабление прочностных свойств вечной мерзлоты в этой области не является серьезным препятствием для строительства на ранее неосвоенных территориях, поскольку его можно учесть на этапе проектирования. Несколько иная ситуация будет складываться на Ямале и на самом севере ЕТР из-за повсеместного распространения *криопэгов*. Здесь в процессе потепления будут спонтанно возникать очаги протаивания, приводя к просадкам грунтов, термокарсту и термоэрозии.

Все сценарии указывают на высокое значение индекса геокриологический опасности в восточной части криолитозоны (Чукотка, север Дальнего Востока).

В центральной части криолитозоны расчеты по сценариям заметно различаются, при том, что все они предсказывают достаточно пеструю картину, в которой встречаются все три градации индекса.

Какова достоверность такого рода прогнозов, и можно ли использовать карты на рисунке 18 в практических целях для планирования строительства и землепользования на конкретных территориях, природоохранных мероприятий? С учетом значительных неопределенностей прогнозов климата это было бы неоправданно. Более информативную оценку можно получить, используя ансамблевый подход, при котором соответствующим образом обрабатываются результаты расчетов по нескольким климатическим сценариям. Можно построить как «среднюю» по всем сценариям карту геокриологических рисков, арифметически осреднив в каждой точке результаты, полученные по всем пяти сценариям, так и «экстремальные» карты, выбрав в каждой точке наибольшее и наименьшее значения индекса из пяти полученных. Важно понимать, что построенная таким образом

«средняя» по пяти сценариям карта и карта, построенная по единственному «среднему» климатическому сценарию GFDL – не одно и то же. Для корректной оценки необходимо использовать все пять сценариев, и только лишь потом проводить осреднение.

Геокриологические прогнозы позволяют заранее оценить риск возникновения аварийных ситуаций и выработать наиболее эффективные и экономичные проектные решения для минимизации возможных негативных и катастрофических последствий. Изменения механических свойств грунта происходят в течение длительного времени и могут быть предсказаны. В инженерной геокриологии разработано большое число методов стабилизации фундаментов и оснований на вечномёрзлых грунтах. Такие методы могут быть предложены как часть общей стратегии адаптации экономики России и, в частности, топливно-энергетического комплекса, к предстоящим изменениям климата в северных регионах. Представленные оценки геокриологического риска в значительной степени условны и не могут быть использованы для принятия конкретных решений применительно к отдельным объектам и конструкциям. Для решения задач такого уровня необходимо привлечение более детальной информации о природных условиях исследуемого района и особенностях размещения того или иного объекта инфраструктуры. При этом необходимо проведение специальных полевых, лабораторных и теоретических исследований.

Возможности адаптации к прогнозируемым изменениям вечной мерзлоты: практические рекомендации для лиц, принимающих решения

При наличии прогнозов изменения вечной мерзлоты и карт, указывающих наиболее уязвимые ее области, можно предложить комплекс мер по адаптации к будущим условиям. В России такие стратегии еще предстоит выработать как на Федеральном, так и на региональном уровнях, но уже сейчас можно сформулировать некоторые общие принципы адаптации и предложить конкретные меры для инфраструктуры и населения.

Рассмотренные в предыдущих разделах примеры воздействия изменений вечной мерзлоты на инфраструктуру можно разделить на группы, для каждой из которых сформулировать меры по адаптации. Такое разделение можно провести на

основе мерзотно-климатических признаков, выделив северную область криолитозоны, характеризующую наиболее суровым холодным климатом и высокой пространственной сомкнутостью вечной мерзлоты; центральную область с прерывистым и островным распространением вечной мерзлоты и с выраженным континентальным климатом, южную переферийную область, где встречаются отдельные острова вечной мерзлоты, а также отдельно побережье арктических морей. В каждой из этих зон можно предложить несколько различные адаптационные меры для точечных объектов, таких как отдельные строения, и линейных сооружений, имеющих значительную протяженность. Степень подверженности объектов деструктивному воздействию в пределах каждой зоны можно оценить, используя карты геокриологических рисков, показанные на рисунке 21.

Принципиальным отличием линейных сооружений, например, железных дорог, или даже протяженных зданий, является то, что для их нормальной эксплуатации необходимо, чтобы неизбежное воздействие криогенных процессов, таких как термокарстовые просадки при сезонном оттаивании или пучение грунта при промерзании, было достаточно равномерным на единицу длины сооружения. При этом условии даже высокие интенсивности этих процессов не столь опасны. В противном случае могут возникнуть значительные деформации, см. рис. 22.

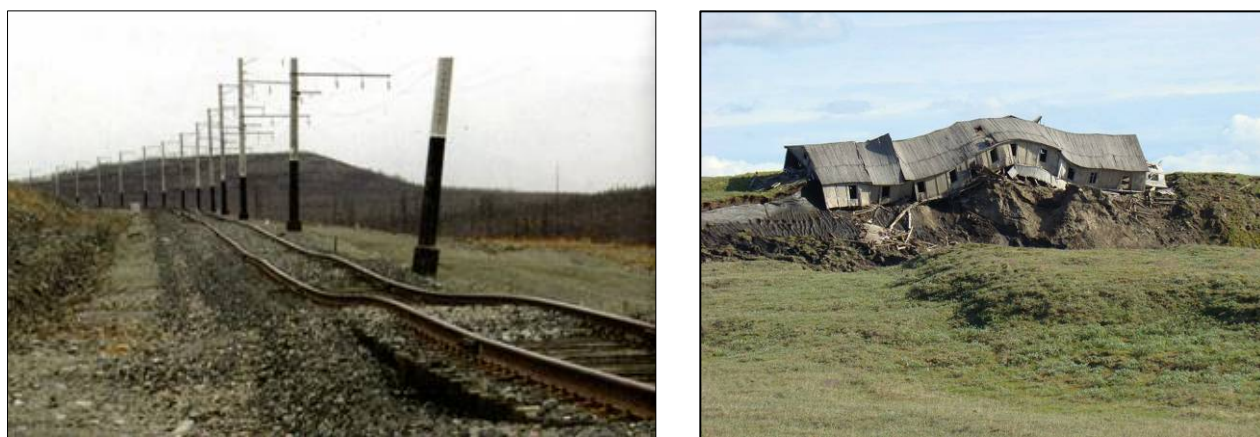


Рис. 22. Слева - участок Байкало-Амурской железнодорожной магистрали, подверженный деформации из-за неравномерной просадки и пучения грунта. Справа - Деформация здания заброшенной воинской части в низовье Енисея за счет неравномерного вытаивания подземного льда. Фото Д.С. Дроздова.



Рис. 23. Примеры строительства линейных сооружений в условиях высокогорной вечной мерзлоты на Тибетском плато (Китай), адаптированных к изменению климата. Слева – термостабилизация насыпи железнодорожного полотна и автомобильной дороги при помощи охлаждающих термосифонов. Справа сверху – установка охлаждающих вентиляционных каналов в дорожной насыпи. Справа внизу – автомобильная дорога, построенная на неустойчивом грунте по принципу эстакады с заглубленными опорами. Фото Н.И. Шикломанова.

Основной способ адаптации линейных сооружений к прогнозируемым изменениям – термостабилизация вечной мерзлоты с применением различных технических средств и инженерных решений (см. рис. 23, 24). К таковым можно отнести установку парожидкостных термосифонов. Это достаточно простое устройство работает по принципу теплового насоса, «закачивая холод» из атмосферного воздуха в верхний слой вечной мерзлоты и понижая ее температуру в холодный период года. Оно не потребляет энергии и представляет собой замкнутую с обоих концов трубу, внутри которой находится хладагент, часто сжиженная углекислота. Нижний конец трубы погружен в вечную мерзлоту, на верхнем конце

обычно имеется радиатор для улучшения теплообмена с воздухом. В холодный период года вечная мерзлота имеет достаточно высокую температуру (как правило, несколько градусов ниже 0) для того, чтобы хладагент, находящийся на дне трубы, испарился. За счет затрат тепла на испарение происходит понижение температуры. Температура воздуха при этом может быть значительно, на несколько десятков градусов, ниже температуры мерзлоты. Пары, поднимаясь вверх, быстро охлаждаются и конденсируются вблизи радиатора, при этом тепло конденсации развеивается в атмосферу, сконденсировавшаяся жидкость стекает вниз трубы и цикл повторяется. Это позволяет понизить среднегодовую температуры на 1 – 5 °С без каких-либо затрат энергии. При невысокой стоимости термосифона и отсутствии энергозатрат при его эксплуатации такой способ термостабилизации вечной мерзлоты весьма эффективен также и с экономической точки зрения. Термосифоны широко использовались в России еще в 1960е годы, и находят применение и сейчас.

Еще более простой способ термостабилизации – устройство вентиляционных каналов в насыпях линейных сооружений, как показано на рисунке 23. Это обеспечивает не столь эффективное, как при установке термосифона, но все же заметное охлаждение приповерхностного слоя насыпи, а также создает прослойку, изолирующую нижележащие слои от хорошо прогреваемой летом на солнце поверхности. Аналогом для точечных сооружений является обустройство вентилируемых подвалов и подполий, которые также широко применяются при городской застройке.



Рис. 24. Слева - устройство опор транс-Аляскинского трубопровода в применении термосифонов. Фото Н.И. Шикломанова. Справа – деформация опоры трубопровода в Западной Сибири. Фото из (Гарагуля, Ершов, 2000)

Основным способом адаптации точечных объектов является усиление фундамента посредством установки дополнительных свай, термостабилизация с применением термосифонов и вентиляции.

При разработке мер по адаптации инфраструктуры необходимо принимать во внимание следующие региональные особенности. В северной области изменения вечной мерзлоты будут проявляться прежде всего в увеличении ее температуры и глубины сезонного оттаивания. Наибольшую опасность здесь представляет возможное повреждение фундаментов домов и сооружений на вечной мерзлоте за счет уменьшения ее несущей способности. Лицам, принимающим решения и руководителям таких регионов необходимо акцентировать внимание на организации мониторинга состояния фундаментов зданий с целью своевременного обнаружения их деформаций и принятия мер по стабилизации фундаментов за счет установки дополнительных свай или термосифонов, а в случаях, если это невозможно, по прекращению эксплуатации домов.

В южной области наибольшие проблемы связаны с тем, что здесь участки, занятые вечной мерзлотой, соседствуют с теми, где она отсутствует. Под воздействием изменения климата границы между этими участками находятся в постоянном движении, что приводит к неравномерным просадкам грунта, часто сопряженным с выносом протаивающего материала и образованием термокарстовых просадочных воронок. Наибольшую опасность это представляет для линейных сооружений (дорог, взлетно-посадочных полос, трубопроводов), пересекающих участки с интенсивным развитием термокарста. Руководителям таких регионов необходимо организовать мониторинг состояния грунтов вдоль линейных сооружений, при этом особое внимание уделять участкам перехода от островов многолетнемерзлых грунтов к сезонно-промерзающим грунтам, вблизи границы которых возможны наиболее сильные нарушения рельефа. При необходимости применять инженерные меры, препятствующие термокарстовому размыву грунтов в насыпях.

Центральная область занимает промежуточное положение, и в ней все перечисленные процессы могут иметь место, протекая с меньшей интенсивностью. Спецификой побережья Арктических морей является ослабление деструктивных процессов по мере удаления от береговой линии, с одной стороны, и постепенное продвижение ее вглубь суши со скоростью от 1-2 до 25 метров в год, с другой. Из-за физической потери территории и отступления береговой линии адаптация существующей инфраструктуры не всегда возможна. Часто единственным решением является перенос объектов на значительное удаление от берега. Такого рода адаптация на примере целого поселка на Аляске рассмотрена далее в отчете.

До сих пор речь шла лишь об адаптации инфраструктуры к прогнозируемым изменениям вечной мерзлоты. Между тем, не менее важно разработать меры по

адаптации населения к таким изменениям. В настоящее время отсутствуют не только научно обоснованные рекомендации по адаптации населения, но и программы, направленные на их создание на государственном уровне. Не претендуя на решение этой задачи в рамках данного отчета, отметим лишь два аспекта этой проблемы. Первый аспект - поведенческий, связанный с изменением видов, способов и приемов труда и отдыха, землепользования и т.п. Особую актуальность он имеет для коренных народов Севера, в жизни которых значительную роль играют традиционные виды деятельности, такие как оленеводство, охота, рыболовство, собирательство грибов и ягод. Опыт и мастерство в этой деятельности, издавна передававшиеся от поколения к поколению, могут придти в противоречие с меняющимися условиями внешней среды, в том числе и из-за изменений вечной мерзлоты, хотя более правильно было бы рассматривать ее в комплексе с другими меняющимися факторами окружающей среды. Очевидна необходимость приведения их в соответствие, и это, с учетом давних традиций, является весьма непростой задачей. Под эгидой Фонда Дикой Природы (WWF) проводится большая разъяснительная работа о необходимости такой адаптации, с одной стороны, а с другой – собирается информация от населения о том, какие именно изменения, связанные с климатом и вечной мерзлотой они отмечают уже сейчас и как эти изменения влияют на повседневную жизнь и традиционную деятельность. На основе таких данных в дальнейшем можно будет выработать какие-то рекомендации по адаптации к происходящим изменениям.

Второй аспект адаптации населения – медицинский. Он связан с прогнозируемым ухудшением санитарно-эпидемиологической обстановки, прежде с повышенным риском проникновения токсичных веществ и патогенных микробов при оттаивании различного рода хранилищ отходов в питьевую воду, но также и с продвижением на север ареала обитания различных животных и паразитов, и переносимых ими болезней. Меры по адаптации в данном случае достаточно понятны и состоят в усилении контроля за качеством потребляемой воды и продуктов питания, в первую очередь рыбы и мяса, получаемых из локальных источников, поскольку они являются участниками трофической цепи.

Оценка возможного влияния эмиссии метана при деградации вечной мерзлоты на территории России на глобальный климат

До сих пор в отчете речь шла о влиянии изменения климата на вечную мерзлоту. Между тем, сама вечная мерзлота может воздействовать на глобальный

климат через изменения углеродного цикла. В этом разделе кратко описывается механизм такого взаимодействия и оценивается степень его влияния.

На протяжении многих тысяч лет тундра накапливала в почвенном слое органическое вещество, выступая в качестве стока углерода из атмосферы. Механизм этого достаточно ясен и состоит в следующем. Растительный покров, даже столь небогатый, как в тундре, в процессе фотосинтеза поглощает из атмосферы углекислый газ, формируется биомасса и гумус. Гумус представляет собой отмершие растения, накапливаясь в верхнем слое почвы, он формирует ее органический слой. Ниже находится минеральный грунт, чаще всего песчаный, супесчаный или же суглинистый, который содержит мало органики. Из-за низкой продуктивности тундровой растительности процесс накопления очень медленный, в результате чего на большей части криолитозоны толщина верхнего органического слоя невелика, порядка 10-15 см. Иная ситуация складывается в болотах, которые продуцируют (или продуцировали ранее в более теплые эпохи) большое количество органики.

В криолитозоне России находится большое количество мерзлых болот, особенно широко они распространены в Западной Сибири. Органическое вещество, накопленное в болотах (торф), при положительных температурах разлагается, выделяя углерод в виде углекислого газа или метана, причем метан по своим радиационным свойствам в 21 раз активнее CO_2 . Если бы весь углерод из болотных почв, поступающий в атмосферу, высвобождался в форме CO_2 , этот процесс лишь компенсировал бы уменьшение парникового эффекта за счет стока в предшествующий период, когда происходило накопление торфяной залежи в болоте и через фотосинтез углекислый газ забирался из атмосферы. В длительной перспективе такой процесс не оказывал бы существенного влияния на тепловой баланс Земли. Если же хотя бы часть накопленного углерода выделится из болота в виде метана, произойдет усиление парникового эффекта. При этом каждый атом углерода, попадая в атмосферу в форме метана, будет в 21 раз эффективнее "работать" на потепление, чем до того, как он попал в торфяную залежь. Метан выделяется в том случае, когда при разложении отсутствует доступ кислорода, а именно такие условия имеются ниже уровня болотных вод. Потепление климата повлечет за собой увеличение глубины сезонного таяния мерзлых болот криолитозоны, при этом увеличивается

объем талого торфа, находящегося в анаэробных условиях, в результате чего может увеличиться эмиссия метана.

Неоднократно высказывались опасения относительно того, что таяние вечной мерзлоты за счет указанного выше и ряда подобных механизмов может привести к значительному увеличению эмиссии метана, что усилит парниковый эффект и вызовет дополнительное увеличение глобальной температуры. Несмотря на кажущуюся очевидность данного тезиса, до недавнего времени количественные оценки того, насколько сильным является этот механизм, отсутствовали.

Недавние исследования, проведенные в России в Государственном гидрологическом институте, показали, что опасения не имеют достаточных оснований (Анисимов и др., 2005; Anisimov, 2007; Anisimov, Reneva, 2006). Этот вывод был сделан на основе результатов расчетов, в которых было учтено точное местоположения болот криолитозоны России и оценена их площадь. Согласно оценкам, основанным на оцифровке контуров болот на картах миллионного масштаба, в криолитозоне России их общая площадь составляет около 0.7 млн. км². По модельным расчетам, проведенным с использованием нескольких климатических сценариев, прогнозируемое увеличение толщины сезонно-талого слоя торфа к середине 21 столетия в южной периферийной области составит 15%-20%, в центральной части криолитозоны России до 40%, а на арктическом побережье более чем 50%. Увеличение объема доступного (талого) органического вещества и более высокая температура грунта будут способствовать усилению эмиссии парниковых газов. Полученные при помощи модели углеродного газообмена результаты указывают на то, что к середине 21 века вблизи арктического побережья эмиссия метана может вырасти более чем на 50%, а на большей части прерывистой криолитозоны на 30% - 50%. На востоке и юго-востоке криолитозоны, где сосредоточена большая часть многолетнемерзлых болот России увеличение составит не более чем 20%. Суммарно эмиссия метана из многолетнемерзлых болот России может увеличиться на 8-10 млн. тонн в год. При среднем времени жизни в атмосфере 12 лет это увеличит равновесное содержание приблизительно на 100 млн. тонн, или на 0.04 ppm. Чувствительность же глобальной температуры к концентрации атмосферного метана достаточно хорошо известна и составляет около 0.3 °C/ppm,

таким образом ее прогнозируемое изменение за счет таяния многолетнемерзлых болот на территории России к середине 21 века будет незначительным, порядка 0.012 °C. Даже если принять во внимание возможную неточность этой оценки, связанную с использованием упрощенной модели, и увеличить ее в несколько раз, полученный вывод о незначительном влиянии таяния вечной мерзлоты на глобальный климата останется в силе.

Экономическая составляющая прогнозируемых изменений вечной мерзлоты

Данные предшествующих разделов отчета указывают на то, что прогнозируемые изменения вечной мерзлоты представляют серьезную опасность для экономики России, прежде всего из-за повышающегося риска повреждения инфраструктуры Крайнего Севера. При общем понимании этой проблемы вопрос об оценке связанного с ней потенциального экономического ущерба остается открытым, т.е. такие оценки в настоящее время отсутствуют. Причин этого несколько, основными из них являются следующие.

1. Наиболее значительные изменения климата и вечной мерзлоты в большинстве регионов Крайнего Севера происходили в конце 1980х и в 1990х годах. Они совпали с периодом глубочайшего и продолжительного кризиса в России, который сопровождался распадом экономики, хозяйственной системы, смены форм собственности многих крупных предприятий и переходом значительной части из них от государственного в частное управление. Подавляющее большинство новых собственников, к которым перешла в том числе и обширная инфраструктура, были заинтересованы лишь в быстром получении прибыли любым путем, часто посредством спекулятивных перепродаж предприятий и объектов, и вопрос о разработке долгосрочных стратегий адаптации инфраструктуры к изменениям климата в реалиях того времени был неуместен. Многие из существующих сейчас проблем с объектами инфраструктуры Крайнего Севера России являются наследием той эпохи и варварской хозяйственной деятельности, на фоне которой влияние изменения климата и вечной мерзлоты играют малую роль, создавая иллюзию, что они несущественны.

2. Российские мерзлотоведы, в том числе и специалисты по инженерной геокриологии, за редким исключением не рассматривают климат в качестве фактора, способного вызвать масштабные изменения вечной мерзлоты, существенно превышающие пределы ее естественной изменчивости. Поскольку именно через них происходит взаимодействие науки с хозяйствующими субъектами в районах Крайнего Севера, изменению климата уделяется второстепенное внимание при планировании и осуществлении строительства и эксплуатации сооружений. В инженерных расчетах используется традиционная концепция, за основу принимаются современные *нормы климатических характеристик*, на которые накладывается климатическая изменчивость за предшествующий период порядка ста лет. По этим данным рассчитывается вероятность того, что климатические характеристики будут находиться в заданных пределах. Иными словами, эта концепция предполагает, что в последующий период до конца 21 века климат будет тем же, что и в предшествующее столетие, при этом учитывается лишь составляющая, связанная с естественной изменчивостью и игнорируются тренды, обусловленные глобальным потеплением, в результате которых меняются *нормы климатических характеристик*. Очевидно, что при таком подходе понятие климатообусловленного ущерба не определено.
3. Все существующие нормативные документы, регламентирующие строительство и эксплуатацию зданий и сооружений в районах распространения вечной мерзлоты (Строительные Нормы и Правила, СНИП), не учитывают изменения климата. В результате на сегодняшний день в России отсутствует нормативно-правовая база, на основе которой можно было бы развить методики оценки экономического ущерба, связанного с необходимостью учета прогнозируемых изменений вечной мерзлоты при возведении новых сооружений и эксплуатации существующих. Значительно упрощая реальную ситуацию, можно сказать, что при наличии таких обновленных документов получить грубую оценку экономического ущерба (или же в ряде случаев выгоды), обусловленного влиянием таяния вечной мерзлоты на конкретное сооружение, можно было бы простым сравнением его расчетной стоимости (с учетом как строительных, так и эксплуатационных расходов), проведенной по «старым» и «новым» СНИП.

4. Были развиты методики оценки экономического ущерба или выгоды от изменений климата для тех отраслей, где эффект можно выделить среди иных действующих факторов и он достаточно велик по сравнению с ними. Например, существуют оценки влияния ожидаемых изменений климата на продуктивность сельскохозяйственного производства, и при известных рыночных ценах на зерно, можно рассчитать увеличение прибыли в денежных единицах для заданного климатического сценария. Еще один пример - сокращение продолжительности отопительного периода и дефицита тепла в зимний период для того или иного климатического сценария. Рассчитав его, можно сказать, как это уменьшит расходы на отопление. Во всех этих примерах речь идет о процессах, интенсивность и отдача от которых напрямую зависит от изменения климата, в простейших случаях лишь от температуры воздуха. В случае же с таянием вечной мерзлоты ситуация принципиально иная, поскольку непрерывная зависимость в цепочке климат – вечная мерзлота – инфраструктура отсутствует. Здесь действуют пороговые механизмы, которые часто маскируют происходящие процессы. Повышение температуры не оказывает заметного эффекта до тех пор, пока оно не достигнет критического уровня, по превышении которого происходят качественные изменения, такие как таяние вечной мерзлоты, вызывающее массовые разрушения инфраструктуры.

По отмеченным причинам в России в настоящее время отсутствуют количественные оценки возможного экономического ущерба, связанного с таянием вечной мерзлоты. Еще более осложняет ситуацию то, что отсутствуют экономические методики, на основе которых такие оценки можно получить. Ряд методических принципов можно сформулировать, используя опыт немногочисленных зарубежных исследований и учитывая климатические сценарии, прогнозы состояния вечной мерзлоты и геокриологических рисков.

Прежде всего, данные наблюдений и результаты моделирования указывают на то, что с экономической точки зрения наиболее серьезной и насущной проблемой, связанной с таянием вечной мерзлоты, является опасность разрушения инфраструктуры. При этом иные аспекты, упоминавшиеся в отчете, такие как

геополитический (потеря прибрежной территории, малых арктических островов), социальный (влияние на традиционный жизненный уклад и виды деятельности), природный (изменения флоры и фауны) и климатический (возможность воздействия на глобальный климат через эмиссию парниковых газов) также важны, но их экономическая составляющая относительно невелика. Отметим, что важным экологическим аспектом проблемы, имеющим экономическую составляющую, является проблема нераспространения токсичных, радиоактивных и биологически активных веществ из специализированных хранилищ при таянии вечной мерзлоты. Однако поскольку сами хранилища являются, как правило, инфраструктурными объектами, эта проблема входит в уже обозначенную группу.

Схему анализа иллюстрирует рисунок 25. Элементы, заключенные в закругленные фигуры, содержат неопределенности. К таковым относятся:

- сценарии эмиссии парниковых газов, поскольку они во многом зависят от будущего мировой экономики и политики в отношении ограничения антропогенного воздействия на климат;
- сценарии изменения климата, большие неопределенности связаны с ограниченной точностью используемых для их построения климатических моделей;
- ранжирование криолитозоны по степени уязвимости при таянии вечной мерзлоты, поскольку нет единого критерия для оценки такого рода рисков;
- проектируемая (еще не построенная) инфраструктура, поскольку конкретные решения зависят от меняющихся условий.

Доля неопределенности связана также со сценариями изменения вечной мерзлоты, которые при заданных условиях зависят от выбора модели, и коэффициент запаса прочности каждого конкретного сооружения, который выбирается на этапе его проектирования и определяет способность конструкции сохранить свою целостность при изменении условий внешней среды. Заметим, что в строительной практике этот коэффициент для большинства ординарных сооружений принимают равным 1.2, т.е., упрощая ситуацию, можно сказать, что фундамент должен выдержать нагрузку, на 20% превышающую фактический вес объекта. Остальные элементы, заключенные в прямоугольники, полностью предсказуемы и их параметры могут быть определены

расчетами по существующим методикам. Например, стоимость нового строительства полностью определяется проектной сметой и в достаточной степени предсказуема.

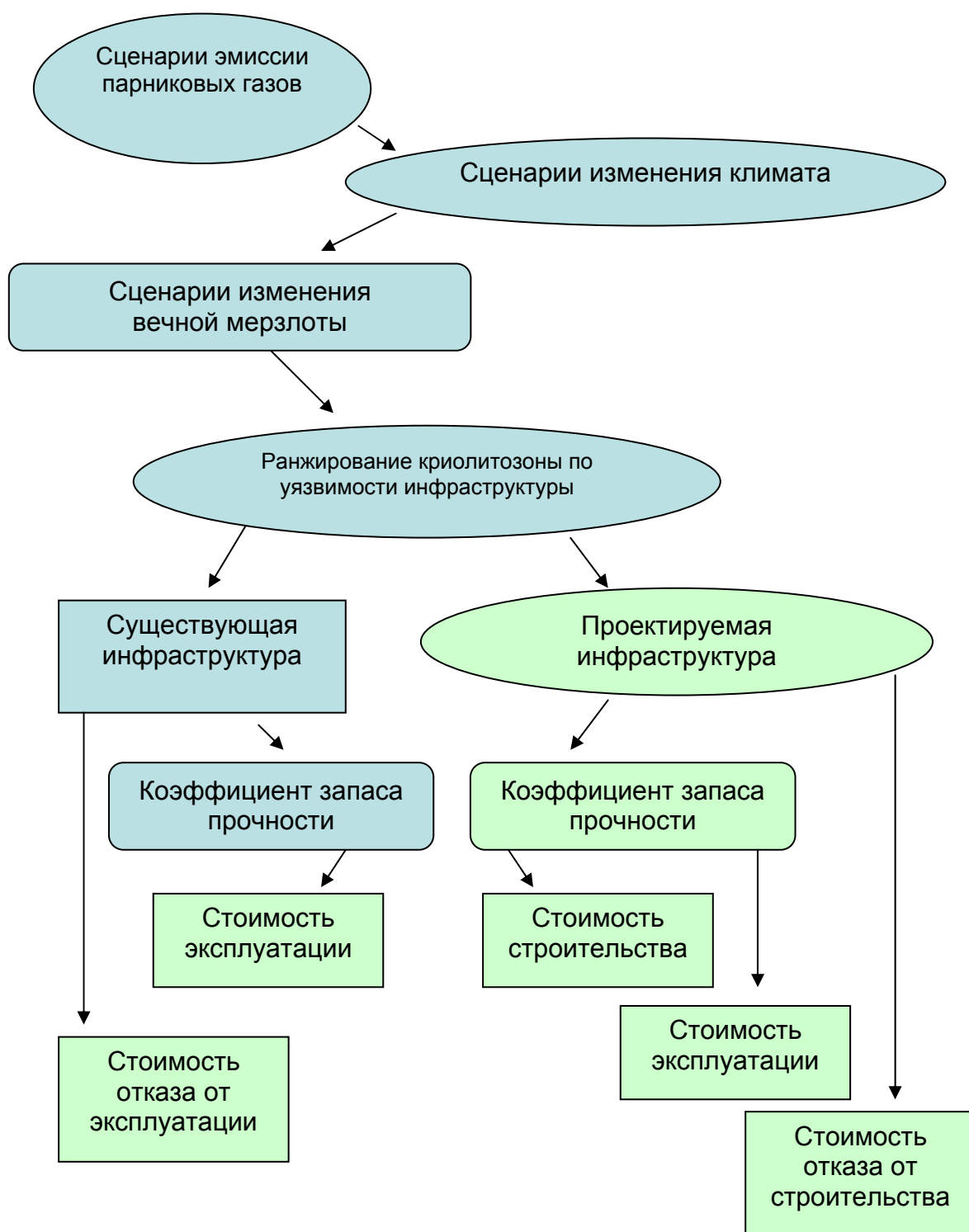


Рис. 25. Схема оценки экономического ущерба от таяния вечной мерзлоты.

На рисунке 25 салатным цветом обозначены элементы, на которые изменение вечной мерзлоты оказывает непосредственное влияние и которые могут быть модифицированы, в том числе и с учетом величины этого влияния. Все остальные элементы либо не испытывают такого влияния, либо не могут быть изменены, и по этой причине их можно исключить из анализа. Следует пояснить, что элементы «Существующая инфраструктура» и заложенный в ней «коэффициент запаса прочности» исключены, поскольку все их свойства уже predeterminedены, а возможность их модификации с целью адаптации к изменениям вечной мерзлоты неявно учтена в элементе схемы «Стоимость эксплуатации».

Таким образом, для оценки экономического ущерба или выгод, обусловленных таянием вечной мерзлоты, формируются две независимые линии. Одна из них связана с существующей инфраструктурой и содержит лишь два элемента:

- стоимость эксплуатации конкретного объекта, которая включает также и цену его преобразования, например, усиления фундамента сооружения с тем, чтобы он мог выдержать вес объекта при ослаблении несущей способности вечной мерзлоты;
- стоимость отказа от эксплуатации объекта, т.е. совокупные потери, которые возникнут в случае, если данный объект перестанет существовать и выполнять свои функции.

Вторая линия связана с еще не построенной инфраструктурой и, кроме вышеуказанных, содержит еще два элемента:

- коэффициент запаса прочности, увеличивая который можно строить объекты, которые будут сохранять стабильность даже в районах с относительно «слабой» вечной мерзлотой. Например, увеличение вдвое числа свай фундаментов или увеличение длины их части, погруженной в мерзлоту, при том же расчетном весе конструкции вдвое уменьшает нагрузку на каждую из них, в результате фундамент сможет выполнять свои функции при более высоких температурах вечной мерзлоты;
- стоимость строительства объекта, которая помимо прочих факторов определяется также и величиной коэффициента запаса прочности.

Представленную на рисунке 25 схему можно применять как к отдельным элементам инфраструктуры, т.е. жилой дом, взлетно-посадочная полоса аэропорта, трубопровод и т.п., так и к локализованным группам функционально связанных объектов, таким, как населенный пункт. В анализе важно принимать во внимание, что помимо принятия решения о строительстве нового объекта (или реконструкции существующего), всегда имеется альтернативная возможность отказа от строительства (ликвидации существующего) объекта, при том, что выполняемые им функции либо прекращаются, либо передаются другим аналогичным объектам. Обоснованный выбор состоит в сравнении стоимости реализации прямого и альтернативного решения. Банальным примером выбора альтернативной гипотезы при имеющейся инфраструктуре является демонтаж жилого здания, вместо его ремонта, и переселение жильцов в другие дома. Менее тривиальный пример таков. Пусть имеется поселок, где отсутствует больница и при необходимости привлекается авиация для транспортировки больных в лечебное учреждение. При увеличении числа жителей (и пропорциональном увеличении числа заболевших) в какой-то момент станет экономически более целесообразным построить свою больницу, поскольку расходы на строительство и эксплуатацию станут меньше, чем стоимость авиа транспортировки. Между тем, из-за таяния вечной мерзлоты срок службы здания больницы может оказаться меньше рассчитанного для стационарных климатических условий, либо, если строительство вести с учетом происходящих изменений, задавая высокий коэффициент запаса прочности, его стоимость многократно возрастет и превысит суммарные расходы с учетом авиа транспортировки в существующее лечебное учреждение. В такой ситуации экономически более целесообразно отказаться от нового строительства. При этом достаточно легко рассчитать прямой экономический ущерб, обусловленный таянием вечной мерзлоты, который в год будет равен разности между суммарной стоимостью всех авиа транспортировок и рассчитанной для стационарных условий стоимостью строительства больницы деленной на число лет ее предполагаемой эксплуатации + годовая стоимость эксплуатации здания. Более подробно логика принятия такого рода решений и математические методы расчета стоимостных показателей для строительства в

различных климатических условиях на Крайнем Севере изложена в публикации (Хрусталева, Давыдова, 2007).

Особую группу составляют сооружения, выполняющие уникальные функции, наличие которых абсолютно необходимо, невзирая на экономическую сторону вопроса. К сооружениям такого рода, построенным на вечной мерзлоте, можно отнести Билибинскую атомную электростанцию, Вилюйский, Усть-Хантайский, Усть-Среднеканский, Колымский, Курейский (вблизи Туруханска), Зейский, Эвенкийский (Нижняя Тунгуска) и Мамаканский (первый, построенный на вечной мерзлоте) гидротехнические узлы, а также построенный в 2009 году в крайне сложных мерзлотных условиях мост через реку Юрибей. По гидротехническим сооружениям имеется обширная литература, обзор которой показывает, что при относительно малом их количестве в районах распространения вечной мерзлоты, на них приходится 48% всех аварий. Основной причиной аварий является неучет криогенных процессов в теле плотин, их основаниях и в районах примыкания. Надо отметить, что до настоящего времени не климат, а собственно строительство сооружений оказывало влияние на изменения вечной мерзлоты. При том, что в ближайшие десятилетия климатическая составляющая таких изменений, согласно прогнозам, будет заметно увеличиваться, следует ожидать увеличения аварийности. В условиях, когда отсутствуют альтернативы существующим сооружениям, следует предусмотреть увеличение эксплуатационных расходов, включив в них стоимость дополнительных мероприятий по предупреждению аварийных ситуаций. При этом дать какую-либо объективную экономическую оценку дополнительных расходов, связанных с единственным выделенным фактором, например, с таянием вечной мерзлоты, невозможно, поскольку указанные сооружения уникальны, заведомо сложны в эксплуатации, с одной стороны, а с другой – несмотря на все это отдача от них превышает и еще долго будет превышать затраты на их содержание.

К этой группе относятся и проекты нового строительства с безальтернативным использованием неустойчивой вечной мерзлоты, часто характеризуемой высоким содержанием льда, засоленностью грунтов и наличием *криопегов*, несущая способность которой минимальна. Так обстоит дело со многими сооружениями нефтегазовой отрасли. В частности, это относится к инженерным сооружениям вдоль

строящегося газопровода «Бованенково-Ухта», при проектировании которых принималась во внимание не только крайне низкая несущая способность вечной мерзлоты вдоль многих участков трассы, но и прогнозируемые изменения климата. Проект, разработка которого была закончена коллективом ОАО «ВНИПИГаздобыча» в 2008 г., предусматривал различные варианты строительства, в том числе с применением термосифонов (Попов и др., 2008). Была рассчитана стоимость нулевого цикла строительства с учетом термостабилизации грунтов и установки термосифонов для гипотетического сценария изменения климата, предусматривающего увеличение температуры воздуха во все месяцы года на 2 °С за 40 лет. По этим расчетам удельные затраты для стандартных свайных фундаментов с проветриваемым подпольем в расчете на 1 м² застройки дополнительно возрастают на 3 – 20 тысяч рублей в зависимости от числа устанавливаемых термосифонов.

Наиболее важный вывод этого заключительного раздела состоит в том, что объективную оценку экономического ущерба, связанного с таянием вечной мерзлоты, можно дать лишь тогда, когда имеется какой-либо план действий по борьбе с этим явлением. Отсутствие таких планов в России является серьезной проблемой. Чтобы понять, насколько детальны требования такого планирования, к примеру, на Аляске, достаточно рассмотреть лишь один пример.

В последние два десятилетия значительная береговая эрозия привела к тому, что образовалась серьезная угроза разрушения небольшого поселения на одном из островов Арктического побережья Аляски (Кивалуна, см. рис. 26).

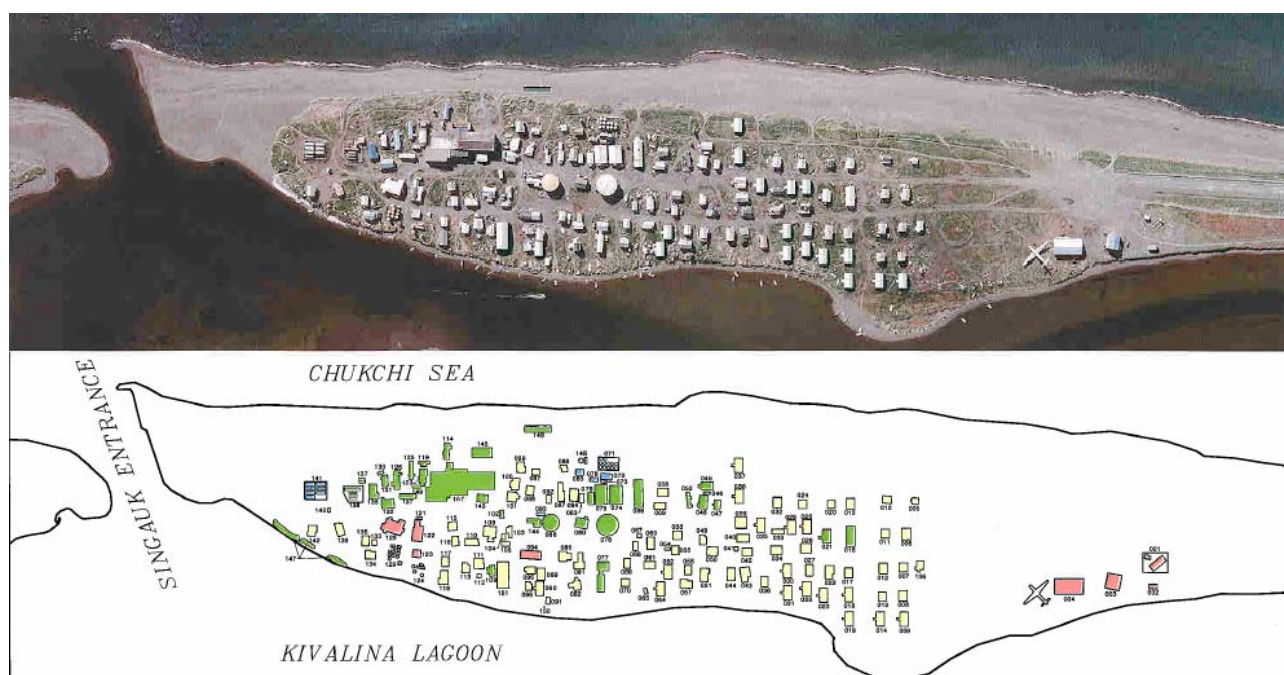


Рис. 26. Спутниковый снимок и план поселка Кивалуна, Аляска.

Население Кивалуны на время составления проекта (2006 г.) составляло 402 человека, все - коренные жители Аляски, компактно проживающие в 70 домах. В поселке из существенных инфраструктурных объектов кроме частных домов имеется также школа и резервуар для питьевой воды емкостью 2000 м^3 , из которого жители самостоятельно могут брать воду на домашние нужды. Ситуация близка к критической и в случае, если никакие меры не будут предприняты, поселок вскоре перестанет существовать, поскольку территория будет размыва, а строения уничтожены. В этой связи Корпусом инженеров-геокриологов были предложены в качестве возможных мер по адаптации укрепление береговой линии вокруг всего острова и поселка железобетонными дамбами (стоимость всех работ \$196.2 млн., см. рис. 27), или же перемещение всего поселка в одно из 6 выбранных для этого безопасных мест на Арктическом побережье. Стоимость такого переноса оценивается в \$154.9 млн. - \$251.1 млн., в зависимости от выбора конкретного места (см. карту на рис. 28).

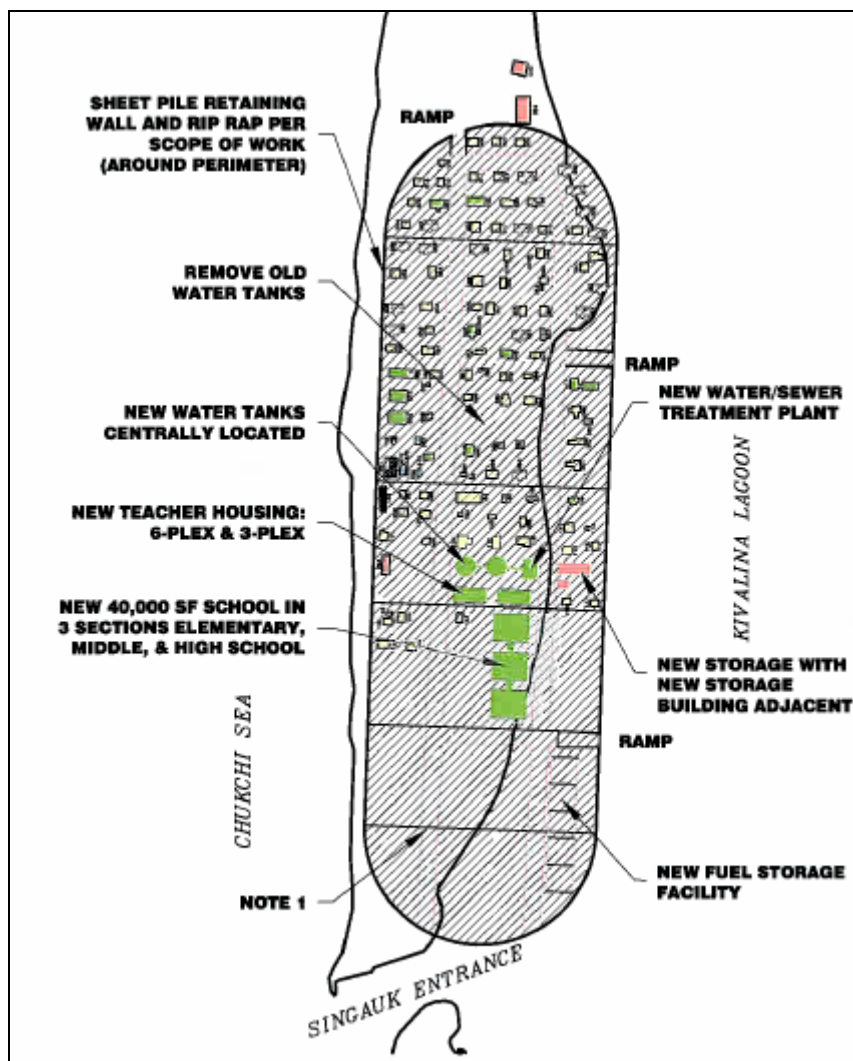


Рис. 27. План укрепления береговой линии поселка Кивалуна.

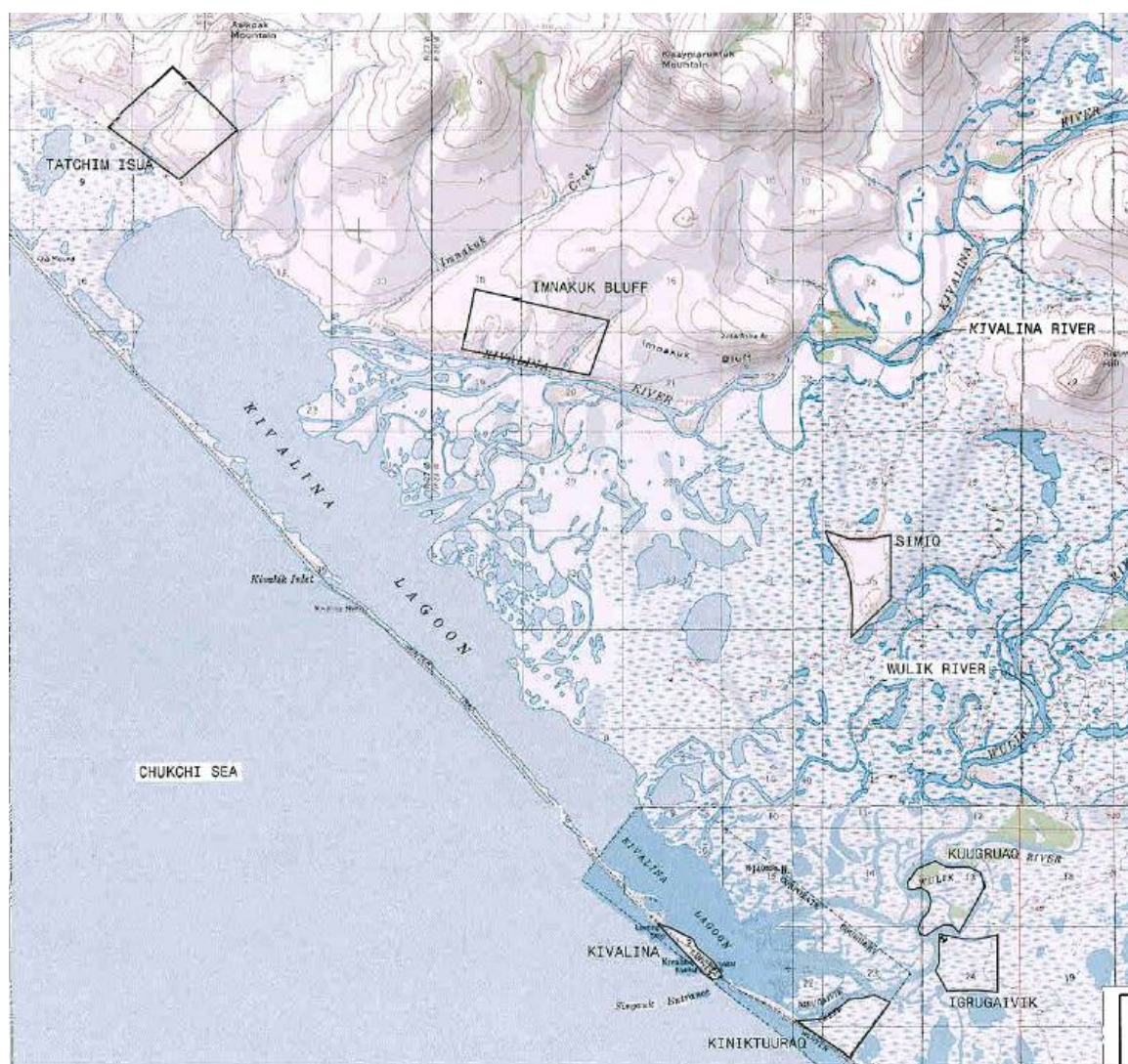


Рис. 28. Карта, на которой выделены возможные места переноса поселка.

В рамках плана для каждого из возможных мест перемещения были определены все виды расходов. Например, в случае перемещения поселка в Simiq (см. карту на рис. 28), в ценах 2006 г. они приведены в таблице 7.

Таблица 7. Сводная оценка стоимости перемещения Кивалуны

Подготовка площадок и строительство аэропорта	\$167 400 000
Защита от эрозии	\$231 000
Строительный лагерь	\$606 000
Электроэнергия и топливо	\$5 292 000
Перемещение домов	\$1 125 000
Строительство новых домов	\$52 690 000
Строительство водоснабжения и канализации	\$21 119 261
Строительство дороги	\$3 056 000
Всего	\$251 500 000

После этого была составлена сравнительная таблица, в которой учитывались характеристики каждого из возможных мест перемещения по следующим группам характеристик:

- физико-географические условия: подверженность затоплениям при речных разливах, опасность береговой эрозии, гидрологические условия и наличие стока воды, тип почвы, ее устойчивость и льдистость мерзлых пород, защищенность от сильных ветров, наличие и качество источников воды;
- факторы, определяющие условия строительства: наличие мест для хранения отходов или возможность организации таких мест (свалка и биоотходы), условия для организации системы хранения воды и водоснабжения, наличие карьеров, в которых можно добывать гравий для строительства, близость к реке, по которой можно завозить строительные материалы, место для аэропорта и взлетно-посадочной полосы с учетом преобладающих направлений ветра, потенциал для расширения поселка, возможность удобного расположения строительного городка на период работ;
- социальные факторы: расстояние от Кивалуны, доступ к океану и лагуне Кивалуна, доступ к рекам Wulik, Kivaluna, доступ к территориям, на которых

население традиционно вело деятельность, возможность организации удобной стоянки для лодок, возможность обустройства погребов в вечной мерзлоте, в которых население Кивалуны традиционно хранит продовольствие (естественные морозильники), удовлетворенность населения предлагаемым новым местом, статус земли;

- стоимостные факторы: стоимость предпроектной подготовки нового места, стоимость строительства дорог, стоимость защиты от эрозии на новом месте, коммунальные расходы (отопление, электроэнергия), стоимость транспортного сообщения (авиа, морское, речное) с другими поселками.

По каждому из приведенных в списке показателей все предполагаемые места переселения были оценены по пятибалльной системе, рассчитаны средние баллы для каждой группы показателей и общий балл, разброс которого составил от 80 до 103.

Далее были разработаны различные технические решения, основанные на схемах упрощения и удешевления процесса (экономичный вариант), сохранения качества всех объектов инфраструктуры на существующем уровне, а также схема, предусматривающая улучшение жилищных и коммунальных условий за счет модификации конструкций при их переносе. Для каждого из этих вариантов были разработаны детальные сметы. Об их объективности говорит тот факт, что в зависимости от продолжительности планируемых работ была по-разному отражена стоимость периодического техобслуживания грузовой и подъемной техники (стандартное ТО, включая регулировку двигателя грузовиков, замену масла, фильтров и т.п.). Таким образом, полученные оценки отражали стоимость всех необходимых работ и давали исчерпывающее представление об экономическом ущербе, связанном с таянием вечной мерзлоты и береговой эрозией.

В заключение отметим, что предложенные вначале этого раздела методические принципы расчета экономических потерь от таяния вечной мерзлоты не являются единственно возможными. Их достоинство в том, что они выстраивают все элементы анализа в единую цепочку, выделяют те из них, которые испытывают воздействие меняющейся вечной мерзлоты, и позволяют при наличии всех необходимых данных

получать количественные оценки для любого конкретного объекта. Между тем, реалии таковы, что получить объективные данные, необходимые для расчета по такой методике даже для небольших районов, практически невозможно. Отчасти это обусловлено большой спекулятивной составляющей, заложенной в цену любого строительства, что крайне затрудняет определение истинной себестоимости того или иного действия, например, стоимость рассмотренных выше прямых и альтернативных решений. Немаловажный фактор также и стремление различных собственников искажать в сторону завышения стоимостные показатели строительства и эксплуатации сооружений. Самое же главное препятствие – отсутствие в России общегосударственной программы, нацеленной на выявление объектов, требующих первоочередного внимания в контексте изменений вечной мерзлоты, и на разработку по адаптации к таким изменениям. Для страны, 62% территории которой находится в криолитозоне, это недопустимо. В отсутствии такой централизованной программы возникающие проблемы часто решаются или остаются без внимания в зависимости от наличия средств у конкретного собственника и его личной заинтересованности. При этом чаще всего социальная составляющая вообще не принимается во внимание. Разработка такой программы должна стать одним из важнейших государственных приоритетов.

Заключение

Природным и социально-экономическим системам присуща изменчивость, их состояние всегда меняется, и это не подлежит сомнению. Содержательными вопросами являются следующие:

- как велико изменение в системе за данный промежуток времени,
- с какой определенностью оно известно,
- какая его часть может быть связана с изменением климата, а какая – с другими факторами,
- в какой степени изменения можно предсказать.

В представленном отчете эти вопросы рассматривались в связи с конкретной проблемой воздействия изменения климата на вечную мерзлоту и на них, по крайней мере частично, были даны ответы. Выводы отчета согласуются с позицией, высказываемой многими специалистами по проблеме климата, которая заключается в следующем.

Изменения климата, произошедшие на территории России в XX веке, заметно затронули природные и хозяйственные системы. Отмечены и позитивные, и негативные последствия, при этом катастрофических последствий, обусловленных изменением климатических факторов, до настоящего времени отмечено не было. В первой половине XXI века также ожидается, что изменения климата не будут лимитирующим фактором для устойчивого экономического развития России в целом. Однако разработка ответных стратегий (в частности, мер адаптации) для ряда регионов, систем и секторов необходима и должна стать приоритетной государственной задачей.

Словарь

Анаэробные условия – условия, при которых отсутствует кислород и невозможно окисление углерода до углекислого газа. Такие условия имеются в болотах ниже уровня болотных вод.

Арктика – в общем случае определяется как пространство, находящееся к северу от полярного круга, охватывающее часть континентальной территории, арктические острова, моря и Северный ледовитый океан. Часто ее рассматривают совместно с *суб-арктической областью*.

Арктический Совет – организация, учрежденная 19 сентября 1996 представителями Правительств 8 Арктических государств (Канады, Дании, Финляндии, Исландии, Норвегии, Российской Федерации, Швеции и Соединенных Штатов Америки), с целью улучшения сотрудничества, координации и взаимодействия по вопросам Арктики, представляющим взаимный интерес, при широком привлечении арктических коренных народов. Материалы об Арктическом Совете: http://ru.wikipedia.org/wiki/Арктический_совет. Декларация об учреждении Арктического Совета: <http://www.lawmix.ru/abro.php?id=6719>

Арктическая тундра – биоклиматическая зона в *Арктике*, в которой доминируют лишайники, мхи, малочисленные виды кустарниковой растительности и небольших деревьев.

Биом – сообщество растений, характеризующееся определенным сочетанием различных их видов. Например, *тундра*, широколиственный лес, и т.п.

Вечная мерзлота (более правильное название «многолетнемерзлые породы») – любое вещество, находящееся ниже поверхности Земли, температура которого на протяжении двух или более последовательных лет остается отрицательной. В зависимости от сомкнутости многолетнемерзлых пород, различают области их сплошного (ММП занимают более 90% площади), прерывистого (50%-90%) и островного (10%- 50%) распространения, между которыми можно провести условные границы.

Материалы о вечной мерзлоте: <http://www.permafrost.su>

Деградация вечной мерзлоты – любые изменения вечной мерзлоты, при которых происходит один или несколько из перечисленных процессов: увеличение температуры грунта, глубины сезонного таяния, уменьшение мощности (толщины) мерзлых пород, образование *таликов*, сокращение площади распространения.

Инфраструктура – обширный класс созданных человеком объектов, включающий в себя различные постройки, имеющие фундамент, сооружения транспортной сети (дороги, взлетно-посадочные полосы, мосты и тоннели, трубопроводы, речные и морские порты), линии электропередач и иные инженерные сооружения, имеющие определенную функцию в системе экономических и социальных отношений, или в природопользовании/охране окружающей среды. Инфраструктура является необходимым атрибутом экономического развития как на региональном, так и на национальном и глобальном уровнях.

Климатически обусловленное распространение вечной мерзлоты – территория, на которой климатические условия таковы, что почва ниже уровня сезонного оттаивания может иметь отрицательную температуру на протяжении всего года. На фактическое наличие или же отсутствие вечной мерзлоты влияют помимо климата также и иные факторы, например, растительность, теплофизические свойства почвы, и т.п. По этой причине климатически обусловленное распространение может отличаться от реального.

Криолитозона – часть территории суши и Арктического шельфа, на которой имеется вечная мерзлота.

Криопэги – переохлажденные минерализованные подземные воды с температурой замерзания ниже 0 °С.

Льдистость – доля объема многолетнемерзлой толщи, занятая льдом. Как правило, на картах указывается средняя льдистость верхнего слоя, ограниченного несколькими метрами. Измеряется в процентах.

Ледовый комплекс – многолетнемерзлые породы с высоким содержанием льда в приповерхностном слое толщиной в несколько метров. Часто встречается на побережье арктических морей.

МГЭИК – Межправительственная Группа Экспертов по Изменению Климата, более известная по своей англоязычной аббревиатуре IPCC. Состоит из трех рабочих групп (РГ). Занимается подготовкой периодических докладов, в которых оцениваются современные и ожидаемые в будущем изменения климата (Первая РГ), последствия таких изменений (РГ-2), а разработкой стратегии адаптации к ним (РГ-3). До настоящего времени были выпущены 4 таких отчета в 1991, 1995, 2001 и 2007 годах. В 2007 г. МГЭИК была присуждена Нобелевская премия Мира, которую эта организация разделила с А.Гором. Подробнее о МГЭИК на <http://www.ipcc.ch>

Нормы климатических характеристик – типичные значения характеристик, например, средней годовой температуры воздуха в данном пункте наблюдений, осредненные за достаточно большой интервал времени. Всемирная метеорологическая организация рекомендует для расчета современных норм осреднять характеристики за период 1961-1990 г. Возможно также рассчитывать нормы за любой иной период времени.

Регрессия и трансгрессия вечной мерзлоты – периодическое отступление и расширение области, занятой вечной мерзлотой, в силу различных причин, как правило, изменений климата. Часто рассматривают эти процессы в геологических масштабах времени, порядка тысячелетий, хотя также можно применять эти термины и в пределах одного столетия – нескольких десятилетий.

Сезонно-талый слой – верхний слой почвы над вечной мерзлотой, который ежегодно протаивает в летнее время. Сезонно-талый слой (СТС) играет огромную роль, поскольку он определяет количество вещества, вовлеченного в энерго и

массообмен между почвой и атмосферой в криолитозоне. Толщина (обычно ее называют мощностью) СТС является одним из важнейших параметров состояния вечной мерзлоты. Характерные мощности СТС составляют несколько десятков сантиметров в наиболее северных областях сплошной мерзлоты, около 1 метра области прерывистого распространения, и до 2 метров в островной зоне.

Суб-арктическая область – территория, примыкающая с юга к *Арктике*, тесно связанная с ней общими природными явлениями и процессами, например, наличием вечной мерзлоты, которая встречается и южнее полярного круга

Тайга – лесная зона, граничащая на севере с *тундрой*, в которой доминируют хвойные деревья.

Талик – протаявший слой вечной мерзлоты. Различают сквозные и несквозные талики. В первом случае протаивает вся толща мерзлых пород, при этом образуется талый «остров», окруженный мерзлотой. Во втором случае под талым слоем остаются мерзлые породы, а выше талого слоя имеет место сезонное промерзание.

Термокарстовые осадки – понижения уровня земной поверхности при таянии льдосодержащих подстилающих мерзлых грунтов.

Ррт – единица, используемая для измерения концентрации различных газовых примесей в атмосфере, обозначающая количество молекул данного газа на миллион молекул других газов. Также иногда называют миллионными долями.

Список литературы

- Алексеева, О.И., В.Т. Балобаев, М.Н. Григорьев, В.Н. Макаров, Р.В. Чжан, М.М. Шац, В.В. Шепелев, 2007. О проблемах градостроительства в криолитозоне (на примере Якутска).- Криосфера Земли, № 2, с. 76-83.
- Анисимов, О.А. 1999. Влияние антропогенного изменения климата на обогрев и кондиционирование зданий.- Метеорология и гидрология, № 6, с. 10-17.
- Анисимов, О.А., М.А. Белолуцкая, 2002. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России.- Метеорология и гидрология, № 6, с. 15-22.
- Анисимов, О.А., М.А. Белолуцкая, 2004. Моделирование воздействия антропогенного потепления на вечную мерзлоту: учет влияния растительности.- Метеорология и гидрология, № 11, с. 73-81.
- Анисимов, О.А., С.А. Лавров, 2004. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК.- Технологии ТЭК, № 3, с. 78-83.

- Анисимов, О.А., С.А. Лавров, С.А. Ренева, 2005. Эмиссия метана из многолетнемерзлых болот России в условиях изменения климата, в кн.: Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем, А. Израэль, (ред.). Гидрометеиздат: С.Петербург. с. 124-142.
- Анисимов, О.А., В.А. Лобанов, С.А. Ренева, 2007. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 века.- Метеорология и гидрология, № 10, с. 20-30.
- Анисимов, О.А., Ф.Э. Нельсон, 1998. Прогноз изменения мерзлотных условий в северном полушарии: применение результатов балансовых и транзитивных расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы.- Криосфера Земли, № 2, с. 53-57.
- Анисимов, О.А., Ф.Э. Нельсон, А.В. Павлов, 1999. Прогнозные сценарии эволюции криолитозоны при глобальных изменениях климата в XXI веке.- Криосфера Земли, № 4, с. 15-25.
- Аржанов, М.М., А.В. Елисеев, П.Ф. Демченко, И.И. Мохов, 2007. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа).- Криосфера Земли, № 4, с. 65-69.
- Бедрицкий, А.И., В.Г. Блинов, Д.А. Гершиноква, Г.С. Голицин, В.П. Дымников, А. Израэль, В.М. Катцов, В.М. Котляков, В.П. Мелешко, В.И. Осипов, С.М. Семенов, ред. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. Изменения климата. 2008, Росгидромет: Москва. 227 с.
- Бедрицкий, А.И., В.Г. Блинов, Д.А. Гершиноква, Г.С. Голицин, В.П. Дымников, А. Израэль, В.М. Катцов, В.М. Котляков, В.П. Мелешко, В.И. Осипов, С.М. Семенов, ред. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 2. Последствия изменений климата. 2008, Росгидромет: Москва. 288 с.
- Вильд, Г.И. 1882. О температуре воздуха в Российской империи. Вып 2, ч. IV. 1882, Санкт-Петербург. 359 с.
- Гаврилова, М.К. 1981. Современный климат и вечная мерзлота на континентах. 1981, Новосибирск: Наука. 112 с.
- Гарагуля, Л.С., Э.Д. Ершов, ред. Геокриологические опасности. Природные опасности России, ред. В.И. Осипов, С.К. Шойгу. Т. 1. 2000, Крук: М. 315 с.
- Гречищев, С.Е. 1997. Прогноз оттаивания и распределения вечной мерзлоты и изменения криогенного растрескивания грунтов на территории России при потеплении климата.- Криосфера Земли, № 1, с. 59-65.
- Груза, Г.В., Э. Ранькова, Л.Н. Аристова, Л.К. Клещенко, 2006. О неопределенности некоторых сценарных климатических прогнозов температуры воздуха и осадков на территории России.- Метеорология и гидрология, № 10, с. 5-23.
- Дымников, В.П., В.Н. Лыкосов, Е.М. Володин, В. Галин, А.В. Глазунов, А.С. Грицун, Н.А. Дианский, М.А. Толстых, А.И. Чавро, 2005. Моделирование климата и его изменений, в кн.: Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Наука: М., с. 36-173.
- Израэль, А., А.В. Павлов, А. Анохин, Л.Т. Мяч, Б.Г. Шерстюков, 2006. Статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на Территории Российской Федерации.- Метеорология и гидрология, № 5, с. 27-38.
- Ильичев, В.А., В.В. Владимиров, А.В. Садовский, А.В. Замараев, В.И. Гребенец, М. Кутвицкая, 2003. Перспективы развития современных северных поселений. 2003, Москва: Российская архитектурная академия. 152 с.
- Кудрявцев, В.А., Л.С. Гарагуля, К.А. Кондратьева, В.Г. Меламед, 1974. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. 1974, М. Наука. 431 с.
- Малевский-Малевич, С.П., Е.К. Молькентин, Е.Д. Надежина, 2000. Модельные оценки эволюции вечной мерзлоты и распределения слоя сезонного протаивания в зависимости от

- климатических условий в северных регионах Западной Сибири.- Криосфера Земли, № 4, с. 49-57.
- Малеvский-Малеvич, С.П., Е.К. Молькентин, Е.Д. Надежина, Т.П. Павлова, 2005. Модельные оценки изменений температуры воздуха и эволюция теплового состояния многолетнемерзлых пород.- Криосфера Земли, № 3, с. 36-44.
- Малеvский-Малеvич, С.П., Е.К. Молькентин, Е.Д. Надежина, Т.П. Павлова, А.А. Семиошина, 2007. Моделирование и анализ возможностей экспериментальной проверки эволюции термического состояния многолетнемерзлых грунтов.- Криосфера Земли, № 1, с. 29-36.
- Малеvский-Малеvич, С.П., Е.Д. Надежина, 2002. Оценки влияния изменений климата на вечную мерзлоту в России, основанные на модельных сценариях изменений климата, в кн.: Изменения климата и их последствия, Г.В. Менжулин, Editor. Наука: С.Петербург. с. 231-239.
- Малеvский-Малеvич, С.П., Е.Д. Надежина, В.В. Симонов, О.Б. Шкляревич, К.К. Молькентин, 1999. Оценки воздействий изменений климата на режим протаивания многолетнемерзлых грунтов, в кн.: Современные исследования главной геофизической обсерватории, М.Е. Берляндт, В.П. Мелешко (ред.). Гидрометеиздат: С.Петербург, с. 33-51.
- Оберман, Н.Г. 2007. Глобальное потепление и изменение криолитозоны Печоро-Уральского региона.- Разведка и охрана недр, № 4, с. 63-68.
- Оберман, Н.Г., И.Г. Шеслер, 2009. Прогнозирование деградации многолетнемерзлых пород (на примере Европейского Северо-Востока страны).- Разведка и охрана недр, № 7, с. 20-30.
- Павлов, А.В. (ред.). Теплофизические исследования криолитозоны Сибири. 1983, Наука: Новосибирск.
- Павлов, А.В. 1997. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз.- Криосфера Земли, № 1, с. 47-58.
- Павлов, А.В., Г.В. Ананьева, Д.С. Дроздов, Н.Г. Москаленко, В.А. Дубровин, Н.Б. Какунов, Г.П. Минайлов, Б. Скачков, П.Н. Скрябин, 2002. Мониторинг сезонноталого слоя и температуры мерзлого грунта на севере России.- Криосфера Земли, № 4, с. 30-39.
- Павлова, Т.П., В.М. Катцов, Е.Д. Надежина, П.В. Спорышев, В.А. Говоркова, 2007. Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения.- Криосфера Земли, № 2, с. 3-13.
- Попов, А.П., В.И. Милованов, В.В. Жмулин, В.А. Рябов, М.А. Бережной, 2008. К вопросу о типовых технических решениях по основаниям и фундаментам для криолитозоны.- Инженерная геология, № 3, с. 22-40.
- Чудинова, С.М., С.С. Быховец, В.А. Сороковиков, Р. Барри, Т. Жанг, 2003. Особенности изменения температуры почв России в период последнего потепления климата.- Криосфера Земли, № 3, с. 23-30.
- Хрусталеv, Л.Н., И.В. Давыдова, 2007. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномерзлых грунтах.- Криосфера Земли, № 2, с. 68-75.
- Anisimov, O., 2007. Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission.- Environmental Research Letters, № 2, p. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045016.
- Anisimov, O.A., F.E. Nelson, 1997. Permafrost zonation and climate change in the northern hemisphere: Results from transient general circulation models.- Climatic Change, № 2, p. 241-258.
- Anisimov, O.A., S.A. Reneva, 2006. Permafrost and changing climate: the Russian perspective.- Ambio, № 4, p. 169-175.
- Anisimov, O.A., N.I. Shiklomanov, F.E. Nelson, 1997. Global warming and active-layer thickness: results from transient general circulation models.- Global and Planetary Change, № 3-4, p. 61-77.
- Brown, J., K.M. Hinkel, F.E. Nelson, 2000. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: research designs and initial results.- Polar Geography, № 3, p. 165-258.

- Duhaime, G., A. Caron, 2006. The economy of the circumpolar Arctic, in *The economy of the North*, I.A. S. Glomsrod, Editor. Statistics Norway: Oslo. p. 17-23.
- Frauenfeld, O.W., T. Zhang, R.G. Barry, D. Gilichinsky, 2004. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia.- *Journal of Geophysical Research*, № D05101, doi:10.1029/2003JD004245,
- Goodrich, L.E., 1982. The influence of snow cover on the ground thermal regime.- *Canadian Geotechnical Journal*, № p. 421-432.
- Lachenbruch, A.H., B.V. Marshall, 1986. Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan arctic.- *Science*, № p. 689-696.
- Lawrence, D.M., A.G. Slater, 2005. A projection of severe nearsurface permafrost degradation during the 21st century.- *Geophysical Research Letters*, № L24401, doi:10.1029/2005GL025080,
- Lindholt, L., 2006. Arctic natural resources in a global perspective, in *The economy of the North*, I.A. S. Glomsrod, Editor. Statistics Norway: Oslo. p. 27-37.
- Majorowicz, J.A., W.R. Skinner, 1997. Anomalous ground warming versus surface air warming in the Canadian Prairie provinces.- *Climatic Change*, № 4, p. 485-500.
- McDonald, H., S. Glomsrod, I. Maenpaa, 2006. Arctic economy within the Arctic nations, in *The economy of the North*, I.A. S. Glomsrod, Editor. Statistics Norway: Oslo. p. 41-63.
- Nelson, F.E., 2003. (Un)frozen in time.- *Science*, № 299, p. 1673-1675.
- Nicolsky, D.J., V.E. Romanovsky, V.A. Alekseev, D.M. Lawrence, 2007. Improved modeling of permafrost dynamics in a GCM land-surface scheme.- *Geophysical Research Letters*, № L08501. DOI:10.1029/2007GL029525.,
- Osterkamp, T.E., V.E. Romanovsky, 1999. Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska.- *Permafrost and Periglacial Processes*, № 10, p. 17-37.
- Sazonova, T.S., V.E. Romanovsky, 2003. A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active-layer thickness and mean annual ground temperatures.- *Permafrost and Periglacial Processes*, № 2, p. 125- 140.
- Sazonova, T.S., V.E. Romanovsky, J.E. Walsh, D.O. Sergueev, 2004. Permafrost dynamics in the 20th and 21st centuries along the East Siberian transect.- *Journal of Geophysical Research- Atmospheres*, № D01108, p. doi:10.1029/2003JD003680.
- Shiklomanov, N.I., 2005. From Exploration to Systematic Investigation: Development of Geocryology in 19th- and Early-20th-Century Russia.- *Physical Geography*, № 4, p. 249-263.
- Shur, Y., K.M. Hinkel, F.E. Nelson, 2005. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science.- *Permafrost and Periglacial Processes*, № 16, p. 5-17.
- Zhang, T., J.A. Heginbottom, R.G. Barry, J. Brown, 2000. Further statistics of the distribution of permafrost and ground ice in the Northern Hemisphere.- *Polar geography*, № 2, p. 126-131.
- Zhang, T.J., O.W. Frauenfeld, M.C. Serreze, A. Etringer, C. Oelke, J. McCreight, R.G. Barry, D. Gilichinsky, D.Q. Yang, H.C. Ye, F. Ling, S. Chudinova, 2005. Spatial and temporal variability in active layer thickness over the Russian Arctic drainage basin.- *Journal of Geophysical Research- Atmospheres*, № D16, p. Art. No. D16101.