

*Федеральное автономное научное учреждение
«Восточный центр государственного планирования»*

МОНИТОРИНГ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

«Академический проект»
Москва, 2024

УДК 551.2/.3;624.1

ББК 26.32;38.6

М 77

Авторский коллектив:

Брушков А. В., Алексеев А. Г., Дроздов Д. С., Дубровин В. А.,
Железняк М. Н., Осокин А. Б., Садуртдинов М. Р., Сергеев Д. О.,
Багина С. В., Великин С. А., Жданев О. В., Кузнецов М. Е., Малкова Г. В.,
Остарков Н. А., Федоров Р. Ю., Фролов К. Н.

Рецензенты:

Осипов В. И., научный руководитель Института, доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН)

Фоменко И. К., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной геологии Гидрогеологического факультета, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ)

Мониторинг вечной мерзлоты. — М.: Академический проект,
М 77 2024. — 468 с. + 48 с. цв. вкл. — DOI 10.61828/9785829142780-2024-1-468
ISBN 978-5-8291-4278-0

Территория вечной мерзлоты занимает до 65% площади России. Влияние криолитозоны на формирование экологической и экономической обстановки при недропользовании и промышленном освоении является определяющим. Однако, несмотря на чувствительность криолитозоны при недропользовании, строительстве и эксплуатации промышленных и гражданских объектов, создании рекреаций и т. п., до сих пор не существует государственной программы комплексного ее изучения.

Книга посвящена изучению этой проблемы — созданию государственной системы мониторинга состояния криолитозоны, также в книге рассмотрены снижение рисков ее экономического освоения, предупреждение развития опасных мерзлотных (криогенных) процессов и экологических угроз и сохранение криогенных ресурсов, охрана окружающей среды.

Работа адресована студентам высших учебных заведений на направлениях геокриологического и экономического образования, ученым геокриологам, экономистам, специалистам органов регионального и местного управления, а также всем тем, кто интересуется развитием арктических территорий нашей страны.

УДК 551.2/.3;624.1

ББК 26.32;38.6

- © Коллектив авторов, 2023
- © Федеральное автономное научное учреждение «Восточный центр государственного планирования», 2024
- © Оригинал-макет, оформление.
«Академический проект», 2024

ISBN 978-5-8291-4278-0

Оглавление

Введение.....	11
1. Современный климат и состояние вечной мерзлоты.....	16
1.1. Основные понятия.....	16
1.2. Изменения климата.....	18
1.2.1. Глобальные изменения климата.....	23
1.2.2. Изменения климата в РФ.....	27
1.3. Изменения состояния вечной мерзлоты.....	33
1.3.1. Общие положения.....	33
1.3.2. Пространственная изменчивость температурного режима криолитозоны и криогенных процессов в материковой части.....	35
1.3.3. Наблюдения за состоянием вечной мерзлоты на арктическом шельфе.....	39
2. Основные риски освоения территории распространения вечной мерзлоты на современном этапе.....	44
2.1. Требования по обеспечению устойчивости зданий и инженерных сооружений в криолитозоне.....	44
2.2. Региональные опасности и риски строительства и эксплуатации городских и промышленных агломераций в криолитозоне страны.....	48
2.3. Ожидаемый экономический ущерб при сохранении текущих схем хозяйствования в АЗРФ.....	50
2.3.1. Изменение температуры и оттаивание вечной мерзлоты — основные факторы ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям в АЗРФ.....	50
2.3.2. Унифицированная методика оценки ущерба для секторов Российской Арктики.....	52
2.3.2.1. Оценка температур воздуха в выделенных районах (МО).....	52
2.3.2.2. Оценка возможных температур мерзлых грунтов.....	52
2.3.2.3. Оценка изменения несущей способности грунтов.....	54
2.3.2.4. Методика оценки стоимости зданий и сооружений по отраслям экономики в муниципальных образованиях АЗРФ....	61
2.3.3. Результаты оценки возможного ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям.....	65
2.3.4. Выводы. Распределение ожидаемого экономического ущерба по площади АЗРФ.....	73

3. Современное состояние фонового мониторинга (ФМ)	
криолитозоны в мире	75
3.1. Глобальная система мониторинга. Фоновый мониторинг за рубежом.....	75
3.2. Фоновый мониторинг в Российской Федерации.....	78
3.2.1. Формирование системы фонового мониторинга	78
3.2.2. Опыт фонового мониторинга Минприроды РФ	81
3.2.2.1. Воркутинский опорный мерзлотно-гидрогеологический полигон	81
3.2.2.2. Геокриологический стационар Марре-Сале.....	84
3.2.3. Опыт фонового мониторинга в институтах РАН и вузах	87
4. Опыт геотехнического мониторинга в криолитозоне	99
4.1. Современное состояние геотехнического мониторинга в криолитозоне Арктики	99
4.1.1. Отечественные требования геотехнического мониторинга при строительстве в криолитозоне	99
4.1.2. Зарубежный подход к геотехническому мониторингу	103
4.2. Опыт геотехнического мониторинга на предприятиях нефтегазовой отрасли	107
4.2.1. Общие положения.....	107
4.2.2. Объекты Европейского Севера и Западной Сибири	114
4.2.3. Магистральный газопровод Надым—Пунга, Западная Сибирь.....	122
4.2.4. Магистральный газопровод Мессояха—Норильск, Западная—Восточная Сибирь.....	128
4.2.5. Магистральный газопровод Среднеботуобинское месторождение—Полярный, Восточная Сибирь.....	131
4.3. Опыт геотехнического мониторинга подземных хранилищ углеводородов	131
4.4. Опыт геотехнического мониторинга в Минстрое и ЖКХ	135
4.4.1. Мониторинг урбанизированных территорий	135
4.4.2. Развитие системы мониторинга в Якутске.....	138
4.5. Опыт геотехнического мониторинга дорог	142
4.6. Опыт геотехнического мониторинга крупных карьеров.....	152
4.7. Опыт геотехнического мониторинга гидротехнических сооружений	160
5. Анализ отечественной нормативной базы в области проектирования и строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов	167
5.1. Отечественная нормативная база, система нормативных правовых, нормативных технических и методических документов.....	167

5.1.1. Комплекс «Основания и фундаменты на ММГ»	169
5.1.2. Своды правил, относящиеся к инженерно-геологическим и инженерно-геодезическим изысканиям на многолетнемерзлых грунтах	174
5.1.3. Национальные стандарты, разделы которых касаются многолетнемерзлых грунтов	175
5.1.4. Комплекс «Требования к строительным материалам и конструкциям»	179
5.1.5. Комплекс «Защита от опасных геофизических воздействий»	180
5.1.6. Комплекс «Требования к проектированию сооружений различных отраслей»	180
5.1.6.1. «Требования к проектированию дорог»	180
5.1.6.2. «Требования к аэродромам»	182
5.1.6.3. «Требования к гидротехническим сооружениям»	183
5.1.6.4. «Требования к инженерным сетям»	184
5.1.6.5. «Требования к сооружениям нефте-, газодобывающего комплекса»	186
5.2. Выявление и систематизация стандартов и сводов правил, относящихся к области проектирования и строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов	192
5.3. Сопоставление требований отечественных, европейских и иных зарубежных документов, регламентирующих требования к проектированию зданий и сооружений в условиях многолетнемерзлых грунтов	194
5.3.1. Система советских и российских нормативных документов	194
5.3.2. Нормативные документы США и Канады	195
5.4. Классификация требований к проектированию и строительству в условиях многолетнемерзлых грунтов	198
5.5. Анализ отечественной нормативной базы, выявление и систематизация нормативных правовых, нормативных технических и методических документов, относящихся к геотехническому мониторингу в условиях многолетнемерзлых грунтов	201
5.6. Состав геотехнического мониторинга	207
6. Мониторинг вечной мерзлоты — неотъемлемая часть успешной экономической политики освоения Арктики	210
6.1. Обоснование Концепции государственного межведомственного фонового и геотехнического мониторинга вечной мерзлоты АЗРФ ...	210
6.1.1. Состояние проблемы	210
6.1.2. Экологические вызовы и риски освоения арктической криолитозоны	213

6 | Оглавление

6.1.3. Цель разработки Концепции	214
6.1.4. Архитектура государственного межведомственного мониторинга вечной мерзлоты АЗРФ в рамках разработанной Концепции	215
6.1.4.1. Общие положения	215
6.1.4.2. Цель и задачи государственного мониторинга криолитозоны	216
6.1.4.3. Структура государственного мониторинга	217
6.1.5. основополагающие документы Концепции	218
6.1.5.1. Разработка Программы	218
6.1.5.2. Ответственные исполнители Программы мониторинга	218
6.1.5.3. Функции Федерального агентства по вечной мерзлоте (ФАМ) при Правительстве РФ, учитываемые в Программе	219
6.1.5.4. Функции Министерства развития Дальнего Востока и Арктики, учитываемые в Программе	220
6.1.5.5. Функции Минприроды РФ, учитываемые в Программе	221
6.1.5.6. Функции Минстроя РФ, учитываемые в Программе	222
6.1.5.7. Функции Министерства энергетики РФ, учитываемые в Программе	223
6.1.5.8. Функции подразделений Минобрнауки (ФАНО, РАН, ВУЗ), учитываемые в Программе	223
6.1.6. Новые законодательные акты в связи с разработкой и реализацией Программы создания государственной системы мониторинга вечной мерзлоты РФ (Совет Федерации и Государственная Дума Федерального Собрания РФ)	224
6.1.7. Наблюдательные сети межведомственного мониторинга вечной мерзлоты АЗРФ	228
6.1.7.1. Общие положения	228
6.1.7.2. Наблюдательная сеть геокриологического полигона	229
6.1.7.3. Размещение геокриологических полигонов на территории АЗРФ	231
6.1.8. Выводы	232
7. Основные параметры архитектуры и методические аспекты строительства государственной системы мониторинга вечной мерзлоты	233
7.1. Архитектура межведомственного фонового и геотехнического мониторинга вечной мерзлоты	233
7.1.1. Блок сбора исходных данных	235
7.1.1.1. Мерзлотные станции	238
7.1.1.2. Мерзлотные инспекции	239

7.1.1.3. Научное сопровождение полупромышленных экспериментов	240
7.1.1.4. Центры проектирования и реконструкции зданий и сооружений	242
7.1.2. Блок обработки мониторинговой информации. Федеральный банк региональных баз данных	242
7.1.3. Блок принятия решений	244
7.2. Региональные работы и картирование полигонов — составная часть мониторинга	245
7.2.1. Иерархия картографических моделей как основа пространственно-временной характеристики регионов	245
7.2.2. Цифровые ландшафтные и геоэкологические карты локального и элементарного уровня	248
7.2.3. Инженерно-геоэкологические карты масштаба 1:500 000	254
7.2.4. Карта инженерно-геоэкологических условий	257
7.2.5. Карта инженерно-геоэкологического районирования	258
7.2.6. Карты эколого-геологического районирования	259
7.2.7. Схема техногенной нагрузки	260
7.2.8. Карты ландшафтного и геоэкологического районирования в масштабе 1:500 000	263
7.2.9. ГИС-ориентированная карта районирования криолитозоны масштаба 1:8 000 000 для выбора объектов геоэкологического мониторинга	271
7.3. Обоснование размещения наблюдательной сети мониторинга в Арктической зоне	273
7.3.1. Принципы размещения и выбор перспективных территорий для геоэкологических полигонов	273
7.3.2. Полигон Печорский, лист: R-40-B6	276
7.3.3. Полигон Воркутинский, лист: R-41, 3-4	277
7.3.4. Полигон Ямальский (стационар Марре-Сале, Сабетта), лист: R-42	278
7.3.4.1. Геоэкологический стационар Марре-Сале	279
7.3.4.2. Геоэкологический стационар Сабетта, съемочный лист: R-42-1,2	280
7.3.5. Полигон Уренгойский (Южный, Северный), листы: Q-43-1,2	283
7.3.5.1. Площадка регулярного обследования «Уренгой Северный» ...	284
7.3.5.2. Площадка регулярного обследования «Уренгой Южный»	285
7.3.5.3. Площадки периодического обследования на полигоне Уренгойский	286
7.3.6. Полигон Норильский, лист: R-45-3,4	286

8 | Оглавление

7.3.7. Полигон Хатанга, лист: R-48-A	287
7.3.8. Полигон Жиганский, лист: Q-51-Б	289
7.3.9. Полигон Саскылах, лист: R-50,1,2	290
7.3.10. Полигон Тикси, лист: R-52-1,2	291
7.3.11. Полигон Депутатский, лист: R-54-В	292
7.3.12. Полигон Черский, лист: R-57-Г	293
7.3.13. Полигон Магаданский, лист: Р-55-С, D	294
7.3.14. Полигон Анадырский, лист: Q-60-Г	295
8. Основные виды наблюдений и их технико-экономические показатели в системе мониторинга криолитозоны	297
8.1. Наблюдаемые параметры при геокриологическом мониторинге	301
8.2. Наблюдения за температурным режимом пород	303
8.2.1. Наблюдения за температурным режимом пород на геокриологических стационарах и полигонах	305
8.2.2. Регламент наблюдений на геокриологических стационарах и полигонах	308
8.2.3. Наблюдательные скважины и их технико-экономические показатели для типовых геокриологического стационара и полигона	309
8.2.3.1. Строительство наблюдательных скважин, полевое и лабораторное опробование керна, геофизические исследования и оборудование выработок автономной измерительной аппаратурой на типовом геокриологическом стационаре и полигоне на Европейском Севере и в Западной Сибири	310
8.2.3.2. Строительство наблюдательных скважин, полевое и лабораторное опробование керна, геофизические исследования и оборудование выработок автономной измерительной аппаратурой на типовом геокриологическом стационаре и полигоне в Восточной Сибири и на Чукотке	312
8.3. Технические средства мониторинга. Регламент наблюдений	313
8.3.1. Технические средства измерений на базе «Логгер LPC» (ООО «Геотехцентр»)	313
8.3.2. Технические средства измерений на базе измерительной аппаратуры ООО «Эталон» (г. Омск) и «Сколково»	320
8.3.3. Рекомендации по применению средств мониторинга	322
8.4. Наблюдения за динамикой мерзлотных (криогенных) процессов...	323
8.4.1. Рельефообразующие процессы	323
8.4.1.1. Термокарст	324
8.4.1.2. Криогенное растрескивание и образование полигонально-жильных льдов	326

8.4.1.3. Сезонное и многолетнее пучение.....	327
8.4.1.4. Линейная эрозия.....	330
8.4.1.5. Речная боковая эрозия. Перестройка речной сети.....	331
8.4.1.6. Воронки газового выброса.....	333
8.4.1.7. Термоденудация на склонах.....	339
8.4.1.8. Крип, солифлюкция и оползни скольжения.....	341
8.4.1.9. Криогенные оползни скольжения (КОС).....	344
8.4.1.10. Термоабразия морских берегов.....	347
8.4.1.11. Мониторинг рельефообразующих ЭГП по материалам обработки данных БПЛА в пакетах Agisoft Metashape Professional и ГИС Спутник как общее методическое средство мониторинга ЭГП.....	354
8.4.2. Криогенные процессы, не выраженные в рельефе.....	358
8.4.2.1. Осадка дневной поверхности.....	358
8.4.2.2. Заболачивание территории.....	359
8.4.2.3. Деградация мерзлоты и опускание ее кровли.....	360
8.4.2.4. Оценка состояния изученности и прогноза опасных криогенных процессов.....	361
8.5. Лабораторные исследования грунтов.....	364
8.5.1. Общие положения.....	364
8.5.2. Термины мерзлых грунтов.....	364
8.5.3. Свойства мерзлых грунтов.....	366
8.5.3.1. Водно-физические свойства грунтов.....	366
8.5.3.2. Теплофизические свойства грунтов.....	368
8.5.3.3. Механические свойства мерзлых грунтов.....	370
8.6. Геофизический мониторинг криолитозоны.....	380
8.6.1. Обоснование применения геофизических исследований в криолитозоне.....	380
8.6.2. Определение положения кровли мерзлоты.....	382
8.6.3. Мониторинг положения кровли мерзлоты и влажности в активном слое.....	383
8.6.4. Поиск областей повышенной льдистости и ледяных жил.....	384
8.6.5. Поиск подошвы мерзлоты.....	385
8.6.6. Выделение пластичномерзлых пород.....	385
8.6.7. Определение последствий техногенного влияния.....	386
8.6.8. Примеры геофизического мониторинга в криолитозоне.....	387
8.6.9. Методы проведения наблюдений и техническое обеспечение геофизических исследований.....	390

9. Управление государственной системой мониторинга вечной мерзлоты	397
9.1. Федеральное агентство по вечной мерзлоте при Правительстве РФ	397
9.2. Федеральный и региональные аналитические центры мониторинга вечной мерзлоты	401
10. Геокриологический прогноз в системе мониторинга вечной мерзлоты.....	405
10.1. Основные положения геокриологического прогноза	405
10.2. Методы геокриологического прогноза	412
10.3. Данные для геокриологического прогноза	419
10.4. Пример прогноза температур горных пород Западной Сибири в связи с глобальным потеплением	422
10.4.1. Динамическая карта температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в период 1960–2100 гг.	422
10.4.2. Температуры ММП в Пуровском и Надымском районах ЯНАО	426
10.4.3. Выводы.....	427
11. Кадры и поддержка образовательных учреждений, выпускающих геокриологов	428
11.1. Актуальность расширения геокриологического образования	428
11.2. Опыт, цель и задачи образовательных учреждений, выпускающих геокриологов.....	431
11.3. Образовательные учреждения в РФ, выпускающие геокриологов, и опыт их работы.....	433
11.4. Задачи образовательных учреждений, выпускающих геокриологов	433
11.5. Первоочередные практические шаги	434
11.6. Принципы организации геокриологического образования и привлечение коренного и местного населения АЗРФ	436
11.7. Взаимодействие с производственными организациями	437
11.8. Взаимодействие с научными учреждениями	438
11.9. Курсы повышения квалификации	440
11.10. Экономические показатели поддержки геокриологического образования	441
Заключение	443
Список использованных источников	449
Об авторах.....	462
Сведения о финансировании.....	463

Введение

Книга посвящена одной из актуальных проблем современной науки о вечной мерзлоте — созданию государственной системы мониторинга состояния криолитозоны, снижения рисков ее экономического освоения, предупреждения развития опасных мерзлотных (криогенных) процессов и экологических угроз, а также сохранения криогенных ресурсов и охраны окружающей среды.

Предполагается, что эта система должна основываться на региональных исследованиях геокриологических, гидрогеологических и геоэкологических условий территории в процессе проведения инженерно-геокриологической съемки (или экспресс-картирования) в масштабе 1:500 000.

Информация, характеризующая фоновое состояние многолетне-мерзлых толщ, и результаты геотехнического мониторинга должны собираться региональными центрами мониторинга и затем поступать в федеральный центр, где должен происходить ее анализ и разработка прогнозов состояния вечной мерзлоты.

Задача по научному обеспечению хозяйственного освоения Арктики усложняется процессами климатических изменений не только в нашей стране, но и во всем циркумполярном регионе.

Актуальность оценки состояния вечной мерзлоты

Актуальность выполнения работ по отслеживанию состояния вечной мерзлоты определяется несколькими факторами, а именно:

- изменениями теплового состояния вечной мерзлоты, которые происходят в последние десятилетия и которые еще не достигли своего максимума;
- инженерно-геологической, геокриологической и гидрогеологической изученностью криолитозоны, в том числе и мониторинговыми наблюдениями и исследованиями, информативность которых не соответствует масштабам и темпам освоения Арктики;
- устаревшими данными о состоянии криолитозоны, которые нуждаются в обновлении и актуализации. Наиболее полный документ — Геокриологическая карта СССР масштаба 1:1 000 000 [1991] отражает ситуацию 80-х гг. прошлого века;
- тем, что современное потепление климата в высоких широтах значительно повысило риски в строительстве и недропользовании, возросли экологические и эпидемиологические угрозы на осваиваемых территориях в АЗРФ (вспышка сибирской язвы на Ямале в 2016 г. [The link... 2020]). Более 40% оснований зданий и инженерных сооружений в криолитозоне имеет недопустимые деформации.

Современное состояние и пути совершенствования экономики в среднесрочной и долгосрочной перспективе будет определяться успехами развития топливно-энергетического комплекса и недропользования в целом на территории арктической криолитозоны.

Вечная мерзлота — составляющая криосферы, представляющая собой часть литосферы с отрицательной температурой, в большинстве случаев характеризующаяся наличием льда, незамерзшей воды и различных газов, а также их гидратов.

Территория вечной мерзлоты занимает около 11 из 17 млн кв. км, или 65% площади страны. Это огромное по площади геологическое тело различного состава и генезиса с отрицательной температурой, большая часть которых находится в многолетнемерзлом состоянии и содержит лед-цемент, ледяные прослои — шлиры и макроледяные тела мощностью до десятков и протяженностью до сотен метров, другая, меньшая часть содержит незамерзающие растворы разнообразного химического состава. По площади криолитозона России больше таких стран, как Канада, США или Китай.

Около 85% территории Арктической зоны РФ (около 3,5 млн кв. км) относится к областям сплошного распространения многолетнемерзлых горных пород. Мощность криолитозоны здесь составляет от нескольких десятков метров до полутора километров и в среднем изменяется от 250 м до 400 м. Температура вечной мерзлоты изменяется от близких к 0 °С значений до минус 16 °С. Льдистость мерзлых толщ нередко превышает 40–50% и более. Строительство в этих регионах осуществляется преимущественно по первому принципу, т.е. с сохранением мерзлого основания.

Устойчивость криолитозоны к колебаниям климата и техногенному воздействию при хозяйственной деятельности зависит, прежде всего, от температуры горных пород, от содержания и распределения в них подземного льда.

Изменения теплового состояния вечной мерзлоты в различных природных зонах обуславливают развитие мерзлотных (криогенных) процессов и явлений. Некоторые из них, такие как термоабразия, термоэрозия, наледи и оползни-сплывы, следует отнести к мощным рельефоформирующим факторам, способным за короткое время существенно изменить облик природного ландшафта. Другие процессы — пучение, термокарст и пр. — менее заметны, но пораженность ими отдельных регионов достигает 30–50%.

Гидрогеологические условия в криолитозоне дифференцируются в зависимости от сплошности распространения многолетнемерзлых пород. Так, в зоне сплошного развития мерзлых толщ гидрогеологические структуры и водоносные горизонты пресных подземных вод, как прави-

ло, проморожены, а подмерзлотные воды во многих случаях засолены. В зонах прерывистого и островного распространения мерзлоты мощности ММП сокращаются, а гидрогеологическая обстановка отличается значительной пестротой как в плане, так и в разрезе. Ограничение зон питания подземных вод за счет мерзлого водоупора отрицательно сказывается на водообмене и ресурсном потенциале месторождений подземных вод. При этом мерзлые приповерхностные горизонты могут препятствовать загрязнению эксплуатируемых водозаборов.

Инженерно-геологические условия и свойства дисперсных мерзлых грунтов в основном определяются величиной льдистости, засоленности и температурным режимом в годовом и многолетних циклах.

Существующая Стратегия освоения АЗРФ. В вечной мерзлоте и под ней находится значительная часть минерально-сырьевых ресурсов страны — золото, олово, ртуть, алмазы, нефть, газ и т.п. Независимо от способов и технологии добычи этих полезных ископаемых, на поверхности земли и в недрах происходят значительные геоэкологические изменения. Эти изменения мало контролируемы, опасны и разрушительны как для естественной среды, так для инженерных объектов и традиционных социумов.

В феврале 2013 г. во исполнение Основ государственной политики Российской Федерации в Арктике (2008 г.) Президентом страны утверждена Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года (далее — Стратегия). Правительством в сентябре 2016 г. утвержден план ее реализации, который предусматривает совершенствование условий деятельности российских компаний на арктическом шельфе, сохранение и развитие российского ледокольного флота, создание новых портово-производственных комплексов и модернизацию арктических портов, развитие транспортного сообщения. Изменяется подход к развитию Арктики — он должен стать проектным. Для этого выделено восемь «опорных зон опережающего экономического развития»: Кольская, Архангельская, Ненецкая, Воркутинская, Ямало-Ненецкая, Таймыр-Туруханская, Северо-Якутская и Чукотская.

В настоящее время принята новая стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г. Стратегия разработана в целях реализации Основ государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года, утвержденных Указом главы государства 5 марта 2020 г. Стратегия определяет основные направления, задачи и меры по развитию Арктической зоны, а также механизмы, этапы и ожидаемые результаты их реализации. Цели развития Арктической зоны страны связаны в первую очередь с повышением качества жизни 2,5 млн граждан, проживающих в Аркти-

ческой зоне, а также с ростом экономики арктических регионов, развитием Северного морского пути как глобального транспортного коридора. К основным проблемам, вызовам и угрозам, формирующим риски развития Арктической зоны и обеспечения национальной безопасности, отнесены интенсивное потепление климата, сокращение численности населения, отставание значений показателей качества жизни от общероссийских значений, низкий уровень доступности качественных социальных услуг и благоустроенного жилья в отдаленных населенных пунктах, в том числе в местах традиционного проживания и хозяйственной деятельности малочисленных народов. Вместе с тем отмечается высокий уровень риска из-за воздействия вредных производственных и метеорологических факторов, условий труда, повышенный уровень профессиональной заболеваемости по сравнению с другими регионами страны, отсутствие системы господдержки завоза в Арктическую зону топлива, продовольствия и других жизненно необходимых товаров по доступным ценам, низкий уровень развития и высокая стоимость создания транспортной инфраструктуры, а также неконкурентоспособность субъектов предпринимательской деятельности из-за более высоких издержек, отставание сроков развития инфраструктуры Северного морского пути и ряд других негативных моментов.

К приоритетным направлениям развития Арктической зоны относятся:

- комплексное социально-экономическое развитие региона;
- развитие науки и технологий;
- создание современной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры;
- обеспечение экологической безопасности;
- международное сотрудничество в Арктике;
- обеспечение безопасности и охрана государственной границы РФ в Арктике.

Влияние криолитозоны на формирование экологической обстановки при недропользовании и промышленном освоении является определяющим. Однако, несмотря на чувствительность криолитозоны при недропользовании, строительстве и эксплуатации промышленных и гражданских объектов, создании рекреаций и т.п., до сих пор не существует государственной программы комплексного ее изучения. Эта опасная ситуация сложилась в то время, когда хозяйственная деятельность начинает развиваться в ранее необжитых, труднодоступных и малоизученных регионах криолитозоны, на которые государство и общество возлагают большие надежды как на источник благосостояния и в отношении которых несут особую ответственность за сохранность природных геосистем и благоприятное экологическое состояние.

В подготовке, написании и обсуждении отдельных разделов настоящей работы, а также консультациях и предоставлении материалов, кроме перечисленных в титуле авторов, принимали участие следующие специалисты: В. Н. Андрианов, Н. М. Бердников, к.г.-м.н. С. Н. Булдович, д.г.-м.н. А. А. Васильев, А. Г. Гравис, д.г.н. М. Н. Григорьев, к.г.н. А. А. Губарьков, д.г.-м.н. В. Г. Кондратьев, к.г.н. П. Я. Константинов, А. А. Коротков, Ю. В. Коростелев, д.г.-м.н. А. В. Кошурников, к.г.-м.н. Л. Н. Крицук, д.г.-м.н. М. О. Лейбман, С. Н. Окунев, к.г.-м.н. В. В. Оленченко, к.г.-м.н. Е. Н. Оспенников, к.г.-м.н. О. Е. Пономарева, д.г.-м.н. Ф. М. Ривкин, к.т.н. А. Г. Скворцов, к.ф.-м.н. М. С. Судакова, к.г.-м.н. О. Д. Трегубов, А. М. Царев, Н. В. Ястреба, д.т.н. Р. В. Чжан, д.г.н. А. Н. Федоров, А. О. Васильева, Э. Д. Николайчук.

1. Современный климат и состояние вечной мерзлоты

1.1. Основные понятия

Геокриология — это наука о мерзлой зоне литосферы. Ее называют также мерзловедением, или наукой о мерзлых горных породах. Основоположник мерзловедения М. И. Сумгин давал такое определение: «Мерзлыми породами, грунтами, почвами называются такие породы, грунты, почвы, температура которых ниже 0°C , независимо от состояния и содержания в них воды». Выдающиеся ученые Н. И. Толстихин и Н. А. Цытович предложили свое определение: «Мерзлыми породами, грунтами, почвами называются породы, грунты, почвы, имеющие отрицательную или нулевую температуру, в которых хотя бы часть воды перешла в кристаллическое состояние». Такое определение мерзлой породы принимается большинством специалистов. Геокриологию можно рассматривать как часть криологии, науки о природном холоде, объектом которой является криосфера. Криология же изучает холод Вселенной.

Вода широко распространена в космосе и является важнейшим агентом геологических процессов. Вода находится и в составе планет, звезд и комет. Поэтому криосфера не уникальное явление. Криосфера — оболочка Земли с отрицательной температурой (ниже 0°C) в пределах атмосферы, гидросферы и литосферы, характеризующаяся существованием или возможностью присутствия льда. Криосфера в составе литосферы, или мерзлая зона литосферы, называется криолитозоной. Криолитозону, существующую долгое время, называют вечной мерзлотой. Вечная мерзлота достигает большой глубины в Антарктиде (свыше 4 км) и Субарктике (около 1,5 км).

Если мерзлые породы существуют более двух лет, такие породы обычно именуются многолетнемерзлыми породами (ММП), или, как называл их П. А. Кропоткин, а еще раньше А. Д. Миддендорф, «вечной мерзлотой» [Сумгин и др., 1940]. Следует подчеркнуть условность минимального времени существования многолетнемерзлых пород, потому что перелетки, а не вечная мерзлота, могут существовать дольше. Важны среднесезонные условия территории. Перелетками называют мерзлые породы, возникшие в результате сезонного промерзания, не протаявшие в течение лета и способные просуществовать несколько лет. По аналогии с ними выделяются перезимки, талые породы, возникшие в результате сезонного протаивания, не промерзшие в течение зимы и также способные просуществовать несколько лет.

По нашему мнению, название «вечная мерзлота», наряду с многолетнемерзлыми породами, вполне удачно. Основатель геокриологии (мерзловедения) Михаил Иванович Сумгин (1873—1942) определял его как учение о вечной мерзлоте и мерзлых грунтах, но понимал при этом слово «вечная» как длящаяся века. Понятие «вечная мерзлота» объединяет, как за рубежом, кроме мерзлых пород (т.е. пород, находящихся при отрицательной температуре и содержащих лед) также морозные (ниже 0 °С, но не содержащие воды и, соответственно, льда; термин введен П. Ф. Швецовым) и охлажденные (ниже 0 °С, но не содержащие льда из-за минерализации воды) породы. В нее можно включить и толщи криогидратов газов, которые могут находиться при положительной температуре, но по физическим свойствам близки к мерзлым породам. Указывая на различие между оттаявшими и непромерзавшими породами, П. Ф. Швецов предложил первые из них называть талыми, а вторые — немерзлыми.

Грунты — горные породы, почвы, техногенные образования, представляющие собой многокомпонентную и многообразную геологическую систему и являющиеся объектом инженерно-хозяйственной деятельности человека (по Е. М. Сергееву и СП 25.13330.2012).

Многолетнемерзлые грунты или породы (ММГ или ММП) — горные породы, почвы, техногенные образования, представляющие собой многокомпонентную и многообразную геологическую систему, имеющие отрицательную или нулевую температуру, в которых хотя бы часть воды перешла в кристаллическое состояние, и являющиеся объектом инженерно-хозяйственной деятельности человека (в соответствии с определением мерзлых пород и грунтов выше).

Вечная мерзлота — толща горных пород, включающая мерзлые (т.е. породы, находящиеся при отрицательной температуре и содержащие лед), морозные (ниже 0 °С, но не содержащие воды и, соответственно, льда) и охлажденные (ниже 0 °С, но не содержащие льда из-за минерализации воды) горные породы. Это определение М. И. Сумгина, полностью соответствующее также англоязычному термину «permafrost». Иногда ее называют «многолетняя криолитозона». Кроме того, в нее, по-видимому, можно включить и толщи криогидратов газов, которые могут находиться при положительной температуре, но по физическим свойствам близки к мерзлым породам.

Мониторинг вечной мерзлоты (или мониторинг криолитозоны) представляет собой межведомственную систему регулярных наблюдений за температурами грунтов и криогенными процессами, сбора, накопления, обработки, анализа информации, оценки, прогноза и управления состоянием вечной мерзлоты в естественных условиях и на освоенной территории. Мониторинг криолитозоны является составной частью (подсистемой) комплексной системы мониторинга окружающей природной среды.

Деградация многолетнемерзлых грунтов (не вечной мерзлоты, охлажденные и морозные породы не «деградируют») — сокращение площади распространения и мощности многолетнемерзлых грунтов, связанное с изменением климата, условиями теплообмена на поверхности, влиянием деятельности человека. Критерием определения активной деградации являются: повышение температуры в толще вечной мерзлоты под влиянием природных или техногенных факторов, фиксируемое ниже слоя годовых колебаний температуры пород; увеличение глубины сезонного протаивания и образование непромерзшего горизонта (перезимка) в подошве сезонно-талого слоя (СТС), по сути замещение СТС сезонно-мерзлым слоем (СМС); формирование нестационарного температурного режима многолетнемерзлых грунтов с отрицательным градиентом температуры пород в верхних (до 100 м) горизонтах вечной мерзлоты; поднятие нижней границы вечной мерзлоты.

Состояние вечной мерзлоты (многолетнемерзлых грунтов) может быть стационарным, если среднегодовые температуры на глубине нулевых годовых амплитуд не изменяются в многолетнем (более 12 лет) цикле, деградационным, если температуры повышаются более 12 лет, и аградационным, если температуры в течение этого срока понижаются. Глубина проникновения температурных колебаний на поверхности зависит от периода: суточные — первые десятки сантиметров, годовые или сезонные — 10–20 м (так называемая «глубина нулевых годовых амплитуд»); для 11-летнего солнечного цикла — ~30 м; для 40-летнего цикла — ~65 м; 65-летнего цикла — ~80 м; 300-летнего цикла — ~175 м).

1.2. Изменения климата

В последние десятилетия все большую актуальность приобретает проблема изучения глобального изменения климата и оценка его природных и социально-экономических последствий. Значительные последствия потепления, ожидаемые в Арктике, связаны с потенциальной угрозой качественных и количественных изменений криолитозоны. Наряду с наметившимся ростом среднегодовой температуры воздуха на Земле отмечается также и рост атмосферных осадков, что в криолитозоне связано с увеличением мощности снежного покрова и с повышением температуры верхней части мерзлых толщ, увеличению глубины сезонного оттаивания и сокращению площади распространения ММП.

Климатическая система Земли изменяется в результате сложных нелинейных взаимодействий между ее отдельными компонентами (атмосфера, гидросфера, криосфера, биосфера и деятельный слой суши), а также под влиянием внешних воздействий, таких как солнечная активность, извержения вулканов и хозяйственная деятельность человека.

Глобальные климатические изменения подвержены цикличности. В изменениях климата выделяются длиннопериодические циклы с периодами в сотни тысяч — миллионы лет и короткопериодические, охватывающие короткие циклы — от циркадных до внутривековых.

С целью оценки и прогноза изменений климата Земли в мире разработано множество моделей, наиболее достоверными из которых являются сложные трехмерные модели общей совместной циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Начиная с 1994 г. наиболее активно развивается проект сравнения объединенных моделей изменения климата CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), сценарии которого постоянно корректируются на основе оценочных докладов Межправительственной группы экспертов по изучению климата при ООН (МГЭИК). Анализ результатов моделирования глобальных климатических изменений показывает значительные количественные и качественные различия между модельными расчетами, что ставит под сомнение доминирующую роль теоретических моделей в прогнозе изменения климата и указывает на необходимость их проверки путем сравнения с прогнозами, построенными по эмпирическим данным.

Помимо отсутствия надежных долгосрочных прогнозов климатических изменений, во многом остаются дискуссионными и сами причины изменения климатических условий, равно как и возможность получения достоверных оценок последствий глобального потепления.

Значительная часть климатологов объясняет современное глобальное потепление климата преимущественно естественными причинами. Они обусловлены положительной ветвью естественных циклических колебаний, укладываемой в вековой цикл колебания климата, который составляет период ориентировочно 70–100 лет. Также значительную роль играют климатические ритмы среднего и малого порядков, совпадающие с циклами волновой солнечной активности продолжительностью 5–6, 11, 22 и 44 года. По мнению этой группы исследователей, антропогенное влияние на климат не может привести к его значительному изменению, существенно выходящему за рамки естественной изменчивости. Подтверждением является тот факт, что инструментальные наблюдения за температурой воздуха во многих регионах Земли за последние 100 лет фиксируют не только ее повышение, но также и понижение.

В отдельных регионах земного шара изменения климатических характеристик значительно отличаются от среднего глобального значения. На фоне общего потепления выделяются районы, не укладываемые в общую схему глобального потепления. К примеру, в период 1980–2000 гг. не зафиксированы существенные изменения температуры воздуха в Фенноскандинавии, а в восточной части Северной Америки и в Северной Атлантике наблюдалось даже некоторое похолодание климата. Понижение

среднегодовых температур на $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ зафиксировано и на побережье моря Баффина. Незначительное летнее похолодание отмечено и в некоторых пунктах наблюдений на территории России (Тикси, Сеймчан и др.).

Влияние неантропогенных факторов на современный климат, главным образом, обусловлено изменением потока солнечной радиации, вулканической активностью и состоянием Мирового океана.

Воздействие солнечной радиации на климатическую систему Земли с середины XVIII в. по настоящее время изменилось на $0,05\text{ Вт/м}^2$ и составило 2% по отношению к антропогенному радиационному воздействию $2,29\text{ Вт/м}^2$. В прошлом самое значительное уменьшение приходящего к Земле потока солнечной радиации происходило в период минимума Маундера (вторая половина XVII в.) и продолжалось около 50 лет. Уменьшение активности Солнца вызвало похолодание, с которым связывают так называемый Малый ледниковый период. Чтобы оценить, насколько такое уменьшение активности Солнца может повлиять на антропогенное потепление, было выполнено исследование с моделью климата, в которой поток солнечной радиации уменьшался на 0,25% по сравнению с современной величиной. Такое уменьшение было наиболее вероятным в период минимума Маундера. Результаты расчетов показали, что если аналогичный минимум солнечной радиации возникнет в середине XXI в., это может замедлить глобальное антропогенное потепление и уменьшит повышение приземной глобальной температуры воздуха на $0,24\text{--}0,26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако при увеличении потока солнечной радиации до первоначальной величины потепление восстановится и будет таким же, как при исходном сценарии.

При крупных извержениях вулканов в атмосферу выбрасывается большое количество сульфатного аэрозоля, который может оказывать значительное влияние на климат на временных масштабах от года до нескольких лет. В XX в. извержения вулканов Агунг, Эль-Чичон и Пинатубо оказали наиболее заметное влияние на колебания глобальной температуры воздуха. Более того, азиатский и африканский летние муссоны некоторое время были слабее после извержения Пинатубо в 1991 г. Реакция влагооборота атмосферы на крупные извержения вулканов происходит очень быстро, и связанные с этим негативные последствия могут проявляться около года.

Океан оказывает сильное влияние на атмосферу и ее изменения. В последние десятилетия общее теплосодержание океана непрерывно увеличивалось. Влияние океана наиболее заметно проявляется в высоких и умеренных широтах Северного полушария на масштабах от сезона до десятилетий. Сложность прогноза естественных колебаний температуры океана связана с недостаточной изученностью процессов в океане. Далека от решения задача удовлетворительного описания процессов в экваториальных и тропических областях океана, где формируются яв-

ление Эль-Ниньо, 60–70-летние колебания в Северной Атлантике и тихоокеанская десятилетняя осцилляция.

В настоящее время в научной литературе активно обсуждается наблюдаемая в последние полтора десятилетия «приостановка» глобального потепления: наблюдаемый тренд средней глобальной температуры оказался меньшим, чем средний тренд, полученный в моделях СМIP3, использованных в Четвертом оценочном докладе МГЭИК. Результаты исследований свидетельствуют, что тренды в данных наблюдениях за короткие периоды (десятилетия) могут быть в большей степени обусловлены собственной изменчивостью климатической системы, в значительной мере определяемой естественными колебаниями океана, чем внешним воздействием. Это же свойственно и модельным расчетам.

Согласно, например, Пятому оценочному докладу МГЭИК, наблюдаемое в 1998–2014 гг. уменьшение тренда повышения приземной температуры по сравнению с периодом 1951–2012 гг. приблизительно в равной мере обусловлено уменьшением радиационного воздействия и охлаждением атмосферы в результате естественной внутренней изменчивости, включая возможное перераспределение тепла в океане.

Гораздо более многочисленные сторонники второго направления полагают, что основной причиной современного потепления климата является антропогенное влияние. Гипотеза антропогенного повышения температуры воздуха основана на известном парниковом эффекте углекислого газа в атмосфере, обусловленном поглощением излучения в видимой и инфракрасной областях спектра.

Теория антропогенного изменения глобального климата имеет почти двухвековую историю, впервые идея о механизме парникового эффекта изложена Ж. Фурье в 1827 г., получила развитие в работах С. Аррениуса в конце XIX в. и активно развивается до настоящего времени.

По существующим представлениям, антропогенное потепление должно обладать рядом специфических черт, важнейшими из которых являются характерные изменения годового и суточного цикла, заключающиеся в большем росте температуры воздуха в зимний период и в ночное время. Такие изменения подтверждаются инструментальными наблюдениями.

В последние годы появились представления о том, что потепление климата за счет парниковых газов будет частично компенсироваться за счет накопления в атмосфере концентраций серосодержащих аэрозолей, увеличивающих альбедо земной поверхности. Однако аэрозоли этого типа, в отличие от парниковых газов, имеют ярко выраженное региональное распределение, и, по имеющимся оценкам, в Арктике их воздействие незначительно и в прогнозных оценках не учитывается.

Инструментальные наблюдения показывают, что содержание парниковых газов в атмосфере за счет антропогенных источников неизмен-

но увеличивается. При этом их увеличение четко коррелируется с повышением температуры воздуха как в прошлом, так и в настоящее время и предполагается в будущем, несмотря на то что взаимосвязь потепления климата с увеличением концентрации CO_2 в атмосфере прямо не доказана и все прогнозные построения об изменениях климата остаются пока лишь предположениями.

Возрастание концентрации парниковых газов отмечается с 1850 г. и на сегодняшний день составляет 0,005%. Прогнозные оценки увеличения содержания CO_2 в атмосфере говорят о возможности его увеличения к 2100 г. от 1,5 до 2 раз. Сценарии изменения эквивалентного содержания CO_2 , учитывающего его количественное содержание и радиационные свойства, различаются весьма существенно. Наиболее известные из опубликованных зарубежными авторами сценарии потепления климата, обусловленного увеличением парниковых газов, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

**Различные сценарии потепления климата при удвоении
в атмосфере парниковых газов**

Автор	Год предполагаемого удвоения CO_2	Прогноз повышения температуры воздуха, °С	Тренд температуры воздуха, °С/год
Washington	2025	3,0	0,028
Clark	2030	2,5	0,062
Bolin	2030	3,5	0,58
Murphy	2065	2,5	0,033
Cubash	2090	2,5	0,025
Manabe	2100	8,0	0,073

Исходя из приведенных в таблице данных, можно считать, что наиболее вероятное значение тренда температуры воздуха, обусловленное повышением содержания в атмосфере Земли парниковых газов, находится в пределах 0,025–0,13 °С/год. Эти значения соответствуют двум крайним сценариям потепления климата.

Не менее значительное потепление прогнозируется в рекомендациях Межправительственной группы экспертов по изменению климата при ООН (МГЭИК), которые оценивают повышение температуры к 2100 г. на 1,0–3,5 °С, причем, согласно большинству прогнозов, наиболее значительные изменения будут происходить в северных широтах. Последний (пятый) оценочный доклад МГЭИК, выпущенный в 2014 г., констатирует, что с вероятностью более 95% влияние человека было доминирующей причиной потепления, наблюдаемого с середины XX в.

Согласованность наблюдаемых и расчетных изменений во всей климатической системе, включая глобальные и региональные значения температуры, температуру тропосферы и стратосферы, глобальный влагооборот, глобальный баланс энергии, изменения в криосфере и Мировом океане, также указывает на то, что наблюдаемые изменения климата вызваны в первую очередь увеличением концентраций атмосферных парниковых газов вследствие хозяйственной деятельности человека. При этом амплитуда и пространственная структура наблюдаемого потепления в разных компонентах хорошо согласуются с ожидаемым по модельным расчетам откликом климатической системы Земли на антропогенные и естественные внешние воздействия (рис. 1.1, рис. 1.2, см. с. I цв. вклейки).

1.2.1. Глобальные изменения климата

Основной особенностью современных изменений глобального климата является потепление конца XX — начала XXI в., зафиксированное начиная со второй половины 1970-х гг. Этому периоду предшествовали период потепления 1910–1940 гг. и сравнительно небольшое похолодание с 1940 до 1970-х гг. Основной индикатор современных климатических изменений — глобальная, т.е. осредненная по всему земному шару, приповерхностная температура воздуха. Согласно данным Рабочей группы по объединенным моделям (WGCM) Всемирной Программы исследования климата (WCRP), средняя скорость потепления для земного шара составляет 0,166 °C/10 лет за 1976–2019 гг. и 0,075 °C/10 лет за 1901–2019 гг.

В последнее десятилетие наблюдается определенное замедление глобального потепления: глобальная температура колеблется на уровне достигнутых высоких значений. Однако начало XXI в., в среднем по земному шару, остается самым теплым 20-летием за всю историю инструментальных наблюдений.

Согласно большинству имеющихся оценок, наиболее значительные изменения климата Земли происходят в области высоких широт Северного полушария. Если линейный тренд среднегодовой температуры воздуха за период с 1976 по 2012 гг. для земного шара составил плюс 0,16 °C за 10 лет, то для Северного полушария — плюс 0,32 °C за 10 лет. Мониторинг климата приземной атмосферы Северной полярной области (СПО) ведется как для области в целом, так и для отдельных ее частей (рис. 1.3, см. с. II цв. вклейки) на основе постоянно пополняемой базы приземных метеорологических данных для полярных районов.

Ниже приведена оценка изменения температуры воздуха и количества осадков СПО за период 1936–2019 гг. Исходными данными послужили данные наблюдений 250 стационарных метеорологических стан-

ций, а также данные, поступающие с дрейфующих буев Международной программы арктических буев.

В течение всего периода с 1936 по 2019 гг. наблюдается статистически значимый (на 5%-м уровне значимости) положительный линейный тренд среднегодовой температуры как в целом для Арктики, так и для отдельных ее широтных зон. Линейное (по тренду) повышение температуры воздуха за 84 года составило соответственно 1,60, 1,85 и 1,68 °C. Для отдельных климатических районов значимый тренд в среднегодовой температуре воздуха прослеживается во всех районах. Потепление за 84 года составляет в разных районах от 1,34 до 2,52 °C.

Временные ряды пространственно осредненных аномалий среднегодовой температуры воздуха для различных районов Северной полярной области и их линейные тренды за весь период с 1936 года, а также за последние тридцать и десять лет, представлены на рис. 1.4. Оценки температурных аномалий получены относительно рекомендованного ВМО стандартного базового периода 1961–1990 гг.

В течение последних тридцати лет (1990–2019 гг.) температура росла во всех регионах Арктики. В целом для Северной полярной области линейный рост среднегодовой температуры составил около 2,43 °C за 30 лет (или 0,81 °C/10 лет).

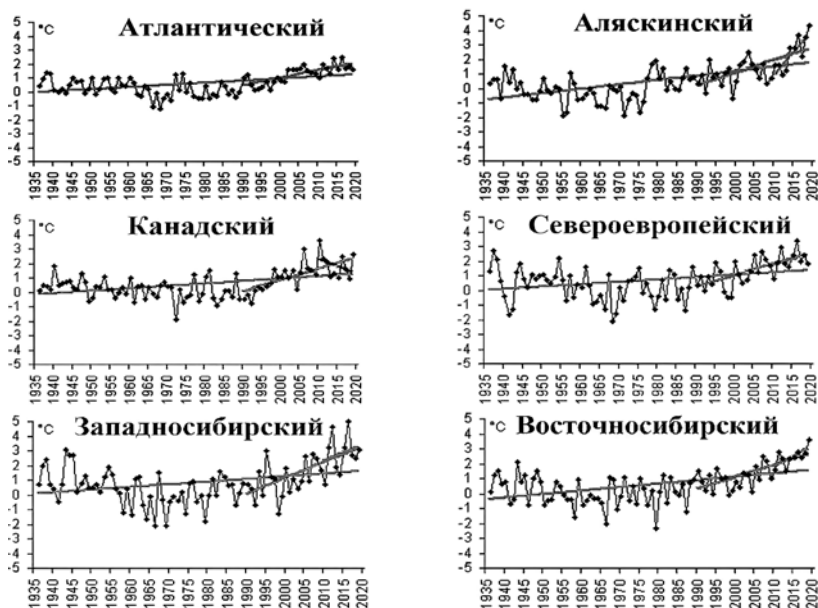


Рис. 1.4. Линейные тренды аномалий среднегодовой температуры воздуха для отдельных районов Арктики за различные периоды (1936–2019 гг.; 1990–2019 гг.; 2010–2019 гг.)

Еще более значительное повышение приповерхностной температуры воздуха отмечено в морской Арктике (в области распространения морского льда) и на побережьях арктических морей, где в течение 1936–2019 гг. повсеместно знак тренда температуры также положительный. В последнем 30-летнем периоде потепление на побережьях морей составило от 2,31 °C в северной части Гренландского и Норвежского морей до 4,74 °C на побережье Карского моря.

Средние значения приповерхностной температуры воздуха в зимние и летние месяцы с 1951 по 2019 годы приведены на рис. 1.5.

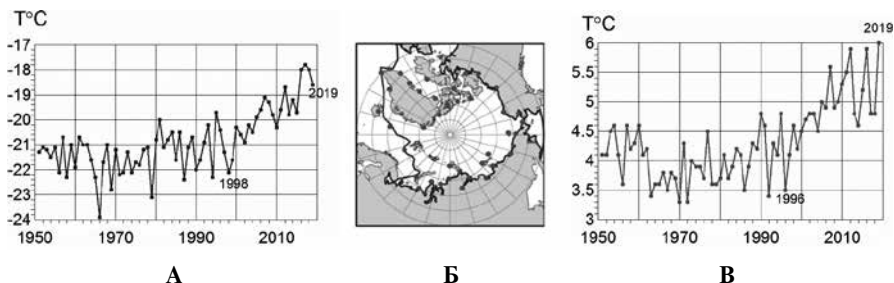


Рис. 1.5. Средняя за декабрь–февраль (А) и за июнь–август (В) температура воздуха по данным 41 станции в морской Арктике (Б) за период 1951–2019 гг.

Вторым важным индикатором глобальных климатических изменений, в значительной степени определяющим состояние криолитозоны, является рост атмосферных осадков, особенно в зимний период.

В многолетних изменениях годовых сумм осадков за период 1936–2019 гг. в северных широтах наблюдается тенденция их статистически значимого увеличения со средней скоростью около 3 мм/10 лет. При этом рост осадков преимущественно отмечается в канадско-европейском секторе, включая Атлантику, и, в основном, в холодный период года.

Тенденция к некоторому убыванию осадков обнаружена в Чукотском районе и в районах арктических морей азиатского сектора Арктики в течение всего года. Более всего рост осадков выражен в южной части Североевропейского района (14,0 мм/10 лет для осадков холодного периода и 17,6 мм/10 лет для годовых сумм), а уменьшение — в Восточно-Сибирском и Чукотском морях (13,1 и 13,6 мм/10 лет для годовых сумм осадков). Оценки трендов в изменении сезонных и годовых сумм осадков с 1936 по 2019 г. по северным (70–85° с.ш.), южным (60–70° с.ш.) частям климатических районов Арктики, а также для районов в целом представлены в табл. 1.2.

Значительное увеличение объема выпадающих в зимнее время осадков приводит к росту мощности снежного покрова и дополни-

тельному отепляющему его влиянию на температурный режим ММП. Кроме того, на значительной части Арктики установлена устойчивая тенденция к уменьшению продолжительности залегания снежного покрова со средним трендом 2,03 дней/10 лет. Максимальные за последние 60 лет отрицательные аномалии продолжительности залегания снежного покрова (в среднем на 12,7 дня короче нормы) зафиксированы зимой 2018–2019 гг. в Российском и Североευропейском секторах Арктики.

Описанные выше тенденции глобальных климатических изменений будут сохраняться и на протяжении XXI в., что подтверждают практически все существующие модели глобального климата, разработанные в рамках пятой фазы проекта взаимосравнения объединенных моделей изменения климата атмосферы и океана (CMIP5) и на результатах которого основан Пятый оценочный доклад МГЭИК.

Таблица 1.2.

Оценки линейного тренда регионально осредненных сезонных и годовых сумм осадков за период 1936–2019 гг.

Район, широтная зона	Холодный период		Теплый период		Год	
	<i>b</i>	<i>D</i> , %	<i>b</i>	<i>D</i> , %	<i>b</i>	<i>D</i> , %
Атлантический	6,95	24,7	–0,36	4,1	6,59	21,8
Североевропейский	11,11	75,5	1,13	13,0	12,24	67,2
Западносибирский	5,39	59,0	–0,95	11,9	4,44	30,4
Восточносибирский	0,31	6,2	–1,39	21,8	–1,08	15,1
Чукотский	–2,79	23,2	–2,03	23,6	–4,62	34,4
Аляскинский	1,90	16,1	–1,60	12,4	0,30	3,7
Канадский	–0,14	2,5	1,46	30,7	1,32	23,8
60–70° с.ш.	5,03	47,3	0,27	6,0	5,30	43,9
70–85° с.ш.	1,69	33,8	–0,79	18,7	0,90	10,9

Примечание: *b*, мм/10 лет — коэффициент линейного тренда, *D*, % — вклад тренда в полную дисперсию.

Согласно этому докладу, в XXI в. средняя глобальная температура будет повышаться при всех сценариях и к 2081–2100 гг. по отношению к базовому периоду 1986–2005 гг. составит от 1,8 °С до 4,8 °С для различных сценариев радиационного воздействия. Также будет сохранена тенденция к значительному увеличению количества выпадающих в зимний период осадков.

1.2.2. Изменения климата в РФ

Анализ климатических изменений свидетельствует, что одним из основных параметров, подтверждающих изменение климата в Арктической зоне страны, являются значения среднегодовых температур воздуха в различных регионах за период метеорологических наблюдений. Проанализированы данные метеорологических наблюдений за последние десятилетия на территории криолитозоны России. Наиболее полный и проверенный массив климатических параметров имеется на сайте <http://meteo.ru/data> Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации. За последние десятилетия произошли существенные климатические изменения. При этом потепление может сопровождаться увеличением общего количества осадков и величины снежного покрова [Малкова и др., 2018; Пономарева и др., 2018; Дубровин и др., 2019; Васильев и др., 2020; Дроздов и др., 2011, 2012].

В соответствии с принятым в климатологии районированием Арктической зоны были рассмотрены четыре основных климатических сектора Арктики: Европейский, Западно-Сибирский, Восточно-Сибирский и Чукотский. Общее количество метеостанций с длинными рядами наблюдений более 50 лет составило 44 станции.

На рис. 1.6–1.10 представлены изменения среднегодовых, средне-летних и среднезимних значений температуры воздуха за весь период наблюдений по упомянутым регионам, а также осредненный ход этих температур по Арктической зоне в целом. В табл. 1.3 приведены осредненные значения среднегодовых температур по регионам за периоды до 1999 г. и с 2000 по 2019 г.

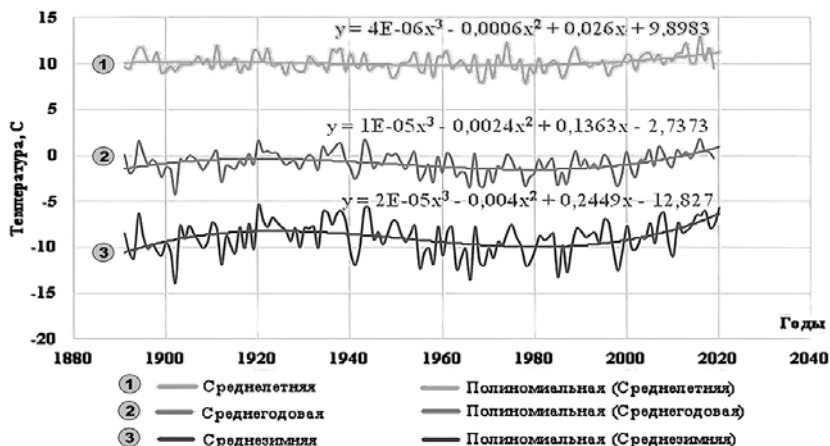


Рис. 1.6. Изменение температуры воздуха в Европейском секторе АЗРФ за период с 1883 по 2019 г. (среднегодовые значения и полиномиальные аппроксимации)



Рис. 1.7. Изменение температуры воздуха в Западно-Сибирском секторе АЗРФ за период с 1883 по 2019 г. (среднегодовые значения и полиномиальные аппроксимации)



Рис. 1.8. Изменение температуры воздуха в Восточно-Сибирском секторе АЗРФ за период с 1886 по 2019 г. (среднегодовые значения и полиномиальные аппроксимации)

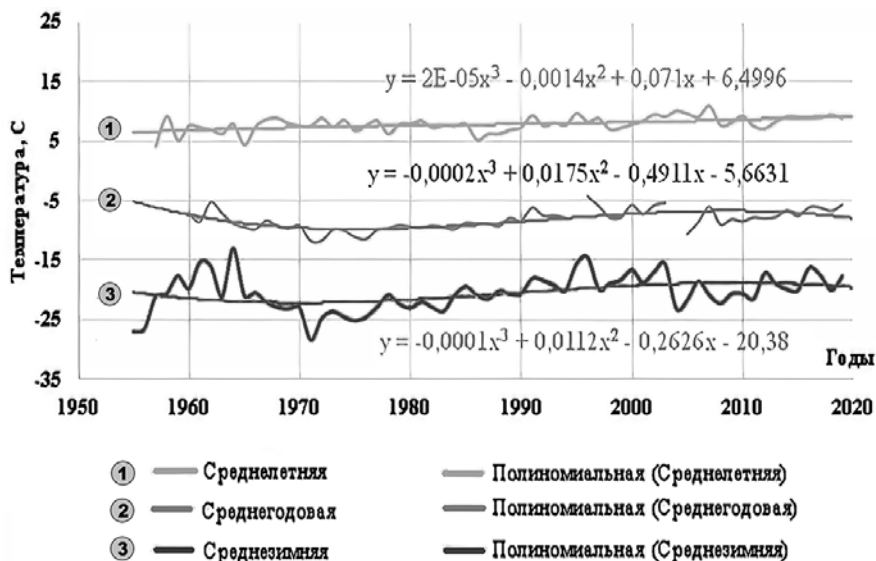


Рис. 1.9. Изменение температуры воздуха в Чукотском секторе АЗРФ за период с 1955 по 2019 г. (среднегодовые значения и полиномиальные аппроксимации)

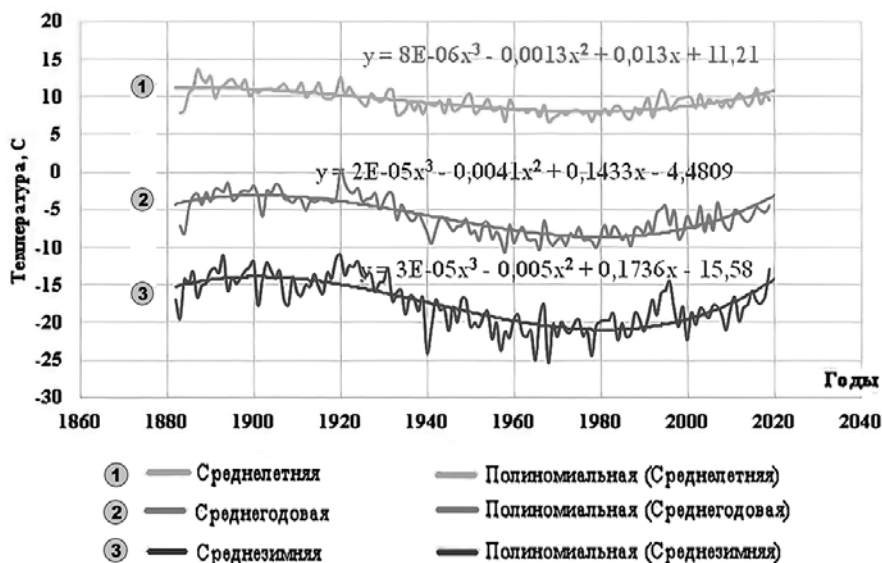


Рис. 1.10. Изменение температуры воздуха по арктической зоне АЗРФ за период с 1885 по 2019 г. (среднегодовые значения и полиномиальные аппроксимации)

Таблица 1.3.

Изменение среднемноголетних температур воздуха по климатическим секторам Арктики за период наблюдений

№ п/п	Регион	Кол-во станций	Период наблюдений		Изменение
			1883—1999 гг.	2000—2019 гг.	
1	Европа	10	−1,00	−0,14	0,86
2	Зап. Сибирь	13	−6,89	−5,47	1,41
3	Вост. Сибирь	18	−10,00	−10,02	−0,02
4	Чукотка	3	−8,74	−7,24	1,50
	Ср. по всем				0,94

Анализ текущих климатических изменений в западном секторе криолитозоны России демонстрирует непрерывное, хотя и не монотонное, потепление климата. Среднемноголетний (за последние 30 лет) тренд изменения среднегодовой температуры воздуха составляет 0,05 °C/год для севера Западной Сибири и 0,08 °C/год для Европейского Севера.

Современная среднегодовая температура воздуха по данным метеостанций Российской Арктики повысилась относительно нормы на 0,9—1,8 °C, а в среднем на 1,4 °C. При этом значения индекса протаивания изменились в среднем на 6 град-мес., еще больше изменились значения индекса промерзания — на 11 град-мес, т.е. произошло потепление как в теплый, так и в холодный период года примерно на 10% относительно значений периода климатической нормы.

Отмечаются достаточно синхронные изменения среднегодовой температуры воздуха в различных районах Российской Арктики. В качестве примера на рис. 1.11 (см. с. II цв. вклейки) показан ход изменения среднегодовой температуры воздуха по трем метеостанциям: Марре-Сале, Тазовское (север Западной Сибири) и Болванский (Европейский Север). При межгодовой вариации значений температуры воздуха в 1...5 °C, обращает на себя внимание практически синхронное чередование периодов похолодания и потепления и заметное повышение среднегодовой температуры воздуха с конца 1990-х гг.

Анализ текущих климатических изменений убедительно показывает непрерывное, хотя и не монотонное, потепление климата. Для оценки пространственно-временных закономерностей были разработаны картографические модели скорости (тренда) изменения среднегодовой температуры воздуха для территории криолитозоны России за различные временные интервалы [Малкова, 2010; Малкова и др., 2015, 2017, 2018]. Рассматривался тридцатилетний период климатической нормы (с 1960 по 1990 г.), период современных изменений с 1990 по 2018 г. и продолжительный период с начала 60-х гг. по 2018 г. На всех моделях была принята

единая легенда, и по скорости изменения среднегодовой температуры воздуха выделены три градации: низкий тренд, менее $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (зеленый цвет на картах); средний тренд $0,03...0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (желтый цвет на картах); высокий тренд, более $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (красный цвет на картах). Оказалось, что в период климатической нормы (рис. 1.12, А, см. с. III цв. вклейки) для обширных районов Арктики (Европейская часть, Западная и Средняя Сибирь, Дальний Восток) был характерен низкий тренд изменения среднегодовой температуры воздуха. Практически на всей территории Субарктики наблюдался средний тренд изменения среднегодовой температуры воздуха. Территории с высокими скоростями изменения среднегодовой температуры воздуха были распространены локально и занимали менее 10% всей площади криолитозоны России. Значения тренда для этого периода по разным метеопунктам изменялись от $0,001$ до $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а среднее значение в целом по всей криолитозоне для периода климатической нормы **составляло $0,031\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$** .

Если рассматривать последующий современный период времени (с 1990 по 2018 г.), то обращает на себя внимание существенное перераспределение трендов изменения среднегодовой температуры воздуха по сравнению с периодом климатической нормы. Теперь высокие скорости изменения климата охватили практически всю Арктическую зону и Дальний Восток, средние тренды наблюдаются неширокой полосой в субарктических районах, а низкие тренды характерны только для южных районов криолитозоны России (рис. 1.12, Б, см. с. III цв. вклейки). При этом разброс значений трендов для различных метеопунктов несколько вырос по сравнению с периодом нормы и составляет $0,001...0,15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а среднее значение по всей криолитозоне **возросло до $0,052\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$** .

При разработке карты трендов среднегодовой температуры воздуха за продолжительный период, который охватывает 1960–2018 гг., получилась совершенно иная, сглаженная картина практически повсеместного распространения трендов в пределах средних значений (рис. 1.12, В, см. с. III цв. вклейки). Интервал изменения многолетних трендов для различных метеостанций значительно сузился по сравнению с двумя другими рассмотренными периодами и составляет $0,015...0,061\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Среднее значение тренда в целом для криолитозоны России за этот период составляет $0,038\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Т. е. чем для более продолжительного периода мы проводим осреднение параметров, тем менее существенным оказывается изменение климата.

Возможно, перемещение центра климатического потепления в XXI в. к арктическому побережью послужило одной из причин активизации негативных процессов в мерзлых толщах в этот период — резкому повышению температуры ММП, увеличению глубины сезонного прота-

ивания, активному развитию криогенных процессов (термокарста, термоэрозии, солифлюкции).

При этом амплитуда изменения температуры воздуха не имеет сколько-нибудь выраженной тенденции к сокращению или увеличению, хотя существенно колеблется год от года в широких пределах, достигающих 20°C по каждой метеостанции (рис. 1.13, см. с. III цв. вклейки).

Если посмотреть, как изменяется во времени дата осеннего и весеннего перехода через 0°C , то видно, что наблюдается повсеместное увеличение теплого периода. Так, например, для мыса Болванский осенний переход через 0°C наступает примерно на неделю позже (не 17 октября, а 24 октября), а весенний переход — на неделю раньше (не 19 мая, а 12 мая). Следует заметить, что в последние три года наступление холодного периода стало наблюдаться несколько раньше, уже в первую неделю октября (рис. 1.14). Даты перехода температуры воздуха через ноль мы получаем с графиков суточных изменений температуры воздуха.

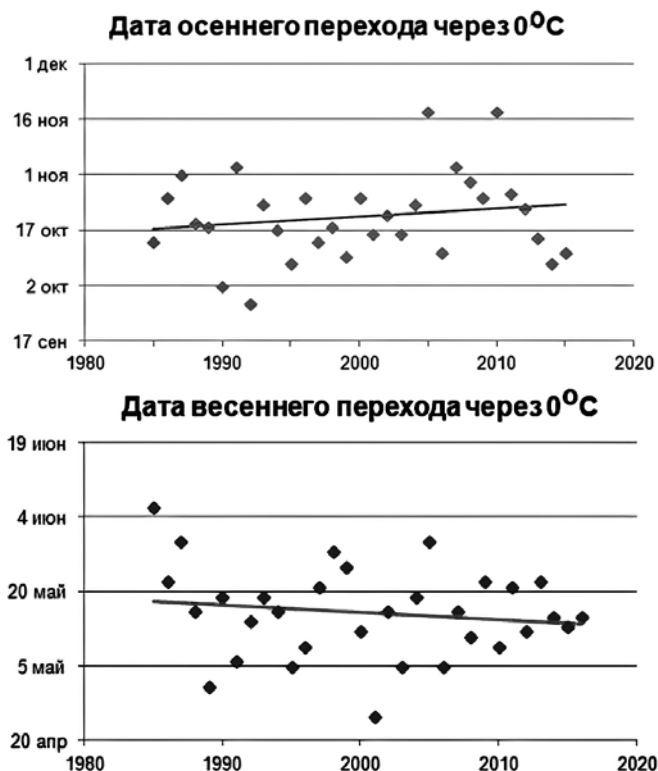


Рис. 1.14. Тенденции изменения даты осеннего и весеннего перехода температуры воздуха через 0°C (метеостанция Болванский)

Изменение высоты снежного покрова по данным метеостанций, расположенных вблизи действующих объектов геокриологического мониторинга, за прошедшие годы XXI в. показано на рис. 1.15 (см. с. IV цв. вклейки). Только для метеостанции Болванский наблюдается заметное повышение максимальной мощности снега от 40–50 см в начале века, до 70–80 см в последние годы. Этот фактор, очевидно, способствовал увеличению темпов потепления в верхних горизонтах пород на геокриологических стационарах Европейского Севера. Для регионов Западной Сибири такая тенденция увеличения мощности снега не характерна, но колебания мощности снега оказываются весьма значительными и могут достигать в разные годы 40–60 см и, соответственно, оказывать разнонаправленное влияние на термический режим пород СТС и ММП.

Проведенный анализ показал, что среднегодовая температура воздуха в криолитозоне России на протяжении последних десятилетий повышается, но имеет пространственно-временные изменения. Амплитуда температур воздуха начиная с 1970-х гг. остается практически неизменной. Снежный покров в этот же период колебался в широких пределах от 20 см до 60 см на Марре-Сале, до 80 см — на Болванском и до 100 см и более на Уренгойском и Надымском стационарах. Растительный покров откликается на потепление климата увеличением высоты растительности и возрастанием проективного покрытия. Так, наблюдения в типичной тундре показали, что высота важнейшей компоненты растительного покрова — сфагнома — возросла с 2 см (1978) до 6 см (2018), проективное покрытие увеличивалось с 16% до 24%. Суммарное содержание влаги в сезонно-талом слое изменялось мало и разнонаправленно. Произошедшие изменения климата неизбежно приводят к существенной перестройке температурного режима верхних горизонтов ММП во всех регионах криолитозоны России.

1.3. Изменения состояния вечной мерзлоты

1.3.1. Общие положения

В системе мониторинга криолитозоны изучению закономерностей формирования температурного режима горных пород отводится одно из главенствующих мест, поскольку именно температурный режим определяет как физико-механические свойства ММП, так и развитие и протекание в них многочисленных криогенных процессов, в том числе опасных. Температурный режим верхних слоев криолитозоны определяется структурой радиационно-теплогового баланса поверхности, тепловым влиянием наземных покровов (снег, растительность, поверхностная вода),

теплопотоком из недр Земли, а также процессами тепломассопереноса в массиве пород. Основные параметры, характеризующие температурный режим пород — среднегодовая температура пород деятельного слоя, среднегодовая температура ММП, амплитуда колебания температуры на различных глубинах в течение годового цикла, глубина проникновения годовых колебаний вглубь массива (так называемая глубина нулевых годовых амплитуд). При этом за глубину нулевых годовых амплитуд принимается глубина, на которой температура грунта изменяется в течение одного года не более $\pm 0,1^\circ\text{C}$ [Дубровин и др., 2019; Основы мерзлотного прогноза... 1974].

В зависимости от изменения значений среднегодовой температуры пород по глубине определяется стационарность температурного режима: в случае постоянства этих значений режим признается стационарным; при их изменении по глубине — нестационарным. Более высокие значения среднегодовой температуры пород до глубины нулевых амплитуд свидетельствуют о процессе потепления и наоборот. Климатические изменения в Арктике обусловили повсеместное повышение температурного режима мерзлых толщ во всех секторах, начиная с регионов Европейского Севера и заканчивая Чукоткой. Об этом свидетельствуют данные многолетних мониторинговых наблюдений, выполненные различными организациями, располагающими наблюдательной сетью скважин в Арктической зоне. В настоящее время наиболее полным массивом геокриологических данных располагают Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в западном секторе Российской Арктики и ИМЗ СО РАН — в восточном секторе. Для огромной территории криолитозоны такое размещение крайне разрежено. Наблюдательная сеть постоянно действующих на протяжении 40 и более лет стационаров и наблюдательных площадок является недостаточной, а ее развитие требует больших финансовых затрат и координации действий различных заинтересованных организаций, ведомств и правительства.

На современном этапе мониторинг криолитозоны в России развивается и расширяет количество точек наблюдений при технической поддержке и использовании универсальной программы исследований в рамках различных международных проектов. Около 20 лет осуществляется Международная программа по циркумполярному мониторингу деятельного слоя (CALM), которая охватывает 260 специальных площадок по всему миру, включая Антарктиду. Международный проект по термическому состоянию вечной мерзлоты (TSP) существует более 25 лет. При технической поддержке данного международного проекта организована единая база и глобальная сеть, превышающая 860 термометрических скважин глубиной от нескольких метров до нескольких десятков метров. Таким образом, международная наблюдательная сеть имеет ме-

нее продолжительные ряды наблюдений, а также далеко не всегда исследования на каждом объекте ведутся регулярно и непрерывно [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014].

Под влиянием современного потепления климата на обширных площадях криолитозоны России в последнее десятилетие сложились благоприятные условия для деградации многолетнемерзлых пород (ММП) с поверхности: отмечается повышение среднегодовых температур грунтов, частичное оттаивание мерзлоты сверху и замена сезонного протаивания сезонным промерзанием. Эти процессы многократно усиливаются на участках интенсивного техногенного вмешательства. Климатические изменения проявились и в ландшафтном облике геосистем, постепенно сдвигаются на север границы природных зон. Натурные данные свидетельствуют о повышении температуры мерзлых грунтов в северных регионах России, но интенсивность этих изменений имеет пространственную и временную изменчивость. Продолжительность рядов наблюдений на геофизиологических стационарах в настоящее время достигает 30–40 лет, систематические измерения на ряде объектов ведутся более 50 лет. Эти данные оказываются чрезвычайно полезными при изучении эволюции криолитозоны в условиях климатических изменений и техногенеза. Наличие и поддержание развитой системы мониторинга криолитозоны с достаточной длительностью рядов наблюдений позволяет осуществлять мерзлотно-климатические ритмические и трендовые оценки с высокой степенью достоверности [Павлов, 2008].

В результате многолетнего мониторинга собран обширный фактический материал, организованный в доступные базы данных и ГИС-пакеты, разрабатываются новые научные подходы к изучению природной среды Арктики. Полученные данные режимных наблюдений не только обеспечивают оценку текущего состояния криолитозоны как важнейшей составляющей части природной среды Арктики, но и дают возможность развития идеи о разном отклике ММП на климатические изменения, как в пределах разных биоклиматических зон, так и в различных криогенных ландшафтах, а также позволили получить ряд качественно новых научных выводов, разработать разномасштабные модели состояния и эволюции криолитозоны.

1.3.2. Пространственная изменчивость температурного режима криолитозоны и криогенных процессов в материковой части

Зона сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) занимает обширную территорию (рис. 1.16, см. с. IV цв. вклейки). На равнинах Европейского Севера России она протягивается поло-

сой шириною 100...200 км вдоль морского побережья. В Западно-Сибирской низменности ее южная граница примерно совпадает с Полярным кругом, в Восточной Сибири и Якутии она опускается до широты Байкала.

Общие закономерности распределения температуры пород контролируются региональными, секторальными и местными климатическими ландшафтными и геологическими условиями, а также их изменениями и характером временных трендов температуры воздуха и грунтов. При этом сами тренды изменения температуры и воздуха, и мерзлоты меняются отлично друг от друга как во времени, так и по территории криолитозоны России (рис. 1.17, см. с. V цв. вклейки).

В этом отношении показательным оказалось сопоставление многолетних режимных наблюдений в одинаковых природно-климатических и сходных ландшафтных и морфологических условиях (полого-волнистые равнины в южной тундре) на Европейском Севере России и в Западной Сибири. На Европейском Севере в южной тундре в большинстве криогенных систем в результате климатических изменений за период 1984–2019 гг. температура вечной мерзлоты на глубине 10 м во всех криогенных ландшафтах повысилась на 1,0–1,5 °С и составляет в настоящее время –0,5...–1 °С, при этом диапазон изменения среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород в различных ландшафтах сократился почти в 3 раза [Оберман, 2012]. И на Европейском Севере, и в Западной Сибири за прошедшие 30–40 лет наблюдается потепление вечной мерзлоты, однако абсолютные значения температур и их градиентов отличаются в 2–2,5 раза. Лишь для азональных отепляющих условий (зимнее скопление снега) результаты оказались идентичны (рис. 1.18, см. с. V цв. вклейки).

По соотношению времени промерзания пород со временем накопления минеральной и биогенной составляющих ММТ разделяются на сингенетические и эпигенетические. В большинстве своем мерзлые толщи имеют эпигенетическое (или эпикриогенное) происхождение, т. е. в эпоху похолодания промерзли ранее накопившиеся отложения. Содержание льда в этих породах примерно соответствует тому количеству воды, которое содержалось в них до промерзания. Иногда создаются условия для приноса дополнительной влаги к фронту промерзания. В этом случае в промерзающей толще образуются пласты льда толщиной от десятков сантиметров до десятков метров (рис. 1.19). Распространены пластовые льды преимущественно на Европейском Севере и в Западной Сибири.

Сингенетические (синкриогенные) мерзлые толщи промерзли одновременно с накоплением минеральных и/или биогенных пород. К ним относятся верхнеплейстоценовые и голоценовые пылеватые и глинистые отложения приречных и приморских равнин, а также шельфа (например,

в Якутии), эолово-элювиально-делювиальных склонов горных массивов, котловин крупных озер. Количество влаги в этих грунтах, промерзающих при накоплении, не ограничено. Лед насыщает породы и образует повторно-жильные льды, суммарный объем которых может достигать 80% и более (рис. 1.20, см. с. VI цв. вклейки).



Рис. 1.19. Пластовые льды мощностью несколько метров практически непосредственно под сезонно-талым слоем, Югорский полуостров, пос. Амдерма. Фото М. О. Лейбман

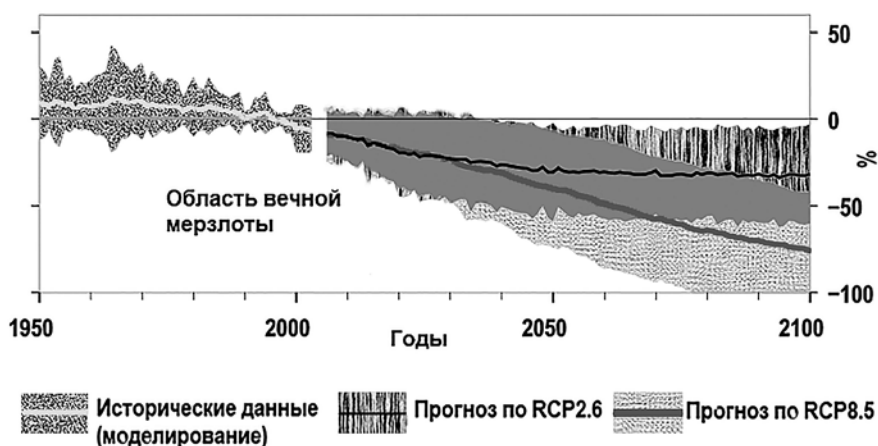


Рис. 1.21. Исторические данные (моделирование) и результаты прогнозных расчетов изменения площади распространения вечной мерзлоты в Северном полушарии с 1950 г. при низких (RCP 2.6) и высоких (RCP 8.5) сценариях выбросов парниковых газов (IPCC, 2019)

Эти льдистые толщи вовлечены в современные разрушительные криогенные процессы, происходящие при деградации вечной мерзлоты. На рис. 1.21 приведены результаты моделирования возможного измене-

ния площади распространения вечной мерзлоты в Северном полушарии (IPCC, 2019). В целом, изменения климата приводят к нарушению температурного режима верхних горизонтов вечной мерзлоты во всех регионах, в том числе и криолитозоны России. Связь температуры воздуха и температуры горных пород не является прямой, так как их значения формируются в результате радиационно-теплового баланса поверхности, но потепление климата ведет, как правило, к повышению температуры горных пород.

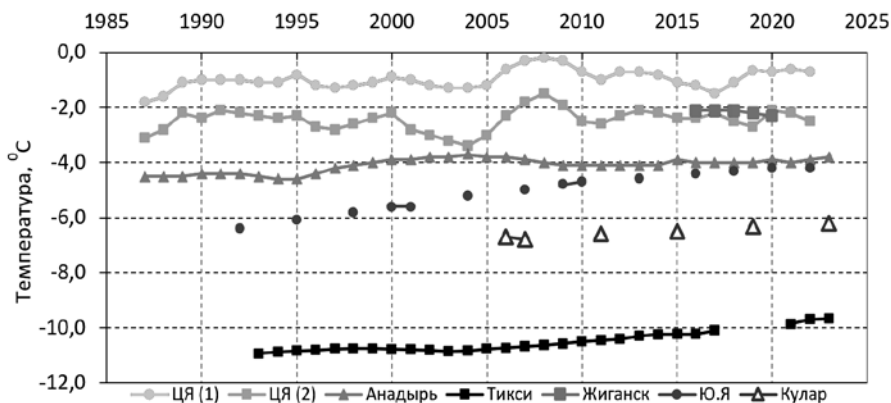


Рис. 1.22. Динамика среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м (Ц. Я.) и на глубине 20 м (остальные участки) в различных районах и типах местности Восточной Сибири: Ц. Якутия (1 — песчано-грядовый); Ц. Якутия (2 — межгрядово-низинный); Анадырь (типичная тундра); Тикси (типичная тундра); Южная Якутия (гольцовая область); Кулар (слаборасчлененная предгорная равнина)

Изменения климата в конце XX — начале XXI в. активны и в восточном секторе Российской Арктики — в Восточной Сибири, в Якутии и на Чукотке. Но реакция мерзлоты не везде однозначна (см. рис. 1.17 на с. V цв. вкладки). На рис. 1.22 показано изменение температуры кровли вечномерзлых пород ММП за период 1985–2019 гг. в районе нескольких метеостанций арктической зоны. Наибольший положительный тренд отмечен для района пос. Оленек (западный сектор арктической зоны Восточной Сибири) — $0,44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. Для района пос. Тикси (центральный сектор арктической зоны Восточной Сибири) он составил $0,31\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. Наименьшее повышение зафиксировано в районе г. Анадырь (Чукотский сектор арктической зоны) — $0,20\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. В отличие от температуры воздуха температура ММП во всех рассматриваемых пунктах повышалась менее интенсивно. Повышение температуры фиксируется на фоне незначительного увеличения высоты снежного покрова — от $0,8$ до $2\text{ см}/10\text{ лет}$. В отдельные годы с высоким значением

среднегодовой температуры воздуха наблюдалась небольшая мощность снежного покрова, что уменьшало влияние температуры воздуха на температуру ММП.

Особая ситуация отмечена с 2000 по 2010 г. в г. Анадырь, где сохранялся положительный тренд температуры воздуха, а изменение в динамике и сокращение высоты снегового покрова в этот период привело к понижению температуры даже на глубине 20 м (рис. 1.22). Как видно из графиков, в Анадыре максимум температуры ММП приходился на 2000–2006 гг., в то время как в Тикси с 2004 г. отмечено устойчивое повышение температуры.

В восточном секторе Российской Арктики влияние температуры воздуха на температуру мерзлоты сильнее проявляется на морских островах и в прибрежной полосе арктических морей, где из-за сильных ветров выше плотность снегового покрова и развит активный наземный перенос снега. В южных районах арктической зоны, относящихся к природным зонам лесотундры и северной тайги, где плотность снегового покрова небольшая и ветровой перенос развит слабо, преобладающее влияние на температуру горных пород оказывает многолетняя динамика высоты снежного покрова.

1.3.3. Наблюдения за состоянием вечной мерзлоты на арктическом шельфе

Оценка распространения, условий залегания, мощности, термического режима и деградации подводной мерзлоты выдвинулась в ряд приоритетных в последние десятилетия в связи с пониманием потенциала и роли подводной мерзлоты в глобальных изменениях климата за счет выделения парниковых газов при оттаивании многолетнемерзлых пород и разложении газогидратов на морском дне. С практической точки зрения изучение подводной мерзлоты представляет особый интерес в связи с ведущимся или предполагаемым нефтегазовым освоением арктического шельфа и необходимостью обеспечения устойчивой и безопасной эксплуатации объектов промышленной инфраструктуры, в первую очередь буровых платформ и систем транспорта продукта на шельфе и в береговой зоне. По современным представлениям многолетнемерзлые породы на шельфе арктических морей или субаквальные многолетнемерзлые породы (СММП) представляют собой реликтовые мерзлые толщи, сформировавшиеся в субаэральных условиях во время последнего криохрона (18–22 тыс. лет назад) или ранее и затопленные впоследствии в ходе фландрской трансгрессии (5–18 тыс. лет назад) — см. рис. 1.23, с. VI цв. вклейки. После перехода в субаквальное состояние толща многолетнемерзлых пород частично протая-

ла сверху и снизу. Сформировался современный облик СММП. Распространение и строение СММП на шельфе арктических морей изучено абсолютно недостаточно. Основные представления получены на базе результатов инженерно-геологического бурения [Мельников, Спесивцев, 1995; Рекант и др., 2009; Рокос и др., 2001; Рокос, Тарасов, 2007 и др.] в прибрежных районах. Несмотря на наличие целого ряда публикаций, основные характеристики СММП, включая достоверные границы распространения и условия залегания СММП до сих пор не установлены из-за отсутствия достаточной прямой геологической информации [Мельников, Спесивцев, 1995]. Поэтому на большинстве геокриологических карт границы распространения СММП проведены на основе экспертных оценок и/или простейших тепловых расчетов, а сами оценки применимы к картам мелкого масштаба. В последние десятилетия для изучения СММП активно привлекаются геофизические методы, из которых повсеместное распространение получила высокоразрешающая сейсмоакустика. В целом, геофизическая изученность арктических морей очень неравномерна, Баренцево и Карское море покрыты относительно густой сетью сейсмоакустических профилей, напротив, в восточном секторе Российской Арктики имеются лишь отдельные сейсмоакустические профили, а для Восточно-Сибирского и Чукотского морей сейсмоакустических профилей практически нет. Более или менее плотная сеть геофизических профилей, за исключением Восточно-Сибирского и Чукотского морей, стала основой для построения оценочных обзорных геокриологических карт арктических морей РФ. Примером может служить составленная в ВНИИ океангеологии геокриологическая карта, на которой помимо области распространения СММП указаны предположительные мощности мерзлых пород. При этом мощности оценены на основе простых тепловых расчетов без учета температур фазовых переходов, зависящих от засоленности отложений, тектонического строения, определяющего тепловой поток снизу, и динамики деградации СММП в связи с повышением придонной температуры. При построении карты были приняты во внимание незавершенные работы Я. В. Незвестнова по составлению прогнозной карты СММП восточно-арктических морей России [Неизвестнов, Соловьев, 1990]. Поэтому в части отображения области распространения СММП карта более или менее адекватно отражает реальную картину. Что касается мощности СММП, то приведенные на карте значения сильно завышены. На карте отображены области распространения сплошной, прерывистой и островной реликтовой мерзлоты на шельфе арктических морей. Карта основана на интерпретации немногочисленных данных морского бурения и высокоразрешающей сейсмоакустики. Карта вполне может быть использована в качестве обзорной, но не при-

менима для конкретной оценки распространения и условий залегания СММП в любом выбранном регионе Российской Арктики.

Температурный режим СММП Российской Арктики практически не изучен. Имеются лишь отдельные, во многом уникальные, данные наблюдений. Во многом это связано с трудностями обеспечения непрерывных наблюдений в условиях арктических морей с мощным ледовым покровом и осенними штормами, которые вызывают значительное переформирование рельефа морского дна и не обеспечивают сохранность самих наблюдательных скважин и установленной в них аппаратуры. Нам известны лишь два успешных случая успешной реализации систем мониторинга температурного режима СММП. Стивен Соломон (S. Solomon) с коллегами в апреле 2005 г. оборудовал несколько наблюдательных скважин в дельте Маккензи (Северо-Восточные территории, Канада) в области смерзания припайного льда на глубинах моря до 2,1 м и выполнил годичный цикл наблюдений [Solomon et al., 2008]. Результаты наблюдений приведены на рис. 1.24–1.26 (см. с. VII–VIII цв. вклейки).

Наблюдения показали, что термический режим СММП, представленных пресными отложениями дельты р. Маккензи, в данном регионе характеризуется отрицательными температурами по всей глубине. Температура пород в придонном слое составляет около $-0,2^{\circ}\text{C}$ и постепенно понижается до $-1,9^{\circ}\text{C}$ на глубине 10 м. Мощность слоя годовых теплооборотов составляет примерно 3,4 м, а амплитуда температуры в придонном слое достигает 30°C .

Другим успешным примером мониторинга СММП являются наблюдения за температурным режимом пород в районе Марре-Сале (Западный Ямал). Скважина расположена в 960 м от берега при глубине моря около 5 м [Дубровин и др., 2015]. На рис. 1.27–1.29 приведены термоизоплеты по скважине 15-14 за 2014, 2017 и 2018 гг. Такой характер температурной картины в течение пяти лет свидетельствует о высокой динамике теплового состояния мерзлых (охлажденных) толщ в пределах мелководного шельфа Карского моря дает основание говорить о необходимости расширения наблюдательной сети в пределах арктических акваторий и увеличения глубины и детальности исследований.

В целом, характер распределения температуры пород по глубине свидетельствует о нестационарном тепловом режиме пород, высокой степени зависимости от погодных условий и штормовой обстановке летнего периода. Так, активная динамика теплового поля (рис. 1.28) обусловлена теплым летом 2016 г. и штилевой погодой на акватории в течение 35 дней в июле-августе. В целом, активная перестройка температурного поля в этой области, как отмечается в работе В.А. Дубровина (2015), связана со сравнительно недавним переходом пород

из континентального в субаквальное состояние вследствие отступления берега.

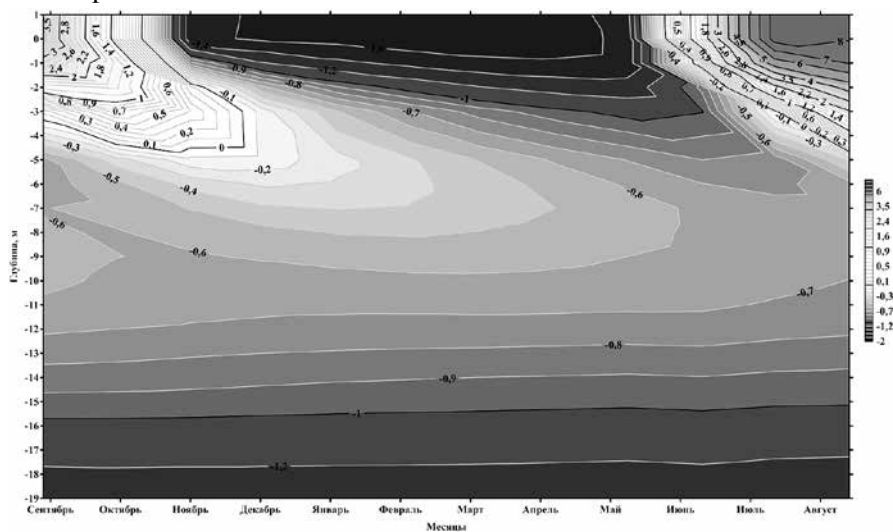


Рис. 1.27. Термоизоплеты по скважине № 15-14 за 2014–2015 гг. (мелководный шельф Карского моря в 960 м от берега, изобата 5 м)

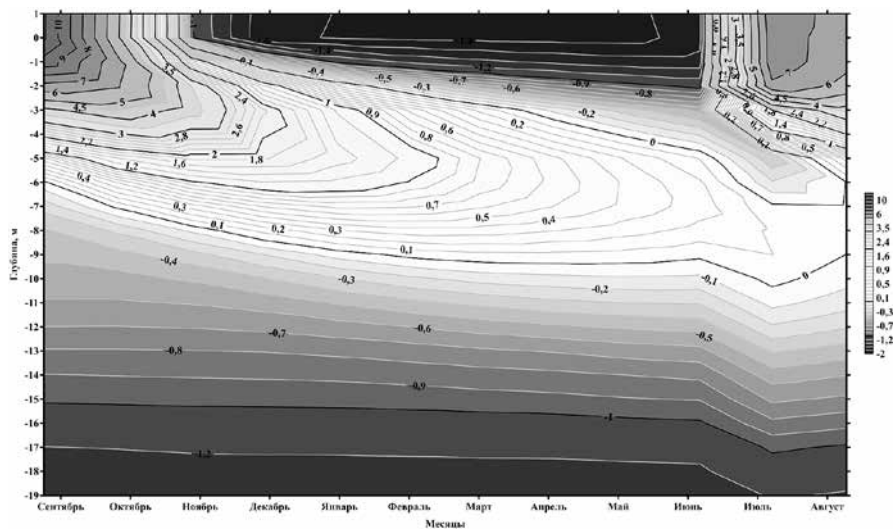


Рис. 1.28. Термоизоплеты по скважине № 15-14 за 2016–2017 гг.

Температуры СММП Российской Арктики были измерены при бурении нескольких инженерно-геологических скважин в ЮВ части Баренцева и Карском морях [Геокриологические условия... 2003; Мельни-

ков, Спесивцев, 1995; Рокос и др., 2019], а также в прибрежно-морской области моря Лаптевых [Григорьев и др., 2006].

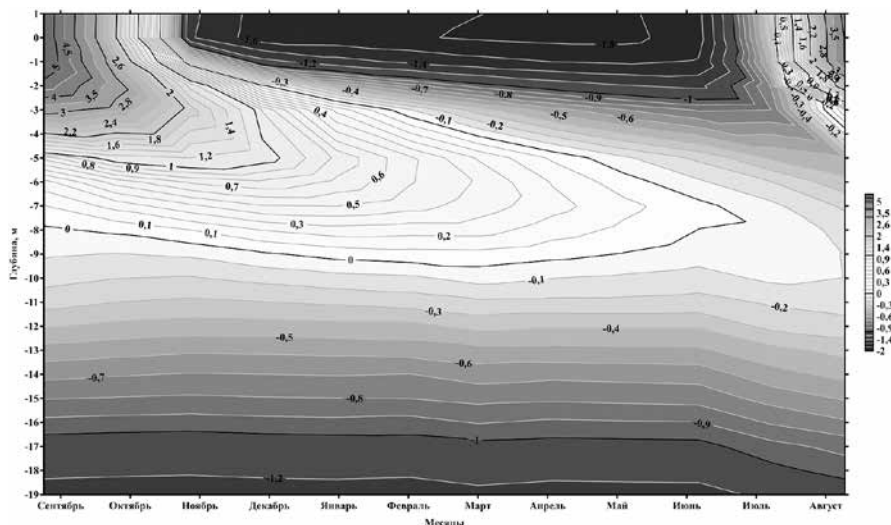


Рис. 1.29. Термоизоплеты по скважине № 15-14 за 2017–2018 гг.

В целом, можно констатировать, что сведения об СММП морей Российской Арктики имеют ограниченный и не систематизированный характер, часто опираются на экспертные оценки. Абсолютно необходима постановка НИР и проведение мониторинговых работ, направленных на получение достоверных характеристик криолитозоны на шельфе арктических морей России. Особенно актуальны эти исследования для прибрежно-морских областей и мелководного шельфа на территориях нефтегазового освоения Российской Арктики.

2. Основные риски освоения территории распространения вечной мерзлоты на современном этапе

2.1. Требования по обеспечению устойчивости зданий и инженерных сооружений в криолитозоне

Согласно действующему нормативу СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменениями № 1—4) [СП 25.13330.2012], мероприятия по обеспечению устойчивости зданий и инженерных сооружений регламентированы в соответствии со следующими требованиями:

«Основания и фундаменты зданий и сооружений (далее вместо термина “здания и сооружения” используется термин “сооружения”, в число которых входят также подземные сооружения), возводимых на территории распространения многолетнемерзлых грунтов, следует проектировать на основе результатов специальных инженерно-геологических изысканий, включающих специальные геокриологические и гидрогеологические изыскания с учетом конструктивных и технологических особенностей проектируемых сооружений, их теплового и механического взаимодействия с многолетнемерзлыми грунтами оснований и возможных изменений геокриологических условий в результате строительства и эксплуатации сооружений и освоения территории, устанавливаемых по данным инженерных изысканий и теплотехнических расчетов оснований.

Исходные данные для проектирования должны предоставляться в необходимом и достаточном объеме, регистрироваться и интерпретироваться специалистами, обладающими соответствующей квалификацией и опытом.

Проектирование должно выполняться квалифицированным персоналом, имеющим соответствующий опыт проектирования и строительства на многолетнемерзлых грунтах. При этом должны быть обеспечены координация и связь между ними и специалистами по инженерным изысканиям.

Используемые материалы и изделия должны удовлетворять требованиям северной строительно-климатической зоны.

При проектировании оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах следует учитывать местные условия строительства, требования к охране окружающей среды, а также имеющийся опыт проектирования, строительства и эксплуатации сооружений в аналогичных условиях.

Выбор строительных площадок и проектных решений оснований и фундаментов следует производить на основании технико-экономического сравнения возможных вариантов с оценкой их по приведенным затратам с учетом надежности.

Не допускается использование восстановленных стальных труб и других бывших в употреблении видов металлоконструкции при проектировании и строительстве зданий и сооружений с нормальным и повышенным уровнем ответственности, а также при строительстве и эксплуатации особо опасных, технически сложных и уникальных объектов.

Техническое обслуживание сооружения при эксплуатации и связанных с ним инженерных систем должно строго выполняться и обеспечивать его безопасность и рабочее состояние на весь срок эксплуатации.

Инженерные изыскания для строительства на многолетнемерзлых грунтах надлежит проводить в соответствии с СП 47.13330 и другими нормативными документами по инженерным изысканиям и исследованиям грунтов для строительства. Требования к инженерным изысканиям на многолетнемерзлых грунтах приведены также в [СП 11-105-97]. Проектирование оснований без достаточного инженерно-геологического обоснования не допускается.

При возведении нового объекта или реконструкции существующего сооружения на застроенной территории необходимо учитывать его воздействие на окружающую застройку с целью сохранения расчетного температурного режима многолетнемерзлых грунтов прилегающих территорий и предотвращения недопустимых деформаций существующих сооружений.

Соответствие состояния грунтов основания и фундаментов проектным требованиям при сдаче сооружения в эксплуатацию должно быть подтверждено результатами натурных наблюдений или испытаний, выполненных в период строительства согласно проекту геотехнического мониторинга.

При проектировании оснований и фундаментов уникальных зданий и сооружений или их реконструкции, а также сооружений повышенного уровня ответственности, в том числе реконструируемых в условиях окружающей застройки, необходимо предусматривать научно-техническое сопровождение строительства.

Научно-техническое сопровождение представляет собой комплекс работ научно-аналитического, методического, информационного, экспертно-контрольного и организационного характера, осуществляемых в процессе изысканий, проектирования и строительства в целях обеспечения надежности сооружений с учетом применения нестандартных расчетных методов, конструктивных и технологических решений.

Состав работ по научно-техническому сопровождению инженерных изысканий, проектирования и строительства оснований и фундаментов должен определяться проектировщиком и согласовываться заказчиком строительства. В состав работ научно-технического сопровождения могут быть включены:

- разработка рекомендаций к программе инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий;
- оценка и анализ материалов инженерных изысканий;
- разработка нестандартных методов расчета и анализа;
- прогноз состояния оснований и фундаментов проектируемого объекта с учетом всех возможных видов воздействий;
- прогноз влияния строительства на окружающую застройку, геологическую среду и экологическую обстановку;
- оценка геокриологических рисков;
- разработка рекомендаций к проекту геотехнического мониторинга;
- разработка технологических регламентов на специальные виды работ;
- выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;
- обобщение и анализ результатов всех видов геотехнического мониторинга, их сопоставление с результатами прогноза;
- оперативная разработка рекомендаций для корректировки проектных решений на основании данных геотехнического мониторинга при выявлении отклонений от результатов прогноза».

Работы должны быть согласованы с нормативами по инженерно-экологическим и инженерно-геодезическим изысканиям для строительства [СП 11-102-97; СП 11-104-97].

Мерзлые грунты обладают достаточно высокой прочностью при отрицательных температурах, но при тепловыделении от зданий грунты основания могут начать оттаивать, превращаясь в разжиженную массу, не способную обеспечить достаточную несущую способность. Вследствие неравномерных осадок появляются деформации, приводящие к постепенному разрушению сооружения.

Промерзание грунтов как сезонно-талых, так и немерзлых приводит к пучению, которое также может вызвать разрушения.

Для нормальной эксплуатации и долговечности здания, возводимого на мерзлых грунтах, необходимо правильно выбрать метод строительства и ряд мероприятий, учитывающих свойства грунтов основания.

На сегодняшний день используют два основных принципа строительства на мерзлых грунтах: 1) использование грунтов с сохранением их

мерзлого состояния; 2) использование грунтов с их оттаиванием (либо постепенное в процессе строительства и эксплуатации, либо предварительное оттаивание).

Оттаивание грунтов допускается при близких к 0 °С отрицательных температурах грунта, если это не ведет к недопустимому разупрочнению или разрушению основания, а сам процесс оттаивания, сопровождающийся деформациями, завершается быстро. В остальных случаях прибегают к сбережению мерзлого состояния грунта и даже его морозного закрепления.

Основные методы сбережения мерзлого состояния грунта и дополнительного охлаждения следующие:

- устройство теплоизоляции из природных и искусственных материалов (под зданиями, насыпями);
- устройство проветриваемых подполий под зданиями (циркуляция холодного воздуха зимой и экранирование летом);
- удаление снежного покрова (вокруг зданий, насыпей, снегозадерживающих конструкций — заборы, надземные коммуникации, зеленые насаждения);
- искусственное охлаждение различными типами активных или пассивных охладителей;
- каменные (глыбовые) наброски-насыпи на естественных и искусственных откосах;
- солнцезащитные экраны над поверхностью.

Наиболее эффективные из простых организационных мероприятий:

- вывоз снега с городских (застроенных) территорий;
- строгое соблюдение режима проветривания подполий;
- зимняя «холодная» продувка коробов и туннелей подземных коммуникаций;
- исключение утечек из теплонесущих коммуникаций;
- устройство мерзлотной завесы (на дамбах и плотинах).

Для борьбы с выпучиванием свайных, ленточных, плитных фундаментов применяют:

- увеличение нагрузки на фундаменты и удельного давления на их боковую поверхность;
- использование специальных засыпок в котловане возле фундаментов;
- заанкеривание фундаментов.

При неэффективности всех мер по борьбе с мерзлотными осадками или пучением прибегают к изъятию масс ненадежных грунтов, их замене непросадочными и непучинистыми грунтами (крупный песок, гравий и пр.) в объеме расчетной сферы взаимодействия.

2.2. Региональные опасности и риски строительства и эксплуатации городских и промышленных агломераций в криолитозоне страны

Многолетнемерзлые толщи в свете формирующихся в последние годы научных концепций и практических подходов следует рассматривать как своеобразный криогенный ресурс, рациональное использование которого обеспечивает экологически безопасное безаварийное функционирование природно-технических систем и социально-экономических объектов в криолитозоне и комплексное использование иных природных богатств северных территорий. Для этого необходимо знать закономерности формирования, развития и деградации криосферы во взаимодействии с другими средами, и в первую очередь с самой динамичной природной средой — атмосферой и ставшей уже фактором геологического развития Земли техносферой. Смена фазового состояния содержащейся в грунтах воды ведет к коренному изменению всех их свойств — прочностных, коллекторских, водоупорных, сорбирующих, химических и пр. Неожиданное или неконтролируемое оттаивание мерзлых пород может вызвать природные катаклизмы и катастрофы, а неквалифицированное техногенное вмешательство — многократное их усиление. Потепление последних десятилетий вызвало деградацию приповерхностных горизонтов мерзлых толщ на юге криолитозоны и повсеместную активизацию опасных криогенных процессов, которые разрушают природные ландшафты, представляют опасность для хозяйственных объектов, могут создавать тревожную эпидемиологическую обстановку. Инженерная деятельность в Арктике и Субарктике усугубляет природные опасности, и обществу приходится нести существенные затраты по ликвидации накопленного экологического ущерба.

Для районирования территории криолитозоны по условиям хозяйствования был использован интегральный пространственно-временной анализ. Взаимодействие во времени и в пространстве различных климатических изменений и геокриологических характеристик определяет степень опасности хозяйствования в криолитозоне. Поскольку возникновение природных климатических опасностей существенно меняется в пространстве и времени и имеет случайный характер, то его оперативная визуализация была реализована с помощью современных ГИС-технологий.

Предлагаемый подход к оценке рисков народнохозяйственного освоения позволил провести районирование территории криолитозоны с учетом специфики локальных геокриологических условий при различной вариабельности климатических факторов.

На состояние мерзлоты наибольшее влияние оказывает изменчивость таких характеристик климата, как среднегодовая температура воздуха, сезонные изменения температуры в зимний и летний период, количество осадков, в том числе толщина снежного покрова. Поэтому на первом этапе в ГИС-пакете была составлена тематическая карта пространственной изменчивости каждого климатического параметра в отдельности. Затем для интегрального анализа разнородные количественные величины приведены к единой балльной характеристике на основе оценочных шкал. Результирующая карта метеорологического риска изменений климатических параметров имеет сложную мозаичную структуру, но изменения климата в той или иной степени оказывают только тепляющее воздействие на криолитозону (рис. 2.1, см. с. VIII цв. вклейки).

Комплексное тепляющее воздействие на криолитозону произошедших климатических изменений имеет существенные пространственные различия и различную интенсивность, которая на карте показана различным цветом.

Области криолитозоны, имеющие от 1 до 3 баллов, можно отнести к **слабому** метеорологическому риску, они характерны для дельты р. Лена, северной и, частично, Южной Якутии. В общей сложности такие территории занимают 8% площади криолитозоны, они выделены на карте овалом синего цвета.

Области умеренных климатических изменений (4–5 баллов) охватывают значительно большие площади криолитозоны (63%). Сюда относятся обширные территории Средней и Восточной Сибири, частично юго-восточная часть Западной Сибири.

Западная и восточная части криолитозоны России попадают в область сильных климатических изменений (6–8 баллов) и занимают чуть менее 30% криолитозоны России (овалы красного цвета — очень высокий уровень метеорологического риска). Причем максимальный метеорологический риск по нашей оценке (7–8 баллов) характерен для севера Западной Сибири и Чукотки, здесь наблюдается тепляющее влияние на мерзлые толщи всех рассмотренных климатических параметров.

Отклик мерзлоты на климатические воздействия будет существенно зависеть от ландшафтных условий, литологического состава и теплофизических свойств пород. ММП в криолитозоне по-разному способны реагировать на произошедшие климатические изменения. Если использовать классификацию по тепловой инерции ММП, существующую в геокриологии, то пространственная изменчивость этого показателя может быть представлена в виде тематической карты инерционности ММП криолитозоны (рис. 2.2, см. с. IX цв. вклейки).

На карте отдельно выделены штриховкой горные территории и плато. Мы предполагаем, что тепловая инерционность здесь характеризует

рыхлые элювиальные, делювиальные и прочие отложения возвышенных участков и аллювий, пролювий и пр. межгорных впадин.

Сопоставление пространственных контуров на различных тематических картах осуществлялось в ГИС-пакете. Результатом проведенного анализа стало районирование территории криолитозоны по условиям хозяйствования (рис. 2.3, см. с. IX цв. вклейки).

Карта практически не имеет широтно-зональных границ, поскольку алгоритм расчета учитывает региональные особенности современного и прогнозируемого климата, в том числе изменение снежного покрова, а также пространственные особенности температурного режима ММП и неоднородное содержание льда в мерзлом грунте.

Области низкого и умеренного уровня природной опасности занимают около половины площади криолитозоны — и тяготеют к Средней и Восточной Сибири. А высокий и очень высокий уровень природной опасности наблюдается в равнинных районах Европейского Севера, Западной Сибири, на Дальнем Востоке и по южному обрамлению (рис. 2.4, см. с. X цв. вклейки).

2.3. Ожидаемый экономический ущерб при сохранении текущих схем хозяйствования в АЗРФ

2.3.1. Изменение температуры и оттаивание вечной мерзлоты — основные факторы ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям в АЗРФ

Как известно, вечная мерзлота покрывает около 24% суши в Северном полушарии и содержит почти половину всего органического углерода (вероятно, около 1700 млрд т) от его общего количества в почве планеты и в четыре раза больше, чем уже было выброшено людьми после промышленной революции [IPCC, 2014, 2023]. Даже если часть парниковых газов, сохраняющихся в мерзлоте и способных образоваться при ее оттаивании, попадет в атмосферу, это будет иметь серьезные последствия для всей климатической системы Земли. Температура воздуха в Арктике повышается гораздо быстрее, чем температура в среднем для планеты, и за последние 30 лет выросла примерно на 1,5...2,5 °С. В результате потепления к концу века может произойти протаивание от 30 до 85% верхних горизонтов вечной мерзлоты с разрушением инфраструктуры и необратимыми изменениями ландшафтов. Оттаивание мерзлоты может привести к появлению вредных микроорганизмов, как это случилось в 2016 г., когда вспышка сибирской язвы стала причиной госпитализации более 70 человек на Ямале, гибели ребенка и более 2300 северных оленей.

Климатические изменения являются причиной экономического ущерба [Hope, Schaefer, 2016; IPCC, 2014; Burke, et al., 2015; Yumashev, et al., 2019]. Было показано [Euskirchen, et al., 2013], что в XXI в. ущерб от дополнительного потепления, вызванного уменьшением альбеда из-за потери морского льда и снега, а также эмиссии метана, добавится к ежегодному ущербу от потепления, который оценивается от \$7,5 трлн до \$91,3 трлн ежегодно. Согласно [Yumashev, et al., 2019], оттаивание вечной мерзлоты добавит около \$70 трлн к общему ущербу, если планета нагреется на 3 °C к 2100 г. Даже если потепление составит только около 1,5 °C, дополнительно \$24,8 трлн будет потеряно в целом. По другим оценкам, оттаивание мерзлоты в Арктике будет стоить обществу \$43 трлн до конца столетия [Hope, Schaefer, 2015]. Считается, что проблемы оттаивания мерзлоты коснутся около 4 млн человек в мире и примерно 70% существующей инфраструктуры. При этом треть инфраструктуры и около 45% месторождений углеводородов пострадают в Российской Арктике [Hjort, et al., 2018]. Только для Аляски было показано, что потепление обойдется примерно в \$1,6–2,1 млрд ущерба до 2099 г. [Melvin, et al., 2017]. Одним из примеров является международный аэропорт в Гренландии, где около 300 м взлетной полосы недавно пострадало в результате осадки при оттаивании, а стоимость ремонта составит €270 млн, по данным строительной компании KJ Greenland. РБК сообщало, что Росприроднадзор оценил сумму экологического ущерба от разлива топлива летом 2020 г. на ТЭЦ-3 «Норникеля» почти в 148 млрд руб.

Действительно, в первую очередь пострадает устойчивость зданий и сооружений на вечной мерзлоте. Экономический ущерб в Российской Арктике к настоящему времени оценен в работе [Streletskiy, et al., 2019] и касается всей области криолитозоны России: он составит от 50 до 150 млрд руб. (\$2,3 млрд) в год. При этом был выбран наихудший (максимальный) сценарий климатического потепления. В работе говорится, что авторы оценивали изменение несущей способности грунтов. В качестве методологической базы оценки таких явлений использовались результаты, полученные ранее и основанные на авторских геотехнических моделях изменений многолетнемерзлых пород [Streletskiy, et al., 2012]. Кроме того, в работе [Порфирьев и др., 2019] рассматривается три сценария изменения устойчивости дорожной инфраструктуры под влиянием протаивания в девяти регионах Российской Арктики. Показано, что при инерционном (консервативном) сценарии развития дорожной инфраструктуры в 2020–2050 гг. капитальные затраты на поддержание ее устойчивости и снижение рисков разрушения под влиянием протаивания и деградации вечной мерзлоты составят в среднем не менее 14 млрд руб. в год, при умеренном и модернизационном сценариях — превысят

21 и 28 млрд руб. соответственно. Максимальные показатели будут характерны для Республики Саха (Якутия), Магаданской области и Чукотского АО.

В настоящей работе предпринята попытка оценки возможного ущерба от потери несущей способности фундаментов зданий и сооружений для различных сценариев потепления в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) к 2050 г.

2.3.2. Унифицированная методика оценки ущерба для секторов Российской Арктики

Методика оценки ущерба состояла из нескольких стадий: 1) оценивались возможные сценарии изменения температур воздуха в выделенных районах; 2) оценивались возможные изменения температур мерзлых грунтов; 3) оценивалось изменение несущей способности грунтов; 4) выполнялась оценка ущерба. Оценка проводилась отдельно для 39 муниципальных образований (МО) АЗРФ, которые характеризуются развitiем вечной мерзлоты.

2.3.2.1. Оценка температур воздуха в выделенных районах (МО)

Оценка возможных среднегодовых температур воздуха в выделенных районах (муниципальных образованиях) АЗРФ выполнялась на основе прогнозных данных Климатического центра Росгидромета «Изменение климата России в 21-м веке» (<https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke>) и сценариев изменения климата RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 [IPCC, 2014] (рис. 2.5, см. с. X цв. вклейки). При этом учитывался диапазон изменений среднегодовых температур воздуха по различным сценариям (табл. 2.1). В дальнейшем все три сценария учитывались как отдельные варианты, и определялся максимальный и минимальный ущерб по этим сценариям.

2.3.2.2. Оценка возможных температур мерзлых грунтов

Среднегодовая температура грунтов (СГТГ) отличается от среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) на величину общей сдвижки, которая складывается из влияния радиационной поправки, снега, растительности, водного покрова, температурной сдвижки и влияния атмосферных осадков. Общая сдвижка оценивалась двумя способами: расчетным с учетом возможных изменений параметров в связи с изменением климата и по данным об общей сдвижке, наблюдаемой в районах АЗРФ [Геокриология СССР, 1989]. Оба полученных значения сравнивались и в дальнейшем учитывались в оценке ущерба как различные варианты.

Таблица 2.1.

**Изменения среднегодовых температур воздуха на середину XXI в.
по различным сценариям для некоторых муниципальных образований
АЗРФ (пример для 7 МО)**

Муниципальные образования	Название метеостанции	Среднегодовая температура воздуха t в. ср., °С, в настоящее время и в соответствии со сценариями потепления к 2050 г.
Абыйский район	Усть-Мома	–13,2
	RCP 2,6	–10,8
	RCP 4,5	–10,1
	RCP 8,5	–9,3
Анабарский национальный (долгановский) муниципальный район	Саскылах	–14,1
	RCP 2,6	–11,7
	RCP 4,5	–11,0
	RCP 8,5	–10,2
Анадырский	Марково	–7,9
	RCP 2,6	–5,0
	RCP 4,5	–4,5
	RCP 8,5	–3,5
Билибинский муниципальный район	Илирней	–12,7
	RCP 2,6	–9,8
	RCP 4,5	–9,3
	RCP 8,5	–8,3
Верхнеколымский улус (район)	Зырянка	–10,5
	RCP 2,6	–8,1
	RCP 4,5	–7,4
	RCP 8,5	–6,6
Верхоянский район	Верхоянск	–14,5
	RCP 2,6	–12,1
	RCP 4,5	–11,4
	RCP 8,5	–10,6
Воркута	Воркута	–5,4
	RCP 2,6	–2,5
	RCP 4,5	–1,9
	RCP 8,5	–1,0

Расчет выполняется в соответствии с методикой, изложенной в [Основы мерзлотного прогноза... 2016]. При этом по грунтовым условиям

и по характеристикам грунтов, а также характеристикам покровов и других факторов, влияющих на температурный режим, выбирался реалистичный диапазон их изменения, и расчеты выполнялись для крайних значений выбранных диапазонов характеристик (табл. 2.2).

При этом предполагалось, что на строительных площадках и непосредственно под зданиями снежный и растительный покров отсутствует, что является типичным случаем для большинства зданий. Разница температур грунтов в естественных условиях и на застроенной (нарушенной) территории, а также разница между температурами воздуха и температурами грунтов на застроенной (нарушенной) территории назначалась в основном по [Геокриология СССР, 1989].

Таблица 2.2.

Диапазон (max и min) теплофизических характеристик грунтов, принятый в расчетах

Теплота таяния (замерзания) грунта, Дж/м ³ , L_v min	Теплота таяния (замерзания) грунта, Дж/м ³ , L_v max	Объемная теплоемкость талого грунта, Дж/(м ³ ·°C); min	Объемная теплоемкость талого грунта, Дж/(м ³ ·°C); max	Объемная теплоемкость мерзлого грунта, Дж/(м ³ ·°C); min	Объемная теплоемкость мерзлого грунта, Дж/(м ³ ·°C); max	Коэффициент теплопроводности талого грунта, Вт/(м·°C); min	Коэффициент теплопроводности талого грунта, Вт/(м·°C); max	Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/(м·°C); min	Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/(м·°C); max
8,368E+07	1,464E+08	2,720E+06	3,766E+06	2,510E+06	3,347E+06	1,10	1,30	1,20	1,70

2.3.2.3. Оценка изменения несущей способности грунтов

Для оценки изменения несущей способности грунтов принимается, что основная часть зданий и сооружений в АЗРФ построена по I принципу строительства с сохранением мерзлого основания грунтов. В качестве фундамента выбираются висячие сваи как наиболее распространенный вариант. Сначала оценивается их несущая способность в настоящий момент, которая, как предполагается, должна соответствовать несущей способности, определенной в проекте. Затем проводятся расчеты для всех возможных вариантов изменения температур грунтов, которые были рассмотрены ранее.

При этом учитывались заложенные в СП 25.13330.2012 допущения возможности повышения температур основания для песчаных и круп-

нообломочных грунтов на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для глинистых $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ без ущерба для несущей способности оснований. Таким образом, из прогнозного повышения температуры вычиталось $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для песчаных грунтов и $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ для глинистых грунтов, — там, где значение изменения температуры превышало один градус.

Величины несущей способности в настоящее время и в середине столетия в соответствии с прогнозом повышения температуры основания сравнивались, и, если сокращение несущей способности в результате потепления грунтов основания составляет 15%, фундамент здания считается потерявшим несущую способность в соответствии с п. 7.2.1 СП 25.13330.2012 и п. 5.7.2 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Эти разделы определяют коэффициент надежности по ответственности, принимаемый равным 1,2; 1,15 и 1,10 соответственно для сооружений геотехнических категорий 3, 2 и 1. Большинство зданий относится к категории 2, поэтому для оценки устойчивости выбрано значение уменьшения несущей способности на 15%.

Методика расчета несущей способности по СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах», в соответствии с правилами, заключается в следующем. Прежде всего, определяются расчетные характеристики механических свойств грунтов (длительной прочности). Расчет оснований фундаментов по первой группе предельных состояний (по несущей способности) производится исходя из условия [п. 7.2.1 СП 25.13330.2012]

$$F \leq F_u / \gamma_n,$$

где F — расчетная нагрузка на основание; F_u — несущая способность основания, определяемая расчетом, γ_n — коэффициент надежности по ответственности сооружения [7.2.2 СП 25.13330.2012]. При этом расчетные температуры грунтов T_z (на глубине z) и T_c (средней, эквивалентной температуре по глубине заложения сваи) определяются расчетом теплового взаимодействия сооружения с многолетнемерзлыми грунтами основания в периодически установившемся тепловом режиме с учетом переменных в годовом периоде условий теплообмена на поверхности, формы и размеров сооружения, глубины заложения и расположения фундаментов в плане, а также теплового режима сооружения и принятых способов и средств сохранения мерзлого состояния грунтов основания. В наших расчетах значения R_{af} (прочности смерзания грунта с материалом сваи) принимались при средней (эквивалентной) температуре грунта T_c в соответствии с п. 7.2.7 СП 25.13330.2012.

При расчетах многолетнемерзлых оснований по несущей способности расчетные температуры грунтов T_z и T_c принимались равными: T_c — максимальной в годовом периоде средней по глубине заложения фундамента z_d температуре многолетнемерзлого грунта в установившемся экс-

плуатационном режиме (эквивалентная температура грунта) при условии, что на глубине нулевых годовых амплитуд установилась температура СГТГ; T_z — температура многолетнемерзлого грунта на данной глубине z от его верхней поверхности, принимаемой для наших расчетов оценки ущерба равной СГТГ, т.е. считая, что сваи имеют достаточную длину, сравнимую с глубиной нулевых годовых амплитуд, что, как правило, соответствует действительности, особенно для тяжелых и больших зданий или инженерных сооружений. В наших расчетах, однако, мы не учитывали снижение прочности под нижним концом сваи, принимая, что несущая способность свайного фундамента в основном обеспечивается прочностью смерзания. Ввиду того, что под серединой сооружения температуры, как правило, выше, в расчет брались именно значения температур под серединой сооружения, и в этом случае коэффициент α_c по СП 25.13330.2012 оказывается близким к 0,5. Коэффициент k_1 теплового влияния сооружения изменяется в небольшом диапазоне и в среднем, по-видимому, может быть принятым равным 0,5. Температура начала замерзания грунта, T_{br} , °С, в целом находится в диапазоне от $-0,1$ до $-0,25$ °С и незначительно влияет на результаты расчетов, поэтому мы принимали ее равной $-0,15$ °С.

В первом варианте наших расчетов мы исходили из следующего. Нормативное значение среднегодовой температуры многолетнемерзлого грунта T_{on} определяется по данным полевых измерений температуры грунтов на опытных площадках с естественными условиями. Допускается значение T_{on} принимать равным температуре грунта на глубине 10 м от поверхности. Практически невозможно установить, каким образом в каждом конкретном случае изыскатели и проектировщики определяли расчетную среднегодовую температуру многолетнемерзлого грунта. Принимался оптимистичный вариант, что их оценки и расчеты были правильными, и она близка в настоящее время к фактической. О том, что, вероятнее всего, они ее занижали, свидетельствует значительное количество деформаций зданий и сооружений в АЗРФ. При этом, конечно, будущее рискует быть еще более пессимистичным, чем оценки, которые мы даем в настоящей работе.

При оценке изменений температур в МО АЗРФ нами были также использованы следующие фактические данные: разность среднегодовых температур мерзлых грунтов в естественных условиях и на территории застройки; разность среднегодовых температур воздуха и мерзлых грунтов на застройки в прошлом и в настоящее время, а также расчеты среднегодовых температур мерзлых грунтов в соответствии с методикой, изложенной в [Основы мерзлотного прогноза... 2016].

При этом наиболее сложной, на наш взгляд, является оценка изменения среднегодовых температур грунтов на территории застройки (нарушенной территории) по сравнению с температурами грунтов в естественных условиях. Так, для Норильского района установлено, что на

территории застройки при использовании I принципа строительства, с сохранением мерзлого состояния оснований, такое изменение температур грунтов составляет от -1°C до $+2^{\circ}\text{C}$ [Геокриология СССР, 1989], а для Якутска, например, по данным П. И. Мельникова, более характерно изменение температур грунтов на территории застройки около -2°C , т.е. преимущественно понижение температуры. В пос. Надежный в Норильском промышленном районе среднегодовая температура грунтов до застройки изменялась от -3 до -4°C , а после застройки под одним из зданий она составляла от $-3,1$ до $-5,1^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует об эффективности охлаждающей работы подполья, где, вероятно, отсутствовали растительный и снежный покровы. При застройке пос. Новый Город на участке площадки детского сада был удален почвенно-растительный слой, частично удален снежный покров, и температура повысилась на $0,4^{\circ}\text{C}$. На другом участке с теми же нарушениями температура, наоборот, понизилась на $0,6^{\circ}\text{C}$. Первые наблюдения за температурами грунтов под зданиями с проветриваемым подпольем в Якутске проводились еще Г. О. Лукиным в 1950–1956 гг., в результате которых было установлено, что наибольшее понижение температуры грунта под зданием происходит в первые 2–3 года после начала эксплуатации и составляет $3\text{--}4^{\circ}\text{C}$ на глубине 6 м и $0,3^{\circ}\text{C}$ на глубине 18 м [Геокриология СССР, 1989].

Вне контура зданий температура грунта в населенных пунктах Центральной Якутии, по данным П. А. Соловьева, значительно понижается по сравнению с температурой в естественных условиях. Так, для Якутска для застройки возрастом 200–300 лет такое понижение температур составляет от 4 до 6°C , для застройки возрастом 50–100 лет — от 2 до 4°C , для застройки возрастом 20–30 лет это понижение температуры составляет от 1 до 2°C . При этом для пос. Чурапча это понижение температуры на территории застройки составляет $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$, а для пос. Абалах — от 1 до 2°C [Геокриология СССР, 1989]. Это явление понижения температуры на территории застройки впервые отмечал еще А. Ф. Миддендорф в 40-х гг. XIX в. М. И. Сумгин объяснял его уборкой снега и его уплотнением, Н. И. Салтыков — образованием «культурного слоя», а П. И. Мельников — засолением грунтов. Однако в черте современной застройки роль этих факторов, или, по крайней мере, двух последних, по-видимому, незначительна из-за устройства канализации.

Необходимо учитывать, что среднегодовая температура воздуха в подполье зданий выше, чем снаружи, на $1\text{...}3^{\circ}\text{C}$ в г. Норильске и на $0,2\text{...}1^{\circ}\text{C}$ в г. Якутске [Геокриология СССР, 1989]. При этом на поверхности грунта под зданиями формируется среднегодовая температура, близкая к среднегодовой температуре воздуха в подполье. Последняя ниже температуры поверхности грунта в естественных условиях на величины поправок на влияние снега, растительности и радиации, составляющих

в сумме 6...8 °С и более. Поэтому в целом, если не происходит нарушений при строительстве и эксплуатации, наблюдается понижение температур грунтов на застроенной территории. Если подполье обеспечивает надлежащее охлаждение, в Норильске, по данным М. В. Кима, наблюдается понижение температуры по сравнению с естественными условиями от –3 до –6 °С, в Якутске от –1 до –3 °С, в Игарке от –0,5 до –1,5 °С.

Во втором варианте наших расчетов, когда температура в основании сооружения определялась по СП 25.13330.2012, мы исходили из того, что допускается определять расчетное значение среднегодовой температуры грунтов T_0 , °С, по формуле:

$$T_0 = \frac{1}{t_y} \left[(T_{f,m} - T_{bf}) t_{f,m} + L_v d_{th,n} \left(\frac{d_{th,n}}{2\lambda_f} + R_s \right) \right] + T_{bf},$$

где t_y — продолжительность года, принимаемая равной $3,15 \cdot 10^7$ с (8760 ч); $T_{f,m}$ и $t_{f,m}$ — соответственно средняя по многолетним данным температура воздуха в период отрицательных температур, °С, и продолжительность этого периода, с (ч), принимаемые по СП 131.13330; $d_{th,n}$ — нормативная глубина сезонного оттаивания, м, для предварительных расчетов допускается принимать по формулам Г.1 и Г.2 СП 25.13330.2012; L_v — теплота таяния (замерзания) грунта, Дж/м³, определяемая по приложению Б; R_s — термическое сопротивление снегового покрова, м²·°С/Вт, которое мы считали незначительным для условий подполья. В практике проектирования такое назначение среднегодовой температуры фактически, по-видимому, производится довольно часто, поскольку гарантирует защиту от ошибок при определении фактических температур грунтов при изысканиях. Учитывая это, в своей работе мы также приводим такой расчет как один из вариантов оценки изменения температурного режима грунтов при потеплении и, соответственно, ущерба зданиям и сооружениям. При этом важно именно изменение температуры грунта, поэтому разность температур грунтов, полученная таким образом, будет определяться, следовательно:

$$\Delta T_0 = \frac{1}{t_y} \left[\Delta T_{f,m} * t_{f,m} + L_v d_{th,n} \frac{\Delta d_{th,n}}{2\lambda_f} \right],$$

где обозначения те же, что и в формуле выше. Наибольшие и наименьшие изменения температур грунтов, таким образом, будут определяться сочетаниями грунтовых условий и изменениями глубин протаивания, вместе с климатическими изменениями. Изменение мощности и плотности снега в связи с изменением климата в этом варианте расчета не учитывалось, потому что, во-первых, в большинстве сценариев климата предполагается увеличение зимних осадков, особенно в восточной части АЗРФ, а во-вторых, снежный покров в подполье, как правило, не формируется.

Для прогноза изменения температур воздуха в середине XXI столетия использовались данные из Второго оценочного доклада изменения климата на территории Российской Федерации [2014] Росгидромета. В них представлены результаты расчетов будущих изменений климата на территории России с помощью ансамбля глобальных климатических моделей, принявших участие в 5-й фазе международного проекта сравнения объединенных моделей (CMIP5). По сравнению с моделями предыдущей фазы проекта CMIP3, модели CMIP5 характеризуются в среднем более высоким пространственным разрешением и рядом усовершенствований в описании климатических процессов. Результаты расчетов климата с этими моделями используются в Пятом оценочном докладе МГЭИК (2013 г.). В этих расчетах приводятся оценки для новых сценариев изменения содержания парниковых газов и аэрозолей в атмосфере RCP 4.5 и RCP 8.5. Для разных сценариев доступно разное количество моделей, однако во всех случаях — достаточное с точки зрения репрезентативности. Изменения климата (средние за 20 лет значения климатических характеристик) рассматриваются для середины (2041–2060 гг.) XXI в., по отношению к базовому климатическому периоду 1981–2000 гг. Во Втором оценочном докладе изменения климата на территории Российской Федерации [2014] Росгидромета приводятся изменения температуры приземного воздуха, суммарных осадков, разности осадков и испарения, которые использовались нами для оценок. При этом там, к сожалению, не указываются изменения холодного и теплого периодов, которые необходимы для расчетов температурного режима.

В среднем для России число дней со снегом сокращается на 0,75 дня за 10 лет (Доклад об особенностях климата на территории РФ за 2018 г., Росгидромет, 2018). По данным WMO (<http://seakc.meteoinfo.ru/research/34-change-climat21/130-change>), к середине XXI в. ожидается почти повсеместное сокращение числа морозных дней в году (т.е. дней с минимальной суточной температурой ниже 0 °C) на 20–30 суток. Таким образом, нами было принято уменьшение продолжительности зимнего периода к середине столетия на 20 суток, что скорее является минимальной оценкой.

Как указывалось ранее, оценка ущерба, основанная на изменении несущей способности грунтов основания, может основываться на использовании коэффициентов надежности по ответственности сооружений. Если уменьшение несущей способности в результате повышения температур основания будет больше, чем допустимое по коэффициенту надежности по геотехническим категориям ответственности, здание или инженерное сооружение будет считаться вышедшим из строя. Поэтому при оценке ущерба определяющим является оценка изменений механических характеристик грунтов.

В соответствии с СП 25.13330.2012, расчетные давления на мерзлые грунты R , расчетные сопротивления мерзлых грунтов и грунтовых растворов сдвигу по поверхностям смерзания фундаментов R_{af} определяются опытным путем. Однако при отсутствии опытных данных допускается принимать значения R и R_{af} по таблицам В.1–В.11 СП 25.13330.2012. Как свидетельствует практика проектирования, так поступают достаточно часто, больше доверяя таблицам СП 25.13330.2012, чем лабораторным или полевым (проводятся сравнительно редко) испытаниям грунтов, или сравнивая эти значения и выбирая наименее благоприятный вариант. Таблицы были преобразованы в графики, по которым были определены уравнения аппроксимации в диапазоне температур $0...-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ как наиболее характерном в практике строительства в АЗРФ (рис. 2.6).

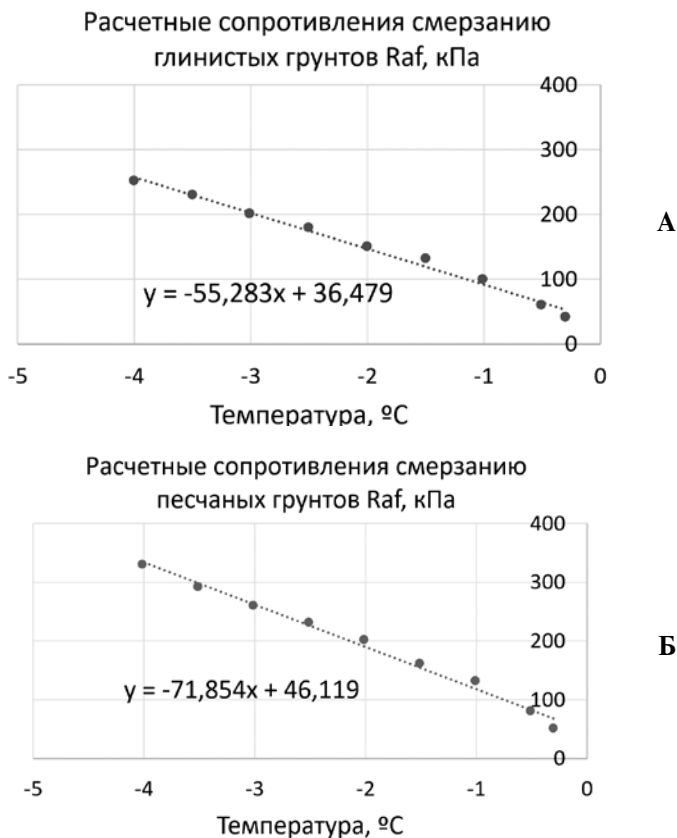


Рис. 2.6. Расчетные сопротивления сдвигу по поверхности смерзания незасоленного глинистого (А) и песчаного (Б) грунта с материалом фундамента по СП 25.13330.2012

Значения R_{af} в таблицах В.3, В.6, В.9 и В.12 следует умножать на коэффициент γ_{af} , зависящий от вида поверхности смерзания, однако в нашем случае принималось, что сваи в большинстве случаев используются бетонные, поэтому этот коэффициент принимался равным 1.

2.3.2.4. Методика оценки стоимости зданий и сооружений по отраслям экономики в муниципальных образованиях АЗРФ

Для прогнозирования вероятного прямого экономического ущерба от деградации вечной мерзлоты необходимы данные о стоимости недвижимой части основных фондов (зданий и сооружений), построенных на мерзлоте по I принципу. Ввиду сильных внутрирегиональных различий мерзлотных условий, а также высокой степени локализации экономической активности, особенно на арктических территориях, методически целесообразно производить оценку на уровне муниципальных образований.

Росстатом на муниципальном уровне предоставляется показатель «Наличие основных фондов на конец года по полной учетной стоимости по коммерческим и некоммерческим организациям (тыс. руб.)». Под данным видом фондов следует понимать фонды организаций муниципальной формы собственности, т.е. муниципальный жилищный фонд и объекты городской инфраструктуры, муниципальные социально значимые объекты недвижимости (детские дошкольные учреждения, школы, библиотеки и пр.), которые вносят минимальный вклад в валовое производство муниципального образования, и муниципальную недвижимость, использующуюся в коммерческих целях. Одновременно именно данный вид фондов является в высокой степени социально уязвимым, поскольку в нем концентрируются наиболее уязвимые категории населения, а также он напрямую зависит от финансирования из зачатую весьма ограниченных средств муниципального бюджета. По нашим оценкам эти фонды составляют для рассматриваемых муниципальных образований в среднем 2–25% от общей суммы, причем их значение наиболее высоко в наименее экономически развитых дотационных районах. Поскольку этих данных недостаточно для исчерпывающей оценки ущербов на уровне муниципальных образований, стоимость основных фондов следует рассчитывать, исходя из значения их суммарной стоимости в соответствующем регионе по видам экономической деятельности.

Принимаем допущение, что показатель стоимости основных фондов муниципального образования пропорционален объему валового производства по соответствующему виду экономической деятельности, а объем валового производства в свою очередь пропорционален фонду заработной платы с поправкой на среднеотраслевые коэффициенты, полученные для регионов России. В разрезе муниципальных образований в открытом до-

студе также отсутствует статистическая информация по объемам валового производства в стоимостном выражении по многим значимым отраслям экономики. Росстатом даны лишь следующие отрасли, формирующие добавленную стоимость: объем промышленного и сельскохозяйственного производства, оборот розничной торговли (те отрасли, по которым напрямую можно оценить стоимость основных фондов на основании прямой пропорции). Необходима дооценка остальных значимых видов экономической деятельности: строительства, транспорта и связи, операций с недвижимостью, государственного управления, здравоохранения и образования, которую предлагается произвести на основании данных о фонде заработной платы работников организаций по соответствующим отраслям. Рациональность такого подхода обоснована подтверждением корреляционных связей данного показателя со статистически доступными параметрами: объемом производства в обрабатывающей промышленности и в производстве и распределении электроэнергии, газа и воды и фондом зарплаты в соответствующих отраслях. Анализ данных по муниципальным образованиям регионов, чьи территории включены в состав АЗРФ, показал высокую степень корреляции этих двух показателей — от 0,7 до 1. При этом, несмотря на очевидную связь двух параметров, соблюдены условия применимости корреляции Пирсона: во-первых, проведена дополнительная проверка с исключением выбросов; во-вторых, проверено наличие нелинейных зависимостей между переменными (анализ диаграмм рассеяния).

Дооценка недостающих параметров произведена следующим образом: показатель оборота организаций по каждому виду экономической деятельности, данный по региону, распределяется по муниципальным образованиям пропорционально фонду заработной платы по соответствующей отрасли. Путем суммирования предоставленных Росстатом и рассчитанных показателей получено оценочное значение валового производства для каждого муниципального образования рассматриваемых регионов.

Фонды по видам экономической деятельности (согласно ОКВЭД) рассчитаны для каждого муниципального образования следующим образом: стоимость фондов по региону распределена пропорционально доле каждого муниципального образования в валовом производстве соответствующей отрасли. Основные фонды из категории «Прочие виды» распределены для каждого муниципального образования пропорционально суммарному валовому производству по всем отраслям. Такая оценка достаточно грубая, однако была осуществлена верификация путем сравнения данных Росстатом стоимостей основных фондов по некоторым крупнейшим городам с получившимися расчетными значениями. В связи с этим можно утверждать, что расчетные значения близки к фактическим и, главное, в целом учтены внутрирегиональные пропорции и дифферен-

ция. Далее, для повышения точности расчетов и снижения погрешности, из общерегионального значения стоимости основных фондов было вычтено значение, данное Росстатом для городов, и уже получившийся остаток распределяется по оставшимся муниципальным образованиям. Обычно доля регионального центра и крупнейших городов в основных фондах весьма велика. Например, для регионов Арктической зоны России доля столиц по этому показателю составляет: Анадырь — 49%, Мурманск — 22%, Красноярск — 25%, Архангельск — 21% и т.д., что существенно снижает погрешность производимых дооценок.

В общей стоимости основных фондов важно понимать, какую их часть составляют здания и сооружения как наиболее восприимчивая к деградации многолетнемерзлых пород составляющая. В общей структуре основных фондов (среднероссийское значение на 2022 г.) доля зданий и сооружений составляет 72% (остальное приходится на машины и оборудование, транспортные средства и прочие виды), таким образом, среднеотраслевой понижающий коэффициент будет равен 0,72. Коэффициенты также были рассчитаны для каждой отрасли в каждом из рассматриваемых регионов, пример для Ямало-Ненецкого АО представлен на рис. 2.7 (см. с. XI цв. вклейки).

Результаты расчетов недвижимой части основных фондов (зданий и сооружений) представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3.

Стоимость недвижимой части основных фондов (зданий и сооружений экономики, жилищного фонда) в регионах криолитозоны Арктической зоны РФ, млрд руб., 2022 г.

Регион и муниципальное образование	Сельское хозяйство	Промышленность	Строительство	Торговля	Транспорт	Прочие	Жилищный фонд
Ненецкий АО							
Заполярный район	1,4	407,7	0,6	Н. д.	11,2	33,1	16,9
Нарьян-Мар	0,3	181,7	0,7	0,9	11,4	17,0	48,6
Ямало-Ненецкий АО							
Красноселькупский район	0,2	211,8	0,1	0,1	21,2	39,0	5,5
Надымский район	0,3	867,5	1,3	2,9	1086,1	179,7	85,0
Приуральский район	0,9	11,0	0,5	0,1	16,8	3,7	20,8
Пуровский район	0,3	2787,7	2,5	1,6	325,1	517,4	88,6
Тазовский район	1,1	671,3	3,2	0,3	174,7	132,7	22,7
Шурышкарский район	0,4	3,2	Н. д.	0,1	4,6	1,0	8,1
Ямальский район	1,3	796,9	12,1	0,2	267,7	171,7	17,3
Салехард	0,1	86,6	0,4	3,1	221,4	22,9	147,1

Регион и муниципальное образование	Сельское хозяйство	Промышленность	Строительство	Торговля	Транспорт	Прочие	Жилищный фонд
Губкинский	Н. д.	59,5	0,2	2,0	23,7	13,1	66,5
Лабытнанги	Н. д.	30,6	0,1	1,0	131,5	7,8	71,0
Муравленко	Н. д.	28,7	0,1	1,5	30,7	7,1	44,3
Новый Уренгой	Н. д.	272,4	3,5	9,5	649,7	74,7	433,7
Ноябрьск	0,1	314,4	0,4	9,0	351,6	66,9	198,9
Коми АО							
Воркута	0,1	69,3	1,3	0,6	223,9	76,4	33,1
Красноярский край							
Таймырский Долгано-Ненецкий район	0,1	36,7	0,5	0,2	27,0	49,6	59,9
Туруханский район	0,1	316,1	1,1	0,1	8,3	321,2	25,9
Норильск	Н. д.	463,5	11,0	2,7	95,7	533,1	435,3
Республика Саха (Якутия)							
Абыйский район	Н. д.	0,5	Н. д.	0,1	6,4	0,8	14,4
Аллаиховский район	Н. д.	0,5	Н. д.	Н. д.	3,3	0,5	9,2
Анабарский национальный (долгано-эвенкийский) район	Н. д.	17,6	Н. д.	Н. д.	Н. д.	12,0	8,5
Булунский район	Н. д.	7,4	Н. д.	Н. д.	5,7	5,5	13,6
Верхнеколымский район	Н. д.	1,7	Н. д.	0,1	12,5	1,9	14,2
Верхоянский район	0,2	1,7	Н. д.	Н. д.	7,2	2,0	10,8
Жиганский район	Н. д.	0,5	Н. д.	Н. д.	3,3	0,6	6,7
Момский район	0,1	0,5	Н. д.	Н. д.	0,8	0,5	4,9
Нижнеколымский район	Н. д.	0,7	Н. д.	0,1	4,5	0,9	13,9
Оленекский район	Н. д.	0,9	Н. д.	Н. д.	0,5	1,0	15,1
Среднеколымский район	0,1	0,7	Н. д.	0,1	1,5	0,9	4,4
Усть-Янский район	0,1	1,7	Н. д.	0,1	6,4	1,8	18,1
Эвено-Бытантайский национальный район	0,1	0,2	Н. д.	Н. д.	0,4	0,3	0,4
Чукотский АО							
Анадырский	0,1	2,7	Н. д.	0,1	4,0	3,4	41,4
Билибинский	0,1	9,2	0,7	0,7	0,7	11,2	44,3
Чукотский	Н. д.	0,3	Н. д.	0,7	0,1	0,6	11,3
Эгвекинот	0,2	2,1	Н. д.	0,2	1,2	2,3	20,9
Провиденский	Н. д.	0,4	Н. д.	0,4	0,4	0,6	13,5
Певек	0,1	8,4	Н. д.	0,3	1,3	8,0	36,0
Анадырь	0,1	60,6	0,3	2,7	2,2	56,0	57,6

2.3.3. Результаты оценки возможного ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям

Если изменение несущей способности фундамента для выделенного муниципального образования находилось в пределах 15%, ущерб, как отмечалось выше, считался нулевым. Если же для данного района несущая способность фундамента изменялась на 15%, здания и инженерные сооружения считались аварийными, и их стоимость относилась на счет ущерба. Данные о стоимости зданий и инженерных сооружений были получены на основании оценки недвижимой части основных фондов (т.е. зданий и сооружений) соответствующих муниципальных образований (табл. 2.4).

Таблица 2.4.

Стоимость зданий и инженерных сооружений в муниципальных образованиях АЗРФ на 2022 г.

Субъект РФ	Муниципальные образования	Стоимость зданий и сооружений по всем видам экономической деятельности (сумма), млн руб.	Стоимость жилфонда, млн руб.
НАО	Заполярный район	454 128	16 928,6
	Нарьян-Мар	211 949	48 605,4
ЯНАО	Красноселькупский район	272 275	5474,6
	Надымский район	2 137 763	85 027,7
	Приуральский район	33 074	20 791,0
	Пуровский район	3 634 528	88 649,7
	Тазовский район	983 410	22 658,9
	Шурышкарский район	9389	8 129,8
	Ямальский район	1 249 871	17 289,7
	Салехард	334 476	147 098,6
	Губкинский	98 453	66 527,3
	Лабытнанги	171 000	70 952,0
	Муравленко	68 197	44 262,9
	Новый Уренгой	1 009 772	433 722,4
	Ноябрьск	742 468	198 945,7
Республика Коми	Воркута	371 588	33 132,4
Красноярский край	Таймырский Долгано-Ненецкий район	114 109	59 886,5
	Туруханский район	646 842	25 918,1
	Норильск	1 105 937	435 316,9

Субъект РФ	Муниципальные образования	Стоимость зданий и сооружений по всем видам экономической деятельности (сумма), млн руб.	Стоимость жилфонда, млн руб.
Республика Саха (Якутия)	Абыйский район	7835	14 377,1
	Аллаиховский район	4296	9160,2
	Анабарский национальный (долгано-эвенкийский) район	29 648	8467,6
	Булунский район	18 600	13 589,0
	Верхнеколымский район	16 230	14 151,2
	Верхоянский район	11 109	10 757,8
	Жиганский район	4454	6726,7
	Момский район	1909	4918,9
	Нижнеколымский район	6134	13 881,0
	Оленекский район	2537	15 103,1
	Среднеколымский район	3308	4381,5
	Усть-Янский район	10 047	18 078,1
	Эвено-Бытантайский национальный район	1055	441,7
ЧАО	Анадырский район	10 301	41 381,2
	Билибинский район	22 628	44 329,5
	Чукотский район	1790	11 333,3
	Эгвекинот	5941	20 866,7
	Провиденский	1725	13 479,2
	Певек	18 076	35 955,0
	Анадырь	121 908	57 626,4

Оценка изменения возможных среднегодовых температур воздуха в выделенных муниципальных образованиях АЗРФ выполнялась, как указывалось ранее, на основе сценариев изменения климата RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5. Все три сценария учитывались, и выбирались максимальная и минимальная оценки. В других, альтернативных, расчетах использовались тренды изменения температур воздуха за последние десятилетия. В частности, принимались в расчет тренды изменения температур воздуха (табл. 2.5).

Таблица 2.5.

Оценки линейного тренда регионально осредненной температуры приземного воздуха за 1976–2006 и 1976–2012 гг. для физико-географических регионов России и федеральных округов, в среднем за год и по сезонам: b — коэффициент линейного тренда ($^{\circ}\text{C}/10$ лет), α_0 — критический уровень значимости
[Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014]

Регион	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	b	α_0	b	α_0	b	α_0	b	α_0	b	
Физико-географические регионы России, 1976–2006										
Европейская часть РФ	0.48	1	0.68	15	0.28	18	0.45	1	0.45	7
Западная Сибирь	0.32	5	0.26	59	0.60	6	0.22	23	0.18	59
Средняя Сибирь	0.46	2	0.42	45	0.58	5	0.47	0	0.24	45
Прибайкалье и Забайкалье	0.46	0	0.39	35	0.66	1	0.58	0	0.21	45
Приамурье и Приморье	0.40	0	0.52	10	0.32	12	0.26	3	0.56	0
Восточная Сибирь	0.42	1	-0.23	35	0.73	1	0.44	0	0.85	0
Физико-географические регионы России, 1976–2012										
Европейская часть РФ	0.52	0	0.43	18	0.41	1	0.59	0	0.64	0
Западная Сибирь	0.29	4	-0.09	100	0.68	0	0.19	18	0.45	7
Средняя Сибирь	0.43	0	0.25	56	0.66	0	0.43	0	0.39	14
Прибайкалье и Забайкалье	0.32	1	0.06	100	0.53	1	0.52	0	0.26	14
Приамурье и Приморье	0.39	0	0.44	6	0.28	9	0.36	0	0.53	0
Восточная Сибирь	0.50	0	-0.04	100	0.74	0	0.46	0	0.80	0
Федеральные округа РФ, 1976–2012										
Северо-Западный ФО	0.51	0	0.58	18	0.41	4	0.48	0	0.59	1
Центральный ФО	0.59	0	0.53	14	0.44	2	0.75	0	0.64	0
Приволжский ФО	0.50	0	0.29	40	0.46	3	0.55	1	0.74	0
Южный ФО	0.54	0	0.37	18	0.37	6	0.78	0	0.65	0
Северо-Кавказский ФО	0.40	0	0.27	18	0.25	7	0.54	0	0.53	1
Уральский ФО	0.36	4	0.11	100	0.64	1	0.25	14	0.48	9
Сибирский ФО	0.30	2	-0.02	100	0.66	0	0.34	0	0.31	18
Дальневосточный ФО	0.48	0	0.20	24	0.58	0	0.46	0	0.67	0

Примечание: белым шрифтом в темных ячейках выделены коэффициенты тренда, значимые на 5 %-м уровне; жирным показаны те из них, которые статистически значимы уже на 1%-м уровне.

Результаты расчетов сведены в табл. 2.6. Расчет с учетом снега и растительности и сценариев изменения климата RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5

показал, что изменения прочности смерзания грунтов с материалом фундамента во всех случаях, во всех возможных диапазонах свойств мерзлых и талых грунтов превышают 15%, таким образом, в этом случае устойчивость грунтов не обеспечивается (вариант 1). Если использовать тренды температур воздуха из табл. 2.5, изменения также не обеспечивают несущую способность (вариант 2).

Таблица 2.6.

Расчеты ущерба при различных сценариях (по состоянию на 2022 г.)

Варианты	Ущерб, млн руб., min	Ущерб, млн руб., max	Описание
1	Максимальный (13 673 777)		По методике [Основы мерзлотного прогноза... 2016], с учетом снега и растительности и сценариев изменения климата RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 для естественных условий
2	Максимальный (13 673 777)		По методике [Основы мерзлотного прогноза... 2016], с учетом снега и растительности и наблюдающихся трендов изменения температуры воздуха [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] для естественных условий
3	Максимальный (13 673 777)		По методике [Основы мерзлотного прогноза... 2016], без учета влияния снега и растительности (для нарушенных условий) по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5
4	1 404 563	11 714 892	По методике [Основы мерзлотного прогноза... 2016], без учета влияния снега и растительности (для нарушенных условий), с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014]
5	5 711 492	13 673 777	По коэффициентам корреляции [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] изменения температур воздуха и грунтов и трендам изменения температур воздуха по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5. Исходные температуры по Геокриологической карте [1991] для естественных условий
6	Менее 800 000	11 999 386	По коэффициентам корреляции [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] изменения температур воздуха и грунтов с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха. Исходные температуры по Геокриологической карте [1991] для естественных условий

Варианты	Ущерб, млн руб., min	Ущерб, млн руб., max	Описание
7	8 868 339	13 673 777	По коэффициентам корреляции [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] изменения температур воздуха и грунтов и трендам изменения температур воздуха по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных (при наличии) условий
8	Менее 700 000	10 791 163	По коэффициентам корреляции [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] изменения температур воздуха и грунтов с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных (при наличии) условий
9	13 554 476	13 673 777	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0,2 до 3 °С по сравнению с температурой воздуха для климатических сценариев по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 (для нарушенных условий)
10	Менее 50 000	3 066 891	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0,2 до 3 °С по сравнению с температурой воздуха для трендов изменения температуры воздуха из табл. 1 [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] (для нарушенных условий)
11	Менее 100 000	13 657 513	По СП 25.13330.2012 для климатических сценариев по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 (для нарушенных условий)
12	Менее 500 000	13 673 777	По СП 25.13330.2012 для трендов изменения температуры воздуха из табл. 1 [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] (для нарушенных условий)

Если рассчитывать температуры грунтов и, соответственно, прочность смерзания грунтов с материалом фундамента, без учета влияния снега и растительности по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5, что характерно для территорий застройки и проветриваемых подполий зданий (вариант 3), в этом случае изменения продолжают оставаться максимальными (см. табл. 2.2). Если при этом используются тренды температур воздуха из табл. 2.5, при благоприятном сочетании грунтовых условий ущерб сокращается почти на порядок (вариант 4).

В свое время были определены тренды изменения температур воздуха и грунтов, и найдены коэффициенты соответствия между ними для

различных регионов (табл. 2.7). Таким образом, зная будущие температуры воздуха, можно прогнозировать (строго говоря, для естественных условий и с рядом оговорок, учитывая, что не температуры воздуха определяют температуры горных пород, а с точки зрения формирования радиационно-теплового баланса поверхности Земли наоборот) будущие температуры грунтов. Исходные температуры грунтов для настоящего времени для регионов могут быть либо взяты с Геокриологической карты СССР [1991], либо из литературных [Геокриология СССР, 1989 и др.] или фондовых источников. Такой расчет был сделан сначала для климатических сценариев по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 (вариант 5), а затем для трендов изменения температуры воздуха из табл. 5 [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] при возможных диапазонах изменений свойств грунтов (вариант 6) с исходными температурами грунтов с Геокриологической карты СССР [1991], а также с исходными температурами грунтов по литературным и фондовым источникам (соответственно варианты 7 и 8).

Таблица 2.7.

Линейные тренды ($\alpha_{\text{ТВ}}$ и $\alpha_{\text{ТП}}$) среднегодовых значений температуры воздуха и пород (соответственно $T_{\text{В}}$ и $T_{\text{П}}$) за 1965–2010 гг. на Севере России [Павлов, 2008 и др.], из Второго доклада Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014]

Регион	Число пунктов наблюдений	Тренды $T_{\text{В}}$ и $T_{\text{П}}$, °C/год		$K_a = \alpha_{\text{ТВ}}/\alpha_{\text{ТП}}$
		$\alpha_{\text{ТВ}}$	$\alpha_{\text{ТП}}$	
Север Европейской части России	6	0.033	0.024	0.72
Север Западной Сибири	6	0.044	0.031	0.70
Средняя Сибирь	7	0.045	0.025	0.56
Якутия	10	0.046	0.033	0.72
Юг Сибири	4	0.045	0.022	0.49
Прибайкалье, Забайкалье	3	0.042	0.034	0.81
Северо-Восток России	5	0.036	0.024	0.67
Север России в целом	41	0.042	0.028	0.66

Как отмечалось, среднегодовая температура воздуха в подполье зданий выше, чем снаружи, на 1–3 °C в г. Норильске и на 0,2–1 °C в г. Якутске. При этом на поверхности грунта под зданиями формируется среднегодовая температура, близкая к среднегодовой температуре воздуха в подполье. Поэтому возникает возможный вариант расчета, при условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0,2 (наихуд-

шие условия) до 3 °С (наилучшие условия) по сравнению с температурой воздуха. Поэтому были проведены расчеты для климатических сценариев по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 (вариант 9) и затем для трендов изменения температуры воздуха из табл. 2.5 [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] при возможных диапазонах изменений свойств грунтов (вариант 10) с учетом этих особенностей формирования температурного режима в подполье зданий.

Наконец, в табл. 6 приводятся результаты расчета изменения температурного режима грунтов по СП 25.13330.2012 для климатических сценариев по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 (вариант 11) и затем для трендов изменения температуры воздуха из табл. 2.1 [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] при возможных диапазонах изменений свойств грунтов (вариант 12).

При осреднении данных для 2020 г. для всех сценариев получалось значение 6 421 627 млн руб., для 2022 г. расчеты показывают, что с учетом изменения стоимости основных фондов ущерб в среднем может составить к 2050 г. 9 152 353 млн руб., т.е. более 9 трлн руб. Можно предположить, учитывая сложность оценки, что экономический ущерб к 2050 г., будет находиться в пределах 7–11 трлн руб.

Если учитывать только жилищный фонд по муниципальным образованиям АЗРФ, получаются следующие результаты (табл. 2.8), среднее значение ущерба жилым зданиям — 895 428 млн руб.

Таблица 2.8.

**Расчеты ущерба по жилищному фонду МО АЗРФ
при различных сценариях (по состоянию на 2022 г.)**

Варианты	Ущерб, млн руб., min	Ущерб, млн руб., max	Описание
1	Максимальный (1 607 675)		По методике [Основы мерзлотного прогноза... 2016], с учетом снега и растительности и сценариев изменения климата RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 для естественных условий
2	Максимальный (1 607 675)		По методике [Основы мерзлотного прогноза... 2016], с учетом снега и растительности и наблюдающихся трендов изменения температуры воздуха [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] для естественных условий
3	Максимальный (1 607 675)		По методике [Основы мерзлотного прогноза... 2016], без учета влияния снега и растительности (для нарушенных условий) по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5

Варианты	Ущерб, млн руб., min	Ущерб, млн руб., max	Описание
4	147 424	1 216 413	По методике [Основы мерзлотного прогноза... 2016], без учета влияния снега и растительности (для нарушенных условий), с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014]
5	1 137 535	1 605 192	По коэффициентам корреляции [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] изменения температур воздуха и грунтов и трендам изменения температур воздуха по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5. Исходные температуры по Геокриологической карте [1991] для естественных условий
6	Менее 80 000	954 544	По коэффициентам корреляции [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] изменения температур воздуха и грунтов с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха. Исходные температуры по Геокриологической карте [1991] для естественных условий
7	1 235 545	1 601 219	По коэффициентам корреляции [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] изменения температур воздуха и грунтов и трендам изменения температур воздуха по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных (при наличии) условий
8	Менее 70 000	944 925	По коэффициентам корреляции [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] изменения температур воздуха и грунтов с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных (при наличии) условий
9	1 531 860	1 605 192	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0,2 до 3 °С по сравнению с температурой воздуха для климатических сценариев по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 (для нарушенных условий)

Варианты	Ущерб, млн руб., min	Ущерб, млн руб., max	Описание
10	Менее 10 000	368 318	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0,2 до 3 °С по сравнению с температурой воздуха для трендов изменения температуры воздуха из табл. 1 [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] (для нарушенных условий)
11	Менее 20 000	1 600 560	По СП 25.13330.2012 для климатических сценариев по RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 (для нарушенных условий)
12	Менее 50 000	1 589 270	По СП 25.13330.2012 для трендов изменения температуры воздуха из табл. 1 [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014] (для нарушенных условий)

2.3.4. Выводы. Распределение ожидаемого экономического ущерба по площади АЗРФ

Важно отметить, что в настоящее время нельзя считать приоритетным какой-либо из этих вариантов. Вероятно, что варианты для нарушенных условий в большей степени отражают условия на застроенных территориях. Значительный диапазон оценок возможного ущерба в табл. 2.6 и 2.8 не является основанием для выбора крайних (максимального или минимального) вариантов. И максимальный, и минимальный варианты получены для крайних значений теплофизических характеристик грунтов, и в действительности, ввиду разнообразия природных условий на застроенных или нарушенных территориях, объективной оценкой будут являться скорее промежуточные значения возможного ущерба. Следует подчеркнуть, что в данной работе использовалась только зависимость изменения сопротивления сдвигу грунтов по поверхности смерзания от температуры, и не во всех случаях только эта характеристика определяет устойчивость зданий и инженерных сооружений на вечномёрзлых грунтах.

В целом, по-видимому, можно предполагать ущерб для зданий или инженерных сооружений в АЗРФ к середине столетия около 7–11 трлн руб. (основываясь на стоимости основных фондов 2022 г.) или больше (рис. 2.8, см. с. XII цв. вклейки). Если за основу расчетов принимать оценку основных фондов 2020 г., ущерб составит, естественно, меньше — 5–7 трлн руб. В целом это согласуется с предыдущими оценками, несколько отличаясь в ту или иную сторону [Hope, Schaefer, 2016; Hjort, et al., 2018; Yumashev, et al., 2019], хотя мы рассматривали только несущую способность фундаментов жилых и промышленных зданий, и заметно выше, чем результаты работы [Streletskiy, et al., 2019].

Ущерб жилому фонду (см. табл. 2.8) ожидается примерно, как и стоимость основных жилых фондов, на порядок меньше, около 900 млрд руб. к середине столетия.

Следует иметь в виду, что деформации и разрушения зданий и инженерных сооружений в АЗРФ будут развиваться постепенно и, вероятно, несколько отставать от изменений температурного режима грунтов.

При настоящей оценке рассматривалась только АЗРФ. Большие территории криолитозоны, где изменения температур грунтов также будут происходить и сопровождаться, возможно, еще большими деформациями и разрушениями, например Забайкалье (г. Чита), Центральная Якутия (гг. Якутск, Мирный), Магаданская область (г. Магадан) и др., также следует рассматривать как территории, где в будущем можно ожидать крупный ущерб и включить в систему будущего мониторинга криолитозоны.

3. Современное состояние фонового мониторинга (ФМ) криолитозоны в мире

3.1. Глобальная система мониторинга. Фоновый мониторинг за рубежом

Идея создания всемирной системы фонового геокриологического мониторинга возникла как результат деятельности Международной ассоциации по мерзлотоведению (МАМ—IPA) в последней четверти XX в., когда очевидным стало то, что восходящая ветвь климатических изменений индицирует общее повышение температуры на поверхности Земли как планеты и что вечная мерзлота реагирует на это, как и вся приповерхностная литосфера, накоплением тепла. А оно в свою очередь ведет к повышению температуры горных пород, частичному оттаиванию грунтового льда, активизации разрушающих мерзлоту криогенных процессов и в целом к деградации мерзлоты с поверхности. И как итог этого — многочисленные проблемы с хозяйствованием и жизнеобеспечением в полярных регионах Земли.

И разрозненные, и систематические наблюдения за состоянием и изменением вечной мерзлоты велись во всех арктических странах и в Антарктиде с 1940—1950-х гг., но были не скоординированы между собой по технологии, точности, периодичности, используемой аппаратуре и пр. Исключением являлись измерения температуры грунтов на метеорологических станциях вытяжными (а позже — автоматическими) термометрами до глубины 3,2 м, что позволяло пересчетом оценивать как температуру на глубине нулевых сезонных амплитуд, так и саму эту глубину (обычно 10—12 м). Однако эти данные не характеризовали местную изменчивость геокриологических особенностей, обусловленную вариативностью ландшафтов — их литогенной основы и покровов.

Усилиями МАМ—IPA в 1990-х гг. началась реализация двух международных проектов по специальному мониторингу температуры многолетнемерзлых пород: «Тепловое состояние мерзлоты» (TSP — Thermal state of Permafrost) и «Циркумполярный мониторинг деятельного слоя» (CALM—Circumpolar Active Layer Monitoring). Данные мониторинга поступают в единую базу данных GTN-P — Global Terrestrial Network on Permafrost (Глобальная наблюдательная сеть за мерзлотой) (<http://gtnpdatabase.org>). Разработки этих проектов лежат в основе фонового геокриологического мониторинга большинства зарубежных стран.

За рубежом мониторинг криолитозоны активно развивается преимущественно в двух регионах северного полушария: Северной Америке (Аля-

ска, США и Канада) и Юго-Восточной Азии (Китай и Монголия), режимные наблюдения за фоновым состоянием мерзлоты также выполняются на побережье Антарктиды. Первые измерения температуры мерзлых грунтов начались еще в 40-х гг. прошлого столетия [Павлов, 2008] на Аляске.

Режимные наблюдения за фоновым состоянием криолитозоны выполняются согласно международной программе по наблюдению за параметрами вечной мерзлоты в рамках сети глобального мониторинга криолитозоны — GTN-P, которая объединяет работу сотен ученых и десятков организаций по всему миру. Сеть была создана в начале 1990-х гг. Международной ассоциацией мерзловедения МАМ—IPA в рамках Глобальной системы наземных наблюдений (GTOS — Global Terrestrial Observing Network) и Всемирной системы наблюдений за климатом (GCOS — Climate Observing System). Всемирная система наблюдений за климатом и Глобальная система наземных наблюдений включает более 50 регистрируемых параметров состояния и динамики компонентов природной среды, в том числе и многолетнемерзлых пород. Цель сети GTN-P заключается в получении исчерпывающей картины пространственной структуры, трендов и изменчивости температуры ММП и мощности сезонноталого слоя. Схема размещения опорных пунктов режимной сети GTN-P в Северном полушарии представлена на рис. 3.1 (см. с. XIII цв. вклейки).

Сегмент TSP изначально основан в рамках деятельности Геологической службы Канады в Оттаве. Наблюдения TSP в США (и частично в России) организованы при финансовой поддержке Национального научного фонда США, а ответственной организацией является Университет Аляски (Фэрбенкс). Массив данных о температурном режиме ММП находится в открытом доступе на специальном сайте, а также доступен в сервисе Advanced Cooperative Arctic Data and Information Service (ACADIS). Сервис является совместным проектом Национального центра снега и льда (NSIDC) в США, Корпорации Университетов по атмосферным исследованиям (UCAR) и Национального центра США по атмосферным исследованиям (NCAR).

Программа Циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) изначально была связана с проектом International Tundra Experiment (ITEX), реализуемого с 1991 г. В разные годы ответственными за исполнение Программы CALM организациями были Университет Рутгерса (1991—1994), Государственный университет Нью-Йорка (1994—1997), Университет Цинциннати (1998—2003) и Университет Делавер (2003—2009). На данный момент программа базируется в Университете Джорджа Вашингтона. Финансовая поддержка программы осуществляется из средств Национального научного фонда США. Массив данных мониторинга CALM также находится в открытом доступе на специальном сайте программы и на сайте Национального центра снега и льда (NSIDC).

Система фонового мониторинга состояния ММП имеет многоуровневую структуру управления. Главным управляющим звеном в GTN-P является Комитет управления, совместно избираемый на срок 4 года ведущими представителями IPA, GCOS и других структур GTN-P, а также членами научного сообщества. В составе Комитета управления действует Консультативный совет, проводящий внутреннюю экспертизу руководства сетью GTN-P, а также разрабатывающий рекомендации по стратегическому развитию программы мониторинга.

Исполнительной структурой, обеспечивающей текущую деятельность GTN-P, является Секретариат, в функции которого входит: взаимодействие с другими организациями; периодическое издание результатов деятельности программы; управление данными, включая интеграцию, стандартизацию, контроль качества, архивацию и публикацию данных GTN-P; поддержка баз данных и системы управления данными; взаимодействие с национальными представителями сети для получения, загрузки и контроля качества данных сегментов TSP и CALM в общую базу данных GTN-P; публикация регулярных отчетов о деятельности программы и стратегии ее дальнейшего развития.

Функционирование сети глобального мониторинга криолитозоны в каждой конкретной стране, включая РФ, координируется национальными представителями, которые обеспечивают: реализацию стратегии развития GTN-P в своей стране; стимулирование и координацию сбора данных; контроль качества представляемых данных; взаимодействие с соответствующими институтами и финансовыми ведомствами в своей стране, а также своими национальными представителями MAM-IPA. Для координации международных усилий и очного (или on-line) обмена информацией и опытом регулярно проводятся конференции, так называемые генеральные ассамблеи GTN-P.

В целом, за почти 30-летний период существования GTN-P накоплен значительный объем данных о динамике температурного режима верхней части ММП и мощности СТС, которые позволяют оценить реакцию природных комплексов криолитозоны на современные глобальные климатические изменения. Главными недостатками системы глобального мониторинга криолитозоны являются отсутствие в ее составе режимных наблюдений за динамикой развития опасных криогенных процессов, а также недостаточная плотность опорных пунктов режимной сети, которая не охватывает все многообразие геокриологических условий криолитозоны, в том числе и на территории РФ.

Главное, даже длинные ряды наблюдений часто невозможно интерпретировать, потому что измерялись в большинстве случаев только температуры горных пород и глубины оттаивания, а параметры, определяющие их температурный режим, а именно характеристики снежного и рас-

тительного покрова, почв (мощность, плотность, влажность и др.), их теплофизические свойства, условия увлажнения поверхности и т.д., оставались и остаются до сих пор неизвестными. Поэтому неясно, например, связано ли повышение температуры горных пород с климатическими изменениями или произошли изменения растительности, влажности горных пород слоя сезонного оттаивания и т.д.

3.2. Фоновый мониторинг в Российской Федерации

3.2.1. Формирование системы фонового мониторинга

Мониторинг окружающей среды (экологический мониторинг), в соответствии с ФЗ «Об охране окружающей среды», — это комплексная система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием антропогенных факторов. Под экологическим мониторингом понимают информационную систему наблюдений, оценки и прогноза изменений в состоянии окружающей среды, созданную с целью выделения антропогенной составляющей этих изменений на фоне природных процессов.

С начала 1990-х гг. унифицированную систему наблюдений за состоянием геологической среды на территории многолетнего и сезонного промерзания земной коры, оценки, контроля и прогноза ее изменений под воздействием природно-климатических и техногенных факторов стали определять как **мониторинг криолитозоны или геокриологический мониторинг** [Павлов, 1996, 1997, 2003, 2008].

В результате проведения длительных геокриологических исследований в различных регионах криолитозоны России сформировалась определенная методология организации наблюдательной сети мониторинга криолитозоны, включающая в себя трехуровневую иерархию наблюдательных объектов: региональные (фоновые) стационары, площадные стационары (площадки непосредственно на объектах интенсивного техногенеза) и пункты постоянного или периодического функционирования в пределах стационаров (площадки, профили, скважины и закрепленные точки-реперы, пикеты) [Изучение... 1992].

Методологической основой разработки системы геокриологического мониторинга являются базовые исследования ведущих университетов, академических и отраслевых институтов (МГУ им. М.В. Ломоносова, Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, ИКЗ ТюмНЦ СО РАН, ФГУП ВСЕГИНГЕО, ФБГУ Гидроспецгеология и других научных организаций), представления о криолитозоне как части геологической среды с особыми специфическими свойствами. Геологическая среда (ГС) —

часть земной коры (недр), в пределах которой протекают процессы, оказывающие влияние на жизнедеятельность человека. ГС включает горные породы ниже почвенного слоя, циркулирующие в них воду и газы и связанные с горными породами и флюидами физические поля и геологические процессы. ГС может находиться в естественном состоянии и под техногенным (антропогенным) воздействием [Дроздов, 2019]. Важнейшей особенностью криолитозоны как специфического типа ГС являются отрицательная температура пород и присутствие льда в разных формах. Криолитозона представляет собой весьма динамичную геосистему именно в силу своих специфических свойств на любых уровнях иерархии природных и природно-техногенных геосистем.

Под влиянием природных процессов, меняющегося климата, а также при техногенных воздействиях могут происходить негативные изменения в геосистемах криолитозоны. Предупреждение таких явлений возможно при учете закономерностей протекания природных процессов, а также на основе разработки системы сбалансированного развития территорий, в том числе при условии рационального использования ГС. Необходимая для решения этих задач информация может быть получена на основе систематического изучения, анализа, оценки и прогноза состояния геологической среды, своевременного оповещения органов управления природопользованием и населения о наблюдаемых и возможных изменениях. Эти задачи для территорий криолитозоны решаются при создании системы геокриологического мониторинга [Павлов, 2008].

Эта система должна была включать следующие блоки: блок наблюдений; блок сбора, обработки, анализа, оценки и хранения информации; блок прогноза и разработки мероприятий по управлению процессами, обеспечивающих устойчивость гидроузла. При проектировании системы измерительного комплекса и организации контрольных наблюдений предполагалось руководствоваться нормативными и руководящими документами.

В России первые режимные наблюдения за изменениями криолитозоны начались более полувека назад и проводились в различных регионах Российской Арктики по инициативе различных научных организаций или по запросам и на средства нефтегазового комплекса. Эти исследования были направлены на изучение режима геокриологических условий и прогноза их изменения при естественной динамике климата или при техногенных воздействиях, возникающих при освоении территории криолитозоны. За эти годы был накоплен большой опыт проведения такого рода работ, создана методическая база, изданы всевозможные методические пособия и рекомендации. В соответствии с ними состояние и трансформация природных и природно-техногенных геосистем в криолитозоне определяется взаимодействием гео-

логической среды с внешними сферами, прежде всего с атмосферой, подчиняясь климатическим гармоникам. Однако восходящая ветвь глобальных флуктуаций климата фиксируется до настоящего момента, а замедление подъема температуры воздуха, зафиксированное на рубеже XX и XXI вв., не оказалось, как это предполагалось ранее, вершинной частью синусоиды. Это повышает актуальность продолжения ландшафтно-геокриологических наблюдений и мониторинга для достоверного пространственно-временного описания условий среды.

Режимные наблюдения за температурой грунтов и за деятельным слоем (слоем сезонного промерзания или оттаивания горных пород) на Европейском Севере и в Западной Сибири осуществляются на нескольких площадках, размещенных так, чтобы по возможности охватить все природно-климатические зоны и меридиональные сектора (рис. 3.2), и, как правило, параллельно с другими геокриологическими наблюдениями.



Рис. 3.2. Площадки геокриологического мониторинга в России (подложка — [Геокриологическая карта СССР, 1991])

Поиском методик и способов а также пионерным внедрением геокриологического мониторинга в России занялись с 1970-х гг. в Министерстве геологии, в Академии наук и в вузах. Однако цели, масштабы, результаты и результативность первых попыток геокриологического мониторинга сильно разнились в зависимости от ведомственной принадлежности заказчика и исполнителя исследований, от проработанности научно-технических и производственных программ, от финансирования проводимых работ.

3.2.2. Опыт фонового мониторинга Минприроды РФ

В Министерстве природных ресурсов была разработана и в 1994 г. утверждена концепция государственного мониторинга состояния недр России, из которой логически вытекает, что общее назначение мониторинга криолитозоны — обеспечение органов государственного управления, организаций-земле- и недропользователей, отдельных юридических и физических лиц сведениями о текущем состоянии и тенденциях изменений геологической среды в условиях Севера. Базировалась эта программа на опыте инженерно-геокриологических съемок и тематических исследований, выполнявшихся ВСЕГИНГЕО, а также ПНИИИСом и Фундаментпроектом в 1970–90 гг. на севере Западной Сибири на газоконденсатных месторождениях Надым-Пурского междуречья Методом ключевых участков на базе ландшафтного (геосистемного) подхода.

Уже в 1970-х гг. были заложены наблюдательные площадки периодического посещения для наблюдения за природными изменениями геокриологических условий и для изучения влияния техногенеза и саморекультивации в точках бурения геологоразведочных скважин. Предполагалось, что создание системы мониторинга криолитозоны позволит унифицировать технологию сбора и обработки данных и повышает качество информации, упростит доступность и увеличит оперативность получения прогнозных данных для регулярной выдачи информации о развитии криогенных геологических процессов [Дубровин, 2003; Павлов, 2008] и для принятия управляющих решений в области использования и охраны недр.

Региональный геокриологический стационар является основой наблюдательной сети мониторинга криолитозоны. При выборе опорного района размещения стационара необходимо учесть морфологию многолетнемерзлых пород (мощность, прерывистость), типы геологического разреза, активность проявления криогенных геологических процессов, размеры и доступность изучаемой территории, размещение ближайших метеостанций. Конкретизация места стационара и его экспериментальных объектов (площадки, профили, отдельные наблюдательные скважины) может быть осуществлена на основе маршрутных и аэровизуальных работ.

В ведении ФА Роснедра Минприроды РФ в настоящее время функционирует два объекта в системе государственного мониторинга состояния недр (ГМСН): Воркутинский опорный мерзлотно-гидрогеологический полигон и геокриологический стационар Марре-Сале.

3.2.2.1. Воркутинский опорный мерзлотно-гидрогеологический полигон

Воркутинский полигон функционирует с 60–70-х гг. прошлого столетия, в его пределах ведется государственный мониторинг состояния

недр (ГМСН) по Северо-Западному федеральному округу. На территории полигона решаются задачи *фонов*ого и *геотехнического* мониторинга.

Базовым звеном системы ГМСН в Республике Коми является территориальный центр (КТЦ) ГМСН, осуществлявший общее координационно-методическое руководство по ведению мониторинга состояния недр, сбор информации, анализ и обобщение данных наблюдений о состоянии подземных вод и экзогенных геологических процессах; ведение многолетней базы данных подземных вод и дежурных карт; прогнозирование состояния недр; подготовку регламентной продукции и справочно-информационной продукции о состоянии недр и происходящих в них процессов по запросам органов управления государственным фондом недр, других органов государственной власти и государственных структур на территориальном уровне, федерального и регионального центров ГМСН, согласование программ, проектов объектного мониторинга и проектно-сметной документации на другие виды геологоразведочных и прочих работ.

Воркутинский мерзлотно-гидрогеологический полигон представляет собой совокупность участков: на одних участках наблюдения выполняются по государственной программе (за счет средств федерального бюджета), на других — по программе геотехнического мониторинга недропользователями на собственные средства.

Полигон расположен в Европейской Субарктике, в трех геокриологических зонах: массивноостровного, прерывистого и сплошного распространения «вялой» мерзлоты и включает в себя 5 самостоятельных участков, расположенных в Республике Коми вокруг г. Воркуты (один участок захватывает город, рис. 3.3, см. с. XIII цв. вклейки). Воркутинский мерзлотно-гидрогеологический полигон находится на стыке Восточно-Европейской артезианской и Уральской гидрогеологической складчатой областей. Первая из них представлена здесь Печоро-Предуральским адартезианским бассейном (ледово-ледниково-морская и цокольная равнины); вторая — одним из адмассивов Западно-Уральской системы гидрогеологических структур (предгорья и низкогорья). Ряды наблюдений на полигоне (от 30 до 43 лет) — самые длинные в Европейской Субарктике.

На территории Воркутинского полигона мониторинг ведется за криогенными ЭГП по двум основным направлениям: за деградацией и аградацией многолетнемерзлых пород, за термокарстовыми просадками и криогенным пучением четвертичных отложений. На полигоне наблюдаются: температура мерзлых пород по всему их разрезу и таликов; глубина сезонного протаивания и промерзания отложений; формирование новообразований мерзлоты в благоприятных условиях; сезонное и многолетнее криогенное пучение; температура подземных вод, водо-

вмещающих пород и криогенных водоупоров по наблюдательным скважинам.

В настоящее время фоновый мониторинг состояния недр (ГМСН) осуществляется в естественных условиях на участках: Приполярно-тундровая зональная станция МПП, Лек-Воркутский подветренный; Восточно-Воркутский; Усинское водохранилище; Поднятие Чернова. Геотехнический мониторинг в техногенно нарушенных условиях выполняется на участках Озерный, Усинское водохранилище и Воргашорский.

В соответствии с гидрогеологическим районированием территории Воркутинский полигон располагается в пределах Печоро-Предуральского предгорного артезианского бассейна 2-го порядка; в соответствии с инженерно-геологическим — в Предсевероуральском регионе. Полигон расположен в зоне прерывистого и массивноостровного распространения голоценовых многолетнемерзлых пород (ММП). Он охватывает площадь с естественными и техногенными условиями размером 2600 км².

Интенсивное техногенное воздействие оказывается на территорию в результате угледобычи (Воркутское, Воргашорское и Юньягинское месторождения угля); строительства и эксплуатации транспортных магистралей, в том числе крупнейшего магистрального газопровода Бованенково–Ухта; промышленного и жилого строительства.

Работы на полигоне проводит ЗАО «Горногеологическая компания «МИРЕКО»». Режимные наблюдения на полигоне выполняются двумя структурными подразделениями: Коми территориальным Центром ГМСН (база в г. Сыктывкаре) и ООО «ГРР» (база в г. Воркуте).

Наблюдения на Воркутинском полигоне ведутся по подсистемам: подземные воды и экзогенные геологические процессы (ЭГП).

Мониторинг подземных вод

Целевое назначение: получение данных для оценки и прогноза естественных (фоновых) условий формирования грунтовых и субнапорных вод в различных гидрогеологических и мерзлотно-гидрогеологических условиях; наблюдения для целей ГГД мониторинга.

В процессе изменения мерзлотно-гидрогеологических условий территории возрастают шахтные и карьерные водопритоки, увеличиваются естественные ресурсы и динамические запасы пресных подземных вод. Однако постоянное сокращение наблюдательной сети в связи с ограничением денежных ассигнований ведет к снижению информативности. Общее сокращение — с 64 ПН в 2006 г. до 8 ПН в 2014 г. Также уменьшено количество замеров по каждой скважине.

Мониторинг экзогенных геологических процессов

Целевое назначение: изучение криогенных процессов в естественных и нарушенных условиях на объектах мониторинга с различными ти-

пами распространения ММП. Основные решаемые задачи: оценка активности проявлений ЭГП; оценка и прогноз изменений геокриологических условий в естественных условиях и под влиянием интенсивной хозяйственной деятельности. Объекты мониторинга: аккумулятивно-денудационная среднеплейстоценовая ледово-морская равнина в зоне прерывистого распространения голоценовых ММП и в зоне массивно-островного; цокольная предгорная (предуральская) равнина.

Изучаемыми ЭГП являются: деградация и аградация ММП, термокарстовое проседание — криогенное пучение в различных геокриологических условиях и просадки земной поверхности, обусловленные совокупным воздействием просадки лав в угольных шахтах и природным термокарстом. Возобновлен мониторинг сезонно-талого слоя и сезонно-мерзлого слоя (СТС и СМС).

Наблюдения выполняются в 34 термометрических скважинах и 5 площадных участках. Наблюдаемые параметры: температура горных пород, термокарстовые осадки — криогенное пучение; мощность снежного покрова.

Наблюдательная сеть мониторинга на Воркутинском полигоне требует технического перевооружения

Практическое использование данных мониторинга гидрогеологических условий на Воркутинском полигоне приведено в «Аналитическом обзоре...». По данным режимных наблюдений отмечена устойчивая, на протяжении почти 45 лет, тенденция повышения уровня подземных вод в естественных условиях области ММП, что обусловлено увеличением продолжительности периода инфильтрационного питания грунтовых вод в результате происходящей деградации ММП под воздействием глобального климатического потепления.

По данным мониторинга ЭГП криогенного ряда отмечается практически повсеместное повышение температуры ММП и таликов. Ведущим является процесс деградации мерзлых массивов. Отмечается увеличение мощности таликов, «древних», существовавших до климатического потепления, с начала 1970-х гг. и новообразованных (возникших уже во время этого потепления). Потепление ММП обусловило также частичное (локально — полное) протаивание в них льда и, как следствие, термокарстовые просадки земной поверхности до 30 см и более.

3.2.2.2. Геокриологический стационар Марре-Сале

Стационар Марре-Сале выполняет функции опорного информационного объекта мониторинга криолитозоны в Уральском федеральном округе. Он расположен в арктической тундре в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых толщ на западном побережье полу-

острова Ямал на территории одноименной полярной гидрометеорологической станции и выполняет функции фонового стационара в регионе, как для объектов нефтегазового недропользования, так и при изучении реакции криолитозоны в условиях современных вариаций климата.

Стационар Марре-Сале организован институтом ВСЕГИНГЕО в 1978 г. в процессе выполнения научно-исследовательских и опытно-методических работ по заданию Министерства геологии СССР и сохранил до настоящего времени функции полевого центра по апробации новых методик и технических средств мониторинговых наблюдений в арктической криолитозоне, включая побережье и мелководный шельф Карского моря.

- Расположение геокриологического стационара на территории полярной метеорологической станции, насчитывающей самые длинные ряды наблюдений на полуострове Ямал (с 1914 г.), обеспечивает репрезентативность как собственных наблюдений, так и прогнозных оценок изменений параметров криолитозоны с использованием метеорологических рядов.
- Геолого-геокриологический разрез Марре-Сале, особенно в его верхней наиболее льдистой части, является опорным для значительной части Западного, Центрального Ямала и шельфовой зоны Карского моря и Байдарцкой губы.
- Геокриологические наблюдения на Марре-Сале насчитывают 46 лет и поэтому являются наиболее представительными при оценках фоновых (глобальных, региональных) изменений криолитозоны.

В настоящее время стационар принадлежит ФГБУ Гидроспецгеология (ФА Роснедра Минприроды РФ).

Целевое назначение: получение данных для оценки и прогноза естественных (фоновых) условий состояния криолитозоны в арктических регионах Западной Сибири в обстановке динамично меняющегося климата и информационное обеспечение управления государственным фондом недр при геологическом изучении и недропользовании в регионе.

Основными решаемыми задачами являются:

- изучение основных параметров геокриологической, инженерно-геологической и гидрогеологической обстановки обследуемой территории, включая наблюдения за комплексом криогенных процессов на специальных профилях в скважинах и площадках;
- типизация природных объектов для составления серии разно- (крупно- и мелко-) масштабных карт геокриологического содержания для экстраполяции данных мониторинговых наблюдений на всю изучаемую площадь;

- применение специальных технических средств и технологий, позволяющих производить геокриологические и гидрогеологические наблюдения в труднодоступных районах в автономном режиме;
- разработка рекомендаций по предупреждению или ослаблению прогнозируемых негативных последствий, связанных с изменением геокриологических, гидрогеологических и инженерно-геологических условий.

Схема наблюдательной сети стационара Марре-Сале приведена в разделе 7, а наблюдаемые параметры мониторинга рассмотрены в табл. 3.1.

В основе создания здесь наблюдательной сети лежит строительство наблюдательных скважин для полного и всестороннего доизучения геологического (геокриологического, гидрогеологического и т.п.) разреза и обустройства скважины для регулярного наблюдения за температурой горных пород, являющейся одним из основных показателей стабильности состояния криолитозоны.

Дистанционная видеосъемка для изучения и мониторингирования очагов развития криогенных термоэрозионных и термоабразионных процессов выполняется как с применением вертолетов, так и с помощью радиоуправляемых моделей беспилотных летательных аппаратов.

С учетом особой актуальности работ геокриологического содержания на арктическом шельфе в 2014 г. на стационаре Марре-Сале была пробурена наблюдательная скважина в пределах мелководной части шельфа Карского моря в 1 км от берега на изобате 5 м до глубины 20 м от поверхности дна. Скважина оборудована автономным термоизмерительным комплексом на базе «Логгер LPC» и мониторинг осуществляется по настоящее время. Эти работы не имеют аналогов в мировой практике.

Таблица 3.1.

Наблюдаемые параметры на стационаре Марре-Сале

№ п/п	Режим или процесс	Показатели геологической среды
1	Термовлажностный режим грунтов и снегомерные съемки	Состав и влажность сезонно-талого слоя, температура грунтов в слое годовых теплооборотов, глубина сезонного протаивания пород, тепловые потоки в грунтах, высота и плотность снежного покрова на закрепленных маршрутах
2	Режим криогенных геологических процессов	Интенсивность термоабразии морских берегов, термоэрозии и оврагообразования, интенсивность криогенных оползней-сплывов, интенсивность пучения грунтов при промерзании СТС
3	Геохимическое загрязнение пограничных сред	ПДК загрязнения поверхностных вод, донных отложений и грунтов СТС, биоты

С момента прекращения круглогодичных наблюдений (1996 г.) мониторинг на стационаре Марре-Сале осуществляется в режиме проведения *контрольных работ осеннего цикла*. Эти наблюдения включают: съем термометрической информации в наблюдательных скважинах и измерения максимальных глубин сезонного оттаивания грунтов на профилях и специальном «квадрате» 1х1 км (CALM), не менее 1–2 раз в месяц (начало — середина сентября) с 5-кратной повторностью измерений на каждой точке, всего в среднем 550 замеров за один срок.

В настоящее время все наблюдательные скважины, оборудованы автономными измерительными комплексами на базе «Логгер LPC». Регистрация температур производится с любой наперед заданной периодичностью от 1 до 4 и более раз в сутки, при этом работоспособность логгеров не изменяется. Дополнительная, к обязательным срокам, информация является очень важной для научных исследований. Наличие автоматизированных наблюдений позволяет с достаточно высокой точностью осуществить «приведение» остальных скважин к полному годовому циклу. В настоящее время системами LPC оборудованы 16 скважин, в том числе 3 скважины глубиной 70, 90 и 100 м. Глубина остальных скважин — 20–30 м.

Мониторинг процессов криогенного ряда (термоэрозии, термоабразии, солифлюкции и др.) проводится на 11 участках, оборудованных сетью постоянных марок и реперов, замеры по которым осуществляются с помощью видеосъемки с БПЛА. Одновременно на участке береговой зоны протяженностью 22 км производится видеоцифровая съемка, позволяющая более точно оценивать масштабы и объемы разрушений.

Информация в виде годовых отчетов передается в ФА Роснедра Минприроды РФ.

Прекращены в настоящее время *все виды зимних мониторинговых наблюдений* (снего- и ледосъемки, изучение схода снега и т.п.), а также наблюдения за процессами пучения грунтов и оползнями-сплывами, требующие серьезной финансовой и технической подготовки.

3.2.3. Опыт фонового мониторинга в институтах РАН и вузах

Планомерные исследования температурного режима вечной мерзлоты проводился в России начиная с 30-х гг. XX в. мерзлотными станциями Института мерзлотоведения. В то время и фоновый, и геотехнический мониторинг вечной мерзлоты проводили совместно. Это методологическое положение тех лет является актуальным и сегодня. По сути дела, разделение мониторинга вечной мерзлоты на фоновый и геотехнический мониторинг условно, его можно и совершенно необходимо — для правильной интерпретации результатов — проводить совместно. Воз-

никшее в результате специализации и в значительной степени утраты ценного опыта прошлого разделение ведет к неоправданным и неэффективным наблюдениям, не позволяющим понять причины происходящих изменений температурного режима грунтов и выполнять обоснованные прогнозы состояния вечной мерзлоты.

Основатель мерзловедения М. И. Сумгин считал мерзлотные станции необходимым и важным инструментом исследований вечной мерзлоты. В 1929 г. он совместно с акад. В. И. Вернадским подал в АН СССР докладную записку о необходимости организации в стране научно-исследовательского центра по вечной мерзлоте. АН СССР созвала по этому вопросу совещание, на котором М. И. Сумгин сделал доклад об изученности вечной мерзлоты и перспективах ее дальнейшего изучения в народнохозяйственных целях. По результатам совещания на базе географического отдела Комиссии по изучению естественных производительных сил России была создана Комиссия по изучению вечной мерзлоты (КИВМ) под председательством акад. В. А. Обручева. В 1936 г. КИВМ была реорганизована в Комитет вечной мерзлоты (КОВМ). Одновременно, для изучения вечной мерзлоты на местах и решения проблем строительства на мерзлых грунтах, создавались мерзлотные станции.

В 1927 г. на опытном полигоне Сковородинской метеостанции при Забайкальской железной дороге начались наблюдения за температурами вечномерзлых грунтов, и ее название было изменено: она превратилась в Сковородинскую почвенно-мерзлотную, а затем преобразована в Сковородинскую научно-исследовательскую мерзлотную станцию. Причиной ее создания послужило отсутствие знаний в области строительства и эксплуатации железнодорожных сооружений на вечной мерзлоте, появление деформаций земляного полотна, водопропускных сооружений, технических и жилых зданий на Забайкальской и Амурской железных дорогах. На станции исследовались свойства мерзлых грунтов, проводились наблюдения за деформациями зданий и инженерных сооружений на вечной мерзлоте.

Мерзлотная станция находилась в ведомстве НКВД, а из ГУЛАГа подбирались специалисты, отбывавшие различные сроки наказания. Некоторые ученые были уже с мировым именем, такие как великий философ и гуманист П. А. Флоренский и естествоиспытатель П. Н. Каптерев. Они выполнили на мерзлотной станции важные наблюдения за распространением и свойствами вечной мерзлоты. Именно здесь П. Н. Каптерев выполнил уникальные исследования жизнеспособности живых организмов, актуальные и сегодня. Он показал, что за восемь лет постоянных наблюдений на глубине 3,2 м температура колебалась от $-0,2^{\circ}\text{C}$ до $-1,4^{\circ}\text{C}$, а на глубине 5 м — всего между $-0,6^{\circ}\text{C}$ и $-1,0^{\circ}\text{C}$.

В 1975 г. на базе Сковородинской мерзлотной станции открыта Тындинская мерзлотная станция, работающая в системе РЖД до сих пор.

В период строительства БАМа в 1970–1980-е гг. на станции работали 45 человек, в том числе 5 кандидатов наук, имелся электронно-вычислительный комплекс, буровая техника. Вместе с ЦНИИС станцией была решена проблема применения столбчатых оснований мостов, важные результаты были получены при решении технологических проблем тоннелей, для строительства на вечной мерзлоте разработаны конструкции земляного полотна, водоотводных канав, труб и мостов, ряд разработок вошли в рекомендательные и нормативные документы. Термостабилизаторами (СОУ) было оборудовано сорок мостов, установлены десятки термометрических поперечников, пробурено 30 км скважин. Испытаны сотни образцов бетона, проведены десятки испытаний мостовых столбов и свай на станциях и в поселках. Для БАМа характерно широкое распространение высокотемпературной мерзлоты, поэтому повышение температур грунтов последних десятилетий здесь сказывается особенно сильно. По свидетельству начальника станции В. Цыганкова, в основании насыпей формируется «ложе протаивания» глубиной пять и более метров, что создает значительные проблемы.

В 1930 г. была создана Игарская научно-исследовательская мерзлотная станция (ИНИМС) по инициативе инженера треста «Северстрой» Н. И. Быкова. Она вошла в состав Горно-геологического управления Главсевморпути, а исследования на ней выполнялись выдающимся гео-криологом, чл.-корр. АН СССР Н. А. Цытовичем. В 1935–1938 гг. ИНИМС возглавлял акад. П. И. Мельников. Станция проводила изучение мерзлотных, инженерно-геологических и гидрогеологических условий района Игарки, выполнила уникальные, длительные экспериментальные исследования в области механики мерзлых грунтов в подземной лаборатории. Они впервые позволили оценивать несущую способность фундаментов в мерзлых грунтах. С. С. Вялов заложил здесь основы реологии грунтов, сегодня его труды переведены на многие языки мира. Подземная лаборатория ИНИМС была сооружена в 1936 г. в льдистых мерзлых породах на глубине 8–14 м. П. И. Мельников проводил на станции комплексные научные эксперименты в природных условиях. Выяснилось, что сила смерзания грунта с деревом и бетоном и сопротивление мерзлых грунтов сдвигу в природе значительно ниже, чем считалось до этого на основе лабораторных опытов. Опубликованная по результатам этих исследований его работа «Определение сил смерзания грунта с деревом и бетоном и сопротивление сдвигу мерзлых грунтов в полевых условиях» имела большое значение для строительства на вечной мерзлоте.

В 1936 г. в Игарке началось строительство первой подземной лаборатории, которая стала впоследствии широко известным оригинальным сооружением в стране. Эта лаборатория существует до сих пор, и полученные в ней результаты сыграли большую роль в теории мерзло-

товедения. Отметим, что позже в Якутске были сооружены еще две аналогичные лаборатории. Опыт такого строительства П. И. Мельников обобщил в 1938 г. в работе «Подземные сооружения в толще вечной мерзлоты». На Игарской, а также и Сковородинской станциях, по инициативе П. И. Мельникова и Н. И. Быкова, были оборудованы площадки для изучения температурного режима, промерзания-протаивания и режима влажности грунтов. В 1950-х гг. ИНИМС изучала особенности строительства на вечной мерзлоте в Эвенкии, площадки строительства Красноярского алюминиевого завода и Ангара-Питского железнорудного бассейна, а также Усть-Хантайской ГЭС. В 1965 г. на базе ИНИМС открылся Музей вечной мерзлоты, идею создания которого высказывал в свое время М. И. Сумгин.

В настоящее время в Игарке существует геокриологическая лаборатория Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН (Якутск). Здесь изучают реакцию криолитозоны Енисейского Севера на климатические изменения и техногенные воздействия, решают проблемы комплексного управления развитием криогенных процессов в основаниях инженерных сооружений, изучают генезис и закономерности распространения пластовых подземных льдов Енисейского Севера, температурные поля в районах островного и сплошного распространения многолетнемерзлых толщ. На основе анализа сорокалетних геотермических наблюдений природно-техногенной системы г. Норильска лабораторией установлены закономерности формирования температурного поля в основаниях зданий и на застроенной территории. Анализ мерзлотных условий в Игарском и Норильском районах и опыта строительства показал, что деформации многих сооружений произошли в результате пучения при аградации или даже новообразовании многолетнемерзлых пород на строительных площадках. Предложены методы инженерной и биологической рекультивации участков, нарушенных в результате строительства газопроводов. Состав лаборатории сегодня — 8 сотрудников.

Анадырская научно-исследовательская мерзлотная станция была создана в 1935 г. при участии С. П. Качурина на Чукотке, а возглавил ее сначала чл.-корр. П. Ф. Швецов, а затем А. П. Соловьёв, которые впервые описали мерзлотные условия этой территории. Станция занималась изучением устойчивости сооружений Анадырского рыбоконсервного завода и других объектов, существовала до 1983 г., была преобразована в экспедицию; в 2010 г. в результате реорганизации Чукотского филиала СВКНИИ ДВО РАН было создано обособленное структурное подразделение института — Лаборатория комплексного изучения Чукотки (Центр «Чукотка»), где мерзлотные исследования проводятся в определенном объеме до настоящего времени.

В результате широкомасштабных работ, к 1950-м гг. были установлены основные региональные закономерности изменения температур грунтов в годовом цикле и их промерзания-протаивания в основных регионах страны. Институт мерзлотоведения им. В. А. Обручева в Москве продолжил эти работы и в период Международного геофизического года (ММГ), в 1957—1958 гг. выполнил важные исследования на стационарах в Загорске (Сергиев Посад), Воркуте и на хребте Сунтар-Хаята.

В 1936 г. была создана Воркутинская научно-исследовательская мерзлотная станция (ВНИМС). Руководителем был назначен выдающийся мерзлотовед В. К. Яновский, заместителем — Л. А. Братцев, а В. А. Кудрявцев — начальником производства. При этом штат станции составляли около ста человек, а здание станции располагалось в пределах лагерной зоны. Станция провела инженерные изыскания для проектируемой Печорской железной дороги, изучала условия выращивания овощей в Арктике. В 1957 г. ВНИМС реорганизована в Северное отделение Института мерзлотоведения, а затем НИИ оснований и подземных сооружений (НИИОСП). Именно В. К. Яновский впервые разработал методику полевых исследований, которая использовалась впоследствии в дорожных изысканиях в северных и восточных районах страны. Результатом работ В. А. Кудрявцева стала монография «Температура верхних горизонтов вечномерзлотной толщи в пределах СССР» (1954). Он стал основателем научной школы геокриологов Московского университета. Специалисты ВНИМС проводили изыскания для первой большой шахты Капитальная № 1. Они исследовали температуры и свойства грунтов и готовили рекомендации для проектирования шахт и надземных сооружений. Сотрудниками ВНИМС был впервые предложен способ возведения зданий на подсыпках. Ряд зданий на подсыпках той поры эксплуатируется в Воркуте до сих пор. В 1938 г. в Воркутинском районе, в числе первых в стране и мире, начали строиться здания с проветриваемым подпольем. Станция проводила инженерно-геологические изыскания для гражданских и промышленных зданий Воркуты, первой в условиях вечной мерзлоты Арктики железной дороги Воркута—Котлас, при этом наблюдения за состоянием полотна при эксплуатации осуществлял заключенный Воркутлага, впоследствии известный мерзлотовед М. С. Водолазкин. Во время Великой Отечественной войны из-за потери Украины значение угля Воркуты резко выросло, было заложено более десяти новых шахт, строились жилые дома и объекты инфраструктуры. Появились многоэтажные каменные здания с большими нагрузками на фундамент, и ВНИМС обеспечивала необходимые научные исследования для такого строительства. В 1950-е гг. станцией была организована многолетняя экспедиция, которая проводила мерзлотные исследования в Большеземельской тундре, выполнялось картирование новых

месторождений в Хальмер-Ю, Воргашоре, Усе и других районах. Большой вклад в работу в этот период внесли А. Т. Акимов, В. Ф. Жуков, Ю. Т. Уваркин и многие другие, в том числе из числа заключенных Воркутлага. Впоследствии изучение и мониторинг вечной мерзлоты на северо-востоке европейской части России перешли в ведение отраслевых предприятий.

В 1938 г. была организована Якутская экспедиция Совета по изучению производительных сил АН СССР во главе с М. И. Сумгиным. В 1940 г. экспедицию возглавил П. И. Мельников, и она была реорганизована в 1941 г. в Якутскую научно-исследовательскую мерзлотную станцию (ЯНИМС). Одной из важнейших в те годы была проблема водоснабжения Якутска. В 1948 г. сотрудники ЯНИМС открыли Якутский артезианский бассейн, способный обеспечить пресной водой эту достаточно заселенную территорию. Результаты мерзлотно-гидрогеологических исследований Якутии обобщены в монографии «Опыт эксплуатации подземных вод в области распространения вечной мерзлоты», удостоенной первой премии АН СССР. По инициативе специалистов станции, в Якутске еще в конце 1930-х гг. впервые стали строить здания с сохранением мерзлых грунтов в основании, а первым таким сооружением стала Якутская электростанция. Написанная П. И. Мельниковым по результатам этих работ диссертация «Мерзлотно-геологические условия возведения гражданских и промышленных зданий на территории Центральной Якутии по данным опытного строительства в районе г. Якутска» (1947) была отмечена премией Президиума АН СССР. Полученные материалы дали основание Мельникову сделать вывод, что в условиях континентального климата Центральной Якутии принцип сохранения мерзлого состояния грунта в основании промышленных сооружений и каменных зданий с применением проветриваемых подполий является основным. В 1956 г. станция реорганизована в Северо-Восточное отделение Института мерзлотоведения в Москве, а в 1960 г. отделение стало базой для создания Института мерзлотоведения СО АН в Якутске.

В 1953 г. создана Алданская научно-исследовательская мерзлотная станция (АлНИМС) в пос. Чульман в связи с промышленным освоением железных руд и каменных углей Южно-Якутского угольного бассейна. Первым начальником станции был выдающийся исследователь В. М. Пономарев. Результаты работы сотрудников АлНИМС были обобщены С. М. Фотиевым в монографии «Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна».

Мерзлотная лаборатория появилась и в Норильске. Она была создана при геологическом управлении комбината еще в 1936 г. Она занималась в том числе новыми методами строительства на вечной мерзлоте. Первым зданием, построенным в Норильске на сваях с проветриваемым

подпольем, и одним из первых в СССР и мире стал в 1937 г. кирпичный завод. В 1966 г. инженеры из Норильска были удостоены Ленинской премии за внедрение прогрессивных промышленных методов при строительстве комбината и г. Норильска в условиях вечномерзлых грунтов. На базе мерзлотной лаборатории комбината в 1997 г. было решено создать геокриологическую лабораторию ГМОИЦ.

Уникальная Амдерминская мерзлотная станция (АНИМС) существовала до начала 1990-х гг. в пос. Амдерма Ненецкого национального округа. Развитие арктических портов советского сектора Арктики определялось задачей Главсевморпути по созданию надежной транспортной артерии для доставки грузов в Заполярье. Для решения задач строительства в 1940-х гг. был организован трест «Арктикстрой» и институт «Ленгипроарктика», которые проектировали и строили объекты в важнейших арктических портах: Амдерме, Диксоне, Хатанге, Тикси, Певеке, Провидения и Анадыре. Кроме того, в конце 1940-х гг., учитывая трудный опыт Великой Отечественной войны, началось строительство ряда базовых аэродромов для нужд гражданской авиации и ВВС, поскольку их отсутствие резко ограничивало надежность и возможности авиации. Предвидя сложности проектирования и строительства в суровых климатических условиях, в районах сильных ветров и интенсивного снегопереноса, активных береговых процессов, развития мерзлых пород с высоким засолением, Главсевморпуть в пос. Тикси, Диксон и Амдерма создает небольшие мерзлотные станции для решения задач изучения мерзлых грунтов и их температурного режима, а также мерзлотных процессов. Из трех станций наиболее укомплектована была станция А-76 в Тикси (7 человек), но в 1955 г. штаты трех станций были переведены в Амдерму (А-74), где была создана мерзлотная станция № 1 Гипроарктики (МСГ-1) со штатом из 12 человек. Станция размещалась на базе экспедиции № 14 на флюоритовом руднике, сухая подземная горная выработка длиной более 200 м и глубиной около 7 м с температурой около -4°C , которая начиная с 1958 г. послужила хорошей подземной лабораторией для проведения экспериментов, в том числе полномасштабных, с мерзлыми грунтами. Именно в Амдерме мерзлотной станцией на тринадцати различных площадках В. Н. Ивановым, впоследствии многолетним руководителем Аэропроекта, и его коллегами Ю. М. Маковым, Ю. С. Петрухиным и др. разрабатывались виды покрытий взлетных полос аэродромов в Арктике. Здесь изучались также особенности составляющих радиационно-теплогового баланса поверхности, И. В. Шейкиным на этой основе была разработана методика прогноза температурного режима грунтов. Станцией изучались арктические плотины (Тикси, Диксон), деформации широко распространенных в Арктике деревянных зданий на вечной мерзлоте. При передаче станции в Ленинградский институт экс-

периментального проектирования (ЛенЗНИИЭП) была поставлена задача создания новых строительных технологий с использованием облегченных материалов, которая была успешно решена.

Сегодня погранзаставы и многие здания и сооружения вооруженных сил России, нефтегазового комплекса возведены именно с использованием технологий, которые испытывались на Амдерминской станции в основном под руководством В. В. Докучаева и Ю. Я. Велли. Общее количество приборов для испытаний мерзлых грунтов на сдвиг, одноосное сжатие и другие виды механических испытаний в 70–80-х гг. было более ста, так не была оснащена ни одна лаборатория ни в стране, ни за рубежом. Возможность проведения в горной выработке длительных широкомасштабных экспериментов, в которых участвовали В. И. Аксенов, З. П. Артемов, А. В. Брушков, Г. В. Лепинских, Ю. М. Маков, Ю. С. Петрухин, Н. Ф. Цыбина, А. Н. Хименков, Л. В. Чистотинов, А. Л. Данилов, А. Н. Яркин и др., обеспечила создание таблиц расчетных механических характеристик, используемых в нормативных документах до сих пор. Достаточно сказать, что под землей, при постоянной температуре, которая там могла поддерживаться с точностью, недоступной никаким другим лабораториям, была возможность проводить испытания свай почти в натуральную величину! К сожалению, практическая ликвидация пос. Амдерма в связи с сокращением вооруженных сил, перспективной разведки на нефть и газ, сети Гидромета привели в начале 90-х гг. к закрытию этой станции с исключительными возможностями исследований свойств мерзлых грунтов. И горная выработка, и оборудование в ней из-за труднодоступности сохранились под землей до сих пор, как и большая часть зданий станции, о которых, к счастью, в свое время позаботились власти поселка (Т. В. Федорова и др.), так что остается надежда на возрождение этой уникальной лаборатории. Для этого необходима лишь воля руководства и энтузиазм молодых ученых, чего у нас в стране никогда не было в недостатке. Иначе в будущем придется создавать все сначала, а такого оснащения и сегодня нет ни в Канаде, ни в США, ни в любой другой стране, где есть вечная мерзлота.

Сегодня в состав Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН (Якутск) входят также мерзлотные станции в Магадане, Чернышевском и Алматы (Казахстан). При этом они занимаются в основном научными исследованиями и, к сожалению, в значительно меньшей степени, чем 40–50 лет назад, вовлечены в проектирование и строительство зданий и инженерных сооружений на вечной мерзлоте.

Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция (Магадан) занимается исследованием закономерностей формирования, распространения, строения многолетнемерзлых пород, таликовых зон и подземных вод на территории Верхояно-Колымской горно-складчатой

области, происхождением льдистых толщ равнин северо-востока России, их реакции на изменение климата и антропогенное воздействие. Проводятся наблюдения за температурой мерзлых и оттаивающих толщ в естественных и нарушенных условиях. Оказывается помощь производственным и проектным организациям при решении региональных народнохозяйственных и природоохранных задач в строительстве, гидротехнике, горном деле, гидрогеологии, гидрологии, инженерной геологии и энергетике на территории Магаданской области. На станции, в частности, разработан способ определения толщины снежного покрова с помощью температурных логгеров, разработана методика промораживания грунта естественным холодом для защиты котлованов от грунтовых вод. На основании технико-экономических расчетов для территории Республики Саха (Якутия), Магаданской области и Красноярского края выявлены населенные пункты, где выгодно и где невыгодно внедрение тепловых насосов для получения низкопотенциального тепла с помощью вертикальных теплообменников, расположенных в мерзлых грунтах. На станции работают десять человек, руководителем является известный геокриолог С. А. Гулый.

Вилуйская научно-исследовательская мерзлотная станция (пос. Чернышевский) сосредоточена в настоящее время на создании методики и техники геофизического контроля состояния горных пород криолитозоны для рациональной и безопасной эксплуатации инженерных объектов, изучении взаимосвязи между физическими полями, составом и свойствами мерзлых пород, а также на исследованиях состояния гидротехнических сооружений в Западной Якутии. На станции накоплен материал о развитии процессов фильтрации в основаниях и береговых примыканиях ГТС. Собран значительный объем уникальных сведений о физических свойствах мерзлых и талых пород региона. Выполняется большой объем геофизических работ по многим важным инженерным сооружениям в криолитозоне, таким как Вилуйская ГЭС, алмазодобывающие рудники, гидротехнические сооружения АК «АЛРОСА». Так, на руднике «Мир» АК «АЛРОСА» установлена современная цифровая термометрическая система, позволяющая контролировать температурную устойчивость фундамента этого крупнейшего в криолитозоне инженерного объекта. Состав лаборатории — 19 человек, руководит ею знакомый многим ученым страны и за рубежом геофизик С. А. Великин.

Казахстанская высокогорная геокриологическая лаборатория (Казахстан, г. Алматы) создана в 1971 г. по инициативе П. И. Мельникова, возглавил ее выдающийся исследователь горной мерзлоты А. П. Горбунов. Экспедиционные работы охватывали Тянь-Шань, Гиссаро-Алай, Памир, Саур-Тарбагатай, Алтай и равнинные территории Казахстана. Сотрудники лаборатории принимали участие в полевых геокриологиче-

ских исследованиях в Китае, Монголии, на Кавказе, в Забайкалье, в Альпах и в Андах Аргентины. В настоящее время в штате лаборатории состоят семь сотрудников, которые изучают закономерности распространения и строения многолетнемерзлых и сезонно-мерзлых пород в горах и на прилегающих равнинах Казахстана и Центральной Азии, морфологию, динамику и эволюцию криогенных процессов и явлений, в том числе на свежих моренах в связи с деградацией ледников и формированием гляциальных селей. Материалы сорокалетнего геотермического мониторинга лабораторией многолетне- и сезонно-мерзлых пород свидетельствуют об их неоднозначной реакции на современные климатические изменения. Результаты исследований лаборатории получили мировое признание, в частности, использованы при составлении Атласа снежно-ледовых ресурсов мира (1997). Руководит лабораторией известный исследователь горной мерзлоты Э. В. Северский.

Происходящие изменения климата и температур горных пород, значительное количество уже деформированных зданий и инженерных сооружений в Арктике делают актуальным расширение сети мерзлотных станций и более активное их участие в северном проектировании, строительстве и в мониторинге вечной мерзлоты.

Как стало известно, в Якутске возобновит работу система мерзлотного надзора, о чем заявила глава города С. Авксентьева. По ее мнению, в работе этого органа Институт мерзлотоведения, с его многолетними данными по температурам грунтов на территории города, должен принять участие. В декабре 2018 г. был создан Научно-технический совет при главе города, в который вошли ученые ведущих НИИ республики. Недавно глава города Норильска О. Курилов подписал Постановление о создании Консультативного совета по сохранению устойчивости зданий муниципального образования город Норильск, в состав которого вошли депутаты, представители администрации и ГМК «Норильский никель», а также организаций, осуществляющих мерзлотно-технический надзор. Основная задача — сохранение вечномерзлых грунтов в основании фундаментов. Важно, чтобы вновь создаваемые мерзлотные станции и имеющиеся научные подразделения имели необходимый штат высококвалифицированных специалистов и участвовали во всех этапах проектирования, строительства, наблюдений за зданиями и сооружениями на вечной мерзлоте, в разработке рекомендаций по их устойчивости и создании новых технологий освоения Арктики, для чего в стране нужна и законодательная база, и соответствующие средства.

Сегодня воссоздание сети мерзлотных станций и практическая направленность их работы в крупных населенных пунктах или на территориях освоения в Арктике и Сибири является насущной и крайне своевременной задачей. Значительное число ранее построенных зданий

и сооружений уже подвергаются деформациям из-за постепенной потери несущей способности фундаментов ввиду медленно развивающейся ползучести грунтов оснований, а также климатических воздействий на строительные конструкции. Повышение температур воздуха и, соответственно, мерзлых грунтов, наблюдающееся в последние десятилетия в криолитозоне почти повсеместно, будет приводить к выходу из строя значительной части жилых и промышленных зданий, инженерных сетей и коммуникаций, газо- и нефтепроводов, причем эти процессы будут ускоряться. Необходимо создание в ближайшее время высокотехнологичной и профессиональной сети геокриологического мониторинга, а также разработка технических решений, которые позволят сохранить обширную инфраструктуру Российской Арктики. Эту задачу могут решить только мерзлотные станции, нацеленные на местные или региональные проблемы и расположенные непосредственно на местах.

С начала и середины 1990-х гг. к фоновому геокриологическому мониторингу подключился ряд подразделений Российской академии наук: Институт криосферы Земли СО РАН (позже — Тюменского НЦ СО РАН), Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Центр экологии и продуктивности лесов РАН, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ИФХиБП РАН), Институт геоэкологии РАН; вузы: МГУ, МГРИ, ТюмГУ, Тюменский нефтегазовый (индустриальный) университет; администрации крупных территориальных образований: Саха (Якутия), ЯНАО, г. Магадан; в 2023 г. поручение вести фоновый геокриологический мониторинг получил Росгидромет.

Наблюдения проводились с различной частотой по разным регламентам. В основном измерялась температура горных пород до глубины нулевых сезонных амплитуд ее колебания (в нескольких скважинах) и толщина сезонно-талого слоя. Эти измерения в зависимости от местной специфики и организационно-технических возможностей исполнителей дополнялись наблюдениями за динамикой ландшафтов, экзогенных геологических процессов, гидрогеологическими и гидрологическими условиями.

Длина рядов систематических наблюдений за температурами горных пород составляет 25–45 лет. Наблюдения за толщиной деятельного слоя (СТС—СМС) проводились поначалу не систематически и разрозненно, и в единую систему они были сведены после организации международной сети «Циркумполярный мониторинг деятельного слоя» (CALM). Длина рядов наблюдений по протоколу CALM в основном не превышает 10–20 лет. Основой для оценки широтной изменчивости является Западно-Сибирский трансект, захватывающий природно-климатические зоны от северной тайги до высокоарктической тундры.

Площадки на Восточно-Сибирском плоскогорье и в Якутии характеризуют секторальную изменчивость.

Общее направление изменения климатических параметров неблагоприятно для существования ММП. Так, группа режимных площадок в Западной Сибири, образующих региональный трансект от северной тайги до высокоарктической тундры, зафиксировала как увеличение среднегодовых температур (воздух и грунты) и высоты снежного покрова, так и сопровождающее их увеличение мощности деятельного слоя вплоть до образования участков с мерзлотой несливающегося типа в северной тайге и лесотундре.

В последние годы, на основе многолетнего опыта наблюдений, сформировалась точка зрения, что мониторинг вечной мерзлоты должен включать в себя измерения как температуры горных пород, так и ряда параметров, определяющих их температурный режим, а именно характеристики снежного и растительного покрова, почв (мощность, плотность, влажность и др.), их теплофизические свойства, условия увлажнения поверхности, динамику подземных вод, а также тепловой поток в качестве необходимых для понимания происходящих изменений и прогноза данных.

4. Опыт геотехнического мониторинга в криолитозоне

4.1. Современное состояние геотехнического мониторинга в криолитозоне Арктики

4.1.1. Отечественные требования геотехнического мониторинга при строительстве в криолитозоне

Под геотехническим мониторингом (ГТМ) природно-технических систем (ПТС) или геотехнических систем (ГТС) понимается система комплексного контроля, прогнозирования и управления их состоянием с целью обеспечения эксплуатационной надежности на всех стадиях жизненного цикла. При этом понятие ГТС включает в себя совокупность прямо связанных друг с другом природных объектов и технических сооружений, которые взаимодействуют между собой и оказывают влияние друг на друга, в результате чего функционирование технического объекта зависит от природного и наоборот.

Необходимость осуществления ГТМ регламентируются рядом федеральных нормативных документов, главные из которых следующие:

- Федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»;
- СП 22.13330.2011 «Основания здания и сооружений»;
- СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых фундаментах»;
- СП 497.1325800.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых фундаментах. Правила эксплуатации».

В разное время необходимость контроля состояния ММП и возведенных на них инженерных сооружений определялась также следующими нормативными документами:

- СНиП 22.02.2003 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения»;
- СП 11-105-97 «Инженерные изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов»;
- СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения»;
- СНиП 2.05.06-85 «Магистральные трубопроводы»;
- СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».

Особо актуален контроль состояния ГТС в криолитозоне, поскольку именно ММП являются ведущим фактором развития северных геосистем, наиболее динамичным и неустойчивым их компонентом и определяют реакцию природной среды на различного рода изменения условий их развития, как природных, так и техногенно обусловленных. От состояния ММП во многом зависит надежность функционирования возведенных на них инженерных сооружений.

В целом, мониторинг при строительстве в условиях распространения многолетнемерзлых горных пород (грунтов) регламентируется п. 8.7 свода правил **«СП 305.1325800.2017 Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве**, СП (Свод правил) от 17 октября 2017 г. № 305.1325800.2017».

Согласно этому СП, геотехнический мониторинг на многолетнемерзлых грунтах — комплекс работ, основанный на натурных наблюдениях за состоянием грунтов основания (температурный режим), гидрогеологическим режимом, функционированием термостабилизаторов, перемещением конструкций фундаментов вновь возводимого, реконструируемого и эксплуатируемого сооружения.

В районах распространения многолетнемерзлых грунтов геотехнический мониторинг необходимо проводить для всех видов зданий и сооружений, в том числе подземных инженерных коммуникаций.

В проекте мониторинга следует учитывать факторы, оказывающие влияние на вновь возводимое (реконструируемое) сооружение, его основание, окружающий грунтовый массив и окружающую застройку в процессе строительства и эксплуатации, в том числе возможность проявления опасных геокриологических процессов (криогенное пучение, термокарст, оползневые процессы, оседание поверхности при оттаивании и др.), а также тепловые воздействия от строительных работ.

Для осуществления мониторинга в период строительства сооружений оборудуют контрольные термометрические и гидрогеологические скважины, на фундаментах сооружений устанавливают постоянные геодезические марки, по которым выполняют измерения температуры грунта, уровень подземных вод, их состав и температуру, нивелирование фундаментов, в том числе погруженных свай, измеряют отметки подкрановых путей мостовых кранов, водоотводных лотков в технических этажах и подпольях зданий, а также тротуаров у сооружений. Кроме того, контролируют плотность грунтов, уложенных в насыпях, при замене грунтов в выемках и при намыве территории. Термометрические скважины оборудуют в соответствии с ГОСТ 25358, гидрогеологические скважины — в соответствии с СП 305.1325800.2017, устройство нивелирных марок и геодезические измерения проводят в соответствии с ГОСТ 24846.

Таблица 4.1.

Основные контролируемые параметры при геотехническом мониторинге сооружений

Контролируемый параметр	Устройство для наблюдения за контролируемым параметром	Параметры устройств контроля	Принципы использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружений		
			принцип I	принцип II	
				Предварительное искусственное оттаивание грунтов	Допущение оттаивания грунтов в период эксплуатации сооружения
Температура грунта	Термометрическая скважина	Количество	Не менее 2% общего числа фундаментов (свай, столбчатых фундаментов)	Допускается не предусматривать	Не менее 2% общего числа фундаментов
		Расположение	У наружных фундаментов и фундаментов, расположенных посредине здания		У наружных рядов фундаментов, а также в центре и на расстоянии от центра, равном 0,25—0,4 ширины здания
		Глубина заложения	Не менее глубины заложения фундаментов	-	На глубину сжимаемого слоя, но не более 20 м
Уровень подземных вод	Гидрогеологическая скважина	Количество	Не менее двух		
		Расположение	Одна внутри контура здания, одна снаружи	В контуре здания	
		Глубина заложения	На глубине заложения фундаментов плюс 5 м, а в случае свайных фундаментов — на глубине заложения свай		
Осадка фундамента	Геодетическая марка	Расположение	Устанавливают на угловых фундаментах, в средней части по осям здания по его наружному контуру, а также по обе стороны от осадочных швов		

Примечание: температуру в контрольных термометрических скважинах измеряют по всей их глубине с интервалами: 0,5 м до глубины 5 м, 1 м — свыше 5 м до глубины 10 м, 2 м — свыше 10 м связками инерционных термометров или электротермометров в ручном или автоматическом режимах.

В процессе мониторинга необходимо обеспечивать своевременность информирования заинтересованных сторон о выявленных откло-

нениях контролируемых параметров, в том числе тенденций их изменений, превышающих ожидаемые, от проектных значений и результатов тепло- и геотехнического прогноза.

Контролируемые параметры, параметры устройств контроля, применяемые при геотехническом мониторинге сооружений в зависимости от принципа строительства, представлены в табл. 4.1. Периодичность проведения измерений контролируемых параметров при геотехническом мониторинге в период строительства в зависимости от принципа использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружения представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Периодичность проведения измерений контролируемых параметров при строительстве (реконструкции) сооружения

Контролируемый параметр	Принципы использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружения		
	принцип I	принцип II	
		Предварительное искусственное оттаивание грунтов	Допущение оттаивания грунтов в период эксплуатации сооружения
Температура грунта	Ежемесячно		
Уровень подземных вод	Один раз в конце летнего периода	Ежемесячно	Один раз в конце летнего периода
Осадки фундаментов строящегося (реконструируемого) сооружения	Ежемесячно		
Осадки фундаментов сооружения окружающей застройки	Один раз в квартал	Ежемесячно	Один раз в квартал

Примечания: 1. Периодичность замеров может быть увеличена при превышении максимально допустимых значений контролируемых параметров или при приближении к этим значениям, при отсутствии стабилизации деформаций или повышении (отсутствии понижения) температур.

2. При мониторинге в сложных геокриологических условиях, а также уникальных вновь возводимых и реконструируемых сооружений допускается дополнительно проводить фиксацию контролируемых параметров, не указанных в таблицах.

Как видно из приведенного текста и таблиц, **все внимание сконцентрировано на инженерных объектах**, в то время как **вопрос о контроле фоновых характеристик даже не ставится**. Таким образом, если в процессе

выполнения работ согласно СП 305.1325800.2017 обнаружатся некие тренды в температурах или деформациях, то все они будут «списаны» на техногенез. В том числе ущербы от природных изменений окружающих ландшафтов будут интерпретироваться как связанные с хозяйственными объектами. А если кто-либо попытается отнести изменения целиком или частично на счет природных трендов, то достаточно убедительной аргументации у него не будет.

В результате совместного влияния на ММП современного потепления климата и крупномасштабных техногенных воздействий возникает кумулятивный эффект, последствия которого уже в настоящее время приводят к потере устойчивости мерзлых оснований, крупным авариям природно-технических систем, экологическим катастрофам и, в целом, к возрастанию риска природопользования в осваиваемых районах криолитозоны.

Одна из последних таких экологических катастроф произошла в 2021 г. под Норильском, где в результате потери несущей способности мерзлых пород в основании резервуара с нефтепродуктами произошла авария, и более 20 тыс. т дизельного топлива попали в реки и наземные экосистемы. Оценки экологического и экономического ущерба достигают полутора сотен миллиардов рублей, однако этой аварии можно было бы избежать при своевременно организованной системе ГТМ данного объекта.

Приводимые ниже примеры наблюдения за геокриологическими обстановками в районе инженерных объектов иллюстрируют повсеместное присутствие этой однобокости в геотехническом мониторинге даже в случаях, когда природные компоненты контролируются систематически.

Кроме того, при мониторинге вечной мерзлоты необходимо проводить не только измерения температуры грунтов и деформаций, но и параметров, определяющих их температурный режим: характеристики снежного и растительного покрова, почв (мощность, плотность, влажность и др.), их теплофизические свойства, условия увлажнения поверхности, параметры подземных вод, тепловой поток как в нарушенных, так и в природных (фоновых) условиях. Только такие комплексные наблюдения позволят понять причины изменений температурного режима грунтов и разработать обоснованный прогноз состояния вечной мерзлоты.

4.1.2. Зарубежный подход к геотехническому мониторингу

За рубежом работы по геотехническому мониторингу начались в начале 1940-х гг. в связи со строительством топливопровода, обеспечивавшего ленд-лизские поставки через Аляску. Они носили сугубо утили-

тарный характер обеспечения притрассовой дороги, однако позже из них выросла научная и инженерно-строительная школа геотехнических исследований на мерзлоте. Массовым мерзлотный геотехнический мониторинг стал в 1970-х гг. после начала разработки месторождений углеводородного сырья на севере Аляски и сопутствующего строительства Трансаяскинского трубопровода.

Наиболее эффективные системы ГТМ за рубежом, как и в РФ, созданы на объектах нефтегазовой отрасли и с различным успехом функционируют в процессе разработки месторождений углеводородного сырья и эксплуатации трубопроводных систем, расположенных преимущественно на территории Аляски и северных провинций Канады.

Первый опыт ГТМ был получен в связи со строительством Трансаяскинского нефтепровода наземного и подземного способа прокладки диаметром 1220 мм и протяженностью 1300 км, который пересекает Аляску от месторождения Прудю-Бэй на северном побережье до г. Валдиз на южном, расположен в пределах сплошной и прерывистой криолитозоны и функционирует с 1977 г. Пункты мониторинга расположены преимущественно вдоль северной части нефтепровода. Режимные наблюдения выполняются за температурным режимом оснований и деформациями конструкций нефтепровода на участках развития неблагоприятных криогенных и других экзогенных физико-геологических процессов и явлений. На выявленных аварийных участках (рис. 4.1) разрабатываются мероприятия по обеспечению надежной эксплуатации нефтепровода.



Рис. 4.1. Деформации на Трансаяскинском нефтепроводе, выявленные в процессе ГТМ. а — на участке развития криогенного оползания оттаивающих грунтов; б — на участке криогенного выпучивания опор

Результаты мониторинговых исследований криолитозоны вдоль трассы нефтепровода опубликованы в ряде работ, в том числе и в российских научных изданиях [Романовский, Остеркамп, 2001].

Кроме того, в пределах Аляски режимные наблюдения за состоянием ММП выполняются также на двух полностью заглубленных газопроводах: от форта Лиард до р. Бобровой (Канада) и от Прудоу-Бэй до компрессорной станции № 4 вдоль Трансальяскинского нефтепровода.

Наиболее эффективная система мониторинга криолитозоны и геоэкологических условий в целом реализована на трассе магистрального нефтепровода Норман-Уэлс—Зама на северо-западе Канады, построенного в районе распространения высокотемпературной и прерывистой мерзлоты с мощностью ММП до 50 м и крайне неоднородными геокриологическими и инженерно-геологическими условиями. Нефтепровод подземной прокладки диаметром 324 мм и протяженностью 866 км эксплуатируется с 1985 г. Значительная часть трассы нефтепровода расположена в бассейне р. Маккензи (рис. 4.2), где отмечается наибольшее потепление современного климата в Канадском секторе Арктики.

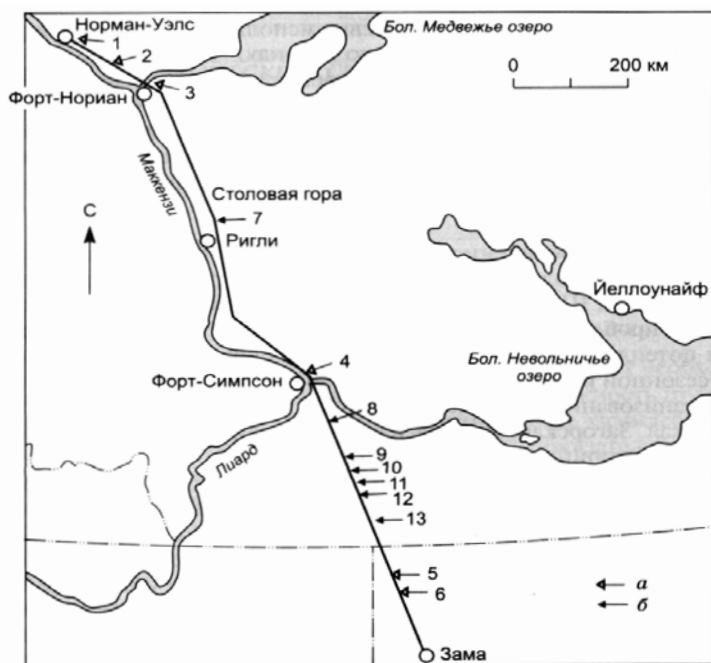


Рис. 4.2. Схема размещения и названия основных пунктов мониторинга на нефтепроводе Норман-Уэлс—Зама [Павлов], 2008).

а — пункты, оборудованные в 1984 г. (1 — Норман-Уэлс, 2 — Каньон Крик, 3 — р. Большая Медвежья, 4 — переход через р. Маккензи, 5 — р. Малая Южная); б — пункты, оборудованные в 1985 г. (7 — Столовая гора, 8 — Манерс Крик, 9 — насосная станция, 10 — шоссе Маккензи Южное, 11 — Морейн Южный, 12 — Жан Мари Крик, 13 — Холмы Реднайф)

Система ГТМ нефтепровода отличается комплексным подходом [Norman Wells... 1992] и включает:

- режимные аэронаблюдения и наземные обследования конструкций трубопровода;
- наблюдения за комплексом климатических и геокриологических параметров (температура воздуха и грунтов, снежный покров, осадки, оттаивание грунтов), а также за грунтовыми водами;
- контроль развития неблагоприятных криогенных процессов (термопросадки, термокарст, пучение, оползни-сплывы, термоэрозия);
- регулярную оценку ландшафтно-геокриологических условий полосы трассы трубопровода и оценку применяемых мероприятий по инженерной защите.

Планомерное осуществление ГТМ позволяет своевременно предупреждать эксплуатирующую нефтепровод компанию о негативных явлениях на трассе с целью проведения работ по ремонту и рекультивации природно-технических комплексов. Затраты на мониторинг оправдывают себя полностью его высокой экономической, технической и экологической эффективностью.

Кроме Северной Америки, системы ГТМ реализованы также и на наиболее ответственных объектах на мерзлых основаниях Юго-Восточной Азии, главным образом — в Китае.

Наиболее комплексная и эффективная система ГТМ в регионе функционирует с 2006 г. на самой высокогорной в мире Цинхай-Тибетской железной дороге, которая пересекает Тибетское плато со сложными и неоднородными геокриологическими условиями и трасса которой на участке протяженностью 552 км проходит в зоне развития ММП. В систему мониторинга объекта включены 78 участков автоматического мониторинга температурного режима ММП и деформации грунтов (осадка при оттаивании и криогенное пучение) оснований железной дороги, а также три станции автоматического мониторинга климатических параметров. Кроме того, организованы режимные наблюдения за деформациями железнодорожного полотна на участках развития криогенных процессов. Об эффективности системы ГТМ объекта свидетельствует более чем 14-летний период безаварийной эксплуатации Цинхай-Тибетской железной дороги.

Несмотря на понимание за рубежом важности наблюдений за характеристиками напочвенных покровов и условиями увлажнения, количественные оценки изменений температурного режима горных пород в связи с этими ландшафтными изменениями, как правило, отсутствуют. Более того, как за рубежом, так и в нашей стране на наблюдательных площадках можно видеть нарушения растительного покрова, уплотне-

ние почв, изменение условий увлажнения и т.д., которые приводят к нарушению температурного режима горных пород. Анализ данных наблюдений за температурой вечной мерзлоты выполнить в таких условиях невозможно.

В целом, выполняемые за рубежом работы в рамках геотехнического мониторинга объектов промышленной и гражданской инфраструктуры позволяют с разной степенью эффективности обеспечить надежность и безаварийную эксплуатацию контролируемых инженерных сооружений и в значительной степени снизить риски, связанные со снижением несущей способности многолетнемерзлых оснований в результате глобальных климатических изменений.

4.2. Опыт геотехнического мониторинга на предприятиях нефтегазовой отрасли

4.2.1. Общие положения

Основная часть добывающих мощностей ПАО «Газпром» и значительная часть газотранспортной системы, месторождения нефти и газа, разрабатываемые дочерними ПАО «Роснефть», АО «Газпром нефть», ПАО «Лукойл», ПАО «НОВАТЭК», ряда других компаний, расположены на севере Западной Сибири и на севере европейской части страны, в условиях распространения вечной мерзлоты как сливающегося, так и прерывистого типов. Устойчивость и механическая безопасность существующих, проектируемых и строящихся объектов в значительной степени определяется надежностью их оснований, представленных многолетнемерзлыми грунтами.

Понимание необходимости осуществления системного геотехнического контроля объектов добычи и транспорта газа стала появляться к середине 80-х гг. прошлого столетия, когда в условиях отсутствия опыта проектирования крупных территориально-промышленных комплексов на вечной мерзлоте, на первенце газовой промышленности, месторождении Медвежье, а затем и на Новоуренгойском месторождении «Газпрома», начали массово развиваться деформации оснований и фундаментов, трубопроводов, зданий технологических цехов и оборудования, которые приводили к отказам оборудования, авариям и инцидентам, необходимости проведения масштабных ремонтных работ, преждевременному прекращению эксплуатации зданий и сооружений. При этом, в отличие от затухающего характера деформаций на объектах, построенных на талых грунтах, деформации сооружений на мерзлых основаниях развиваются во времени, что обусловлено характером ответной реакции ММП на техногенные воздействия.

Примеры различных типов деформаций объектов нефтегазового комплекса построенных в 1970–1980-е гг. без должного учета специфики геокриологических условий территории и особенностей взаимодействия сооружений с многолетнемерзлыми грунтами оснований приведены на рис. 4.3, 4.4.

Наиболее распространенной причиной деформаций фундаментов является многолетнее криогенное пучение, вызванное воздействием касательных сил морозного пучения, возникающих в слое сезонного промерзания-оттаивания. Величина сезонного перемещения свай достигает 100–150 мм. Характерным является нарастающее выпучивание фундаментов вследствие невозвращения свай после зимнего цикла пучения в исходное положение (так называемое остаточное пучение). Накапливающиеся из года в год деформации в разных условиях достигают от 200–300 мм до 1 м. Зафиксированы также случаи многолетнего пучения фундаментов и сооружений вследствие новообразования мерзлоты в основаниях зданий и сооружений. Особенно опасным является неравномерное выпучивание свай линейных коммуникаций при их надземной прокладке (см. рис. 4.3).



Рис. 4.3. Юбилейное нефтегазоконденсатное месторождение. Неравномерное выпучивание фундаментов трубопроводной обвязки куста газовых скважин

ММП оттаивают как при изменениях граничных условий и теплообмена на контакте системы «мерзлый грунт—атмосфера», так и при эксплуатации сооружений, характеризующихся наличием прямого теплового потока в мерзлые основания. К последнему типу взаимодействия относятся добывающие скважины, подземные трубопроводы с положительной температурой транспортируемого продукта и некоторые технологические корпуса газопромысловых комплексов. Зафиксированные осадки грунтов оснований при их оттаивании изменяются в широком диапазоне: от нескольких сантиметров до 1,5–2,0 м.



Рис. 4.4. Медвежье нефтегазоконденсатное месторождение. Деформации аппаратов воздушного охлаждения газа

Максимальное тепловое воздействие на массив ММП оказывают технологические сооружения подготовки газа к транспорту, среди которых наиболее мощным источником теплотоков являются аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа. Используемые при их работе вентиляторы в режиме рециркуляции нагнетают теплый воздух прямо в основания установок, способствуя образованию техногенных таликов (рис. 4.5). На действующих газопромысловых объектах Ямбургского и Медвежьего месторождений кровля ММП в основании АВО газа, в зависимости от начальных криогенных условий и времени эксплуатации понизилась от 1,5–2,0 м до 7,5–8,0 м, что иногда превышает глубину заложения свай и приводит к потере несущей способности оснований и различного рода аварийным ситуациям.

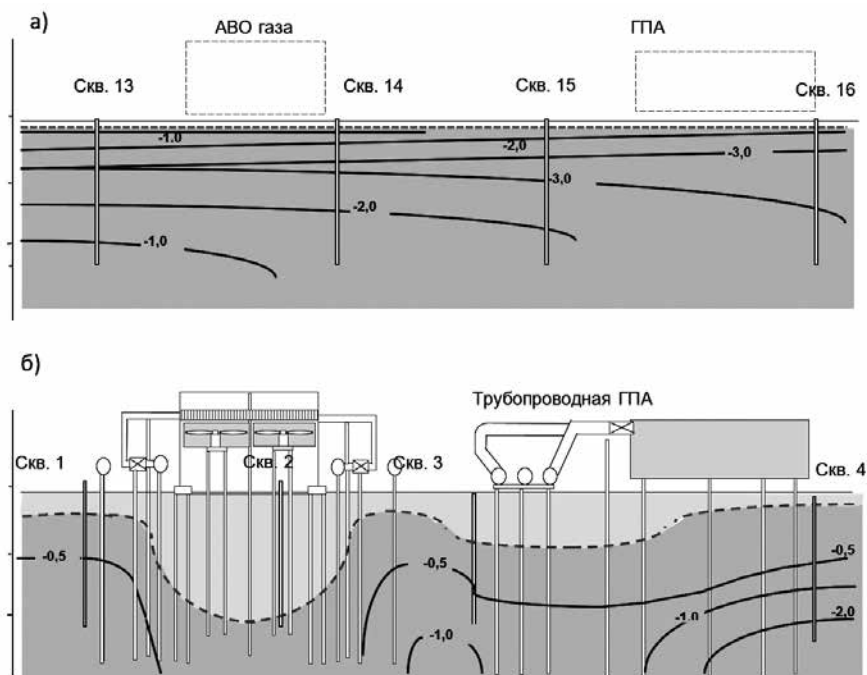


Рис. 4.5. Медвежье нефтегазоконденсатное месторождение. Изменение температурного поля и формирование техногенных таликов в основании сооружений ДКС-9. а — естественные условия по данным изысканий; б — техногенные талики после 5 лет эксплуатации

Значительным деформациям подвержены магистральные трубопроводы с температурой продукта, отличной от температуры вмещающих пород. Вокруг трубопроводов с положительной температурой транспортируемого продукта ($+10^{\circ}\text{C}$ и более), в зависимости от способов теплоизоляции, а также состава, криогенного строения и температурного режима грунтов в естественных условиях, образуются техногенные талики, что сопровождается процессами проседания поверхности, локальным термокарстом, термоэрозией вдоль трубы и нередко приводит к всплыванию газопровода на дневную поверхность (рис. 4.6).

При транспортировке охлажденного газа (от -2°C зимой до -7°C летом), при пересечении газопроводом склонов, поднятие верхней границы ММП под трубопроводом приводит к затруднению грунтового стока, что грозит активизацией термоэрозии и оползней-сплывов. Кроме того, прокладка трубопроводов через таликовые зоны на переходах через водотоки неизбежно приводит к формированию ореолов промерзания, усилению сегрегационного льдообразования и пучению промерзающих грунтов, что служит причиной деформаций газопроводов.

а)



б)



в)



Рис. 4.6. Магистральные газопроводы $\varnothing 1420$ мм. Различные типы деформаций на участках потери несущей способности мерзлых оснований. а, б — деформации газопровода в плане на участках оттаивания ММП и всплывтия; в — оттаивание ММП под тепловым воздействием подземных газопроводов на участках расположения крановых узлов

Значительным деформациям подвержены основания площадок расположения нефте- и газодобывающих скважин и прискважинных сооружений (рис. 4.7). Ранее выполненный нами анализ различных осложнений, возникающих при строительстве и эксплуатации скважин в криолитозоне (Березняков и др., 2003) показал, что оттаивание льдистых пород в верхней части разреза сопровождается обвалами оттаявшего грунта, искривлением обсадных колонн крепи скважин, их смятием при обрат-

ном промерзании вмещающих пород, что приводит к возникновению различного рода аварийных ситуаций.

Особенно актуальны геотехнические проблемы для старого фонда добывающих скважин, строительство которых осуществлялось в условиях отсутствия достаточного опыта, без надлежащих решений, обеспечивающих снижение тепловой нагрузки на вмещающие ММП.

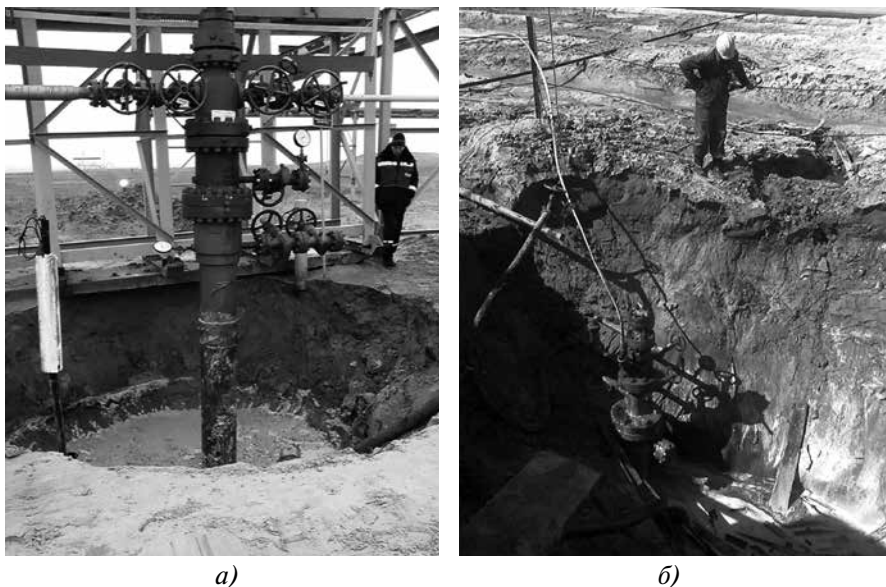


Рис. 4.7. Деформации эксплуатационных скважин.

а — Бованенковское месторождение, термокарстовая просадка в приустьевой зоне; б — Сандибинское месторождение, потеря продольной крепи скважины и слом колонн скважины при оттаивании и осадке вмещающих ММП

Результаты ГТМ объектов нефтегазовой промышленности свидетельствуют о том, что значительная часть осложнений, связанных с потерей устойчивости сооружений, построенных и эксплуатирующихся в криолитозоне, связана не только с техногенными воздействиями на ММП, но также обусловлена и современными изменениями их состояния в результате глобальных климатических изменений.

Повышение среднегодовой температуры воздуха и увеличение зимних осадков за последние четверть века привело к значительным изменениям температурного режима ММП. За последние 35–40 лет фоновые значения температуры верхней части разреза ММП на приморских низменностях Западной Сибири повысились на величину от 2,0 до 4,0 °С в зависимости от геоморфологического уровня. При этом повышение

зафиксировано не только в слое годовых амплитуд (10–15 м), но и значительно ниже, до глубин 25–30 м (рис. 4.8, см. с. XIV цв. вклейки).

Наличие на приведенных графиках обратного градиента температуры в интервале глубин от поверхности до 50–60 м свидетельствует [Осокин и др., 2012] о факте разогрева верхней части разреза ММП и несоответствии современных условий теплообмена на поверхности ранее сформировавшимся геотемпературным условиям.

Помимо повышения среднегодовой температуры ММП и связанного с ним снижения несущей способности мерзлых оснований, наблюдающееся с конца 70-х гг. прошлого века потепление привело к изменению экзогеодинамической обстановки и активизации комплекса опасных экзогенных геологических процессов, прежде всего криогенных.

Резкая активизация всего комплекса парагенетически связанных криогенных процессов происходит в аномальные сезоны, когда климатические отклонения по температуре и осадкам в теплый период года превышают норму на 10–15%. Оптимальные условия для интенсивного проявления процессов за последние 40 лет складывались в 1983–1984, 1989–1990 и 2014–2015 гг.

Наиболее активно развивающимися и опасными процессами, угрожающими безаварийной эксплуатации линейных и площадных сооружений нефтегазового комплекса, являются термокарст, криогенное оползание грунтов, термоэрозия, термоабразия, морозобойное растрескивание и морозное пучение. Отличительной чертой этих процессов является их тесная парагенетическая связь. Практически ни один из процессов не присутствует в чистом виде, все они или развиваются синхронно друг с другом, или же каждый из них становится причиной и условием развития другого. Примеры развития опасных криогенных процессов, угрожающих безаварийной эксплуатации объектов нефтегазового комплекса [Меньшиков и др., 2016], приведены на рис. 4.9–4.10.



Рис. 4.9. Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение. Развитие термоцирков по пластовым льдам на пологом (а) и крутом (б) склонах морских террас в районе концентрации термоэрозионных оврагов

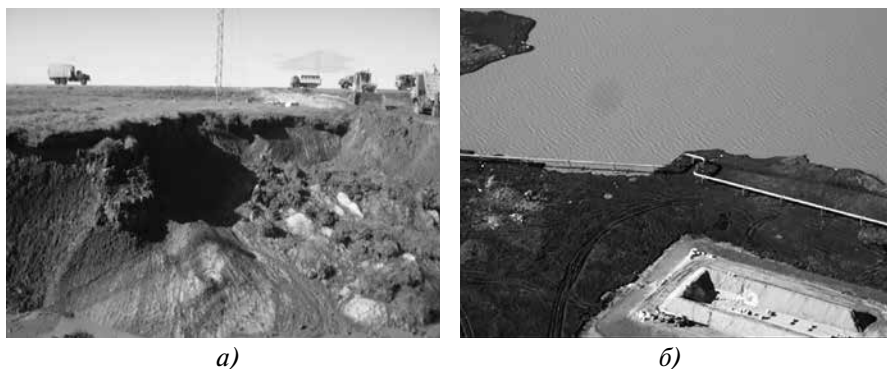


Рис. 4.10. Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение. Различные типы криогенных процессов, угрожающих устойчивости линейных сооружений

В целом, характерной чертой территории размещения объектов нефтегазовой промышленности региона являются сложные процессы активной переработки реликтовых морских равнин во вторичные озерно-аллювиальные равнины, которые более соответствуют современным климатическим условиям, более стабильны в ненарушенном состоянии и более устойчивы к техногенным воздействиям (Грива, 2005). Процесс этой переработки повсеместен и проявляется в активном вертикальном расчленении территории, ведущая роль в котором принадлежит эрозионно-аккумулятивной деятельности рек, процессам криопланации, снижению местных базисов эрозии и комплексной термоденудационной переработке склонов морских террас. Эти природные, не связанные с техногенным воздействием, процессы обусловлены глобальными климатическими изменениями и представляют значительную угрозу объектам нефтегазового комплекса.

4.2.2. Объекты Европейского Севера и Западной Сибири

Предприятия нефтегазовой промышленности, имея обширный опыт проектирования, строительства и эксплуатации объектов в криолитозоне в условиях севера европейской части страны и в арктических регионах Западной Сибири, свидетельствующий о необходимости эффективного контроля и управления геотехническими системами в условиях распространения ММП, руководствуясь нормативной базой федерального и корпоративного уровня, широко внедряют технологию геотехнического мониторинга (ГТМ) на объектах обустройства месторождений (установки подготовки газа и нефти, скважины, трубопроводы, ЛЭП, дороги и т.д.), на объектах транспортировки углеводородного сырья [Бондарик, 1981; Осокин, Меньшиков, Морозов, 2012].

На текущий момент в составе всех крупных дочерних обществ ПАО «Газпром», осуществляющих эксплуатацию месторождений углеводородов и газотранспортной системы в Арктической зоне (дочерние общества «Газпром добыча Надым», «Газпром добыча Уренгой», «Газпром добыча Ямбург», «Газпром добыча Ноябрьск», «Газпром трансгаз Югорск», «Газпром трансгаз Ухта»), в составе совместных предприятий Группы Газпром («Газпром нефть») созданы и успешно функционируют службы геотехнического мониторинга (ГТМ). Опыт внедрения системы ГТМ успешно транслируется и в проекты таких компаний, как «НОВАТЭК», «Транснефть» и др.

Системы геотехнического мониторинга функционируют на предприятиях, разрабатывающих следующие газоконденсатные (ГКМ) и нефтегазоконденсатные (НГКМ) месторождения региона: Бованенковское НГКМ, Медвежье НГКМ, Заполярное НГКМ, Уренгойское НГКМ, Ямсовейское НГКМ, Юбилейное НГКМ, Ямбургское НГКМ, Новопортовское НГКМ, Южно-Тамбейское ГКМ.

Работы по ГТМ выполняются также и на большинстве газотранспортных систем, включая следующие магистральные газопроводы (МГ): Бованенково–Ухта, Ямбург–Поволжье, Ямбург–Западная граница, Ямбург–Торжок, Ямбург–Елец, Ямбург–Тула, СРТО–Урал, Уренгой–Помары–Ужгород, Уренгой–Центр, Уренгой–Петровск, Уренгой–Новопсков.

Геотехнический контроль при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов нефтегазовой промышленности включает в себя следующие направления:

- контроль процесса проектирования оснований и фундаментов объектов, включая объемы и качество инженерных изысканий, выбор площадок строительства, принятие принципиальных строительных решений;
- контроль соблюдения проектных требований к состоянию многолетнемерзлых грунтов оснований, фундаментов, систем термостабилизации в процессе строительства объектов, в том числе посредством проведения геотехнического мониторинга на стадии строительства;
- геотехнический мониторинг на стадиях строительства и эксплуатации объектов, включающий инструментальный контроль динамики мерзлотно-геологических условий участков застройки, состояния систем термостабилизации мерзлых грунтов, несущих элементов зданий и сооружений, напряженно-деформированного состояния конструкций;
- своевременное устранение непроектных и ненормативных состояний в процессе проведения текущих, капитальных ремонтов и реконструкции объектов.

Целью осуществления геотехнического контроля промышленных объектов, строящихся и эксплуатирующихся в условиях криолитозоны, является обеспечение их механической безопасности, соответствия проектным и нормативным условиям эксплуатации оснований и фундаментов.

Как следует из вышеизложенного, одним из важнейших видов работ в рамках геотехнического контроля объектов, строящихся и эксплуатирующихся в условиях криолитозоны, является геотехнический мониторинг. Для достижения указанной цели в рамках проведения геотехнического мониторинга решается следующий комплекс задач:

- постоянный инструментальный контроль динамики геокриологических условий площадок и трасс расположения объектов капитального строительства, оснований инженерных сооружений, пространственного положения несущих конструкций, оборудования и трубопроводов и их соответствия проектным и нормативным условиям;
- инструментальный контроль работоспособности систем термостабилизации, функционирования вентилируемых подполий в основаниях зданий, условий снегонакопления на участках застройки;
- мониторинг динамики опасных экзогенных мерзлотно-геологических процессов в зоне потенциального воздействия на инженерные сооружения;
- комплексный геотехнический прогноз динамики геокриологических условий и устойчивости оснований и фундаментов, в том числе с использованием нестационарных численных методов теплотехнического и термомеханического моделирования;
- контроль напряженно-деформированного состояния конструкций зданий, сооружений, оборудования и трубопроводов с использованием инструментальных и расчетных методов.

При проектировании объектов в составе проектной документации в соответствии с действующими государственными и корпоративными нормативами разрабатывается раздел «Геотехнический мониторинг», в котором обосновывается сеть системно расположенных термометрических и пьезометрических наблюдательных скважин, глубинных геодезических реперов и деформационных марок. Разрабатываются программы геотехнического мониторинга, в которых обосновываются требования к периодичности и точности измерений, хранению и обработке полученных результатов. Обосновываются критериальные параметры допустимых изменений геотехнических систем: температурный режим ММГ, при котором допускается передача полезной нагрузки на фундаменты в процессе строительства, допустимый диапазон изменения температуры ММГ в зоне заложения фундаментов в процессе эксплуатации объектов, допустимые величины деформаций фундаментов и опорных

конструкций, зданий технологических цехов, оборудования и трубопроводов.

Геотехнический мониторинг объектов начинается на стадии строительства. При возведении фундаментов осуществляется инструментальный контроль температур грунтов в термометрических наблюдательных скважинах с целью выполнения требований проектной документации в части обеспечения расчетных температур ММГ в момент передачи нагрузки на сваи. На завершающем этапе строительства, в соответствии с программой, разрабатываемой в составе проектной документации, выполняется «базовый», или «реперный», замер геотехнического мониторинга по всему объему сетей ГТМ (термометрическим и пьезометрическим скважинам, глубинным геодезическим реперам, деформационным маркам). Осуществляется контроль работоспособности систем термостабилизации. По результатам измерений разрабатывается геотехнический паспорт объекта, который содержит в себе сведения об инженерно-геологических условиях площадки (трассы) строительства, проектных решениях по основаниям, фундаментам и системам термостабилизации, допустимым диапазонам изменения параметров геотехнических систем (диапазоне изменения температурного режима ММГ в зонах заложения фундаментов, допустимых значениях деформаций фундаментов и опорных конструкций и т.п.), результатах измерений в рамках «базового» замера ГТМ, выводы о соответствии состояния геотехнических систем нормативным и проектным требованиям.

Затраты на проведение геотехнического мониторинга на стадии строительства, как правило, включаются в сметы строительства объектов. Геотехнические паспорта являются неотъемлемой составной частью исполнительной документации и базой для проведения ГТМ на стадии эксплуатации.

На стадии эксплуатации объектов инструментальные измерения в рамках геотехнического мониторинга осуществляются в объеме и с периодичностью, определенными нормативными и проектными документами. Результаты измерений сравниваются с критериальными требованиями состояния геотехнических систем, определенными в нормативной, проектной документации, а также в геотехнических паспортах.

Для контроля температурного режима ММГ в основаниях объектов все шире используется термометрическое оборудование, работающее автономно, в автоматическом режиме. Для этого применяется оборудование различных производителей с передачей сигнала на центральный сервер управления как с использованием радиоканала, так и с помощью проводной связи (рис. 4.11). Применяется также и термометрическое оборудование с ручным режимом опроса датчиков.



Рис. 4.11. Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение. Термометрическая наблюдательная скважина, оборудованная термометрическим оборудованием с функцией передачи сигнала по радиоканалу

Работоспособность систем термостабилизации определяется как по визуальным признакам (наличие инея на теплообменниках в зимний период), так и с использованием тепловизионной съемки (рис. 4.12, см. с. XIV цв. вклейки). В случае, если системы термостабилизации не работают либо работают неэффективно, на термограмме определяется, что температуры теплообменников равны или близки к температуре атмосферного воздуха (иных металлоконструкций, расположенных на объекте и имеющих температуру атмосферного воздуха). Температура поверхности теплообменников эффективно работающих термостабилизаторов при низких отрицательных температурах атмосферного воздуха должна быть существенно выше нее.

Кроме того, об эффективности функционирования систем термостабилизации позволяют делать выводы результаты режимных наблюдений в термометрических наблюдательных скважинах, обустроенных в зоне теплового воздействия систем термостабилизации.

Изменения пространственного положения фундаментов, конструкций зданий, оборудования и трубопроводов традиционно определяются геодезическими методами с использованием цифровых нивелиров и тахеометров. В зависимости от категории ответственности сооружений, нормативных и проектных требований режимное нивелирование деформационных марок на фундаментах, зданиях, оборудовании и трубопроводах выполняется по методике от 2-го до 4-го класса точности.

Большие объемы геодезических измерений (речь идет о тысячах и десятках тысяч точек геодезического контроля в рамках отдельно взятого месторождения или компрессорной станции) являются наиболее

трудозатратными процессами в рамках геотехнического мониторинга объектов газовой промышленности. Именно в связи с данным обстоятельством в последние годы осуществляется активная разработка и опытно-промышленное апробирование технологий, позволяющих осуществлять контроль изменения пространственного положения строительных конструкций с необходимой точностью с использованием дистанционных методов. АО «Газпром космические системы» при поддержке «Роскосмоса» разрабатываются технологии мониторинга планово-высотного положения объектов с использованием спутниковой радарной интерферометрии. Уже достижима точность контроля пространственного положения трубопроводов около 20 мм, т.е. сопоставимая с точностью традиционных геодезических методов.

Ряд компаний ТЭК выполняет опытно-промышленные работы по использованию наземного лазерного сканирования для целей определения изменений пространственного положения объектов.

Очевидно, что с учетом огромного количества промышленных объектов нефтяной и газовой промышленности, их территориальной удаленности, в большом ряде случаев — сложной транспортной доступности, необходимости оптимизировать эксплуатационные затраты, использование методов геотехнического мониторинга, основанных на аппаратуре, функционирующей в автоматическом режиме с возможностью дистанционной передачи сигнала, применение дистанционных методов зондирования (в том числе космических) является основной перспективой развития технологий геотехнического мониторинга в отрасли.

Для объектов мониторинга, на которых регистрируется высокая динамика теплового режима многолетнемерзлых грунтов, разрабатываются постоянно действующие теплотехнические модели, в том числе с целью обоснованного регулирования теплового режима ММГ (рис. 4.13, см. с. XV цв. вклейки). Теплотехнические модели разрабатываются с использованием специализированных компьютерных программ, позволяющих реализовать двух- и трехмерные нестационарные решения задачи Стефана с подвижной границей раздела фаз и с учетом засоленности поровой жидкости. На основании теплотехнического моделирования разрабатываются технические решения, обеспечивающие проектный тепловой режим многолетнемерзлых грунтов оснований, при необходимости осуществляется регулирование мощности систем термостабилизации.

Для диагностики состояния инженерных сооружений, напряженно-деформированного состояния трубопроводных систем применяется комплексное термомеханическое моделирование с использованием специализированного программного обеспечения для расчета напряженно-деформированного состояния оборудования и трубопроводов (рис. 4.14, см. с. XV цв. вклейки).

При осуществлении геотехнического мониторинга, в случаях, когда по результатам измерений фиксируется приближение значений измеряемых характеристик геотехнических систем к предельно допустимым значениям (температуры ММГ в зоне заложения фундаментов, уровней грунтовых вод, значений деформаций фундаментов и других несущих конструкций, иных параметров), разрабатываются управляющие технические решения, которые реализуются в процессе выполнения текущих, капитальных ремонтов объектов и реконструкции.

На территориях активного развития опасных экзогенных мерзлотно-геологических процессов осуществляется мониторинг их динамики на участках потенциального воздействия на объекты капитального строительства. Речь идет о таких процессах, как термокарст, термоэрозия, термоабразия, подтопление, которые представляют угрозу, как правило, для линейно-протяженных объектов обустройства месторождений, вне отсыпанных площадок (трубопроводов-коллекторов сетей сбора скважинной продукции, магистральных трубопроводов, линий электропередачи, автомобильных дорог).

Для контроля динамики опасных мерзлотно-геологических процессов осуществляются режимные наблюдения с использованием космических и аэрофотоснимков, наземных маршрутных исследований, обустройства режимные площадки. Разрабатываются критерии рисков воздействия опасных экзогенных процессов на промышленные объекты с учетом расстояния до очагов их развития, вида процесса и интенсивности его развития. В случае возникновения недопустимых рисков их воздействия на объекты капитального строительства разрабатываются и реализуются мероприятия по инженерной защите [Меньшиков, Морозов и др., 2014].

При формировании ситуационных планов обустройства месторождений объекты размещаются с учетом сведений о распространении на территории очагов опасных экзогенных мерзлотно-геологических процессов. Для этого при выполнении инженерных изысканий разрабатываются специализированные карты распространения экзогенных процессов.

Таким образом, за последние два десятилетия в большом ряде компаний ТЭК, осуществляющих хозяйственную деятельность в условиях криолитозоны, создана и эффективно функционирует система геотехнического контроля, базирующаяся на геотехническом мониторинге, позволившая контролировать динамику мерзлотных условий в пределах территорий застройки, оптимизировать объемы инженерных изысканий при реализации крупных инвестиционных проектов, разрабатывать и внедрять современные геотехнические решения при строительстве на многолетнемерзлых грунтах, обеспечивать устойчивость и механическую безопасность промышленных объектов, оптимизировать эксплуа-

тационные расходы за счет своевременно принимаемых решений по управлению состоянием мерзлых оснований.



Рис. 4.15. Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение. Термоденудационная просадка в опасной близости от внутрипромысловой автомобильной дороги

При этом следует отметить существенный недостаток ведомственной системы геотехнического мониторинга. Он заключается в отсутствии контроля за динамикой геокриологических условий за пределами зон промышленной застройки, в том числе за температурным режимом ММП, вследствие чего при контроле температурного режима многолетнемерзлых грунтов оснований объектов отсутствует возможность разделить природную и техногенную составляющие изменений теплового состояния мерзлоты в зонах застройки. Малозаметные изменения фонового состояния теплового режима массивов ММП, обусловленные многолетними изменениями климата, не идентифицируются и не всегда учитываются при составлении геокриологических прогнозов. Между тем, за прошедшие 30–40 лет несущая способность мерзлых грунтов в Западной Сибири за счет повышения температур, обусловленных глобальным потеплением, снизилась на 5–30%. Причем пояс максимального снижения несущей способности проходит примерно по линии Салехард–Надым–Новый Уренгой–Норильск, захватывая при этом и полуостров Ямал, т.е. область нефтегазового освоения территорий конца XX в., и все построенное здесь в то время находится в условиях риска, поскольку оказывается исчерпан запас прочности по грунту.

Отсутствие фонового мониторинга динамики геокриологических условий за пределами участков застройки безусловно снижает ценность и достоверность выполняемых работ. Однако действующими нормативами федерального уровня (а соответственно, и корпоративными стан-

дартами) фоновый геокриологический мониторинг при проведении ГТМ не предусмотрен. Очевидно, для исправления ситуации требуется внесение соответствующих требований в нормативную базу проектирования.

4.2.3. Магистральный газопровод Надым—Пунга, Западная Сибирь

Надымский стационар (площадка регулярного посещения) — самый старый в Западной Сибири — основан в 1972 г. (ВСЕГИНГЕО, Мингео СССР) после прокладки газопровода Надым—Пунга в подзоне северной тайги (рис. 4.16, см. с. XVI цв. вклейки) примерно на границе областей прерывистого и островного распространения многолетнемерзлых пород (ММП). С 1990-х гг. работы ведет ИКЗ СО РАН [Москаленко, 1980; Комплексный мониторинг... 2012]. Целью мониторинга было наблюдение за изменением геокриологических условий в полосе, на которой в ходе прокладки газопровода и последующей плановой замены труб были нарушены рельеф, растительность, почвы, естественный режим поверхностных и подземных вод (рис. 4.17 и 4.18).



Рис. 4.17. Зона с нарушенным растительным покровом и измененным при перекладке газопровода рельефом вдоль трассы газопровода (2005 г.)



Рис. 4.18. Нарушение естественных условий стока поверхностных вод в 2005 г., в ходе реконструкции газопровода Надым—Пунга привело к временному подтоплению территории на 8 км трассы газопровода Надым—Пунга

Созданию стационара предшествовало составление карты исходных ландшафтных условий по аэроснимкам 1970 г., давшей возможность выявить доминантные ландшафты, выбрать и разместить объекты наблюдения.

Для проведения мониторинга геокриологических условий вдоль трассы газопровода, в доминантных ландшафтах были заложены парные наблюдательные площадки: каждая площадка, расположенная в нарушенной полосе, имела аналог вне полосы нарушений. Перпендикулярно трассе газопровода были заложены профили, пересекающие нарушенные и естественные ландшафты и ежегодно в летнее время на всех площадках и профилях выполнялись наблюдения за динамикой геосистем. В том числе на площадках в 10 метровых скважинах измерялась температура пород, у марок на площадках и профилях определялась глубина протаивания грунтов и выполнялось описание растительного покрова.

Поскольку климат в 70-е гг. XX в. был относительно стабилен, выполненными исследованиями устанавливалось преимущественно влияние техногенеза на криогенные геосистемы согласно первоначальной программе. Но уже через 10 лет климатологи отметили начавшееся направленное повышение температуры воздуха, которое продолжается до сих пор, и геокриологический мониторинг получил новое дополнительное направление — потребовалось оценить влияние потепления на естественное изменение геокриологических условий. Данные 1970-х гг. служат фоном для оценки изменений геокриологических условий, обусловленных трансформацией климата и техногенезом.

В 2004–2005 гг. произведена реконструкция газопровода, вызвавшая новые нарушения, что потребовало обновления некоторых объектов наблюдательной сети стационара. Внедрение логгеров позволило перейти к круглогодичному мониторингу температуры пород по всей глубине наблюдательных скважин, в том числе в слое сезонных колебаний.

Природные условия

Вне зоны техногенеза естественные ландшафты подвергаются медленной трансформации под влиянием потепления климата и в силу саморазвития. Потепление климата выразилось в повышении среднегодовых температур воздуха и в существенном увеличении длительности теплого периода, т.е. длительности периода оттаивания грунтов сезонно-талого слоя (СТС). Среднегодовые температуры воздуха в 80-х, 90-х гг. XX в. поднимались со скоростью 0,03 °C/год, а с начала XXI в. — на 0,06 °C/год. Длительность периода оттаивания увеличилась на 15–20 дней, главным образом за счет более раннего начала весны.

На *ровных лесных ландшафтах* мерзлота отсутствует (зафиксировано до глубины 20 м), температура пород обычно +1...+2,5 °C.

На остальных ландшафтах увеличение температуры воздуха и высоты снежного покрова привело к значительным изменениям температуры и даже началу деградации ММП. В 70-х гг. XX в. среднегодовая температура пород на глубине 10 м составляла $-2...-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в настоящее время она близка к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-0,1...-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) и лишь на высоких буграх пучения она составляет пока $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. На ранее безлесных пространствах (торфяники, болота) появляются единичные деревья, высота и площадь проективного покрытия кустарника увеличивается, что способствует снегозадержанию, сокращается доля лишайников на буграх пучения.

Повышение температуры грунтов отмечено и в слое сезонного протаивания, в результате чего мощность слоя увеличилась, начала развиваться тепловая осадка поверхности, а на поверхности некоторых бугров пучения начал развиваться термокарст. Он проявляется в образовании провалов и озерков *на поверхности бугров*, в появлении свежих оползней и трещин на склонах бугров. В окрестностях стационара обнаружено новое термокарстовое озеро, образовавшееся на месте бугра пучения (1999–2000 гг.). На *старых залесённых буграх пучения* повышения температуры ММП не происходит. Причиной этого, возможно, является сильное затенение поверхности бугра летом, благодаря разрастанию древесной растительности и кустарника.

В *болотных ландшафтах* отмечено понижение кровли ММП и формирование слоя мощностью 3–7 м, в котором температуры пород равны нулю. В холодные годы, по-видимому, породы слоя имеют температуру «минус ноль» их оттаивание прекращается, а в теплые температура пород становится «плюс ноль», и оттаивание пород продолжается.

На некоторых *плоских торфяниках* повышение температуры пород приводит к образованию как постоянных, так и временных (рис. 4.19, см. с. XVI цв. вклейки) участков с мерзлотой несливающегося типа (сезонная мерзлота не сливается с вечной). Небольшая мощность торфа (до 0,5 м) и неоднородность литологического состава приповерхностных отложений формируют контрастный криогенный рельеф (рис. 4.20), в понижениях которого зимой скапливается снег, образуя покров, по мощности превышающий критические значения.

Поверхность всех торфяников зимой испытывает неравномерный подъем вследствие сезонного пучения, а летом при оттаивании происходит ее неравномерное понижение. В XX в. пучение преобладало над осадкой. Последние 19 лет преобладает тепловая осадка за период с 2004 до 2019 г. поверхность осела на 12 см. А это ведет к формированию множества локальных мочажин и увеличению теплопотока в грунт.

Тепловая осадка поверхности отмечена и на грядах пучения, особенно по контуру у подножья.



Рис. 4.20. Контрастный криогенный рельеф торфяников, на которых периодически формируются участки с мерзлотой несливающегося типа

Техногенез

Эффект техногенного воздействия и естественная динамика ландшафтов фиксируются ежегодно, ландшафтная карта пересоставляется примерно каждые 10 лет (в 1979, 1988, 1998, 2005 гг.), установлено 9 основных видов техногенных нарушений.

Наибольшую площадь и отрицательное влияние оказывает **нарушение покровов**: полное уничтожение растительного покрова; полное или частичное снятие торфяного покрова; нарушение микрорельефа. На нарушенных участках первоначальная пространственная структура геосистем с 1970 г. так и не восстановилась.

На **недренированных и слабодренированных участках** снятие растительного покрова приводит к активизации заболачивания — возникают торфяно-моховые болота, консервирующие изменения на неопределенно долгое время. Соответственно, не восстанавливаются первоначальные геокриологические условия.

Самыми уязвимыми к нарушениям поверхности оказались **бугры и гряды пучения**, сложенные сверху песками, которые на глубинах 4–8 м подстилаются сильнольдистыми суглинками. Вырубка древостоя, снятие кустарничкового и лишайникового покрова на буграх уже в первые годы после нарушения привела к двукратному уменьшению влажности песков, увеличению на 5–6 °С летних среднесуточных температур в верхней части разреза и увеличению глубины сезонного протаивания более чем вдвое. После прекращения техногенного воздействия на поверхности бугров и гряд появляются березы и подрост кедра, что способствует задержанию снега зимой и, соответственно, препятствует промерзанию грунтов. В восстанавливаемом напочвенном растительном покрове сокращается доля лишайников, что отрицательно влияет на альбедо и ведет к дополнительному увеличению глубины протаивания.

В настоящее время на вершинах нарушенных бугров пучения, верхняя часть которых сложена песками, кровля ММП погрузилась на глубину 3–5 м и сформировалась мерзлота несливающегося типа.

Менее значимые последствия отмечались *на плоских торфяниках и болотах*. Удаление растительного покрова привело здесь к повышению температуры почвы в летнее время соответственно на 3–4 °С и на 2 °С. В нарушенных болотных ландшафтах восстановление первоначального растительного покрова и постепенное возвращение температурного режима ожидалось через 20 лет после нарушения. Реально достигнуто современное фоновое состояние.

Отепляющее воздействие газопровода привело к понижению кровли ММП под ним, т.е. к формированию талой зоны мощностью 10 м (определено по данным геофизических исследований). Кроме того, по отношению к поверхностным водам газопровод и насыпь над ним оказывают барражный эффект, мешают поверхностному стоку и приводят к образованию небольших по площади подпрудных озер, вытянутых вдоль газопровода (рис. 4.21, А). Тепловое влияние подпрудных водоемов приводит к заболачиванию, гибели растительного покрова, оттаиванию мерзлоты, понижению поверхности, увеличению глубины и площади техногенного талика, существенному изменению гидрологических, гидрогеологических и геокриологических условий вдоль трассы газопровода. При промерзании оттаявших грунтов в условиях обильного увлажнения происходит сезонное и многолетнее пучение, что может быть причиной нарушения трубопровода (рис. 4.21, Б). Подтверждением тому — плачевное состояние многих участков технологической дороги (рис. 4.21, В).



*А — подпрудное озеро
вдоль трассы газопровода*



Б — выпучивание трубы газопровода вследствие неравномерного пучения



В — полное разрушение технологической дороги в результате сезонного пучения-оттаивания с выносом материала песчаной отсыпки по притрассовому дренажу

Рис. 4.21. Примеры техногенных нарушений ландшафтов и покровов

Повторное картирование

Для Надымского геокриологического стационара и прилегающей к нему территории (как и для всех остальных стационаров и наблюдательных площадок) составлены комплекты карт, отражающих ландшафтную структуру территории, развитие криогенных процессов, геологические и геокриологические условия на момент организации стационара. Большинство стационаров (5 из 6) функционируют более 35 лет, и на их территории, на базе повторных дистанционных и полевых съемок составлены карты, отражающие изменения природной среды за этот промежуток времени. Наиболее полно в этом смысле обеспечен картами, отражающими динамику ландшафтных и геокриологических условий, Надымский стационар в связи с его специализацией — изучение динамики естественных и нарушенных линейным строительством ландшафтов (рис. 4.22, см. с. XVII цв. вклейки).

Выводы

Таким образом, в естественных ландшафтах происходят те же изменения, что и на техногенно нарушенных: повышение температуры ММП, понижение ее кровли, увеличение мощности СТС, тепловая осадка поверхности, но темпы естественных изменений значительно более медленные, а площадь проявления их значительно больше. Пока природные процессы разрушения охватывают лишь бугры пучения, сложенные с поверхности льдистыми породами. На остальной территории стационара криогенные ландшафты находятся в состоянии, близком к критическому, но, по-видимому, в этом состоянии они могут пребывать неопределенно долго, поскольку оттаивание ММП происходит медленно.

Техногенные изменения независимо от их интенсивности пока локальны. К катастрофическим последствиям техногенная активизация опасных криогенных процессов не привела, так как влияние техногенеза распространилось пока только на малольдистые песчаные грунты верхних метров геологического разреза и не затронуло нижележащие сильнольдистые суглинки. Потенциальные опасности, связанные с этой перспективой, хорошо известны, и текущая геокриологическая обстановка свидетельствует: к проектированию защитных мер пора приступать. Аварийное подпруживание поверхностного стока в 2004–2005 гг. при реконструкции трубопровода, приведшее к размывам обваловок трубы и технологической дороги, гибели растительности и необратимому преобразованию ландшафта на обширных пространствах, активизации термокарста, разрастанию чаши протаивания под трубопроводом, утрата реперов напоминают о грозящих опасностях. Однако *то, что эксплуатирующие службы, информированные о мониторинговых работах РАН, не запрашивают эти материалы для своих нужд, свидетельствует, что всестороннее понимание грядущих рисков еще не сформировалось.*

Существенным результатом работы Надымского стационара для хозяйствования в криолитозоне является то, что отмеченные здесь природные и техногенные изменения геокриологических условий дают представление о том, что будет происходить при постепенном смещении ландшафтных и геокриологических границ на север. Вопросы смещения на север зоны островного распространения ММП вплотную встают для территории Уренгойского НГКМ.

4.2.4. Магистральный газопровод Мессояха–Норильск, Западная–Восточная Сибирь

По трассе *магистрального газопровода Мессояха–Норильск* в 1968–1977 гг. экспедицией кафедры мерзловедения геологического факуль-

тета МГУ были выполнены мерзлотные исследования, в том числе мерзлотная съемка и режимные наблюдения за динамикой геокриологической обстановки в связи с его строительством и эксплуатацией [Гарагуля, Гордеева, Полтев, Смирнов, 1970 и др.]. Отмечалось, что на правобережном участке перехода через Енисей аварий не было зафиксировано, однако развитие термоэрозионных и солифлюкционных процессов существенно нарушало устойчивость подземных участков газопровода [Полтев, Кондратьев, Замолодчикова и др., 1979]. Опыт и результаты изучения специфики и динамики мерзлотных условий, разработки методики мерзлотных исследований в связи с проектированием, строительством и эксплуатацией *перехода этого газопровода через р. Енисей*, где был использован подземный способ прокладки, были обобщены и опубликованы в виде монографии В. Г. Кондратьевым [1988]. В этой же работе приведены результаты исследования влияния криогенных процессов в долине Енисея на устойчивость газопровода, проанализированы причины отказов и разработаны рекомендации по их предотвращению.

В 1970–1973 гг. Институтом мерзлотоведения СО АН СССР проводились геокриологические исследования по трассе *магистрального газопровода Мессояха–Дудинка–Норильск–Талнах* на участке Волгочан–Алыкель, где на организованных стационарных площадках, обустроенных для систематических режимных наблюдений, изучалось влияние газопровода на температурный режим грунтов, деформации (пучение-осадка) опор газопровода на участке наземной прокладки и самого газопровода на экспериментальном участке наземной его прокладки [Шумаков, 1974]. Основной способ прокладки этого газопровода — наземный, подземная прокладка была использована лишь на участках в поймах рек Енисей, Большая Хета и Норилка.

По Ю. С. Шумакову [1974], первая стационарная площадка находилась в районе оз. Алыкель (в 3,5–4,0 км от железнодорожной станции Алыкель). Ландшафтные и геокриологические условия ее типичны для значительной части трассы магистрального газопровода (от Дудинки до Норильска). Вторая площадка расположена в районе ст. Волгочан в 10 км от первой по газопроводу в сторону г. Дудинка в пределах экспериментального участка строительства (протяженностью около 9 км), где была использована наземная прокладка трубопровода. Состав наблюдений на площадках стационаров: 1) нивелировка свайных опор, поверхностных наземных марок и участка трубопровода, лежащего на грунте; 2) измерение температур промерзающих и протаивающих грунтов; 3) наблюдения за динамикой протаивания и частично промерзания грунтов; 4) измерения мощности снежного покрова по профилям; 5) фиксация деформаций грунтов по дифференциальным пучино-осадкомерам; 6) наблюдения за общим состоянием газопровода на участке Волгочан–Алыкель.

Всего на двух опорных участках было пройдено и обустроено 13 скважин для геотермических наблюдений с использованием залегиваемых психрометрических термометров.

На опорном участке в районе оз. Алыкель: скв. № 1 пройдена до глубины 9,3 м в северной оконечности оз. Алыкель в 18 м на юг от трубопровода у К-3270; скв. № 2 — до глубины 9,4 м там же в 26 м на север от трубопровода у К-3270; скв. № 3 — до глубины 8,2 м там же в 1,5 м на север от трубопровода у К-3270; скв. № 4а — до глубины 1,0 м там же на склоне юго-восточной экспозиции в 20 м от скв. № 2; скв. № 4в — до глубины 3,0 м там же в 34 м на юг от газопровода, К-3270 и в 5 м от скв. № 4; скв. № 4г — до глубины 8,85 м там же в 34 м на юго-юго-запад от газопровода; скв. № 5 — до глубины 9,15 м там же в 124 м к северу от трубопровода. Температуры грунтов на глубине 5,5–6,0 м в скважинах № 2 и № 3 достигали значений $-6,0...-6,2^{\circ}\text{C}$ и на $0,5^{\circ}\text{C}$ выше, чем в скв. № 1.

На опорном участке в районе ст. Волгочан: скв. № 6 пройдена до глубины 9,3 м в 500 м от ст. Волгочан в 7,5 м на юг от трубопровода; скв. № 7 — 9,7 м там же в 17 м на север от трубопровода; скв. № 8 — 9,3 м там же в 0,7 м на север от трубопровода; скв. № 9 — 5,35 м там же в 80 м на юг от трубопровода; скв. № 10 — 12,8 м там же в 95 м на юг от трубопровода; скв. № 11 — 4,25 м в 1 км от ст. Волгочан в 500 м от скв. № 6 на запад по трассе газопровода и в 70 м от трубопровода на север в трещине торфяника. Весной 1973 г. рядом с реперами-скважинами I–VI были установлены до глубины 2,0 м электротермометры (для замеров на глубинах 0,2 м; 0,4 м; 0,6 м; 0,8 м; 1,0 м; 1,2 м; 1,5 м; 2,0 м).

На опорных площадках наблюдательная сеть включала 6 дифференциальных пучиномеров-осадкомеров (на каждой из площадок по 3 установки, смонтированных на заанкеренных трубах, являющихся одновременно и реперами, совмещенными с геотермической скважиной) с целью определения суммарных величин пучения и последующей осадки грунта у трубопровода в типичных условиях. Анализ фактических данных показал, что выпучиванию и последующей осадке подвергались стержни, заглубленные на 5 и 50 см, в большинстве случаев наблюдалось преобладание осадок над пучением. Стержни, расположенные на глубинах 1,0 и 1,5 м, не имели существенных закономерных вертикальных перемещений. За период с августа 1970 г. по декабрь 1973 г. было проведено около 30 циклов режимных наблюдений, которые в основном приурочивались к периодам весеннего интенсивного протаивания грунтов и осенне-зимнего интенсивного промерзания [Шумаков, 1974].

В условиях современного потепления климата целесообразна организация полигонов комплексного мониторинга с использованием современных средств и методов исследований (мерзлотно-ландшафтных,

геотермических и геофизических) на хорошо изученных в 60–70-х гг. участках магистрального газопровода Мессояха–Норильск:

1) на правобережном участке перехода газопровода через р. Енисей, где мониторинг динамики мерзлотных условий осуществлялся на протяжении 10 лет;

2) на площадках стационаров Алыкель и Волгочан, на которых полвека назад были начаты исследования и в течение 3 лет были получены фактические данные о температурном режиме грунтов и деформациях трубопровода.

4.2.5. Магистральный газопровод Среднеботуобинское месторождение–Полярный, Восточная Сибирь

По трассе *магистрального газопровода Среднеботуобинское месторождение–Полярный* геокриологические исследования проводились Институтом мерзлотоведения СО АН СССР с 1980 г., начиная со стадии ТЭО для южного участка Среднеботуобинское месторождение–Мирный [Гордеев, Самсонов, 1980]. Для северной его части (Чернышевский–Удачный–Полярный) на стадии проектирования с 1985 г. выполнялись обследования, геокриологические и мерзлотно-ландшафтные исследования и районирование [Васильев, Федоров, Константинов, 1989]. Были выделены особо опасные участки и даны рекомендации по оптимизации выбора трассы, строительству линейной части и фундированию технологических объектов [Климовский, Константинов, Васильев, Готовцев, 1988]; закартированы криогенные процессы и явления, составлены мерзлотно-ландшафтная карта масштаба 1:100 000 и планы (на сложные участки) масштаба 1:14 000, определены участки с высокой степенью чувствительности к техногенным воздействиям, даны рекомендации по способам прокладки [Константинов, Васильев, Климовский, Константинов, 1989].

Помимо этого, в связи с региональной неоднородностью интенсивности изменений климата необходимо организовать полигон комплексного мониторинга на конечном (северном) участке магистрального газопровода Среднеботуобинское месторождение–Полярный.

4.3. Опыт геотехнического мониторинга подземных хранилищ углеводородов

Согласно СНиП 34-02-99 «Строительные нормы и правила Российской Федерации. Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки» разделом 11 «Охрана окружающей природной среды» предполагается:

«При строительстве новых, расширении и реконструкции действующих подземных хранилищ следует руководствоваться требованиями

строительного законодательства и государственных нормативных актов по охране окружающей среды.

Подземные хранилища должны располагаться в зонах, обеспечивающих минимальную степень воздействия на недра, почву, атмосферу и воды.

Конструкция всех элементов подземного хранилища и технология их эксплуатации должны обеспечивать минимально возможное техногенное воздействие на природную среду.

До начала сооружения подземных резервуаров и рассолохранилищ должны быть проведены базовая ландшафтно-геохимическая инвентаризация и выделение значимых для экологического *мониторинга* технологических и фоновых площадей и показателей.

При сооружении и эксплуатации подземных хранилищ должен проводиться экологический *мониторинг* сред, подверженных их воздействию, для выявления техногенной миграции загрязняющих веществ и оценки реальных изменений в окружающей среде.

Контролю подлежат:

- охраняемые, в том числе питьевые воды;
- водоносные горизонты, предназначенные для закачки рассола;
- водоносные горизонты, предназначенные для технического водоснабжения; первый надсолевой водоносный горизонт;
- почвы;
- геодинамическое состояние геологической среды;
- смещения земной поверхности;
- состав атмосферного воздуха.

Для контроля за режимом водоносных горизонтов, влияния закачки строительного рассола в зоне размещения подземных сооружений хранилищ, а также наземных рассолохранилищ и выпарных карт рассола следует предусматривать гидронаблюдательные скважины, которые должны быть пробурены, оборудованы и опробованы до начала сооружения подземных резервуаров.

На площадке подземного хранилища следует предусматривать закладку реперов и проводить измерения деформаций поверхности в зоне влияния подземных выработок при строительстве и эксплуатации подземного хранилища.

Оборудование шахтных резервуаров должно исключать выбросы в атмосферу паровоздушной смеси нефти и нефтепродуктов при первоначальном заполнении и “больших дыханиях”.

Проектные решения подземного хранилища, расположенного на площади развития вечномерзлых пород, должны предусматривать сохранение растительного покрова.

При полной или частичной ликвидации хранилища подземные резервуары, наземное технологическое оборудование, сооружения, здания

должны быть приведены в состояние, обеспечивающее безопасность населения и не оказывающее отрицательного влияния на окружающую среду».

Оставляя за скобками состав этого мониторинга, надо отметить, что СНиП упустил необходимость мониторинга ситуации после заполнения и формальной ликвидации хранилища. Это упущение необходимо восполнить. Соответствующие обосновывающие работы проведены, и составлены определенные предложения [Общий геокриологический мониторинг... 2019].

Структура геокриологического мониторинга и состав наблюдений

В структуре геокриологического мониторинга предполагаются два блока: 1) Блок наблюдений за изменениями природной среды *под влиянием* воздействия хранилищ ГСМ и захоронений буровых отходов — объектный мониторинг; 2) Блок наблюдений за *фоновыми изменениями* природной среды — фоновый мониторинг.

В состав фоновой мониторинга входят наблюдения за многолетней динамикой растительного покрова (как индикатора многолетних изменений условий теплообмена на поверхности), сезонным протаиванием-промерзанием, температурным режимом многолетнемерзлых пород, развитием неблагоприятных криогенных физико-геологических процессов, пространственной изменчивостью геокриологических условий до глубины несколько ниже подошвы подземных хранилищ.

Объектный мониторинг включает наблюдения за нарушенным растительным покровом, сезонным протаиванием-промерзанием по сгущенной сети, температурным режимом многолетнемерзлых пород в мелких (до 10 м) и глубоких (до 100 м) скважинах, наблюдения за деформацией дневной поверхности, наблюдения за техногенно обусловленными неблагоприятными процессами (оврагообразованием, термокарстом, оползнями скольжения и т.п.), гидродинамические и уровенные наблюдения в скважинах, возможно, определение водно-физических, механических и химических свойств пород, другие специальные наблюдения. Это обеспечивает возможность контролировать в пространстве и во времени изменение состояния и свойств массива, в пределах которого размещается подземный объект.

Назначение мониторинга геологической среды на стадии строительства подземных резервуаров состоит в следующем:

- оценка распространения наиболее опасных экзогенных (в том числе криогенных) геологических процессов (ЭГП) в зоне отвода под строительство;
- оценка активности проявления наиболее опасных ЭГП;
- выбор полигонов для организации мониторинга на участках развития опасных ЭГП, включая криогенные процессы.

Перечень основных показателей геологической среды, которые обычно исследуются при ведении геокриологического мониторинга, — это режим подземных вод (деятельного слоя, таликов, криопэгов), термовлажностный режим грунтов, развитие экзогенных (в том числе криогенных) процессов, проявления техногенеза во всем его многообразии, определение и оценка свойств и состояния ММП до глубины размещения исследуемых техногенных объектов.

Все перечисленные параметры фиксируются и изучаются на стадиях строительства и эксплуатации подземных хранилищ.

Особое место в структуре геокриологического мониторинга занимают а) наблюдения и оценки гидродинамического взаимодействия хранилищ ГСМ и буровых отходов, особенно в связи с распространением горизонтов криопэгов; б) оценки изменения теплового и напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов в период создания, заполнения и функционирования хранилища, в том числе в период его промерзания.

Детальный перечень наблюдаемых параметров и характеристик, периодичность наблюдений, геометрия сети наблюдений и методика измерений с учетом имеющегося опыта определяются на основе имеющихся общих [Методы региональных... 1986; Методы изучения... 1992; Пендин и др., 2017 и др.] и специальных нормативов и детализируются на основе текущего опыта и расчетов.

При идеальной — изометричной в плане — конфигурации полости хранилища решаемая теплофизическая задача является 2-мерной и ее решение требует двух наблюдательных скважин в сфере взаимодействия геологической среды с хранилищем и одной скважины в фоновых условиях. Помимо того, могут понадобиться скважины в контуре хранилища — итого 4–5 наблюдательных термометрических скважин (рис. 4.23, см. с. XVIII цв. вклейки). Мониторинг напряженно-деформированного состояния массива может проводиться с помощью скважинной (в вышеуказанных скважинах) и наземной (по профилю через скважины) сейсморазведки на продольных и поперечных волнах. При неизометричной форме полости, особенно при непроектной неизометричности, при неоднородных поверхностных условиях и фациальной изменчивости геологического разреза наблюдательных лучей должно быть 2 и более, что кратно увеличивает объем мониторинговой сети. Сократить его можно за счет разряжения сети, если несколько резервуаров находятся в сходных природных и/или техногенно измененных условиях.

Наиболее сложной задачей является система оценок изменения криолитозоны на основе данных мониторинга. Наиболее рациональным представляется использование геосистемного подхода как основы

для обобщения и интерпретации результатов наблюдений. Исходя из теоретических предпосылок геосистемного подхода, считается, что в пределах границ геосистем любого уровня свойства и состояние криолитозоны обладает некой общностью. Параметры, характеризующие геосистему, заключены внутри некоторых пределов и не выходят за их рамки. Разрабатываемая сеть наблюдений выбирается, исходя из геосистемной структуры территории, и накладывается на нее. Все наблюдаемые изменения сравниваются с исходным состоянием, присущим данной геосистеме. Понятно, что при создании хранилищ ГСМ и захоронений буровых отходов часть природных (естественных) геосистем будет нарушена частично или полностью. Поэтому в систему геокриологического мониторинга будут включены не только природные, но и природно-технические геосистемы со своим специфическим набором свойств и состояния.

Пределы устойчивости природных и природно-технических геосистем оцениваются на основе количественных (или полуколичественных) шкал/критериев. Это служит базой для сравнения текущего состояния криолитозоны и возможных последствий ее изменения. Основными показателями являются температурный режим мерзлых пород, глубина сезонного протаивания-промерзания, деформации дневной поверхности, пораженность территории опасными экзогенными процессами, известные средние скорости развития которых позволяют оперативно выделить места техногенной активизации, описать изменчивость свойств и состояния толщи ММП вблизи размещения подземных хранилищ, которые установлены в естественном залегании с помощью геофизических, и прежде всего сейсмических, методов.

Наложение и суммирование осложняющих факторов позволяет вычислить (или экспертно оценить) суммарный показатель сложности, вписав его градации в границы геосистем (или природных комплексов). В качестве примера приведено районирование (рис. 4.24, см. с. XVIII цв. вклейки) одной из территорий на Ямале по условному суммарному балльному показателю сложности РGP с составлением карты в «светофорной» раскраске [Дроздов и др., 2001].

4.4. Опыт геотехнического мониторинга в Минстрое и ЖКХ

4.4.1. Мониторинг урбанизированных территорий

Геокриологический мониторинг — один из методов мерзлотоведения. Если объектом мерзлотоведения считать промерзающие и оттаива-

ющие, а также мерзлые толщи горных пород, то систематический или непрерывный сбор информации об изменении их структуры и состояния в формате реального времени с последующим анализом такой информации можно считать целью геокриологического мониторинга. При этом его задачей, с одной стороны, является познание процессов взаимодействия пород криолитозоны с атмосферой, гидросферой и ноосферой, а с другой — выработка и назначение приемлемых практических рекомендаций по рациональному освоению природных ресурсов территории распространения многолетнемерзлых пород.

Локальная система геокриологического мониторинга для урбанизированных территорий криолитозоны должна быть оснащена наблюдениями за термовлажностным режимом грунтов (скважины, шурфы), реперной (марочной) сетью, за развитием криогенных процессов и деформациями сооружений. Оценка СТС, талики для площадной оценки могут проводиться с помощью наземных геофизических методов. Объекты наблюдений (ключевые участки, здания и сооружения) должны быть обеспечены инженерно-геокриологической информацией (геологические разрезы, физико-механические свойства, криогенное строение, льдистость (влажность), температура пород) и информацией по ландшафтам (растительность, условия увлажнения, почвы). Скважины оборудованы и оснащены контрольно-измерительной аппаратурой.

Система геокриологического мониторинга должна быть предназначена для изучения в режиме реального времени процессов формирования состава и строения грунтов сезоннопротаивающего, сезоннопромерзающего слоя, а также для регистрации изменений теплового состояния грунтов в разрезах слоя годовых теплооборотов в многолетнем цикле.

Проведение геокриологического мониторинга приводит к разработке системы превентивных практических рекомендаций и мер по обеспечению устойчивости существующих инженерных объектов (здания, сооружения, коммуникации), а также к корректировке проектных и строительных норм для территории крупных городских агломераций и муниципальных образований.

Современное изменение климата существенно и неравномерно отражается на составе, строении и состоянии мерзлых грунтов. Поэтому планомерное изучение геокриологических условий является одной из серьезных проблем в обеспечении устойчивости инженерных сооружений. Данные о реакции толщ мерзлого грунта на изменение климата и техногенное вмешательство необходимы изыскателям, проектировщикам, строителям и специалистам, обеспечивающим безаварийную эксплуатацию промышленных и гражданских, энергетических, транспортных и гидротехнических инженерных сооружений на мерзлом грунте.

Существующие и эксплуатируемые инженерные объекты (здания, сооружения, коммуникации) в криолитозоне в своем подавляющем большинстве возведены по принципу сохранения мерзлого состояния грунтовых оснований. Их устойчивость и надежная работа зависят от ряда объективных и субъективных факторов. При этом современный климат определяет характер взаимодействия фундаментов инженерных объектов с грунтом их оснований и является постоянно действующим объективным фактором. Изменение местного климата влияет на состояние и структуру грунтов, обеспечивает нестабильность их физико-механических свойств даже при отрицательных значениях температуры. Особенно возрастает роль такого влияния в случае вызванной изменением климата (и другими факторами) глубокой, часто необратимой перестройки геокриологического разреза горизонта годовых теплооборотов грунта. Поэтому данный горизонт представляет собой главный объект исследований в связи с тем, что наблюдаемое в последнее время глобальное изменение климата отражается на мерзлотно-грунтовых условиях исследуемой территории, приводит местами к значительной и практически важной перестройке геокриологического разреза грунтов горизонта годовых теплооборотов.

Цель геокриологического мониторинга — детальный анализ имеющейся и новой геокриологической информации, разработка научно обоснованных рекомендаций, позволяющих принимать практические меры по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, которые возникают при взаимодействии толщ мерзлого грунта (как оснований инженерных сооружений) с другими естественными и техногенными компонентами окружающей среды в обстановке меняющегося климата.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующие основные задачи:

- сбор данных о составе, строении и состоянии грунтов горизонта годовых теплооборотов;
- составление картографической схемы размещения отдельных зданий, инженерных объектов, сооружений и коммуникаций, эксплуатирующихся в сложных и аварийных мерзлотно-грунтовых условиях;
- выбор на местности (для дополнительного геокриологического изучения) ключевых участков, представленных естественными и техногенными ландшафтами;
- при необходимости (недостаточной изученности по материалам изысканий) проведение геофизических работ для оценки площадного распространения контролируемых параметров и дополнительного бурения скважин на выбранных участках;

- создание и оборудование площадок геокриологического мониторинга в границах ключевых участков и отдельных уровней рельефа;
- оценка роли притока грунтовых вод от таяния подземного льда и значения термической денудации, а также других криогенных процессов на отдельных участках исследуемой территории;
- выявление мест формирования криопэгов (соленые грунтовые воды с отрицательной температурой) и возможных таликов в горизонте годовых теплооборотов;
- выявление тенденций, трендов и характера происходящего в последнее время изменения состава, строения и состояния грунтов горизонта годовых теплооборотов;
- разработка легенды и составление макета крупномасштабной дежурной геокриологической карты территории. Дежурный характер такой карты определяется способом ее разработки (на основе ГИС-технологий) и возможностью внесения с течением времени оперативных изменений в исходное содержание картографического изображения;
- с учетом влияния изменений климата на структуру и состояние многолетнемерзлого грунта внесение информации в контролирующие (обеспечение устойчивости сооружений) органы власти для разработки превентивных мероприятий стабилизации инженерно-геологических условий территории.

Перечисленные задачи должны решаться с помощью стандартных методов, апробированных в грунтоведении, инженерной геологии и геокриологии (мерзловедении) при изучении верхних слоев криолитозоны и процессов их взаимодействия с другими естественными и техногенными компонентами окружающей среды. Методическая особенность современного периода этих работ состоит в максимально возможном использовании автоматизированных приборов (логгеры) и сопутствующей электронно-вычислительной аппаратуры, позволяющей минимизировать роль субъективного фактора при сборе и систематизации исходных данных. Специфика планируемых работ определяется необходимостью использования и составления в ходе работ специальных карт местности на основе ГИС-технологий.

4.4.2. Развитие системы мониторинга в Якутске

Мониторинг вечной мерзлоты осуществляется силами отдела Мерзлотного надзора и контроля за капитальным ремонтом МКД Управления госстройжилнадзора Республики Саха (Якутия) практически на всей ее территории.

Наиболее подробные данные имеются по г. Якутску. Анализ многолетнего изменения температур грунтов основания с 2015 по 2020 г. показывает ежегодное изменение геокриологической обстановки. Часть изменений связана с массовым строительством современных объектов капитального строительства, оборудованных системой водоотведения и фундаментами глубокого заложения.

Подвержен изменениям, как правило, деятельный слой и следующие за ним 2–5 м, с глубины 8–10 м температура грунтов основания обычно стабильна и не подвержена значительным изменениям в течение года.

Стабильной в геокриологическом плане является центральная часть г. Якутска, застроенная домами с проветриваемым подпольем еще в прошлом веке, температура грунтов основания в них достигает -8°C . На данном участке ощутимого повышения температур грунтов основания, как правило, не происходит.

Более того, на рис. 4.25 (см. с. XIX цв. вклейки) показаны результаты наблюдений за среднегодовыми температурами грунтов в Якутске и его окрестностях. Температура многолетнемерзлых грунтов в целом поддерживается на уровне $-4\ldots-6^{\circ}\text{C}$, что способствует сокращению мощности слоя сезонного оттаивания и уменьшению пучения грунта.

Несмотря на увеличение среднегодовых температур воздуха в этом районе, в результате использования технологий проветриваемых подполий и охлаждения грунтов в основном сохраняется существующий температурный режим многолетнемерзлых грунтов основания, первоначальные свойства прочностных конструкций в течение проектного срока службы зданий, а на территории застройки температуры даже ниже, чем на окружающих территориях.

В результате ежегодного мониторинга, выделяются территории с неблагоприятной геокриологической обстановкой, для последующего загущения сети замеров, в целях осуществления более детальной аналитической обработки, параллельно уведомляются органы местного самоуправления, в случае необходимости и другие ведомства, для своевременного принятия мер по обеспечению долговременной и безопасной эксплуатации объектов капитального строительства.

Стоит отметить, что с 2018 г. в г. Якутске функционирует сеть пьезометрических скважин, установленных по рекомендации ОМН и ККР МКД на территориях новостроек. Данных пьезометрических уровней пока недостаточно для выводов и прогнозов. Мониторинг пьезометрических уровней ведется также в отдаленных населенных пунктах Республики. В городах Якутске и Мирном это налаживающаяся система, о других городах Арктики этого сказать нельзя, как правило, собираются отдельные сведения по объектам, системно не связанные (табл. 4.3 и 4.4).

Таблица 4.3.

Принципиальная технологическая схема

в соответствии с «Методическими рекомендациями по формированию технологических схем предоставления государственных и муниципальных услуг» (рекомендации утв. протоколом заседания Правительственной комиссии по проведению административной реформы от 9 июня 2016 г. № 142).

ФОРМА ТИПОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ**Раздел 1. «Общие сведения о государственной (муниципальной) услуге»**

№ п/п	Параметр	Значение параметра / состояние
1	Наименование органа, предоставляющего услугу	
2	Номер услуги в федеральном реестре	В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 апреля 2011 г. № 729-р
3	Полное наименование услуги	Предоставление информации из федерального банка геокриологической информации
4	Краткое наименование услуги	
5	Административный регламент предоставления услуги	
6	Перечень «подуслуг»	
7	Способы оценки качества предоставления услуги	радиотелефонная связь (смс-опрос, телефонный опрос)
		терминальные устройства в МФЦ
		терминальные устройства в органе власти/ органе государственного внебюджетного фонда/органе местного самоуправления
		Единый портал государственных услуг
		региональный портал государственных услуг
		официальный сайт органа
		другие способы

Таблица 4.4.

Раздел 2. «Общие сведения о “подуслугах”»

[illegible]

4.5. Опыт геотехнического мониторинга дорог

Дороги в криолитозоне строятся и эксплуатируются больше 100 лет, все они, и железные, и автомобильные, на участках льдистых многолетне-мерзлых грунтов испытывают многочисленные и многолетние деформации, связанные в основном с оттаиванием вечной мерзлоты в их основании.

Так, федеральная автомобильная дорога «Амур» Чита—Хабаровск, завершенная строительством в сентябре 2010 г. и имеющая для России важнейшее стратегическое значение [Иванов, 2003], испытывает все возрастающее негативное воздействие инженерно-геокриологических процессов и явлений (рис. 4.26 и 4.27). Подборку материалов по мониторингу новой дороги сделал В. Г. Кондратьев [2015].

Об опасности их и необходимости своевременной защиты автодороги в период ее проектирования и сооружения говорилось и писалось нами неоднократно [Кондратьев, 2003а, 2003б, 2007]. К сожалению, наши предложения Дирекцией строительства дороги и Росавтодором в основном игнорировались под предлогом дефицита времени и денег.



Рис. 4.26. Состояние автодороги «Амур» на одном из участков деградации вечной мерзлоты в ее основании, Забайкальская часть дороги, 19 октября 2014 г.

Теперь деньги у Росавтодора появились, много денег, а дорога становится все хуже и хуже. При этом руководители Росавтодора весьма поверхностно воспринимают проблему разрушительного воздействия мерзлотных процессов на дорогу и наивно полагают, что американцы нам помогут. Затраты составили: 288,95 млрд руб. в 2011 г., 335 млрд руб. в 2012 г. и 408 млрд руб. в 2013 г. При этом затраты на содержание и ремонт дорог растут быстрее, чем в целом бюджет Росавтодора. Например, по плану 2013 г. они в 1,48 раз больше, чем в 2012 г.

Как известно, решение о строительстве автодороги Чита—Хабаровск было принято Советом Министров СССР в 1966 г., затем более 10 лет Союздорпроект, Иркутскгипродорнии и Дальгипродорнии прово-

дили изыскания и проектирование дороги. Строительство началось в 1978 г., завершилось в сентябре 2010 г. и обошлось в 200 млрд руб.



Рис. 4.27. Перманентный ремонт автодороги «Амур» на одном из участков деградации вечной мерзлоты в ее основании, Забайкальская часть дороги, 19 октября 2014 г.

Дорога имеет протяженность 2113 км и пересекает с запада на восток Забайкалье и Приамурье — территории с весьма неоднородными геоморфологическими, геолого-тектоническими и ландшафтно-климатическими условиями, что в свою очередь предопределяет значительную неоднородность инженерно-геокриологических условий трассы. На трассе имеются районы с очень сложными, сложными, относительно сложными и относительно простыми инженерно-геокриологическими условиями. Причем сложность условий в основном определяется наличием и льдистостью многолетнемерзлых пород, их просадочностью при оттаивании, а также пучинистостью при промерзании сезонно-талых и сезонно-мерзлых грунтов.

При строительстве и в первые годы эксплуатации дороги произошли существенные изменения мерзлотной обстановки и активизировались неблагоприятные инженерно-геокриологические процессы и явления, в частности термокарст, пучение, солифлюкция, термоэрозия, наледи и др., разрушающие дорогу и создающие предпосылки к снижению скорости и безопасности движения автомобилей. Уже в год завершения строительства дороги 263 км (12,1%) нуждались в капитальном ремонте, а около 400 км (18,5%) — в реконструкции. Иными словами, проектная скорость движения автомобилей 100 км/ч почти на трети протяженности только что построенной дороги «Амур» не обеспечена. Не зря В. В. Путин назвал ее «хорошей проселочной дорогой», проехав в августе 2010 г. от Хабаровска до Читы.

Не прошло и 5 лет, а дорога стала хуже, несмотря на постоянный ремонт. Стремительно растет количество мест с просадками земляного полотна, обусловленными оттаиванием (деградацией) многолетне-мерзлых грунтов в основании дороги.

По данным ФКУ «Упрдор “Забайкалье”» (табл. 4.5) на Забайкальской части автодороги «Амур» в 2011 г. отмечалось 68 мест с просадками земляного полотна, их пытались устранить силами подрядных организаций в рамках гарантийных обязательств. В 2012 г. таких мест стало почти в 5 раз больше — 327 — и на их устранение дополнительно было потрачено 34 265 тыс. руб. На июнь 2013 г. насчитывалось 330 мест с просадками дороги и затраты составили уже 11 738,8 тыс. руб. При этом отмечается рост затрат на устранение просадок с 838 руб. в 2012 г. до 950 руб. в 2013 г. на 1 м². К настоящему времени затраты стали еще больше. В 2015 г. на ремонт нескольких участков протяженностью 265 км было запланировано около 1,6 млрд руб. Всего же на ремонт федеральных дорог в Забайкалье в 2015 г. планировалось выделить 5,3 млрд руб., что почти на 1 млрд больше, чем в 2014 г.

Таблица 4.5.

Развитие просадок земляного полотна и затраты на их устранение на Забайкальском участке автодороги «Амур» Чита–Хабаровск, км 0–км 794 (741+588) в 2011–2013 гг. (по данным ФКУ «Упрдор “Забайкалье”»)

Год	2011	2012	2013, июль
Количество зафиксированных просадок, шт.	68	327	330
Общая площадь просадок, м ²	—	103 159	103 960
Площадь устраненных просадок, м ²	Просадки устранялись по гарантиям строителей	40 874	12 356,6
Затраты на устранение просадок, тыс. руб.		34 265	11 738,8
Затраты на устранение 1 м ² просадок, руб.	—	838	950

Примечания: 1. Кроме того, систематически выполняются работы по восстановлению ровности покрытия в рамках текущего содержания дороги. 2. По состоянию на июль 2013 г. было выявлено 330 просадок, устранено 111, осталось 119. На устранение просадок дополнительно на 2013 г. затребовано 51 610,6 тыс. руб.

Аналогичная ситуация и на Амурской части дороги «Амур». По данным ФКУ ДСД «Дальний Восток» (табл. 4.6), за период с 2010 по июнь 2013 г. пришлось ремонтировать 178,025 км, а затраты составили 430 2937,06 тыс. руб.

Таблица 4.6.

**Ремонты автодороги «Амур» Чита–Хабаровск на Амурском участке,
км 794 (741+588)—км 1811 (1752+205) в 2010–2013 гг.
(по данным ФКУ ДСД «Дальний Восток»)**

Год	Отремонтировано, км		Стоимость ремонтов, тыс. руб.			
	всего		Общая			
	капре- монтом	ремон- том	капремонта		ремонта	
			всего	1 км	Всего	1 км
2010	12,406		131 643,433			
	7,806	4,600	113 811,430	14 579,993	17 831,003	3876,6522
2011	27,715		694 023,990			
	23,015	4,7	645 194,780	28 033,664	48 829,210	10 389,194
2012	51,301		952 416,790			
	10,301	41	330 933,640	32 126,845	621 478,150	15 158,004
2013	86,603		2 524 852,847			
	75,823	10,780	238 8805,987	31 505,031	136 046,680	12 620,302
Всего за 2010– 2013	178,025		4 302 937,060			
	116,945	61,080	3478 750,837	297 466,891	824 186,223	13 493,553

Надежды Росавтодора на гарантийные обязательства строителей, выданные на 3 года, рухнули — стало очевидно, что просадки земляного полотна — это не мелкие недоделки строителей, а системные просчеты Росавтодора и проектировщиков дороги: трасса автодороги «Амур» проходит по территории с вечной мерзлотой и глубоким сезонным промерзанием грунтов, а необходимого геокриологического обоснования изысканий, проектирования и строительства автодороги не было. Отсутствие надлежащей геокриологической информации часто приводило либо к недооценке опасности возможных инженерно-геокриологических процессов и явлений и применению ненадежных технических решений и конструкций элементов дороги, либо, наоборот, к переоценке такой опасности и применению излишне дорогостоящих и длительных по исполнению технических решений и конструкций [Кондратьев, 2003а; Кондратьев и др., 2010].

Сейчас Росавтодор судорожно пытается остановить разрушение автодороги «Амур» криогенными процессами и явлениями: в спешном порядке проводятся изыскания и разработка стабилизационных мероприятий, ведутся разговоры об организации опытных стационаров, привлечении американцев, проводятся заседания технических совета и отдельных секций...

Так, 23 июля 2013 г. с большой помпой (приглашены 2 американца, работала камера) в Росавтодоре состоялось заседание научно-технического совета, где ФКУ «Упрдор “Забайкалье”», ФКУ ДСД «Дальний Восток», ОАО «Иркутскгипродорнии», ООО «СметаПлюс» докладывали по проблеме стабилизации деформирующихся участков автодороги «Амур». Заседание готовилось 5 месяцев, на него возлагались большие надежды.

Что же предложил Иркутскгипродорнии по рекомендациям ООО «Сибиндор» и Института мерзлотоведения СО РАН? Арсенал технических решений невелик (табл. 4.7).

Предложенные Иркутскгипродорнии мероприятия (типы 1–6), рекомендованные ООО «Сибиндор» и Институтом мерзлотоведения СО РАН, бесполезны, а первые 3 — вредны.

Приоткосные бермы (типы 1–3) окажут противоположное ожидаемому действие: увеличат чашу оттаивания многолетнемерзлых грунтов и вызовут дополнительные длительные просадки дороги. Это подтверждено более чем 40-летним опытом БАМа, где также пытались бороться с просадками земляного полотна с помощью берм. Дополнение берм водоотводными лотками или валиками не спасет ситуацию.

Применение криогеля (тип 4) или сухобетонной смеси (тип 5) не может прекратить деградацию вечной мерзлоты в основании дороги, поскольку асфальтированная дорога будет по-прежнему прогреваться солнечной радиацией, а снежный покров на обочинах и откосах насыпи, а также в канавах будет препятствовать охлаждению их зимой — деформации будут продолжаться.

Применение одиночных СОУ, устанавливаемых через 3 м вдоль дороги, не может прекратить деградацию вечной мерзлоты в основании дороги вследствие их локального влияния — деформации будут продолжаться. Об этом свидетельствует 12-летний опыт их применения на Тибете и 27-летний на БАМе.

Тем не менее предлагается применить эти мероприятия для стабилизации 72,66 км земляного полотна, посчитана стоимость мероприятий — 2943 836 490 руб. Стоимость ремонта 1 м дороги в среднем — 40 515 руб. Стабилизации же земляного полотна не произойдет по изложенным выше причинам.

Только солнцезащитные навесы (тип 7), рекомендованные НПП «ТрансИГЭМ», могут быть полезны, поскольку доказали свою эффективность на Аляске [Zarling, Breley, 1986], Тибете (рис. 4.28) [Wenjie, et al., 2009] и на БАМе [Кондратьев, Валиев, 2011].

Их эффективность обусловлена предотвращением поступления прямой солнечной радиации и теплых летних осадков на поверхность защищаемого массива грунта и усилением теплоотдачи из него зимой,

Таблица 4.7.

Мероприятия по предотвращению деформаций земляного полотна автодороги «Амур», предложенные
ОАО «Иркутскгипродорнии»

Тип	Мероприятие	Дефекты земляного полотна и покрытия	Условия применения	Замечания В. Г. Кондратьева
1	Приоткосные бермы из суглинистого грунта с каменным заполнителем	Просадки обочин и откосов, продольные трещины на покрытии и обочине	Льдонасыщенные грунты в основании насыпи. Верхний горизонт вечной мерзлоты (ВГММ) вошел в насыпь. Поверхностный водоотвод обеспечен	Зачем бермы из суглинка при обеспеченном водоотводе?
2	Приоткосные бермы из суглинистого грунта с каменным заполнителем, водоотводный лоток из геомембраны	Просадки, продольные и поперечные трещины, сетка трещин	Льдонасыщенные грунты в основании насыпи. ВГММ понизился под насыпью. Замена и осадка грунтов при строительстве	Зачем бермы из суглинка при водоотводном лотке?
3	Приоткосные бермы, водоотводные валики из суглинистого грунта с каменным заполнителем	Те же	Насыпи на косогоре, фильтрация воды в откос насыпи	Зачем бермы из суглинка при водоотводном валике?
4	Укрепление грунтов основания криогелем	Просадки, волны, продольные и поперечные трещины на покрытии	Переувлажненные, сильнольдистые, недrenирующие грунты. Наличие водотока	Как закачать криогель в недrenирующие грунты? Не остановит дeтpаdацию вечной мерзлоты
5	Укрепление грунтов основания сухобетонной смесью	Те же	Переувлажненные, сильнольдистые, недrenирующие грунты. Наличие водотока	Не остановит дeтpаdацию вечной мерзлоты
6	Сезонно-охлаждающие устройства (COУ)	Те же	Лед или сильнольдистые грунты в основании насыпи	Локальное воздействие в радиусе 3—4 м
7	Солнцезащитные навесы	Те же	Переувлажненные и сильнольдистые просадочные грунты	

поскольку под навесом не формируется снежный покров [Кондратьев, 2011]. Стоимость же навеса, как показал опыт БАМа [Кондратьев, Валиев, 2011], в 20–25 раз меньше стоимости берм из скального грунта.



Рис. 4.28. Сооружение солнцезащитного навеса на Цинхай-Тибетском шоссе, сентябрь 2003 г.

В арсенале ТрансИГЭМ имеются и другие эффективные решения по стабилизации земляного полотна на льдистых многолетнемерзлых грунтах [Кондратьев, 2011].

ООО «СметаПлюс» на научно-техническом совете Росавтодора 23 июля 2013 г. докладывало о проекте капитального ремонта участка автодороги «Амур» на переходе через руч. Чичон, 247 км, постоянно деформирующегося с 2001 г. (рис. 4.29).



Рис. 4.29. Состояние автодороги «Амур» на переходе через руч. Чичон, 247 км, 16 августа 2013 г.

Мероприятия, предложенные ООО «СметаПлюс»:

Мероприятие 1 — разборка насыпи, вырезка талых грунтов из основания насыпи, заполнение котлована послойно промораживаемым грунтом и сооружение новой насыпи из послойно промораживаемого грунта — создание «холодного ядра». Мероприятие технически осуществимо, но предложенная технология нецелесообразна. Надмерзлотный талик под насыпью можно проморозить и без разборки насыпи высотой до 20 м и разработки котлована глубиной до 7–8 м. Главное — прекратить дальнейшую деградацию вечной мерзлоты под насыпью.

Мероприятие 2 — консервация «холодного ядра» в насыпи с помощью теплоизоляции. Утопия, без ежегодной «подпитки» холодом «холодное ядро» исчезнет под обогревающим воздействием солнечной радиации через откосы насыпи и черное асфальтобетонное покрытие. Устройство вентилируемых труб диаметром 1 м в основании насыпи — полезное мероприятие для охлаждения нижележащих грунтов основания насыпи, в особенности в сочетании с теплоизоляцией над трубами, однако диаметр их должен быть в 2–3 раза меньше и укладывать их следует не выше 0,5 м от подошвы насыпи. «Холодное» же ядро вентилируемыми трубами охлаждаться не будет из-за расположения над ними теплоизоляции.

Мероприятие 3 — размещение гидроизоляционной пленки над «холодным ядром» для предотвращения попадания грунтовых вод в тело насыпи, а также устройство в земляном полотне каптажного дренажа из полиэтиленовых труб с полиэтиленовыми смотровыми колодцами. На участке нет потока таких вод в земляном полотне, соответственно, и защита от них не нужна. Необходима защита поверхности и откосов насыпи от теплых дождевых вод, выпадающих здесь в основном в июле-августе и составляющих около 70% годовой суммы осадков.

Мероприятие 4 — устройство банкета в нагорной стороне земляного полотна для обеспечения поверхностного водоотвода. Нет необходимости в этом, так как дождевые воды свободно стекают по существующей задернованной поверхности.

Мероприятие 5 — размещение в теле насыпи естественно вентилируемых прослоек из бутового камня. Малоэффективное мероприятие в условиях преобладания безветренной погоды в зимний период, а размещение каменных прослоек над теплоизоляцией практически полностью исключит их охлаждающее воздействие на «холодное ядро».

Мероприятие 6 — укрепление откосов насыпи засевом многолетних трав с целью уменьшения воздействия солнечной радиации на поверхность земляного полотна. Малоэффективное мероприятие с точки зрения уменьшения воздействия солнечной радиации на земляное полотно. Незначительный эффект затенения поверхности откосов травяным

покровом будет снижен утепляющим влиянием более рыхлого и мощного снежного покрова на техногенной травяной поверхности по сравнению с поверхностью с естественной растительностью.

Таким образом, правильно понимая причину многолетних деформаций автодороги «Амур» на переходе через руч. Чичон и направление возможных стабилизационных мероприятий, ООО «СметаПлюс» предложило громоздкий, дорогостоящий и неэффективный набор мероприятий. Они во многом умозрительны и не обоснованы теплотехническими расчетами. Реализация их не приведет к длительной стабилизации участка, будут напрасно потрачены средства и потеряно время, как и при предыдущих ремонтах участка в 2006, 2008 и 2010 гг. Поражает размах проектировщиков: почти полмиллиарда рублей на 200 м дороги, в 2006 г. ремонт участка обошелся в 10 млн, правда и он оказался бесполезным. Проект нуждается в коренной переработке, поскольку не решает главной задачи — стабилизации участка, а стоимость его реализации чрезмерна. Необходимо разработать другие технические решения, которые позволят не только стабилизировать участок и предотвратить дальнейшее опасное развитие деформаций автодороги «Амур» на переходе через долину руч. Чичон, но и кардинально уменьшить стоимость и продолжительность ремонта.

При этом следует иметь в виду, что отработанные на этом участке эффективные в техническом и экономическом отношении стабилизационные мероприятия могут быть полезны и на других участках дороги «Амур», где имеются льдистые грунты и где также развиваются деформации земляного полотна вследствие деградации вечной мерзлоты. Пока же проезд транспорта со скоростью 30 км/ч обеспечивается систематическим «закатыванием» участка «Чичон» в асфальт (рис. 4.30).



Рис. 4.30. Состояние автодороги «Амур» на переходе через руч. Чичон, 247 км, 19 октября 2014 г.

ООО «Сибиндор» на научно-техническом совете Росавтодора 23 июля 2013 г. докладывало о «Методических рекомендациях по геокриологическому прогнозированию устойчивости дорожных сооружений при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог» — сочинении столь сумбурном и мало относящемся к теме, что мы отважились спросить докладчика, что он понимает под «геокриологическим прогнозированием». Докладчик не смог ответить, и обсуждение завершилось.

Присутствовавшие на научно-техническом совете Росавтодора 23 июля 2013 г. американцы не выступали, после заседания мы пообщались с ними на тему дорог в криолитозоне. Они оказались не в теме: на Аляске не бывают, американских специалистов по теме не знают. Их интересуют только вопросы продвижения на российский рынок американских продуктов, в частности асфальтовых заводов. Едва ли такие специалисты будут полезны в вопросах дорожного дела в криолитозоне, если не считать, что ОАО «Труд» — одно из крупнейших дорожно-строительных предприятий Сибири и Дальнего Востока — специально для ремонта автодороги «Амур» закупило американские асфальтовые заводы.

Для обеспечения устойчивости и надежности автодороги «Амур» в период ее эксплуатации необходимы: своевременное выявление закономерностей развития мерзлотных условий на трассе, систематический контроль их динамики и криогенного воздействия на элементы дороги, осуществление защитных мероприятий. Наиболее эффективно это возможно в рамках системы инженерно-геокриологического мониторинга автодороги «Амур», осуществляемой на единой научно-методической основе. Такая основа была разработана ТрансИГЭМ в 2004–2006 гг., передана в Росавтодор в 2006 г. в виде проекта ОДМ «Рекомендации по инженерно-геокриологическому обоснованию эксплуатации федеральной автомобильной дороги “Амур” Чита–Хабаровск», опубликована в 2010 г. в виде монографии [Кондратьев, Соболева, 2010] и передана в ОАО «Иркутсгипродор» в 2012 г. в виде программы инженерно-геокриологического мониторинга автодороги «Амур».

Необходимо безотлагательно обеспечить федеральную автомобильную дорогу «Амур» Чита–Хабаровск защитой от опасных инженерно-геокриологических процессов и явлений — создать систему инженерно-геокриологического мониторинга дороги, сравнимой с Транссибом и БАМом по значению для развития Забайкалья, Дальнего Востока и страны в целом [Иванов, 2003]. Без такой защиты автодорога «Амур» обречена на перманентный ремонт, постоянные ограничения скорости движения автомобилей и колоссальные в связи с этим финансовые и материальные потери государства и населения.

Министр транспорта М. Соколов бодро докладывал президенту В. В. Путину в сентябре 2014 г., что на федеральной дороге «Амур» Чита–

Хабаровск при сдаче в постоянную эксплуатацию в 2010 г. насчитывалось 30 больших мест, а в 2014 г. — 500, которые к концу 2014 г. будут «зашлифованы», т.е. закатаны в асфальт (рис. 4.31).

В России, как известно, на 65% территории имеет место вечная мерзлота и глубокое сезонное промерзание грунтов. Именно там в ближайшие 15–20 лет будет в основном развиваться инфраструктура страны, строиться дороги и именно там нужна новая идеология дорожного хозяйства: мерзлотная составляющая должна пронизывать весь процесс изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации дорог в криолитозоне. Без этого невозможно экономически оптимальным способом обеспечить транспортную и экологическую безопасность автодорог Сибири, Забайкалья, Дальнего Востока и Европейского Севера. Автодорога «Амур» это наглядно показала. Сейчас на очереди автодорога «Виллюй», где те же заказчики, изыскатели и проектировщики и т.д. Говорят, надо создавать опытные полигоны для изучения опыта эксплуатации дорог в криолитозоне. Не надо их создавать — вся автодорога «Амур» полигон для испытаний и опытов.



Рис. 4.31. Подсыпка — основной способ устранения просадок автодороги «Амур» на участках деградации вечной мерзлоты в ее основании, 15 августа 2012 г.

4.6. Опыт геотехнического мониторинга крупных карьеров

Открытие алмазонасных пород в Западной Якутии в середине 50-х гг., широкомасштабные и комплексные исследования природных условий этой территории обусловили выделение Якутской алмазонасной провинции (ЯАП). В геолого-географическом отношении провинция приурочена к центральной части Сибирской платформы. Ее

площадь составляет около 900 тыс. км². На территории ЯАП распространена вечная мерзлота преимущественно сплошного типа, мощностью от десятков до нескольких сотен метров и отрицательными температурами пород, ее слагающих, изменяющимися от долей до 3–4 и более градусов.

Для освоения алмазонасных месторождений ЯАП за короткий период были созданы крупные горнопромышленные предприятия, включающие селитебные территории, горнотехнические, гидротехнические и линейные сооружения. Интенсивность, характер и способы их взаимодействия, а также результаты взаимодействия с вечной мерзлотой, как показала практика функционирования перечисленных сооружений, часто непредсказуемы, а их протекание может существенно затруднять ее эффективность. Для решения этих проблем была создана в пос. Чернышевске ВНИМС ИМЗ им. П. И. Мельникова СО РАН, основными задачами которой были и остаются фундаментальные исследования формирования и трансформации геофизических полей в геологической и геокриологической среде с учетом естественных изменений природных условий, особенностей и разновидностей влияния на нее технического прессинга. Для эффективного их решения в качестве методологической базы был выбран системный подход, позволивший обосновать необходимость использования комплексного геофизического мониторинга физико-геокриологических моделей (ФГКМ) горно- и гидротехнических систем (ГРТС и ГДТС) [Великин, 2012; Великин, Демура, 2010; Шестернев, 2011]. Следует отметить, что границы этих систем определяются воздействием сооружений на геокриологическую среду. Однако если строго следовать системному подходу, то технические системы воздействуют не только на геокриологическую среду, но и на другие сферы (атмосферу, гидросферу, биосферу), поэтому область взаимодействия окружающей среды и технического сооружения будет более правильным называть природно-технической системой [Ревзон, 1992; Шестернев, 2011].

С конца 70-х гг. часть земной коры (литосферы), являющейся основой для развития биосферы, начали называть геологической средой. Согласно Е. М. Сергееву, это любые горные породы и почвы в верхней части литосферы, изучаемые как многокомпонентные системы в области деятельности человека. Исходя из этого, криогенной средой ЯАП мы будем называть ту часть криолитозоны, которая испытывает воздействия технической среды.

В развитии алмазодобывающей промышленности на территории ЯАП условно можно выделить три этапа: начальный (1955–1970), развития и стагнации (1970–1990), современный (после 1990 г.). На начальном этапе были введены в строй первые горнотехнические

объекты добычи алмазов будущего Мирнинского ГОК (карьер «Мир», 1957 г.), Айхальского в 1961 г. (карьер «Айхал»), Удачинского в 1967 г. (карьер «Удачный»). На втором этапе первые горнотехнические объекты Анабарского ГОКа, выделившегося из Удачинского ГОКа, появились в 1984 г. (прииск «Анабар»). В современный период создан Нюрбинский горно-обогатительный комбинат для освоения месторождений Накынского рудного поля в Нюрбинском улусе Республики Саха (Якутия) — кимберлитовых трубок «Нюрбинская» и «Ботубинская», россыпей (2000 г.). К настоящему времени существуют 5 полноценных ГОКов, в структуре каждого из которых функционируют различные предприятия, обеспечивающие жизнедеятельность ГОКов, включая селитебные территории (города, поселки городского типа и т. п.).

Поскольку в течение первых двух периодов технология добычи алмазов открытым способом по разным причинам стала малоэффективной, повсеместно используется подземная разработка месторождений алмазов. Тем не менее наиболее перспективным и наименее затратным способом отработки алмазов и целого ряда полезных ископаемых остается *карьерная добыча полезных ископаемых*. Строительство и последующая эксплуатация карьеров в криолитозоне приводят к значительным изменениям инженерно-геокриологических условий, определяющих устойчивость оснований этих объектов и сохранность природного комплекса.

Важнейшим фактором этого процесса является вечная мерзлота — при ее деградации деструктивные экзогенные процессы здесь начинают протекать интенсивно, динамично и могут быстро перейти в катастрофическую стадию. Если не уделять достаточного внимания мониторингу криогенной среды, то катастрофическая ситуация, связанная с потерей устойчивости оснований и откосов карьеров, может возникнуть неожиданно, в любой момент эксплуатации (пример на рис. 4.32).

Основную опасность (сложность) при строительстве и эксплуатации карьеров горной промышленности в криолитозоне представляют процессы деградации мерзлых пород, ведущие к потере устойчивости бортов и развитию оползневых процессов. Поэтому есть потребность проведения специализированных исследований с привлечением современных технических средств и методик. Главное средство фиксации происходящего в бортах карьера и на прилегающей поверхности — это топографический или автоматизированный контроль положения реперов и марок. Эти измерения дополняются различными видами высотных съемок. Но даже если все деформации своевременно отслеживаются, далеко не всегда имеется ясность в причинах деформаций и перспективах их затухания или дальнейшего развития вплоть до аварийного

и катастрофического. Причем далеко не всегда ясен характер деформаций — объемные ли они либо происходят вдоль некоторых сместителей. Специальное бурение дает лишь отрывочную информацию. Помочь в этом случае могут геофизические методы, позволяющие охарактеризовать объем геологической среды.



Рис. 4.32. Обрушение участка борта карьера в мерзлых породах

В этих условиях особую роль следует отвести комплексным мониторинговым геофизическим исследованиям. Структура их полей и изменение во временном интервале может отражать состояние вмещающих мерзлых пород и характер проходящих здесь процессов [Великин и др., 2015].

Несмотря на остроту проблемы, геофизические работы проводятся в весьма ограниченном объеме, что связано со сложностью проведения самих исследований в условиях разрабатываемых месторождений, в том числе высоких техногенных помех.

Тем не менее в опасных ситуациях такие работы проводятся в достаточных объемах. На карьере «Нюрбинский» (рис. 4.33) работы по изучению инженерно-геокриологического состояния вмещающих пород проводились в связи с выявленными высокими скоростями смещений реперов на примыкании восточного борта карьера. Для исследования применяется комплекс инженерно-геологических, геофизических и мерзлотных исследований [Зыков, 2007; Горяинов и др., 1987].



Рис. 4.33. Карьер «Нюрбинский»

Комплекс полевых геофизических исследований включал сейсморазведку, электротомографию, георадиолокацию, гамма-каротаж, радиоволновое просвечивание.

Инженерно-геокриологические условия карьера Нюрбинский характеризуются наличием в разрезе слабopочных терригенно-осадочных песчанистых, алевроитистых, глинисто-алевроитистых отложений нижней и средней юры (частично и верхнего триаса), перекрытых делювиально-элювиальными образованиями (льдистыми суглинками и супесями).

В мерзлом состоянии перекрывающие трубки юрские отложения представляют собой довольно монолитную толщу. Прочность на сжатие этих отложений составляет около 40 МПа, объемный вес — 1,8–2,5 т/м³. В талом состоянии прочность их резко снижается, а верхняя часть разреза этих отложений превращается в плавун. На участке в непосредственной близости к карьеру вскрыты шлировые и повторно-жильные льды. Данные ледяные включения могут оказывать значительное влияние на процессы деформации прибортового пространства карьера. Этот интервал (5–7 м от поверхности) со вскрытыми льдами также может активно принимать участие в годовом теплообороте.



Рис. 4.34. Суффозионная воронка



Рис. 4.35. Эрозионные борозды и трещины отседания

По ряду скважин на глубинах 3,5–6,0 м происходили провалы бурового инструмента. Ниже интервала провалов часто следовали льдистые грунты. Также на участке исследования встречаются суффозионные воронки диаметром до 3 м и глубиной до 1 м (рис. 4.34). В 10–20 м от уступа восточного борта карьера находится водоотводная канава и небольшой водоем техногенных соленых вод. Здесь прослеживаются эрозионные борозды временных потоков воды, направленные в сторону водоема (рис. 4.35).

В непосредственной близости от линий реперов, где были выявлены смещения, наблюдаются участки с активным проявлением заболачивания. При этом процесс заболачивания происходит не только за счет атмосферных осадков и временных водотоков, но и технических минерализованных вод. Вследствие накопления этих вод в грунтах идут процессы перераспределения солей и изменение и без того нарушенного температурного режима. На основании геокриологических исследований и температурных наблюдений в скважинах следует, что верхнюю часть разреза рыхлых отложений можно охарактеризовать как пластичномерзлую. Такие породы могут скользить под влиянием нагрузок не только в непосредственной близости, но и на некотором удалении от бортов карьера. Откосы карьера — около 40° — обеспечивают только устойчивость от поверхностных осыпных и оползневых явлений, но не обеспечивают глубинную устойчивость от тангенциальных напряжений от веса пород, развивающихся в пластичномерзлой толще [Ржевский, Новик, 1978].

Ситуация потребовала оценки пространственного распределения напряженно-деформированного состояния массива для выявления ослабленных зон и потенциального разрушения массива и формирования оползневых (обвальных) тел. Для ее решения применено **сейсмопрофилирование** с использованием цифровой многоканальной сейсмостанции. В результате проведенных сейсмических исследований восточного борта карьера «Нюрбинский» были построены сейсмические разрезы

На сейсмических картах-срезах отношения скоростей V_s/V_p и коэффициента Пуассона выделяется ряд линейных зон субмеридионального простираения, наличие которых можно трактовать как отражение механизма отрыва оползневого тела при его смещении в борту карьера. Зоны, установленные сейсморазведкой, хорошо коррелируют с данными электроразведки, отображающими более глубинное (~ до 50 м) строение на геоэлектрических разрезах, что подтверждает объективность получаемой картины (рис. 4.36, см. с. XX цв. вклейки, и 4.37, см. с. XXI цв. вклейки).

На карте изолиний кажущегося сопротивления (см. рис. 4.37) по данным **геоэлектротомографии** синим цветом выделен участок пониженных сопротивлений. Интересно отметить, что он имеет сходство

с контуром обрушенного борта карьера трубки Юбилейная, также расположенного в Западной Якутии.

Результаты обработки полевых данных электротомографии показывает, что геологическая толща исследуемого участка расчленяется на высокоомную верхнюю часть и относительно низкоомную нижнюю. При этом имеет место неоднородное распределение удельного сопротивления по латерали во всем диапазоне глубин. На рис. 4.38 (см. с. XXII цв. вклейки) виден слой мощностью примерно 20–30 м, присутствующий на многих из профилей. Можно предположить, что этот слой связан с особенностями геокриологического строения верхней части нижнеюрских отложений — льдонасыщенной толщи мерзлых пород.

Следует отметить, что присутствие в геоэлектрическом разрезе довольно крупных тел изометричной формы и подстилающих их пластов глинистых пластичномерзлых пород может быть причиной развития оползневой активности ниже слоя годовых колебаний температур. Это предположение вполне обосновано, поскольку полученные в результате геоэлектрические разрезы в пределах имеющихся скважин дают почти полное соответствие изученным по керну и по каротажу геологическим разрезам скважин, а геоэлектрическое строение совпадает со строением, построенным с помощью сейсмопрофилирования карт отношения продольных и поперечных скоростей, по которым выделяются ослабленные зоны и возможные трещины бокового отпора. Таким образом, электротомография показала высокую информативность при изучении состояния примыкающих к карьере массивов горных пород [Бобачев, Яковлев, 2012].

Георадиолокация

Полевые наблюдения по борту карьера «Нюрбинский» производились аппаратурой GSS SIRSystem-2000 (антенна 200 МГц). Было отработано 25 профилей в пределах восточного борта карьера «Нюрбинский» с целью оценки состояния рыхлых отложений верхней части разреза. По сети широтных профилей выполнена 3D обработка данных. Результаты обработки георадиолокации показывают, что разуплотненные участки на глубине от 4 до 10 м в плане укладываются в приграничную линию зоны разрушенных пород, выделенную по данным малоглубинной сейсморазведки на глубине 12 м. В северной части область повышенных значений диэлектрической проницаемости соответствует обводненному участку борта карьера, с зафиксированным выходом воды (рис. 4.39, см. с. XXIII цв. вклейки).

В средней части карты участок менее высоких значений диэлектрической проницаемости простирается до восточной границы участка съемки. В юго-восточной части, где наблюдаются наиболее интенсив-

ные смещения бортов карьера, выявлены многочисленные нарушения и трещины по профилям вкрест борта карьера. Направление нарушений и трещин совпадает с субмеридиональными зонами чередующихся значений параметров V_s/V_p и коэффициента Пуассона, предположительно интерпретируемых как признаки трещин отрыва при образовании оползней [Владов, Старовойтов, 2004].

Скважинные геофизические методы проведены в пяти наблюдательных скважинах для изучения межскважинного пространства. Использовано радиоволновое просвечивание в односкважинном (ОРВП) и межскважинном (РВГИ) варианте и гамма-каротаж. Установлено, что на протяжении порядка 200 м породы залегают горизонтально либо субгоризонтально. Горизонтальное залегание пластов нарушается в нижней части разреза. Это нарушение может быть обусловлено либо унаследованием рельефа от карбонатного цоколя, либо структурным нарушением в данной области. На разрезе по линии скважин РВП12-14-13 (рис. 4.40, см. с. XXIV цв. вклейки) между скважинами РВП14-13 можно заметить перегиб в центральной части разреза. Подобная область является ослабленной зоной и может быть потенциальным источником опасности для устойчивости восточного борта карьера.

Результаты геофизических работ подтверждают, что верхняя часть рыхлых отложений (10–15 м) достаточно раздроблена и разуплотнена, есть незначительные воронки, возможно термокарст. Фиксируются трещины отрыва, зоны разуплотнения, проседание грунтов, обводнение. Хвостохранилище, соответственно, подпитка водой, да и температурный режим верхнего слоя благоприятствуют развитию негативных процессов.

В результате структурно-тектонического анализа и проведенного комплекса инженерно-геофизических работ в примыкании восточного борта установлены закономерности инженерно-геокриологического строения и **выявлены потенциально опасные зоны, состояние которых необходимо контролировать.**

1. Основными причинами смещения бортов карьера являются особенности геокриологического строения и технологическая деятельность, способствующие оттаиванию мерзлых пород, а спусковым механизмом являются поверхностные геокриологические процессы, спровоцированные антропогенной деятельностью.
2. Ведущим геофизическим методом, позволяющим обнаружить и проследить смещение пород, примыкающих к бортам карьера, безусловно, является электрическая томография, в комплексе с радиоволновым просвечиванием, гамма-каротажом и термометрией для выявления и контроля динамичных поверхностных геокриологических процессов.

3. Проведенные исследования показывают целесообразность геофизического мониторинга, чтобы на ранней стадии выявлять и прогнозировать опасные участки, на которых возможно возникновение оползневых процессов.
4. Избежать развития негативных процессов можно путем своевременной разработки мероприятий по обеспечению устойчивости на основе долговременных программ натурных наблюдений.

4.7. Опыт геотехнического мониторинга гидротехнических сооружений

Саха (Якутия) — гигантский регион, где работает множество горных предприятий. Функционирование структуры ГОКов невозможно без наличия гидротехнических сооружений технологического и энергетического комплексов. Крупнейшие из них — это гидроэлектростанции (Вилюйские ГЭС-1 и ГЭС-2, а также Светлинская ГЭС). Период строительства и ввода в строй первых двух — 1960–1978 гг., третьей — 1979–2004 гг.

Глубина воздействия гидротехнических сооружений на мерзлоту в пределах водохранилища ГЭС может достичь 2/3 их ширины. Однако по механизму теплового воздействия все они подразделяются на два типа: экстенсивного и интенсивного. Первый тип зависит от изменения природными и техническими факторами составляющих радиационно-теплового баланса, второй — от интенсивности непосредственного стока тепла в массивы вечной мерзлоты.

Необходимо также отметить весьма существенное различие природных условий, в которых создавалась хозяйственная структура ГОКов [Климовский, Готовцев, 1994]. Это относится не только к физико-географическим, но и к геокриологическим условиям. Несомненно также и то, что в настоящее время эти условия меняются в связи с глобальным изменением природно-климатических условий. Например, в г. Якутске среднегодовое значение температуры воздуха в настоящее время повысилось на 2 °С и составляет –8 °С.

Перечисленные выше особенности строительства и функционирования гидротехнических сооружений, а также природные условия, в которых они находятся, предопределили формирование геокриологической среды, строение и свойства которой существенно отличаются в пространстве и во времени и в значительной мере зависят от ее взаимодействия с конкретными типами инженерных сооружений. В результате этого в области их взаимодействия часто возникают различные типы инженерно-геологических, гидрогеологических и геокриологических процессов и явлений, которые отрицательно сказываются на жизнедеятельности и эксплуатационных характеристиках сооружений. Несомненно, что предупреждение их разви-

тия связано с диагностикой состояния геокриологической среды. Однако максимального эффекта в обеспечении рационального функционирования объектов алмазодобывающей промышленности возможно достичь только на основе создания технологии управления свойствами геокриологической среды. Решение этой задачи невозможно без надежной технологии контроля за геофизическими полями в криолитозоне в целом и в пределах границ геокриологической среды в частности.

Базируясь на перечисленных выше предпосылках по созданию геофизического мониторинга на гидротехнических объектах, расположенных в зоне развития многолетнемерзлых пород (ММП) Якутской алмазодобывающей провинции (ЯАП), был опробован в процессе многолетних работ ВНИМС ИМЗ СО РАН широкий комплекс геофизических методов исследований:

- 1) термометрические мониторинговые наблюдения для изучения температурного режима и тепловых потоков в изучаемых массивах горных пород;
- 2) высокоточный индукционный и волновой диэлектрический каротаж (ВИК — разработка МГРИ и ВНИМС, ВДК — разработка МГРИ), позволяющий изучать в естественных условиях электропроводность и диэлектрическую проницаемость криогенных пород в широком диапазоне;
- 3) гамма, гамма-спектрометрический и гамма-гамма плотностной каротаж (ГК, ГСК, ГГК-п). Этими методами проводилось литолого-стратиграфическое расчленение разрезов в скважинах по плотности горных пород;
- 4) радиоволновое просвечивание (РВП — разработка фирмы Радионда) впервые использовалось в регионе для геоинтроскопии межскважинного и околоскважинного пространства и получения детальных пространственных характеристик слагающих его геоэлектрических горизонтов, изучения изменчивости их границ под влиянием природных и техногенных процессов;
- 5) высокоточный каротаж магнитной восприимчивости (ВКМВ — разработка МГРИ) и каппа-метрия (разработка ВНИМС) для литологического расчленения геокриологических разрезов в натуральных условиях, также привязка образцов керна для определения физических свойств;
- 6) каротаж методом электрического сопротивления на постоянном токе для сухих скважин, а также обсаженных пластиковыми и железными обсадными трубами (ЭКОС — разработка ВНИМС);
- 7) механический каротаж (АМК, разработка ВНОГЕМ) для изучения прочности на одноосное сжатие для выделения льдистых и рыхлых горизонтов;

- 8) слежение за динамикой пьезометрических уровней в специально оборудованных гидрогеологических скважинах в сочетании с резистивиметрией;
- 9) наземные электроразведочные методы в различных модификациях, включая электротомографию (ЭТ) и методы естественного поля (ЕП), метод заряженного тела (МЗТ), дипольное индуктивное профилирование (ДИП), высокочастотное электропрофилерование (ВЧЭП), метод переходных процессов (МПП) и др.;
- 10) георадиолокация в наземном и водном вариантах, локация бокового обзора (ЛБО), аквальные исследования методом электротомографии для изучения верхних частей геокриологических разрезов и строения прибрежной части дна водохранилища;
- 11) сейсморазведочные (МПВ, МОВ и ВСП) для получения глубинной информации о геологическом строении ММП.

Эти работы позволили сформировать комплекс геофизических методов, которыми успешно решались отдельные геокриологические задачи как на гидротехнических, так и на горнотехнических объектах ЯАП. При этом к числу наиболее эффективных были отнесены: скважинные — термометрические, ВДК, ВИК, ГК, ГГК, ВКМВ, ЭКОС, РВП, резистивиметрия и ВСП; наземные электрометрические — ЕП, ЭП, МПП, а также георадиолокационные и сейсмометрические методы.

В настоящее время, несмотря на широкий спектр решаемых этими методами отдельных инженерно-геокриологических и экологических задач, требуется переход на более качественный уровень ведения комплексных геофизических исследований. В первую очередь это связано с необходимостью внедрения автоматизированных систем регистрации геофизических измерений в режиме натурного мониторинга для целей контроля и оперативного прогноза аварийных ситуаций на ГЭС, расположенных в верхней части криолитозоны.

Предлагаемая комплексная система наблюдений и контроля в зонах активного взаимодействия основных сооружений гидроузла и его водохранилища с природным комплексом должна создаваться путем объединения мониторинговой геофизической сети с существующей контрольно-наблюдательной сетью системы КИА. Это повысит информативность и точность исследований комплексного многоцелевого геофизического мониторинга криолитозоны и оптимального использования имеющейся системы наблюдательных скважин и прилегающих к ним наземных профилей для прогноза возможных аварийных ситуаций.

В качестве методологической основы использована *статистическая модель верхней части криолитозоны, на которой в равной мере отражены состав, строение, история формирования горных пород и динамика их изменений* под воздействием природно-техногенных процессов. Для

приложения этой модели к конкретным параметрам криосферы возможно использование всего спектра геологических и геофизических методов, важно найти их рациональный и эффективный комплекс и иметь систему сбора информации.

Схема опробована на примере Светлинского гидроузла, находящегося в стадии эксплуатации с 2004 г. (рис. 4.41). В районе гидроузла и приплотинной части водохранилища, р. Вилюй прорезала трамповое плато, образуя узкую каньонообразную долину. Склоновые отложения представлены были комплексом солифлюкционных, суглинисто-щебенистых и глыбовых террас, мощностью до 20 м, аллювиальные террасовые образования — суглинками, супесями, галечниками и валунами мощностью до 15 м.



Рис. 4.41. Фотография Светлинской ГЭС

Борта долины слагают **коренные породы и четвертичные отложения**, вовлеченные в оползневые дислокации. В основаниях сооружений и бортах долины развиты мерзлые и талые под руслом слабопрочные мергелисто-глинистые породы, нарушенные оползневыми процессами. В левобережной части сооружения породы в различной степени засолены и подстилаются мощной толщей пород с отрицательной температурой, которая насыщена минерализованными водами (**криопэгмами**), гидравлически связанными с уровнем р. Вилюй. Район возводимых сооружений характеризовался распространением подземных вод, которые по

отношению к многолетнемерзлым породам подразделяются на надмерзлотные, подмерзлотные и воды таликовой зоны под долиной р. Виллюй. В период работ в строительном котловане, в части, прилегающей к верховой перемычке, наблюдалось вытеснение пресными водами р. Виллюй сильноминерализованных вод.

Криогенная толща имела двухъярусное строение. В верхней части многолетнемерзлые породы находились в пластичном или твердомерзлом состоянии, в нижней — породы имели отрицательные температуры и не содержали ледяных включений. Для района характерна сплошная, сливающаяся мерзлота. Водопроницаемость грунтов в строительном котловане оценивается средним коэффициентом фильтрации 1 м/сут, а отдельных прослоев известняков и доломитов — до 10 м/сут.

Под влиянием сооружений гидроузла в строительный и эксплуатационный периоды предполагалось (прогнозировалось) изменение инженерно-геокриологических условий, обусловленное возможным развitiем или активизацией следующих процессов:

- расширением подрусловой и формированием таликовой зоны в основаниях сооружений гидроузла «талого типа», в ложе и бортах водохранилища — своеобразного «теплового штампа» на поверхности мерзлых пород;
- повышением температур мерзлых пород в прибереговой полосе водохранилища в связи с микроклиматическими изменениями и конвективным теплообменом;
- оживлением и активным развитием оползневых процессов на отдельных участках бортов водохранилища;
- выносом заполнителя из крупных трещин с возможной сосредоточенной фильтрацией по ним вод водохранилища в обход сооружений;
- изменением солевого состава, в частности опреснением поровых растворов в оттаивающих породах;
- расширением области и степени химического обмена пресных вод водохранилища и подземных криопэггов в зонах протайки;
- изменением минерализации и химического состава воды водохранилища и нижнего бьефа, определяющим экологическую обстановку в районе.

Все перечисленные и другие процессы должны не только контролироваться в процессе эксплуатации сооружения, но и через управляющие воздействия оптимизироваться в своем развитии.

Физические свойства мерзлых пород, развитых в верхней части криолитозоны Светлинской ГЭС, резко различны по электрическому сопротивлению. Общие закономерности его изменения связаны с составом горных пород: более глинистые и связанные с корой выветривания

имеют низкие значения до 50–200 Ом·м, более плотные (долериты) имеют значения сопротивления от 200 до нескольких тысяч Ом·м и разделяются со 100%-й надежностью. По плотности и магнитной восприимчивости надежность их разделения на фоне осадочных пород верхоленской и иглинской свиты в пределах 79–85% соответственно. Температурные свойства мерзлых пород варьируют в пределах 1–2 градусов, и высокоточные натурные измерения позволяли с высокой надежностью выделять таликовые и инфильтрационные участки. Скоростные характеристики горных пород изменяются в следующих интервалах: в рыхлых горных породах от 400 до 700 м/с, в карбонатных, разрушенных до дресвы, и суглинках от 400 до 1500 м/с, а в плотных известняках скорость распространения упругих волн не больше 3000 м/с. Радиоактивность пород разреза по данным гамма-каротажа зависит от глинистости разреза; более глинистые разности осадочных пород разреза отмечаются величиной экспозиционной дозы до 20 мкр/ч, а плотные известняки и доломиты характеризуются уровнем от 16 до 18 мкр/ч, рыхлые отложения имеют фоновые значения.

Практически по всем петрофизическим параметрам надежность разделения большинства групп осадочных мерзлых пород варьирует от 60 до 80%, что соответствует отношению аномалия/помеха от 3 до 15. При этом следует учесть, что верхняя часть криолитозоны находится в зоне гипергенеза и криогенеза, под влиянием которых кардинально изменяются физические свойства горных пород. Это позволяет предполагать наличие слабых аномалий в геофизических полях и необходимость использования для их выделения статистических приемов обработки.

Результаты работ методами электротомографии дали возможность установить четкое местоположение зоны, которая выделяется практически детерминированными аномалиями с энергетическими отношениями аномалия/помеха свыше 25, при надежности 99%. Повторные измерения на прилегающих к ФГКМ наземных профилях позволяют оценивать динамику зон развития фильтрации и в частных моделях на скважинах при окончательном запуске в работу автоматизированной системы (рис. 4.42, см. с. XXIV цв. вклейки).

Дальнейшее совершенствование возможностей комплекса геофизических методов и развитие автоматизированных измерений в пределах создаваемых и эксплуатируемых ГЭС в криолитозоне возможно только на основе предлагаемой статистической методологии мониторинга для изучения динамики деградации ММП на натурных физико-геокриологических моделях. Полное извлечение всей имеющейся информации в комплексных геофизических полях при проведении автоматизированного мониторинга может быть достигнуто путем оперативного корреляционно-спектрального анализа данных.

Изучение тонкой структуры меняющихся во времени геофизических полей при природно-техногенных нагрузках существенно расширяет число целевых геокриологических задач для оперативного контроля и прогноза состояния сооружений.

Предлагаемые принципы ведения автоматизированных мониторинговых геофизических измерений могут быть положены в основу слежения за состоянием горнотехнических сооружений Якутской алмазодобывающей провинции.

5. Анализ отечественной нормативной базы в области проектирования и строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов

5.1. Отечественная нормативная база, система нормативных правовых, нормативных технических и методических документов

В соответствии с принятыми федеральными законами № 184-ФЗ [2002] и № 384-ФЗ [2009] утратили силу действовавшие ранее советские нормативные документы: СНиПы, ГОСТы, территориальные и ведомственные нормативные документы. В настоящее время выполняется их замена актуализированными документами. Наряду с актуализированными документами продолжает действовать ряд документов (СП, СНиП и ГОСТ), разработанных еще в советское время.

Актуализация нормативных документов началась в 2010 г. и продолжается в настоящее время. В 2012 г. актуализирован основной документ по проектированию на ММГ — СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах», после актуализации он получил номер СП 25.13330.2012. Номер документа указывает на принадлежность к Министерству строительства РФ — 13330.

Ранее действовавшие территориальные и отраслевые строительные нормы (МГСН, ТСН и др.) с юридической точки зрения утратили свою силу. В качестве нормативных документов нижнего уровня в настоящее время разрабатываются стандарты организаций (СТО), применяемые на добровольной основе, расширяющие и дополняющие указания и положения СП и ГОСТов по локальным вопросам проектирования и строительства.

При проектировании строительных объектов, конструктивные решения которых отступают от действующих норм или их дополняют, следует для данного объекта разработать и согласовать в Министерстве строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации специальные технические условия (СТУ). Согласно ст. 48.1 Градостроительного кодекса РФ № 190-ФЗ [2004], СТУ обычно разрабатывается для технически сложных и особо опасных объектов, расположенных в сложных инженерно-геологических условиях.

Постановление Правительства РФ № 914 от 20 мая 2022 г. «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от

28 мая 2021 г. № 815» вносит изменения в постановление № 815, утвердившее перечень национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований 384-ФЗ от 30 декабря 2009 г. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Постановлением с 1 сентября 2022 г. из перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований 384-ФЗ, содержащим в настоящее время четыре ГОСТа и 65 СП, исключаются три ГОСТа и 61 свод правил. Таким образом, в числе обязательных остались: ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения»; СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия»; СП 28.13330.2017 «СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии»; СП 59.13330.2020 «СНиП 35-01-2001. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения»; СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология».

В область проектирования и строительства в условиях многолетне-мерзлых грунтов входят следующие разделы:

- Основания, фундаменты, грунтовые и подземные сооружения;
- Металлические, бетонные и железобетонные, деревянные, каменные конструкции;
- Несущие и ограждающие конструкции;
- Конструкции, взаимодействующие с грунтовыми основаниями;
- Защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов и явлений (за исключением сейсмических воздействий);
- Исследования строительных свойств грунтов, геотехнические исследования и испытания;
- Требования к проектированию и строительству зданий и сооружений различных отраслей.

К вопросам технического нормирования относится обеспечение механической безопасности зданий и сооружений, в том числе при опасных природных процессах и явлениях.

В рамках решения этих задач в области проектирования можно выделить четыре комплекса нормативных документов: «Основания и фундаменты на ММГ» (к нему же относятся вопросы взаимодействия конструкций с грунтом, инженерно-геологические и инженерно-геодезические изыскания и исследования строительных свойств грунтов), «Требования к строительным материалам и конструкциям», «Защита от опасных геофизических воздействий» и «Требования к проектированию сооружений различных отраслей».

5.1.1. Комплекс «Основания и фундаменты на ММГ»

СП 25.13330-2020 является основным нормативным документом по проектированию оснований и фундаментов на ММГ. Данный документ является актуализированной версией СНиП 2.02.04-88, в СП содержатся требования к проектированию оснований и фундаментов с учетом специфических свойств ММГ, разделения подходов к использованию ММГ в качестве оснований на принципы I и II, требования к расчету оснований и фундаментов по двум группам предельных состояний, с разделением на пластичномерзлые и твердомерзлые грунты. Представлены требования к проектированию фундаментов с учетом специфических многолетнемерзлых грунтов, таких как засоленные, сильнольдистые и др., требования к проектированию в сейсмичных районах, на склонах и откосах. Также указаны требования к проведению геотехнического мониторинга.

В период с 2016 по 2020 г. выполнено четыре изменения и один пересмотр данного документа.

Изменение № 1 СП 25.13330.2012 выполнено в 2016 г. Изменение включало следующие основные новшества.

Запрещено использование восстановленных стальных труб и других бывших в употреблении видов металлоконструкций.

Добавлены требования по прочности, морозостойкости, водонепроницаемости к железобетонным конструкциям. Также добавлены требования по использованию стальных бесшовных и сварных шовных труб в качестве свайных фундаментов.

Добавились требования о необходимости выполнения антикоррозионной защиты для всех металлических поверхностей подземных конструкций в слое сезонного промерзания-оттаивания и ниже не менее одного метра.

При разработке Изменения № 1 сделаны первые шаги в сторону нормирования фундаментов из винтовых свай в части классификации по условиям применимости и способам погружения.

Появились требования к количеству испытаний свай на стадиях инженерных изысканий и строительства, добавлен алгоритм определения касательных сил морозного пучения в лабораторных условиях в соответствии с ГОСТ 56726-2015 «Грунты. Метод лабораторного определения удельной касательной силы морозного пучения», выполнена корректировка алгоритма по определению среднегодовой температуры ММГ на верхней поверхности, которая должна назначаться из условия обеспечения требуемых расчетных температур грунта охлаждающими устройствами.

В связи с широким применением сезонно-охлаждающих устройств (СОУ) или термостабилизаторов при строительстве на ММГ разработа-

но и включено в свод правил справочное приложение «Проектирование и применение охлаждающих устройств».

Отдельным приложением справочного характера приведены способы устройства магистральных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах.

При Изменении № 2 СП 25.13330.2012, выполненном в 2017 г., в связи с активным использованием систем термостабилизации для уменьшения теплового влияния сооружений на мерзлые грунты основания добавился контролируемый параметр при геотехническом мониторинге, а именно температура охлаждающих устройств, контролируемая с помощью тепловизора на стадии строительства и эксплуатации сооружений и периодичность проверок.

В Изменении № 2 при определении несущей способности оснований рекомендуется выполнять теплотехнический расчет как на конец срока эксплуатации сооружения, так и на первый год эксплуатации. Распределение температур грунта по глубине при этом рассчитывается без учета теплового влияния сооружения, а температурный коэффициент принимается равным $\gamma_t = 1$. В случае, когда несущая способность основания на первый год эксплуатации меньше несущей способности, определенной по расчетным значениям температуры, установившимся в эксплуатационном периоде, и с учетом температурного коэффициента, за несущую способность следует принимать меньшее значение.

Изменение № 3 СП 25.13330.2012 выполнено в 2018 г. В данном Изменении уточнены требования к научно-техническому сопровождению изысканий, проектирования и строительства оснований и фундаментов.

Внесены уточненные требования к характеристикам строительных материалов фундаментов из стали для условий Крайнего Севера (приведен перечень ГОСТ на трубы, в соответствии с которым следует проектировать сваи, и требования по заполнению внутренней полости труб).

Уточнены расчетные значения прочностных характеристик мерзлых грунтов.

Добавлено требование выполнять антикоррозионную защиту свай по всей длине в случае, когда слой сезонного промерзания-оттаивания не сливается с многолетнемерзлыми грунтами.

При расчете несущей способности основания свайного фундамента следует учитывать возможное возникновение отрицательного (негативного) трения грунта на боковой поверхности свай с учетом требований СП 24.13330.

В Изменении № 4 СП 25.13330.2012, выполненном в 2019 г., добавлено требование рекомендательного характера по учету изменения климата при проектировании оснований и фундаментов: «...Для сооружений повышенного уровня ответственности сроком эксплуатации более

20 лет при выполнении прогнозных расчетов температурного режима грунтов рекомендуется учитывать региональные климатические и гео-криологические особенности и их изменение во времени. Сценарий изменения температуры приземного воздуха, используемый при расчете, рекомендуется принимать по актуальным данным федерального органа исполнительной власти, осуществляющего функции по оказанию государственных услуг в области гидрометеорологии и смежных с ней областях и мониторинга окружающей среды или в соответствии с линейной зависимостью изменения, построенной по архивным данным за весь период наблюдений репрезентативной метеорологической станции».

При проектировании полов в проветриваемом подполье разрешены к применению гибкие водонепроницаемые покрытия с применением мероприятий по сохранению их целостности в период эксплуатации. При устройстве покрытий следует обеспечить гидроизоляцию на контакте свай (фундамента) с материалом покрытия.

Уточнены требования по использованию стальных электросварных труб в качестве свайных фундаментов в многолетнемерзлых грунтах; уточнены требования к характеристикам строительных материалов из бетона и стали фундаментов; введен термин репрезентативной метеорологической станции.

Пересмотр СП 25.13330.2012 выполнен в 2020 г. и в настоящее время (2024 г.) является действующей версией документа. Особо важными вопросами в ходе пересмотра документа являлись: вопрос применения стальных электросварных труб в качестве свайных фундаментов и вопрос применения сухой цементно-песчаной смеси в качестве заполняющего материала внутренней полости свай взамен требуемого заполнения бетоном класса не ниже В7,5, а в пределах слоя сезонного промерзания-оттаивания и выше — бетоном класса не ниже В15. Эти вопросы регламентируются п. 6.3.8 и п. 6.3.10.

Актуальность данных вопросов подтверждена неоднократно разработанными и согласованными Минстроем России специальными техническими условиями (СТУ) по проектированию и строительству.

На основании анализа представленных СТУ и обсуждения с заинтересованными организациями проработаны вопросы внесения соответствующих изменений (дополнений) в рамках пересмотра свода правил.

СП 32-101-95 «Проектирование и устройство фундаментов опор мостов в районах распространения вечномерзлых грунтов» содержит требования к проектированию опор мостов в районах распределения ММГ. Данный документ с 1995 г. не актуализировался и содержит некоторые противоречия с СП 25.13330.2020, но при этом дополняет его в части требований к проектированию мостовых опор. В данный момент (2024 г.) действителен наравне с СП 354.1325800.2017.

СП 354.1325800.2017 «Фундаменты опор мостов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов» содержит требования к проектированию и устройству фундаментов опор постоянных мостов, путепроводов и эстакад на железных и автомобильных дорогах, сооружаемых в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.

Существенным шагом в развитии строительной нормативной базы на ММГ послужила разработка в 2020 г. трех новых нормативных документов: СП 496.1325800.2020, СП 497.1325800.2020, СП 498.1325800.2020. Данные документы дополняют СП 25.13330.2020 в части инженерной подготовки территории, устанавливают требования к устройству фундаментов в зависимости от принципа строительства, а также требования к эксплуатации зданий на ММГ.

СП 496.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила производства работ» распространяется на производство земляных работ и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на территории распространения ММГ. В документ входят требования к производству земляных работ, по устройству насыпей котлованов и выемок; основные требования по устройству буроопускных, опускных, бурозабивных, винтовых и буронабивных свай, вентилируемых фундаментов и фундаментов на насыпях; требования к разработке скважин при устройстве свай; а также технологические параметры при производстве работ по устройству оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах; технологические схемы устройства свайных и пространственных вентилируемых фундаментов и др.

СП 497.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила эксплуатации» устанавливает эксплуатационные требования к основаниям и фундаментам зданий и сооружений на ММГ. Свод правил не распространяется на линейные объекты, особо опасные и технически сложные объекты. В документе обобщен и систематизирован опыт проектирования и эксплуатации зданий и сооружений в части оснований, фундаментов и устройств по устранению или уменьшению теплового воздействия сооружений на мерзлые грунты основания, а также опыт проведения геотехнического мониторинга оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах при строительстве по принципам I и II. Разработаны требования к эксплуатации оснований, фундаментов и теплостабилизирующих устройств, включающие требования по эксплуатации вентилируемых подполий, систем термостабилизации, вентилируемых труб, теплозащитных экранов. Разработаны требования по проведению геотехнического мониторинга оснований, фундаментов и теплостабилизирующих устройств, включающие контроль изменения температуры грунтов в термометрических скважинах, перемещений фундаментов по деформационным маркам, изменения

уровня подземных вод, эффективности работы термостабилизаторов и др. Приведены примеры актов контроля оснований, фундаментов и термостабилизирующих устройств при осмотрах (приложения).

СП 498.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории» устанавливает требования к мероприятиям по инженерной подготовке, включая требования к составу и объему мероприятий по инженерной подготовке застраиваемых территорий в районе распространения многолетнемерзлых грунтов, и регламентирует ее основные направления при строительстве по I и II принципам.

Требования по проектированию вертикальной планировки при строительстве по принципу I, методы предварительного промораживания грунтов, требования к материалу насыпи, требования и положения по расчету оптимальной высоты насыпи, высоты теплоизоляционной и охлаждающей насыпи.

Требования по проектированию вертикальной планировки при строительстве по принципу II, требования к материалу подсыпок, методы предварительного оттаивания грунтового массива и расчет осадки уплотнения основания при его предварительном оттаивании.

Мероприятия по инженерной подготовке территории, при выявлении на застраиваемой территории опасных геологических явлений и криогенных процессов. Рассматриваемые мероприятия включают в себя защиту территории от подтопления поверхностными водами, защиту территорий от затопления, мероприятия по предотвращению морозного пучения, морозобойного растрескивания, термокарстовых процессов и устройству противоналедных конструкций.

Требования к производству земляных работ при строительстве по I и II принципам, включая требования к устройству насыпей. Схемы и конструктивные решения водоотводных элементов при строительстве по принципу I. Методика теплотехнического расчета основания при предварительном промораживании грунтов СОУ.

Косвенно к проектированию фундаментов на многолетнемерзлых грунтах относятся следующие два документа.

СП 26.13330.2012 «Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Актуализированная редакция СНиП 2.02.05-87» распространяется на проектирование фундаментов машин с динамическими нагрузками. В документе содержится раздел, включающий особенности проектирования фундаментов машин на ММГ. В приведенном разделе указаны значения коэффициентов условия работы γ_{es} , которые следует учитывать при расчете несущей способности оснований фундаментов машин, для различных значений коэффициентов использования машин во времени.

СП 45.13330.2012 «Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87». Данный свод правил содержит указания по производству и оценке соответствия земляных работ, устройству оснований и фундаментов при строительстве и реконструкции зданий и сооружений. В СП представлен раздел «Сваи в ММГ», в котором содержатся требования по устройству свай при строительстве по принципу I: буроопускной, опускной и бурозабивной способы. Также представлены требования по устройству свай-стоек при использовании грунтов по принципу II.

5.1.2. Своды правил, относящиеся к инженерно-геологическим и инженерно-геодезическим изысканиям на многолетнемерзлых грунтах

СП 47.13330.2016. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения». Данный свод правил устанавливает общие требования и правила выполнения инженерных изысканий и распространяется на архитектурно-строительное проектирование, строительство, реконструкцию, эксплуатацию, снос (демонтаж) зданий и сооружений, а также на территориальное планирование и планировку территории. Данные общие требования к изысканиям относятся также и к многолетнемерзлым грунтам.

СП 11-105-97 (ч. I–VI) «Инженерно-геологические изыскания для строительства».

Свод правил (ч. I) «Инженерно-геологические изыскания для строительства». Данный свод правил устанавливает общие технические требования и правила производства инженерно-геологических изысканий для обоснования проектной подготовки строительства, а также инженерно-геологических изысканий, выполняемых в период строительства, эксплуатации и ликвидации объектов. Также устанавливает состав, объемы, методы и технологию производства инженерно-геологических изысканий. Требования данного документа относятся и к многолетнемерзлым грунтам.

Свод правил СП 11-105-97 (ч. IV) «Правила производства работ в районах многолетнемерзлых грунтов» устанавливает общие технические требования и правила производства инженерно-геологических изысканий для обоснования проектной подготовки строительства, а также инженерно-геологических изысканий, выполняемых в период строительства, эксплуатации и ликвидации объектов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Данный документ полностью относится к инженерно-геологическим изысканиям на ММГ.

Документом, который напрямую не используется при проектировании оснований и фундаментов, но содержит климатические параметры,

которые являются исходными для теплотехнических расчетов при проектировании фундаментов на многолетнемерзлых грунтах и для анализа климатических условий площадки строительства, является СП 131.13330.2012 «Строительная климатология».

СП 11-104-97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства». Приведенный свод правил устанавливает общие технические требования и правила производства инженерно-геодезических изысканий для обоснования проектной подготовки строительства, включая градостроительную документацию, а также инженерно-геодезических изысканий, выполняемых в период строительства, эксплуатации и ликвидации объектов и обеспечивающих формирование систем учета технической инвентаризации объектов недвижимости всех форм собственности. Настоящий документ устанавливает состав, объемы, методы и технологию производства инженерно-геодезических изысканий. Требования данного свода правил распространяются на выполнение инженерно-геодезических работ на многолетнемерзлых грунтах.

СП 493.1325800.2020 «Инженерные изыскания для строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Общие требования». Приведенный свод правил устанавливает общие требования к выполнению инженерных изысканий для строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов для подготовки документов территориального планирования, документации по планировке территории и выбора площадок (трасс) строительства (обоснования инвестиций); архитектурно-строительного проектирования при подготовке проектной документации объектов капитального строительства; строительства, реконструкции и капитального ремонта зданий и сооружений.

5.1.3. Национальные стандарты, разделы которых касаются многолетнемерзлых грунтов

1. ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».
2. ГОСТ 5686-2020 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями»
3. ГОСТ 12071-2014 «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов».
4. ГОСТ 12248.7-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом испытания шариковым штампом».
5. ГОСТ 12248.8-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности мерзлых грунтов методом среза по поверхности смерзания».
6. ГОСТ 12248.9-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом одноосного сжатия».

7. ГОСТ 12248.10-2020 «Грунты. Определение характеристик деформируемости мерзлых грунтов методом компрессионного сжатия».
8. ГОСТ 12248.11-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности оттаивающих грунтов методом среза».
9. ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава».
10. ГОСТ 19912-2012 «Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием».
11. ГОСТ 20522-2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний».
12. ГОСТ 22733-2016 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности».
13. ГОСТ 23061-2012 «Грунты. Методы радиоизотопных измерений плотности и влажности».
14. ГОСТ 23740-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения содержания органических веществ».
15. ГОСТ 24846-2019 «Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений».
16. ГОСТ 24847-2017 «Грунты. Методы определения глубины сезонного промерзания».
17. ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация».
18. ГОСТ 25358-2020 «Грунты. Метод полевого определения температуры».
19. ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации».
20. ГОСТ 26262-2014 «Грунты. Методы полевого определения глубины сезонного оттаивания».
21. ГОСТ 26263-84 «Грунты. Метод лабораторного определения теплопроводности мерзлых грунтов».
22. ГОСТ 27217-2012 «Грунты. Метод полевого определения удельных касательных сил морозного пучения».
23. ГОСТ 28514-90 (СТ СЭВ 6016-87) «Строительная геотехника. Определение плотности грунтов методом замещения объема».
24. ГОСТ 28622-2012 «Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости».
25. ГОСТ 30416-2020 «Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения».
26. ГОСТ 30672-2019 «Грунты. Полевые испытания. Общие положения».
27. ГОСТ Р 53582-2009 «Грунты. Метод определения сопротивления сдвигу оттаивающих грунтов».

28. ГОСТ Р 54476-2011 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик сопротивляемости сдвигу грунтов в дорожном строительстве».

29. ГОСТ Р 54477-2011 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик деформируемости грунтов в дорожном строительстве».

30. ГОСТ 19804-2021 «Сваи железобетонные заводского изготовления. Общие технические условия».

31. ГОСТ 19804.3-80 «Сваи забивные железобетонные квадратного сечения с круглой полостью. Конструкция и размеры».

32. ГОСТ 19804.6-83 «Сваи полые круглого сечения и сваи-оболочки железобетонные составные с ненапрягаемой арматурой. Конструкция и размеры».

33. ГОСТ Р 55260.1.2-2012 «Гидроэлектростанции. Часть 1–2. Сооружения ГЭС гидротехнические. Требования безопасности оснований».

34. ГОСТ Р 56726-2015 «Грунты. Метод лабораторного определения удельной касательной силы морозного пучения».

35. ГОСТ 20276.3-2020 «Грунты. Метод испытания горячим штампом мерзлых грунтов».

36. ГОСТ Р 59596-2021 «Грунты. Метод лабораторного определения нормальных сил морозного пучения».

37. ГОСТ Р 59597-2021 «Грунты. Метод трехосного сжатия мерзлых грунтов».

38. ГОСТ Р 59537-2021 «Грунты. Метод лабораторного определения влажности за счет незамерзшей воды».

39. Проект ГОСТ Р «Грунты. Методы лабораторного определения теплофизических характеристик».

40. Проект ГОСТ Р «Грунты. Метод лабораторного определения температуры начала замерзания».

За последние пять лет разработано несколько новых стандартов по определению физико-механических характеристик, характерных только для мерзлых грунтов, что позволило существенно повысить точность проводимых расчетов оснований и фундаментов.

ГОСТ Р 59596-2021 «Грунты. Метод лабораторного определения нормальных сил морозного пучения». Стандарт включает в себя испытание образцов грунта ненарушенного сложения в устройствах, обеспечивающих создание, поддержание и контроль заданных условий промораживания образца грунта, вертикальное нагружение образца и измерение вертикальных деформаций грунта.

Для получения зависимости относительной деформации морозного пучения от нормальной нагрузки необходимо проведение испытаний не менее чем при четырех значениях нормальной нагрузки, включая мак-

симальную нагрузку, возникающую при пучении грунта в замкнутом объеме, и при отсутствии нормальной нагрузки на образец.

ГОСТ Р 59597-2021 «Грунты. Метод трехосного сжатия мерзлых грунтов». Метод трехосного осесимметричного сжатия активно используется в практике инженерно-геологических изысканий для определения целого спектра прочностных и деформационных свойств талых грунтов как в России, так и за рубежом.

В стандарте используется ступенчатый режим нагружения. Разрушения образца достигают приложением вертикальной нагрузки при ранее достигнутом боковом давлении в камере. Определяемые характеристики: удельное сцепление, угол внутреннего трения, модуль деформации.

ГОСТ Р 59537-2021 «Грунты. Метод лабораторного определения влажности за счет незамерзшей воды». Влажность за счет незамерзшей воды в стандарте определяется десорбционным и контактным методами.

Десорбционный метод основан на переходе от экспериментально полученной при положительной температуре изотермы десорбции воды из грунта в условиях контакта с пониженной влажностью воздуха над водным раствором электролита к влажности грунта за счет незамерзшей воды при отрицательной температуре.

Контактный метод основан на принципе термодинамического равновесия между льдом, паром и незамерзшей водой воздушно-сухого грунта при его контакте со льдом при заданной отрицательной температуре.

Готовящиеся к утверждению национальные стандарты

Проект ГОСТ Р «Грунты. Методы лабораторного определения теплофизических характеристик».

Теплофизические характеристики входят в перечень параметров, обязательных для выполнения расчетов оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах. В сфере изысканий и проектирования используются следующие теплофизические величины:

- 1) теплопроводность в мерзлом и талом состоянии;
- 2) теплоемкость удельная и объемная;
- 3) теплоемкость эффективная (с учетом фазовых переходов воды);
- 4) теплота заморзания-оттаивания.

В новый ГОСТ включены четыре метода определения теплофизических характеристик мерзлых и талых грунтов: стационарного теплового режима, цилиндрического зонда, монотонного разогрева/охлаждения и регулируемого режима 1-го рода.

Проект ГОСТ Р «Грунты. Метод лабораторного определения температуры начала заморзания». Температура начала заморзания грунта в значительной степени определяет состояние грунта, глубину сезонного про-

мерзания (протаивания) и многие другие теплофизические процессы и их длительность, а в конечном счете — надежность и долговечность эксплуатации зданий и сооружений.

Среди оптимальных методов определения температуры начала заморзания грунта в рамках выполнения инженерно-геологических изысканий были выбраны: калориметрический, потенциометрический и криоскопический.

Представленные национальные стандарты содержат методики определения свойств грунтов как в лабораторных, так и в полевых условиях. В данных документах представлены разделы по определению свойств мерзлых грунтов в лабораторных условиях (физических, деформационных и прочностных, показатель степени пучинистости и др.), а также по определению свойств мерзлых грунтов в полевых условиях (испытание грунтов сваями, определение пучинистых свойств грунтов, зондирование и др.), кроме того, некоторые стандарты содержат требования по определению характеристик только мерзлых грунтов: ГОСТ 25358-2012; ГОСТ 26262-2014; ГОСТ 26263-84; ГОСТ Р 53582-2009.

Отдельным документом является ГОСТ 55260.1.2-2012 «Сооружения ГЭС гидротехнические. Требования безопасности оснований», который распространяется на проектирование, строительство и эксплуатацию оснований речных гидротехнических сооружений, в том числе и на многолетнемерзлых грунтах, и содержит требования безопасности основания.

ГОСТ Р 57361-2016/EN ISO 13793:2001 «Фундаменты зданий. Правила расчета и проектирования с учетом температурных воздействий». Еще одним документом, выходящим из общего списка документов, является ГОСТ Р (EN ISO 1393:2001), который содержит требования к проектированию фундаментов зданий с учетом температурных воздействий и является аутентичным переводом европейского нормативного документа EN ISO 1393.2001.

5.1.4. Комплекс «Требования к строительным материалам и конструкциям»

К данному комплексу относится только один документ — СП 52-105-2009 «Железобетонные конструкции в холодном климате и на вечномерзлых грунтах», в котором содержатся требования к ж/б конструкциям в районах распространения ММГ. Данный документ не утвержден на федеральном уровне, разработчиком его является АО «НИЦ “Строительство”».

Документы обязательного применения, содержащие требования к проектированию строительных конструкций из других материалов (металла, дерева, камня и т.д.) на ММГ, отсутствуют.

5.1.5. Комплекс «Защита от опасных геофизических воздействий»

В комплексе «Защита от опасных геофизических воздействий» содержатся три документа.

В СП 104.13330.2016 «СНиП 2.06.15-85. Инженерная защита территории от затопления и подтопления» представлен раздел с особыми требованиями к инженерной защите в зоне распространения ММГ под влиянием подтоплений и затоплений, в том числе технических воздействий.

В СП 115.13330.2016 «СНиП 22-01-95. Геофизика опасных природных воздействий» представлены положения по определению опасных природных воздействий, вызывающих проявления и/или активацию природных процессов, в том числе относящихся к зоне распространения ММГ: термокарст, пучение, солифлюкция, наледообразование.

В СП 116.13330.2012 «СНиП 22-02-2003. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения» представлены мероприятия инженерной защиты территорий, зданий и сооружений от характерных для зоны распространения ММГ процессов: наледообразование, термокарст, пучение и др.

5.1.6. Комплекс «Требования к проектированию сооружений различных отраслей»

5.1.6.1. «Требования к проектированию дорог»

СП 34.13330.2021 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85*». Данный свод правил устанавливает нормы проектирования на вновь строящиеся, реконструируемые и капитально ремонтируемые автомобильные дороги общего пользования и ведомственные автомобильные дороги. В документе содержатся отдельные пункты по проектированию автомобильных дорог на ММГ. Предусматривается три принципа строительства: первый — с сохранением ММГ в течение всего периода эксплуатации; второй — допущение оттаивания грунта деятельного слоя в основании насыпи в период эксплуатации дорог; третий — обеспечение предварительного оттаивания ММГ. Данная градация отличается от СП 25.13330.2020, где принцип II включает в себя второй и третий принципы СП 34.13330.2021. В документе приводятся рекомендации по использованию того или иного принципа в зависимости от грунтовых условий и проявления мерзлотных процессов (пучение, термокарст и т.д.). Приведены значения допустимой суммарной осадки основания и нестабильных слоев насыпи в период эксплуатации в зависимости от типа дорожной одежды и условия ее устройства. Даны рекомендации по устройству насыпи на участках прогнозируемых наледей.

СП 32-104-98 «Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм». Документ предназначен для применения при проектировании и строительстве земляного полотна новых ж/д линий колеи 1520 мм, главных и стационарных путей, узлов и станций. СП содержит раздел «Земляное полотно в районах распространения вечномёрзлых грунтов (ММГ)», в котором даются рекомендации по прокладке земляного полотна с учетом негативных факторов, возникающих при строительстве на ММГ. Приведены схемы устройства насыпей при различном залегании подземных вод. Приведены требования к дренажам и водоотводящим сооружениям.

СП 447.1325800.2019 «Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования». Настоящий свод правил распространяется на проектирование железнодорожного пути промышленного транспорта (необщего пользования и технологических путей) колеи 1520 мм в районах с наличием многолетнемерзлых грунтов.

СП 431.1325800.2019 «Дороги промышленные автомобильные. Правила проектирования и строительства в Арктической зоне». Настоящий свод правил устанавливает правила проектирования и строительства промышленных автомобильных дорог в Арктической зоне. Свод правил не распространяется на дороги, проектирование и строительство которых регламентируется в СП 34.13330, СП 37.13330, СП 42.13330, а также на сезонные и временные дороги.

СП 313.1325800.2017 «Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства». Настоящий свод правил предназначен для изысканий, проектирования и строительства автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты.

СП 37.13330.2012 «Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91*». В своде правил приведены основные правила и требования, предъявляемые при проектировании и реконструкции сооружений и устройств промышленного транспорта — железнодорожной колеи 1520 мм и 750 мм, автомобильного, гидравлического, канатного подвесного, конвейерного, а также требования промышленной безопасности и охраны окружающей среды. Содержит рекомендации к конструкции земляного полотна автомобильных дорог в районах многолетнемерзлых грунтов, схемы земляного полотна железнодорожного пути в Арктической зоне с использованием гранулированного теплоизоляционного материала.

СП 78.13330.2012 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85 (с Изменениями № 1, 2)». Настоящий свод правил устанавливает правила производства и контроля качества работ и распространяется на вновь строящиеся, реконструируемые и капитально ремонтируемые автомобильные дороги общего пользования

и ведомственные автомобильные дороги. Требования настоящего свода правил не распространяются на временные дороги, испытательные дороги промышленных предприятий и автозимники. СП содержит регламент земляных работ в зимних условиях (при отрицательных температурах) и требования к возведению земляного полотна в районах вечной мерзлоты.

Методические рекомендации по проектированию временных автомобильных дорог на строительных площадках. Методические рекомендации предназначены для использования при разработке технической документации на автомобильные дороги строящихся объектов промышленного, сельскохозяйственного и жилищно-гражданского назначения, входящей в состав проектов организации строительства и проектов производства работ.

5.1.6.2. «Требования к аэродромам»

СП 121.13330.2019 «Аэродромы. Актуализированная редакция СНиП 32-03-96». Данный свод правил устанавливает нормы проектирования и распространяется на вновь строящиеся, расширяемые и реконструируемые сооружения аэродромов (вертодромов). Документ содержит раздел «Основания на вечномерзлых грунтах (ММГ)», в котором приводится три принципа использования ММГ в качестве основания аэродромов. В основном документе по проектированию на ММГ — СП 25.13330 — используются два принципа строительства, в связи с чем есть нестыковки в указанных документах. В СП 121.13330 принцип II разбит на два принципа. В документе приводятся условия использования того или иного принципа строительства, применения теплоизоляционных материалов и подсыпок, а также даны рекомендации по расчету осадок в зависимости от выбранного принципа строительства.

СП 489.1325800.2020 «Аэродромы. Геотехнический мониторинг при эксплуатации». Настоящий свод правил распространяется на геотехнический мониторинг аэродромов при их эксплуатации.

СП 490.1325800.2020 «Аэродромы. Правила производства работ». Настоящий свод правил устанавливает правила производства и контроля качества работ при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте аэродромов (вертодромов). Регламентирует производство земляных работ на многолетнемерзлых грунтах, при отрицательных температурах воздуха и контроль качества работ. В разделе 7 СП регламентируются основные методы проведения геотехнического мониторинга на аэродромах, расположенных в особых условиях, включая районы распространения ММГ и территории, подверженные термокарсту. Регламентируются требования к температурному и гидрогеологическому методам.

5.1.6.3. «Требования к гидротехническим сооружениям»

СП 58.13330.2019 «Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003». Свод правил распространяется на вновь проектируемые, строящиеся, эксплуатируемые, реконструируемые и подлежащие ликвидации речные и морские гидротехнические сооружения. В документе содержится несколько пунктов, относящихся к ММГ. Указывается на необходимость учета изменения физико-механических, теплофизических и фильтрационных свойств пород оснований и материалов сооружений при их переходе из мерзлого в талое состояние и наоборот, а также величины и скорости осадок сооружений при их оттаивании. Отмечается необходимость организации наблюдений за температурным режимом при эксплуатации грунтовых сооружений на многолетнемерзлых льдистых основаниях и за деформациями, связанными с переходом грунтов в талое состояние. Других требований по проектированию гидротехнических сооружений на ММГ в документе не представлено.

СП 40.13330.2012 «Плотины бетонные и железобетонные. Актуализированная редакция». Настоящий свод правил распространяется на проектирование строящихся и реконструируемых бетонных и железобетонных плотин, входящих в состав энергетических, водотранспортных и мелиоративных гидроузлов, систем водоснабжения, водоочистки, переброски стока и борьбы с наводнениями, а также гидроузлов комплексного назначения. В документе содержится несколько пунктов, относящихся к ММГ. Регламентируются требования к прочности бетона конструкций, предназначенных для эксплуатации в особо суровых климатических условиях и учет наличия ММГ в основании при расчете.

СП 287.1325800.2016 «Сооружения морские причальные. Правила проектирования и строительства». Настоящий свод правил распространяется на проектирование новых, реконструируемых и капитальный ремонт морских причальных гидротехнических сооружений. Свод правил устанавливает общие требования к проектированию и строительству стационарных причальных сооружений и частные требования к проектированию и возведению гравитационных сооружений уголкового профиля и из массивовой кладки, причалов типа больверк, эстакад, палов, причальных сооружений для особых условий. В документе содержится несколько пунктов, относящихся к ММГ. Регламентируются расчеты стационарных причальных сооружений для условий Арктики. Регламентируются модуль упругости мерзлых грунтов в зависимости от температуры, нужный при расчете обычного больверка (безанкерного, заанкеренного) эксплуатирующегося с первого дня с мерзлым грунтом в теле засыпки.

СП 23.13330.2018 «Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 (с Изменением № 1)». Насто-

ящий свод правил распространяется на проектирование оснований морских и речных гидротехнических сооружений (далее — ГТС) всех видов и классов согласно СП 58.13330, в том числе гравитационных, арочных и контрфорсных плотин, подпорных стенок, шлюзов, шельфовых и портовых сооружений, а также естественных склонов и искусственных откосов на участках расположения гидротехнических сооружений. В документе содержится несколько пунктов, относящихся к ММГ.

СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*» (с Изменениями № 1, 2, 3). Настоящий свод правил распространяется на проектирование новых и реконструкцию существующих плотин (или напорных дамб) из грунтовых материалов (земляных насыпных и намывных, каменно-земляных и каменно-набросных), входящих в состав систем различных видов строительства (энергетического, гидроэнергетического, мелиоративного). В документе содержится несколько пунктов, относящихся к ММГ.

СП 102.13330.2012 «Туннели гидротехнические. Актуализированная редакция СНиП 2.06.09-84». Настоящий свод правил распространяется на проектирование строящихся и реконструируемых гидротехнических туннелей всех классов, входящих в состав гидроэлектростанций, мелиоративных систем и систем водоснабжения. При проектировании гидротехнических туннелей в особых условиях (в районах с сейсмической активностью, в северной строительно-климатической зоне, в сложных инженерно-геологических условиях и др.) необходимо соблюдать дополнительные требования соответствующих нормативных документов. В документе содержится несколько пунктов, относящихся к ММГ.

ГОСТ Р 55260.1.2-2012 «Гидроэлектростанции. Часть 1—2. Сооружения ГЭС гидротехнические. Требования безопасности оснований». Настоящий стандарт распространяется на проектирование, строительство и эксплуатацию оснований речных гидротехнических сооружений. Проектирование оснований гидротехнических сооружений, предназначенных для строительства в сейсмических районах, в условиях распространения многолетнемерзлых, просадочных, пучинистых, набухающих, биогенных, засоленных грунтов и карста, проводится в соответствии с нормами и правилами, предусмотренными соответствующими нормативными документами. В документе содержится несколько пунктов, относящихся к ММГ.

5.1.6.4. «Требования к инженерным сетям»

В данном комплексе документов содержатся главы или пункты, в которых приведены требования к проектированию оснований и фундаментов инженерных систем на многолетнемерзлых грунтах различных отраслей.

СП 30.13330.2012 «Внутренний водопровод и канализация зданий. Актуализированная редакция СНиП 2.04.01-85». Документ содержит требования к проектированию строящихся и реконструируемых систем внутреннего холодного и горячего водоснабжения, канализации и водосточков. В документ входит раздел по строительству на многолетне-мерзлых грунтах. Предпочтение в указанном документе отдается надземной и наземной прокладке коммуникаций. При подземной прокладке необходимо использовать каналы и тоннели.

СП 41-101-95 «Проектирование тепловых пунктов». Документ содержит требования к проектированию, к объемно-планировочным решениям помещений тепловых пунктов, а также рекомендации по расчету и подбору оборудования, приборов учета, контроля и автоматизации, применяемых в ЦТП и ИТП. В документе содержится раздел по проектированию тепловых пунктов на вечномерзлых грунтах (ММГ). Проектировать ТП на ММГ следует надземными с вентилируемыми подпольями, прокладка трубопроводов должна предусматриваться выше уровня пола. Для опорожнения оборудования и трубопроводов теплового пункта и систем потребления теплоты следует предусматривать систему дренажа и слива воды, исключаящую воздействие теплоты на грунт. Заглубление конденсатных баков и баков с горячей водой ниже планировочной отметки в качестве оснований по принципу I не допускается.

СНиП 3.05.06-85 «Электротехнические устройства». Документ содержит требования, распространяющиеся на производство работ при строительстве новых, а также при реконструкции (расширении) и техническом перевооружении действующих предприятий по монтажу и наладке электротехнических устройств, в том числе электрических подстанций, распределительных пунктов и т.д. В документе содержится раздел по строительству на вечномерзлых грунтах (ММГ). Требования сводятся к устранению льда и снега из траншей, заполнению траншей песчаным или гравийно-галечным грунтом и устройству водоотводных каналов.

СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 (с Изменением № 1)». Данный свод правил устанавливает нормы проектирования вновь строящихся и реконструируемых систем нарушенной канализации постоянного назначения для городских и поверхностных стоков, также близких к ним по составу производственных сточных вод. В документе содержится раздел по прокладке канализации в вечномерзлых грунтах (ММГ), даны рекомендации по выбору принципа I и II, требования к прокладке трубопроводов подземной, наземной или надземной в зависимости от теплового режима трубопровода и принципа использования ММГ в качестве основания. Даны требования по предохранению от замерзания трубопровода.

СП 31.13330.2021 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения». Данный свод правил устанавливает нормы проектирования вновь строящихся и реконструируемых сооружений водоподготовки и систем наружного водоснабжения поселений и городских округов производственных и сельскохозяйственных объектов. В документе содержится раздел по прокладке систем наружного водоснабжения в вечномерзлых грунтах (ММГ), даны требования к прокладке трубопроводов подземной и надземной в зависимости от теплового режима трубопровода и принципа использования ММГ в качестве основания. Даны требования по предохранению от замерзания трубопровода.

СП 445.1325800.2018 «Водопропускные трубы и системы водоотвода в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования». Данный свод правил устанавливает нормы проектирования водопропускных труб и систем водоотвода на новых и реконструируемых железных и автомобильных дорогах в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. В документе содержится раздел по прокладке систем наружного водоснабжения в вечномерзлых грунтах (ММГ), даны требования к прокладке трубопроводов подземной и надземной в зависимости от теплового режима трубопровода и принципа использования ММГ в качестве основания. Даны требования по предохранению от замерзания трубопровода.

СП 129.13330.2019 (СНиП 3.05.04-85*) «Наружные сети и сооружения водоснабжения и канализации». Данный свод правил устанавливает нормы проектирования вновь строящихся и реконструируемых наружных сетей и сооружений водоснабжения и канализации населенных пунктов и промышленных предприятий. В документе содержится пункт по прокладке трубопроводов в вечномерзлых грунтах (ММГ).

5.1.6.5. «Требования к сооружениям нефте-, газодобывающего комплекса»

СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*». Настоящий документ распространяется на проектирование новых и реконструкцию магистральных трубопроводов и ответвлений от них диаметром до 1400 мм (включительно), с избыточным давлением среды свыше 1,2 до 10 МПа включительно для транспортировки нефти, нефтепродуктов, газа и т.д. Документ содержит раздел по прокладке трубопроводов в районах ММГ. В разделе содержатся рекомендации по способу прокладки трубопровода в зависимости от принципа строительства I и II, грунтовых условий (пучинистые или льдистые грунты). Отмечается необходимость разработки мероприятий, снижающих тепловое воздействие трубопровода на грунты, и восстановления вечной мерзлоты в зимний период.

СП 42-102-2004 «Проектирование и строительство газопроводов из металлических труб». Данный СП распространяется на проектирование и строительство новых наружных газопроводов из стальных труб и внутренних газопроводов из стальных и медных труб. Документ содержит раздел с требованиями к сооружению газопровода в многолетнемерзлых грунтах, в котором указаны способы прокладки трубопроводов (подземный и надземный), глубина заложения трубопровода, требование к основанию трубопровода и обратной засыпке. Приводятся рекомендации по устройству вмораживаемых анкеров, выполненных буроопускным и опускным способом, при котором глубина заделки анкера в ММГ составляет не менее 2 м.

СП 42-103-2003 «Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов». Представленный документ распространяется на проектирование и строительство новых газопроводов из полиэтиленовых труб, а также на реконструкцию стальных изношенных. Данный СП содержит требования к сооружению газопроводов на ММГ, в том числе указание о необходимости создания такого температурного режима эксплуатации газопровода, при котором его влияние на окружающий грунт будет минимальным с точки зрения нарушений естественного теплового режима грунтового массива в зоне прохождения трубопровода. Приводятся требования к высоте песчаного основания при разных грунтовых условиях по длине трассы. Также в документе представлены требования к замороженным анкерам, буроопускному и опускному методам устройства свай. Длина части анкера, взаимодействующая с многолетнемерзлыми грунтами в процессе эксплуатации газопровода, должна быть не менее 1 м.

СП 62.13330.2011* «Газораспределительные системы. Актуализированная редакция СНиП 42-01-2002 (с Изменением № 1)». Данный свод правил устанавливает нормы и правила проектирования, строительства, реконструкции, капитального ремонта, расширения и технического перевооружения сетей газораспределения, газопотребления и объектов сжиженных углеводородных газов, предназначенных для обеспечения природными и сжиженными углеводородными газами потребителей, использующих газ в качестве топлива. В документе ММГ упоминаются в двух пунктах, в которых указываются варианты прокладки стальных газопроводов давлением до 0,6 МПа в каналах, проходящих в многолетнемерзлых грунтах под автомобильные и ж/д. Там же приводятся требования для полиэтиленовых газопроводов, прокладываемых в ММГ.

СП 34-116-97 «Инструкция по проектированию, строительству и реконструкции промысловых нефтегазопроводов». Документ не относится к строительной отрасли и содержит инструкцию по проектированию, строительству и реконструкции промысловых нефтегазопрово-

дов. В документе представлен раздел по прокладке трубопроводов на вечномерзлых грунтах (ММГ). Приведены категории участков трубопроводов, прокладываемых на ММГ, в зависимости от способа прокладки (наземный и подземный). Также приведены категории просадочности грунтов в зависимости от веса грунта и содержания ледяных включений.

Кроме обязательных федеральных, в советское время разрабатывались ведомственные строительные нормы по проектированию и строительству на вечномерзлых грунтах (данные нормы относились в основном к дорожному строительству), а также ТСН — территориальные строительные нормы, относящиеся к конкретным территориям, расположенным в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Научно-исследовательскими институтами разрабатывались методические документы: рекомендации и руководства, относящиеся к районам распространения многолетнемерзлых грунтов. Данные документы не имеют правового статуса и по большому счету утратили свою актуальность. Перечень данных документов приводится ниже.

1. ВСН 01-76 (Минцветмет СССР). Инструкция по проектированию и устройству буронабивных свай-стоек в вечномерзлых грунтах района Норильска.

2. ВСН 40-88. Инструкция по проектированию оснований и фундаментов нефтепромысловых сооружений на вечномерзлых грунтах.

3. ВСН 33-82. Инструкция по проектированию инженерной подготовки территорий для нефтепромыслового строительства в районах распространения вечномерзлых грунтов.

4. ВСН 336-74. Инструкция по бетонированию конструкций тяжелых морских причалов, возводимых в условиях низкотемпературной среды.

5. ВСН 145-68. Указания по проектированию, изготовлению, монтажу и приемке стальных конструкций железнодорожных, автодорожных и городских мостов, предназначенных для эксплуатации в условиях низких температур (северное исполнение).

6. ВСН 61-89 (Минтрансстрой СССР). Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты.

7. ВСН 84-89 (Минтрансстрой СССР). Изыскания, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты.

8. ВСН 204-88 (Минтрансстрой). Специальные нормы и технические условия на проектирование и строительство автомобильных дорог на полуострове Ямал.

9. ВСН 210-91. Проектирование, строительство и эксплуатация производственных сооружений и устройств.

10. ВСН 195-83. Инструкция по изысканиям и проектированию при-
трассовых автомобильных дорог в условиях Сибири и Дальнего Востока.

11. ВСН 013-88. Строительство магистральных и промысловых тру-
бопроводов в условиях вечной мерзлоты.

12. ВСН 83-92. Технические указания по применению бетонов
и цементно-песчаных растворов, твердеющих на морозе, при строитель-
стве искусственных сооружений.

13. ВСН 41.88 (Миннефтепром). Проектирование морских ледо-
стойких стационарных платформ.

14. Р 480-82. Рекомендации по устройству и методике расчета анкер-
ных свай в условиях распространения вечномерзлых грунтов.

15. Рекомендации по устройству свайных фундаментов в вечно-
мерзлых грунтах.

16. Рекомендации по устройству буронабивных свай в вечно-
мерзлых грунтах.

17. Р 615-87. Рекомендации по техническому оснащению колон-
ны по сооружению и содержанию зимних дорог при строительстве ма-
гистральных трубопроводов на вечномерзлых грунтах.

18. Рекомендации по расчету железобетонных свайных фундамен-
тов, возводимых на вечномерзлых грунтах, с учетом температурных
и влажностных воздействий.

19. Рекомендации по использованию электронагревателей для от-
таивания вечномерзлых грунтов.

20. Рекомендации по устройству свайных фундаментов в вечно-
мерзлых грунтах с применением гидроструйной технологии.

21. Рекомендации по выбору принципа использования вечно-
мерзлых грунтов в качестве оснований здания.

22. Рекомендации по проектированию, расчету и устройству дере-
вометаллических свай в вечномерзлых грунтах.

23. Рекомендации по проектированию пространственных венте-
лируемых фундаментов на вечномерзлых грунтах.

24. Рекомендации по применению способа стабилизации вечно-
мерзлых грунтов в основании зданий.

25. Рекомендации по устройству свайных фундаментов в вечно-
мерзлых грунтах с проходкой скважин паровым вибролидером.

26. Рекомендации по технологии устройства и теплотехническим рас-
четам буронабивных и комбинированных свай в вечномерзлых грунтах.

27. Рекомендации по устройству и расчету оснований с примение-
нием локального оттаивания вечномерзлых крупнообломочных грунтов.

28. Рекомендации по проектированию и устройству ленточных
и столбчатых фундаментов зданий транспортного назначения в услови-
ях вечномерзлых грунтов и сейсмике.

29. Рекомендации по инженерно-геокриологическим изысканиям для строительства мостов и труб на вечномерзлых грунтах севера Тюменской области, включая Ямал.

30. Р 621-87. Рекомендации по закреплению трубопроводов вмораживаемыми стержневыми анкерами на вечномерзлых грунтах (для опытно-промышленных участков).

31. Рекомендации по устройству и теплотехническим расчетам оснований теплиц, возводимых на вечномерзлых грунтах с почвенным слоем по грунту подсыпки.

32. Руководство по бетонированию фундаментов и коммуникаций в вечномерзлых грунтах с учетом твердения бетона при отрицательных температурах.

33. Рекомендации по струйной технологии сооружения противофильтрационных завес, фундаментов, подготовки оснований и разработки мерзлых грунтов.

34. Рекомендации по определению физических, прочностных и деформационных характеристик мерзлых и оттаивающих крупнообломочных, полускальных и сильновыветрелых скальных грунтов.

35. Методические рекомендации по расчетам и технологии устройства теплоизоляционных слоев дорожных конструкций из пенополистирольных плит «ПЕНОПЛЭКС» в районах распространения вечномерзлых грунтов.

36. ТСН 50-301-96 Республики Коми. Проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых в районах распространения вечномерзлых грунтов Республики Коми.

37. РД 39-Р-088-91. Инструкция по определению температурного режима вечномерзлых и сезонномерзлых грунтов и прогнозированию последствий изменения тепловых условий на поверхности.

38. Пособие по применению теплоизоляционных труб ПЕНОПЛЭКС в аэродромных конструкциях на вечномерзлых и пучинистых грунтах.

39. ТТК К-1-25 (сборник). Устройство свайных фундаментов под опоры ВЛ в вечномерзлых грунтах.

40. ОДМ 218.2.061-2015. Отраслевой дорожный методический документ. Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов.

41. Руководство по применению теплоизоляции из плит полистирольных вспененных экструзионных ПЕНОПЛЭКС® при проектировании и устройстве фундаментов зданий и опор трубопроводов на подсыпках на многолетнемерзлых грунтах.

42. Р 162-74. Руководство по расчету центрально нагруженных свай в вечномерзлых грунтах.

43. Руководство по строительству столбчатых фундаментов и опор мостов на вечномерзлых грунтах.

44. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах.

В последние два десятилетия заменяющими их документами являются СТО — стандарты организаций. Данные документы разрабатываются и применяются конкретными организациями в индивидуальном порядке. Большое количество СТО по многолетнемерзлым грунтам разработано газонефтедобывающими организациями, такими как «Газпром», «Транснефть» и т.п., данные документы являются закрытыми для пользования. Примеры СТО приведены ниже.

1. СТО 01386088-19-2013 «Земляное полотно для железных дорог на многолетнемерзлых грунтах. Правила индивидуального проектирования».

2. СТО 56947007-29.120.95-050-2010 «Нормы проектирования фундаментов из винтовых свай».

3. СТО Газпром 2-2.3-231-2008 «Правила производства работ при капитальном ремонте линейной части магистральных газопроводов».

4. СТО НОСТРОЙ 202. «Сооружения подземные (туннели, здания ГЭС, другие подземные выработки). Требования к производству работ. Правила, методы контроля».

5. СТО Газпром 2-2.1-435-2010 «Проектирование оснований, фундаментов, инженерной защиты и мониторинг объектов ОАО Газпром в условиях Крайнего Севера».

6. СТО СРО НП СПАС-6-2014 «Проектирование автомобильных дорог. Методические рекомендации по районированию трассы дороги в условиях многолетнемерзлых грунтов на основе инженерных изысканий».

7. СТО НОСТРОЙ 2.29.107-2013 «Мостовые сооружения. Устройство фундаментов мостов. Часть 1».

8. СТО НОСТРОЙ 2.17.66-2012 «Освоение подземного пространства. Коллекторы и тоннели канализационные. Требования к проектированию, строительству, контролю качества и приемке работ».

Представленный анализ российской нормативной базы показал, что полностью посвящены проектированию оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах только три документа: СП 25.13330, СП 32-101-95, СП 52-105-2009, а также четыре новых документа: СП 354.1325800, СП 496.1325800, СП 497.1325800 и СП 498.1325800. Значительная часть документов (36) имеет разделы или отдельные пункты, посвященные проектированию, а некоторые и строительству сооружений различных отраслей промышленности на ММГ.

Полностью многолетнемерзлым грунтам посвящены два документа: СП 11-105-97 (ч. IV) и 498.1325800.2020, относящиеся к инженерно-геологическим изысканиям.

В документах, относящихся к проектированию сооружений различных отраслей, содержатся или разделы, или отдельные пункты, относящиеся к проектированию или строительству на ММГ. В документах отмечается необходимость учета изменения свойств ММГ при оттаивании, в некоторых документах указаны общие требования по устройству данных сооружений. Способы устройства и методы расчета отсутствуют. Отсутствие полномасштабных требований к проектированию, расчетам и устройству сооружений в отдельных отраслях объясняется наличием большего числа документов более низкого ранга (ТСН, ВСН, рекомендации, руководства, СТО), в которых детально описаны методы расчетов конструкций и сооружений, правила проектирования и устройства, а также требования к эксплуатации сооружений. На данный момент такие документы не имеют правового статуса и считаются устаревшими. Имеющиеся пробелы в нормативной базе требуется восполнить созданием на федеральном уровне системы нормативных документов, содержащих требования к проектированию, строительству сооружений различных отраслей промышленности на многолетнемерзлых грунтах.

5.2. Выявление и систематизация стандартов и сводов правил, относящихся к области проектирования и строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов

Все нормативные документы могут быть структурно разделены на две группы:

- документы, регламентирующие проектирование;
- документы, регламентирующие строительство.

Основная часть действующих нормативных документов относится к области проектирования. Рассмотрим структуру и возможную классификацию нормативных документов в каждой из выделенных групп.

Документы, регламентирующие проектирование

По своей направленности и решаемым этими документами задачам в них можно выделить следующие основные подгруппы:

1. Основания, фундаменты и подземные сооружения.
2. Инженерно-геологические изыскания, инженерно-геодезические изыскания и определение строительных свойств грунтов.
3. Требования к строительным материалам и конструкциям.

4. Геотехническая защита зданий и сооружений от опасных природных и техногенных процессов.

5. Требования к проектированию зданий и сооружений различных отраслей.

К первой подгруппе документов, регламентирующих требования и правила проектирования оснований, фундаментов и подземных сооружений, относятся СП 25.13330.2020, СП 32-101-95, а также к данной группе можно отнести СП 26.13330.2012, в котором даются указания по проектированию оснований и фундаментов машин на ММГ. Из представленных сводов правил СП 25.13330.2020 является основным документом по проектированию оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах, часть глав и пунктов которого являются обязательными.

В первую подгруппу документов входят также стандарты. Эта группа стандартов не имеет формальной иерархической структуры. Стандарты можно классифицировать по трем основным направлениям: проектирование и расчет, испытания и измерения, конструкции.

Ко второй подгруппе документов, регламентирующих требования к инженерно-геологическим и инженерно-геодезическим изысканиям, относятся четыре свода правил: СП 47.13330.2012, СП 11-105-97 (ч. I–VI), СП 11-104-97 и 498.1325800.2020 (три документа, причем СП 11-105-97 состоит из шести частей).

К методам определения физико-механических свойств грунтов, в том числе многолетнемерзлых, относятся 36 стандартов. Данная подгруппа обладает выраженной иерархической структурой. Головными, определяющими и общими для всей подгруппы являются два стандарта: ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация»; ГОСТ 20522-2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний». Все остальные стандарты можно классифицировать по двум направлениям:

- определяющие требования к полевым методам испытаний (10 стандартов);
- определяющие требования к лабораторным методам испытаний (26 стандартов).

К третьей подгруппе документов, определяющих требования к строительным материалам и конструкциям, относится один документ — СП 52-105-2009, который регламентирует требования, предъявляемые к строительным материалам, в частности к бетонным и железобетонным конструкциям в холодном климате и на вечноммерзлых грунтах; для металлических, каменных и деревянных конструкций нормы проектирования в районах распространения ММГ отсутствуют.

К четвертой подгруппе документов, в которых содержатся требования к защите зданий и сооружений от опасных природных и техноген-

ных процессов на многолетнемерзлых грунтах, относятся три свода правил: СП 104.13330.2016, СП 115.13330.2016, СП 116.13330.2012. Стандарты в данной подгруппе документов отсутствуют. Документы в подгруппе не обладают четко выраженной иерархической структурой.

К пятой подгруппе документов относятся отраслевые документы, в которых содержатся требования применительно к конструкциям, элементам конструкций, сооружениям, трубопроводам, которые проектируются на ММГ.

Документы, регламентирующие строительство на многолетнемерзлых грунтах

Единственным документом, определяющим требования к строительству на многолетнемерзлых грунтах, в настоящее время в нормативной базе России является СП 496.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила производства работ». Еще один нормативный документ, в котором содержатся разделы с общими требованиями к строительству фундаментов на многолетнемерзлых грунтах, — это СП 45.13330.2012 «СНиП 3.02.01-87. Земляные сооружения, основания и фундаменты», а также СП 32-101-95, в котором содержатся требования по устройству фундаментов опор мостов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Для гидроэлектростанций имеется стандарт ГОСТ Р 55260.1.2-2012 «Гидроэлектростанции. Часть 1—2. Сооружения ГЭС гидротехнические сооружения», который содержит требования по безопасности оснований во время строительства на многолетнемерзлых грунтах сооружений.

5.3. Сопоставление требований отечественных, европейских и иных зарубежных документов, регламентирующих требования к проектированию зданий и сооружений в условиях многолетнемерзлых грунтов

5.3.1. Система советских и российских нормативных документов

Система советских, а затем и российских нормативных документов (СП, ГОСТ) по проектированию в строительстве, в том числе и на ММГ, основана на принципах расчета по предельным состояниям. Аналогичный подход заложен в европейских стандартах — Еврокодах. Надежность строительных конструкций определяется системой коэффициен-

тов надежности, которые зависят от уровня ответственности сооружения, условий работы конструкций основания, характеристик прочности и деформируемости материалов конструкций и оснований, а для ММГ дополнительно температурных коэффициентов, учитывающих изменения температуры грунтов основания из-за случайных изменений температуры наружного воздуха.

Европейская система нормирования (Еврокоды, BS в Великобритании, DIN в Германии) определяет только обязательные положения и требования проектирования, не давая конкретных методов расчета и характерных проектных решений. Проектировщик соответствующей квалификации должен самостоятельно принимать решение о выборе методики расчета и типе конструкций проектируемого сооружения, за что в конечном счете он несет юридическую ответственность.

В российских нормах, кроме основных положений проектирования и расчета, предусмотрены методы определения расчетных параметров конструкций и характеристик грунтов (справочные таблицы, графики, карты и т.д.). Это позволяет облегчить работу как проектировщикам, так и надзорным органам (государственная и негосударственная экспертиза), однако ограничивает применение норм: для уникальных объектов, а также сложных с точки зрения инженерно-геологических и климатических условий сооружений требуется разработка СТУ.

Проектирование на многолетнемерзлых грунтах, хоть и имеет аналогичный подход как на немерзлых грунтах, имеет отличия в связи со специфическими особенностями мерзлых грунтов, свойства которых зависят не только от структуры и состава грунтов, но и от их температуры.

В российских нормах СП 25.13330.2020 применяются два принципа строительства на многолетнемерзлых грунтах:

- принцип I — многолетнемерзлые грунты основания используют в мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружения;
- принцип II — многолетнемерзлые грунты основания используются в оттаянном или оттаивающем состоянии (с их предварительным оттаиванием на расчетную глубину до начала возведения сооружения или с допущением их оттаивания в период эксплуатации сооружения).

5.3.2. Нормативные документы США и Канады

Основой строительных объектов в районах распространения ММГ в США и Канаде являются одно- и двухэтажные здания, сборные или заводского изготовления. Данные здания являются семейными коттеджами или жилыми блокхаусами для проживания военных или сотрудников нефтегазодобывающих фирм. В последнее время ведется строитель-

ство и многоэтажных сооружений в таких городах Аляски, как Анкоридж, Фэрбанкс и др.

Подходы к проектированию и строительству на многолетнемерзлых грунтах в зарубежных нормах (США, Канада) схожи с российскими. Грунты, залегающие в основании здания, предохраняют от проникновения тепла, для чего устраиваются теплоизоляционные завесы, вентилируемые фундаменты и подполья, каналы с естественной или искусственной вентиляцией, а также распространенный в последнее время метод термостабилизации грунтов за счет хладагентов, что вызвано более высокими среднегодовыми температурами воздуха.

Для грунтов, содержащих значительные ледяные включения, основания улучшают предварительным оттаиванием и уплотнением. Оттаивание выполняется паром или введением струи холодной воды, а предварительное уплотнение — глубинной вибрацией, предварительным загружением или взрывами.

Проектирование проводится одним из следующих способов: поддержание определенного теплового режима в процессе эксплуатации; выявление последующих изменений в тепловом режиме, которые будут вызваны строительством, с тем, чтобы учесть эти изменения в процессе проектирования, подготовка оснований до начала строительства.

Определяют величину деформации грунта в процессе оттаивания и принимают одно из следующих решений: допустить приемлемое оттаивание ниже уровня основания, где ожидается осадка или когда здание может периодически выравниваться (малые сооружения); удалить слабые грунты в пределах оттаивающей толщи и заменить непучинистой прослойкой; устроить воздушное пространство ниже здания, которое обеспечит промерзание грунтов основания в каждый зимний период и предотвратит таяние грунтов ниже отметки фундаментов.

В качестве фундаментов предпочтение отдается свайным фундаментам, заглубляемым в многолетнемерзлые грунты, поверхностным фундаментам на гравийных подушках, с проветриванием и без него, а также столбчатым ж/б фундаментам с наклоном к оси боковых стенок, снижающих силы морозного пучения при морозном пучении грунта.

Нормативные документы США и Канады, которые доступны в информационной базе, представлены ниже. Следует отметить, что основная часть документов недоступна для ознакомления и анализа.

1. Standard Terminology Relating to Frozen Soil and Rock — ASTM D7099-04(2010). Данный стандарт содержит термины по мерзлым грунтам. Аналогичным документом в российской нормативной базе является ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация».

2. Standard Practice for Description of Frozen Soils — ASTM D4083-89(2016). Представляет собой методику описания мерзлых грунтов на ос-

нове визуального исследования. В России аналогом является ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».

3. Standard Test Method for Laboratory Determination of Creep Properties of Frozen Soil Samples by Uniaxial Compression (ASTM D5520-11). Данный метод испытаний охватывает исследования ползучести образцов мерзлого грунта при одноосном сжатии. Он определяет требования к аппаратуре, измерительным приборам, а также методики определения напряженно-деформированного состояния образца.

4. Standard Test Method for Laboratory Determination of Strength Properties of Frozen Soil at a Constant Rate of Strain (ASTM D7300-11). Данный метод испытаний охватывает определение прочности образцов мерзлого грунта, подвергнутых одноосному сжатию при контролируемых скоростях деформации. Он определяет требования к аппаратуре, измерительным приборам и процедуры для определения напряженно-деформированного состояния. Аналогом данных стандартов в российской нормативной базе является ГОСТ 12248.9-2020 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости», в котором описывается метод проведения испытаний грунтов методом одноосного сжатия мерзлых грунтов.

5. Standard Test Method for Individual Piles in Permafrost Under Static Axial Compressive Load (ASTM D5780-10). В нем рассмотрены методы испытаний отдельных вертикальных свай статическими сжимающими нагрузками. По российской нормативной базе испытания свай выполняют в соответствии с ГОСТ 5686-2020 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями». Подходы к испытанию многолетнемерзлых грунтов сваями как в американском стандарте, так и в российском схожи. В американском стандарте представлен метод определения несущей способности свай с помощью тензодатчиков, в российских нормах данная методика отсутствует.

6. Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils (ASTM D5918-13). Стандарт содержит методы лабораторных испытаний сил морозного пучения и снижения свойств грунта при оттаивании. Данный стандарт разработан для классификации пучинистых грунтов, используемых в дорожных покрытиях. В России аналогичным документом является ГОСТ 28622-2012 «Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости». Данный стандарт разрабатывался с учетом зарубежных нормативных документов, и в нем отражены наработки, используемые в международной практике.

7. Канадский стандарт CAN/BNQ 2501-500 (Geotechnical Site Investigations for Building Foundations in Permafrost) устанавливает минимальные требования, которые следует выполнять в ходе инженерно-

геологических изысканий, направленных на сбор информации и оценку условий участка для целей проектирования и строительства фундаментов зданий в вечной мерзлоте. В российской нормативной базе документом, регламентирующим выполнение инженерно-геологических изысканий на многолетнемерзлых грунтах, является СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства» (ч. IV). Подходы к проведению инженерно-геологических изысканий как в нашей стране, так и Канаде схожи.

8. Thermosyphon foundations for buildings in permafrost regions (CAN/CSA-S500-14, 2014) — стандарт по установке и использованию термосифонов для областей криолитозоны. Данный стандарт обеспечивает требования для всех этапов устройства термосифонов при строительстве зданий на вечной мерзлоте, проектирование, монтаж и ввод в эксплуатацию, а также мониторинг и обслуживание термосифонов. Этот стандарт предназначен для обеспечения долгосрочной эффективности систем термосифонов, изменяющихся в условиях окружающей среды. В Изменении № 1 СП 25.13330.2012 внесен новый раздел с требованиями к термостабилизации многолетнемерзлых грунтов основания.

5.4. Классификация требований к проектированию и строительству в условиях многолетнемерзлых грунтов

Основным требованием проектирования на многолетнемерзлых грунтах является выбор принципа использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружений, в связи с этим различают два принципа строительства.

Принцип I следует применять, если грунты основания можно сохранить в мерзлом состоянии при экономически целесообразных затратах на мероприятия, обеспечивающие сохранение такого состояния. На участках с твердомерзлыми грунтами, а также при повышенной сейсмичности района следует принимать, как правило, использование многолетнемерзлых грунтов по принципу I.

При строительстве на пластичномерзлых грунтах следует, как правило, предусматривать мероприятия по понижению температуры грунтов до установленных расчетом значений, а также учитывать в расчетах оснований пластические деформации этих грунтов под нагрузкой.

Принцип II следует применять при наличии в основании скальных или других малосжимаемых грунтов, деформация которых при оттаивании не превышает предельно допустимых значений для проектируемого сооружения, при несплошном распространении многолетнемерзлых грунтов, а также в тех случаях, когда по техническим и конструктивным

особенностям сооружения и инженерно-геокриологическим условиям участка при сохранении мерзлого состояния грунтов основания не обеспечивается требуемый уровень надежности строительства.

При использовании многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований сооружений по принципу I для сохранения мерзлого состояния грунтов основания и обеспечения их расчетного теплового режима в проектах оснований и фундаментов необходимо предусматривать: устройство вентилируемых подполий или холодных первых этажей зданий, укладку в основании сооружения вентилируемых труб, каналов или применение вентилируемых фундаментов, установку сезонно действующих охлаждающих устройств жидкостного или парожидкостного типов — СОУ, а также осуществление других мероприятий (теплозащитные экраны и др.) по устранению или уменьшению теплового воздействия сооружения на мерзлые грунты основания.

При проектировании оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых с использованием многолетнемерзлых грунтов по принципу II, следует предусматривать мероприятия по уменьшению деформаций основания или мероприятия по приспособлению конструкций сооружения к восприятию неравномерных деформаций основания, назначаемые по результатам расчета основания по деформациям.

При проектировании оснований и фундаментов сооружений, возводимых на многолетнемерзлых грунтах, следует выполнять теплотехнические расчеты основания и расчеты основания и фундаментов на силовые воздействия. В расчетах основания и фундаментов надлежит учитывать принцип использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания, тепловое и механическое взаимодействие сооружения и основания.

Основания и фундаменты на многолетнемерзлых грунтах следует рассчитывать по двум группам предельных состояний: по первой — по несущей способности, по второй — по деформациям (осадкам, прогибам и пр.), затрудняющим нормальную эксплуатацию конструкций сооружения, а элементы железобетонных конструкций — и по трещиностойкости.

При расчете по предельным состояниям несущую способность основания и его ожидаемые деформации следует устанавливать с учетом температурного режима грунтов основания, а при принципе I — также с учетом продолжительности действия нагрузок и реологических свойств грунтов.

Дополнительные требования предъявляются к расчету на воздействие сил морозного пучения.

Особые требования к проектированию предъявляются к специфическим многолетнемерзлым грунтам, таким как засоленные, заторфо-

ванные, сильнольдистые и подземные льды. Дополнительные требования предъявляются и к многолетнемерзлым грунтам, расположенным в сейсмических районах, а также на склонах. Особое внимание уделяется геотехническому мониторингу зданий и сооружений, расположенных на многолетнемерзлых грунтах, где наряду со стандартными измеряемыми параметрами определяются значения температуры воздуха и грунта в основании фундаментов.

При проектировании оснований и фундаментов на сильнольдистых многолетнемерзлых грунтах и подземных льдах следует предусматривать использование таких грунтов в качестве основания, как правило, по принципу I. В случаях необходимости использования сильнольдистых грунтов по принципу II должны обязательно предусматриваться мероприятия по их предварительному оттаиванию или замене льдистых грунтов на непросадочные на расчетную глубину.

Для проектирования фундаментов на засоленных многолетнемерзлых грунтах материалы изысканий должны содержать данные об условиях залегания засоленных грунтов, степени их засоленности, а также о химическом составе водорастворимых солей. Засоленные многолетнемерзлые грунты могут использоваться в качестве основания сооружений как по принципу I, так и по принципу II. При этом должно учитываться повышенное коррозионное воздействие засоленных грунтов на материал фундаментов.

При расчете несущей способности оснований столбчатых и свайных фундаментов на засоленных многолетнемерзлых грунтах при использовании их по принципу I расчетные значения сопротивления грунтов нормальному давлению и сдвигу по поверхности смерзания R и R_{af} надлежит принимать по опытным данным. При расчетах несущей способности оснований буроопускных свай засоленность грунтового раствора и сопротивления сдвигу по поверхности сваи R_{af} следует принимать по засоленности и значениям R_{af} прилегающего природного грунта. Если несущая способность буроопускных свай определена по результатам полевых испытаний, то расчетную несущую способность таких свай следует принимать с понижающим коэффициентом, учитывающим изменение температурного состояния и степени засоленности грунтового раствора в процессе эксплуатации сооружения, устанавливаемым по опыту местного строительства или по данным специальных исследований.

Расчет оснований и фундаментов на засоленных многолетнемерзлых грунтах по деформациям следует производить как на пластичномерзлых грунтах.

Основания и фундаменты на заторфованных многолетнемерзлых грунтах и торфах, а также на грунтах с примесью органических остатков

надлежит проектировать как для мерзлых грунтов с учетом их большой сжимаемости под нагрузкой, проявления пластических деформаций в широком диапазоне отрицательных температур, пониженной прочности смерзания с фундаментами, низкой теплопроводности и замедленной стабилизации осадок при оттаивании.

Для сейсмических районов с расчетной сейсмичностью 7, 8 и 9 баллов следует предусматривать использование многолетнемерзлых грунтов в качестве основания, как правило, по принципу I. При невозможности использования грунтов в качестве основания по принципу I допускается использование их по принципу II при условии опирания фундаментов на скальные или другие малосжимаемые при оттаивании грунты или на предварительно оттаянные и уплотненные грунты. В сейсмических районах следует применять те же виды свай, что и в несейсмических районах, кроме свай без поперечного армирования. Глубина погружения свай в грунт (исключая сваи-стойки) должна быть не менее 4 м.

5.5. Анализ отечественной нормативной базы, выявление и систематизация нормативных правовых, нормативных технических и методических документов, относящихся к геотехническому мониторингу в условиях многолетнемерзлых грунтов

Геотехнический мониторинг (далее — мониторинг) является важным инструментом контроля технического состояния зданий и сооружений, а при строительстве на многолетнемерзлых грунтах, где устойчивость и долговечность сооружений преимущественно зависят от температурного режима грунтов основания фундаментов, является основным инструментом, обеспечивающим целостность сооружений при строительстве и эксплуатации [Алексеев, 2019].

Необходимость выполнения геотехнического мониторинга юридически закреплена в Градостроительном кодексе РФ от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ [2004] и Федеральном законе РФ от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ [2009] для безопасной эксплуатации зданий и сооружений и обеспечения их сохранности.

При выполнении актуализации нормативных документов, разработанных в СССР, в основную главу строительных норм и правил по проектированию фундаментов на вечномерзлых грунтах СНиП 2.02.04-88 включена глава, содержащая требования по геотехническому мониторингу при строительстве и эксплуатации сооружений в районах распространения вечномерзлых (многолетнемерзлых) грунтов. В результате актуали-

зации СНиП 2.02.04-88 в 2012 г. выпущен свод правил СП 25.13330-2012, в 2018 г. введен новый свод правил СП 305.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга», в котором также содержится глава с требованиями к проведению геотехнического мониторинга на ММГ при строительстве. При подготовке указанных нормативных документов использованы «Рекомендации по наблюдению за состоянием грунтов оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на вечноммерзлых грунтах», разработанные в НИИОСП в 1982 г., а также накопленный опыт наблюдений за зданиями и сооружениями, построенными на многолетнемерзлых грунтах за последние 30 лет. Большое внимание мониторингу уделялось в крупных городах РФ, таких как Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург и др., что связано с активным строительством зданий в плотной городской застройке, в результате чего разработаны региональные нормативные документы и вышел целый ряд статей, в итоге в СП 22.13330-2011 включен раздел по геотехническому мониторингу.

Мониторингу на многолетнемерзлых грунтах из-за отсутствия интенсивного строительства в постсоветский период уделялось меньше внимания, но, тем не менее, в настоящее время появился ряд работ, посвященных данной проблематике [Алексеев, 2019, 2023].

В СП 25.13330-2012 приводятся требования к программе мониторинга, устройству сети геотехнического мониторинга, местам установки и контролируемым параметрам, а также периодичности их замеров в зависимости от принципа использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружения.

При строительстве на многолетнемерзлых грунтах в зависимости от конструктивных и технологических особенностей зданий и сооружений, инженерно-геокриологических условий и возможности целенаправленного изменения свойств грунтов основания применяется один из двух принципов использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружений.

Эти строительные правила содержат основные положения по составу и методике проведения геотехнического мониторинга оснований и фундаментов гражданских и промышленных зданий и сооружений во время строительства и эксплуатации в зависимости от принятого принципа использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания сооружения.

В районах распространения многолетнемерзлых грунтов геотехнический мониторинг необходимо проводить для всех видов зданий и сооружений, в том числе подземных инженерных коммуникаций. Мониторинг включает натурные наблюдения за состоянием грунтов основания (температурный режим), гидрогеологическим режимом,

перемещением конструкций фундаментов вновь возводимого, реконструируемого и эксплуатируемого сооружения. Мониторинг осуществляется в соответствии с программой, которая разрабатывается в процессе проектирования и является разделом утверждаемой части проектной документации.

В пересмотренном своде правил СП 25.13330-2020 требования к геотехническому мониторингу при строительстве и эксплуатации отсутствуют, данные разделы перенесены в СП 305.1325800.2017, СП 497.1325800.2020 и СП 496.1325800.2020. В действующем СП 25.13330-2020 указаны требования по проектированию системы геотехнического мониторинга.

Нормативный документ СП 305.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве» содержит требования по проведению геотехнического мониторинга на многолетнемерзлых грунтах при строительстве.

В СП 497.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила эксплуатации» включена глава по геотехническому мониторингу оснований и фундаментов зданий и сооружений в период эксплуатации.

СП 496.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Правила производства работ» содержит основные требования к осуществлению мероприятий по устройству систем геотехнического мониторинга.

В последнее время появился ряд нормативных документов, относящихся к геотехническому мониторингу ММГ.

1. СП 493.1325800.2020 «Инженерные изыскания для строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Общие требования». Требования ГТМ при инженерных изысканиях при строительстве и реконструкции зданий и сооружений. Инженерно-геодезические изыскания.

2. Программа ГТМ разрабатывается и утверждается в составе проектной документации объекта капитального строительства. Для зданий и сооружений геотехнической категории 3 в составе проектной документации дополнительно к программе разрабатывается и утверждается проект ГТМ согласно СП 305.1325800.2017.

3. СП 354.1325800.2017 «Фундаменты опор мостов в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Правила проектирования и строительства». Содержат рекомендации по наблюдению за термоопорами, по обеспечению расчетного температурного режима грунтов оснований с помощью термометрических скважин в грунте, которые представляют собой трубки диаметром около 5 см или через полости в термоопоре позволяют проводить замеры непосредственно в полости.

4. СП 489.1325800.2020 «Аэродромы. Геотехнический мониторинг при эксплуатации». Настоящий свод правил распространяется на геотехнический мониторинг аэродромов при их эксплуатации.

5. СП 58.13330.2012 «Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003». СП содержит общие требования к проведению мониторинга гидротехнических сооружений, определению состава проектной документации, перечню контролируемых и диагностических показателей состояния сооружения и его основания, включая критерии безопасности, инструкции и методические рекомендации по проведению натурных наблюдений за работой и состоянием сооружений. Ответственность за реальное техническое состояние сооружения и его соответствие требованиям проектной документации и критериальным показателям несет эксплуатирующая организация.

6. СП 40.13330.2012 «Плотины бетонные и железобетонные. Актуализированная редакция». Данный документ содержит раздел по регламенту проведения ГТМ для плотин, установлены критерии безопасности в виде критериальных значений диагностических показателей состояния сооружения, характеризующих его безопасность: перемещения, деформации, напряжения, фильтрационные расходы, пьезометрические напоры фильтрационных вод и др.

7. СП 23.13330.2018 «Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 (с Изменением № 1)». В разделе 13 содержатся наблюдения за поведением оснований в процессе эксплуатации. Регламентируются цели и задачи наблюдений за поведением оснований, контрольно-измерительная аппаратура, режим наблюдений за поведением оснований в процессе эксплуатации гидротехнических сооружений и методы наблюдений за поведением оснований.

8. СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84* (с Изменениями № 1, 2, 3)». Содержит требования к контролю состояния сооружений и оснований в период строительства.

В проектах плотин необходимо предусматривать специальный проект применения контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) для проведения натурных наблюдений за работой сооружения как в процессе строительства, так и в период его эксплуатации.

Контрольные натурные наблюдения следует проводить в целях изучения основных показателей работы плотины и основания, комплексного анализа их технического состояния и оценки эксплуатационной надежности. Состав и объем контрольных наблюдений следует назначать в зависимости от класса плотины, ее конструктивных особенностей, кли-

матических, инженерно-геологических, в том числе геокриологических, гидрогеологических, сейсмических условий, а также условий возведения, требований эксплуатации и экологической безопасности. Документ содержит таблицу основных видов нарушений в плотинах из грунтовых материалов и способов их ремонта. И в этом документе содержатся рекомендации по способу обнаружения.

9. ГОСТ Р 55260.1.2-2012 «Гидроэлектростанции. Часть 1—2. Сооружения ГЭС гидротехнические. Требования безопасности оснований». Содержит в себе раздел по мониторингу, где регламентируются особенности обследования оснований. Кратко описано, как обследовать сооружения, приведен состав работ, содержатся рекомендации о геодезическом мониторинге, требования к составу мониторинга основания.

10. СП 445.1325800.2018 «Водопропускные трубы и системы водоотвода в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования». Содержат требования по мониторингу природно-технической системы (ПТС) водопропускного сооружения. Объектом мониторинга (управления) является природно-техническая система водопропускного сооружения (водопропускного тракта, включающего водоотводные каналы и водопропускные трубы), взаимодействующая с сооружениями дороги. Состав работ по мониторингу включает гидрометеорологические наблюдения, термокаротажные измерения, теплобалансовые исследования, визуальные и дистанционные методы контроля состояния и параметров взаимодействия компонентов ПТС водопропускного сооружения, контроль за деформациями грунтов и сооружений, анализ результатов, разработку проектов сценариев управления. Регламентируются требования к системе мониторинга водопропускных сооружений, теплофизическому мониторингу и измерению температуры грунта при изысканиях и в процессе мониторинга.

11. СП 447.1325800.2019 «Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования». Содержит требования к теплофизическому мониторингу. Теплофизический мониторинг — составная часть комплексного мониторинга, определяющая специфику возведения сооружений на вечной мерзлоте. Основные положения теплофизического мониторинга приведены в приложении Б, в котором содержатся конструкции термоскважин и схемы проведения и оформления результатов теплофизического мониторинга земляного полотна.

ОДМ 218.4.1.002-2020 «Организация и проведение геотехнического мониторинга при строительстве земляного полотна на слабых грунтах». Рекомендации методического документа не могут быть применены в полной мере при организации и проведении геотехнического мониторинга при строительстве земляного полотна в районах распространения вечной мерзлоты, на территории с возможностью карстообразования,

зоны распространения просадочных грунтов, в условиях плотной городской застройки, строительства на территориях, подверженных сейсмическим воздействиям, с распространением оползневых процессов, при строительстве на подрабатываемых и подтопленных территориях.

ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния». Настоящий стандарт является нормативной основой для контроля степени механической безопасности и осуществления проектных работ по повышению степени механической безопасности зданий и сооружений. Стандарт регламентирует требования к работам и их составу по получению информации, необходимой для контроля и повышения степени механической безопасности зданий и сооружений.

Настоящий стандарт распространяется на проведение работ по:

- комплексному обследованию технического состояния зданий или сооружений для проектирования их реконструкции или капитального ремонта;
- обследованию технического состояния зданий и сооружений для оценки возможности их дальнейшей безаварийной эксплуатации или необходимости их восстановления и усиления конструкций;
- общему мониторингу технического состояния зданий и сооружений для выявления объектов, конструкции которых изменили свое напряженно-деформированное состояние и требуют обследования технического состояния;
- мониторингу технического состояния зданий и сооружений, попадающих в зону влияния строек и природно-техногенных воздействий, для обеспечения безопасной эксплуатации этих зданий и сооружений;
- мониторингу технического состояния зданий и сооружений, находящихся в ограниченно работоспособном или аварийном состоянии, для оценки их текущего технического состояния и проведения мероприятий по устранению аварийного состояния;
- мониторингу технического состояния уникальных, в том числе высотных и большепролетных, зданий и сооружений для контроля состояния несущих конструкций и предотвращения катастроф, связанных с их обрушением.

Настоящий стандарт не устанавливает требований к проектированию мероприятий по устранению выявленных недостатков в грунтовых массивах, конструкциях, их элементах и соединениях, а также к проектированию мероприятий по восстановлению, усилению и капитальному ремонту объекта. Требования настоящего стандарта не распространяются на другие виды обследования и мониторинга технического состояния, а также на транспортные, гидротехнические и мелиоративные

сооружения, магистральные трубопроводы, подземные сооружения и объекты, на которых ведутся горные работы и работы в подземных условиях, а также на работы, связанные с судебной-строительной экспертизой.

СП 249.1325800.2016 «Коммуникации подземные. Проектирование и строительство закрытым и открытым способами (с Изменением № 1)». Настоящий свод правил устанавливает основные геотехнические требования и распространяется на проектирование (продажу) новых и реконструируемых подземных инженерных коммуникаций (далее — подземные коммуникации) закрытым и открытым способами, а также геотехнический мониторинг при строительстве подземных коммуникаций.

5.6. Состав геотехнического мониторинга

Геотехнический мониторинг зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах — комплекс работ, основанный на натурных наблюдениях за температурным и гидрогеологическим режимами, деформациями фундаментов и состоянием несущих конструкций вновь возводимого, реконструируемого и эксплуатируемого сооружения.

Геотехнический мониторинг подразумевает натурные наблюдения за деформациями конструкций строящихся, реконструируемых, эксплуатируемых зданий и сооружений, а также за сооружениями окружающей застройки и перемещениями окружающего грунтового массива. При строительстве в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, где прочностные свойства мерзлых грунтов зависят не только от состава, но и от температуры, геотехнический мониторинг должен дополнительно включать наблюдения за температурным режимом грунтов основания. Несоблюдение температурного режима грунтов основания особенно при строительстве по принципу I может привести к существенному снижению несущей способности основания, а в некоторых случаях к разрушению сооружения.

Целью геотехнического мониторинга на многолетнемерзлых грунтах является обеспечение безопасности строительства строящихся (реконструируемых), эксплуатируемых зданий, сооружений окружающей застройки, а также сохранение проектируемого температурного режима многолетнемерзлых грунтов.

При выполнении геотехнического мониторинга решаются следующие задачи:

- оценка технического состояния зданий и сооружений окружающей застройки;
- оценка температурного режима грунтов основания сооружений;
- оценка размеров зоны теплового влияния нового строительства (реконструкции);

- проведение периодических замеров величин контролируемых параметров;
- анализ изменения величин контролируемых параметров, установление причин отклонения от проектных (нормативных) значений и выбор мероприятий, снижающих или исключаяющих отклонения значений контролируемых параметров от требуемых значений, при аварийных ситуациях принятие решения о расселении жильцов или остановке промышленного предприятия.

До начала строительства в соответствии с № 190-ФЗ [2004] должна быть разработана программа и проект геотехнического мониторинга.

В состав работ по мониторингу на многолетнемерзлых грунтах входят следующие измерения:

- визуально-инструментальные наблюдения (фиксация образования и изменения размеров трещин и других дефектов, оценка свойств грунтов основания и материалов конструкций);
- термометрические (температура воздуха, грунта основания и охлаждающих устройств);
- гидрологические (уровень, температура и состав подземных вод);
- геодезические (вертикальные и горизонтальные отклонения геодезических опорных знаков);
- геофизические (сейсмические и другие параметры);
- виброметрические (характеристики колебаний: скорости, амплитуды и т.п.);
- тензометрические (перемещения и усилия в основаниях, фундаментах и надземных конструкциях при помощи тензометрических датчиков).

Геотехнический мониторинг на многолетнемерзлых грунтах должен выполняться для всех типов сооружений, как в период строительства (реконструкции), так и в период эксплуатации в соответствии с № 190-ФЗ [2004].

Размеры зоны влияния нового строительства на напряженно-деформированное состояние оснований окружающей застройки, включающей здания, сооружения, железные дороги и автодороги, а также коммуникации, назначают предварительно по СП 22.13330-2022 в зависимости от глубины котлована и системы ограждения, а окончательно определение зоны влияния и дополнительных осадок фундаментов выполняется расчетом, методом конечных элементов или конечных разностей в современных автоматизированных расчетных комплексах (Plaxis, Zsoil и др.). В связи с тем, что при строительстве сооружений на многолетнемерзлых грунтах подземные сооружения практически не строят, котлованы, а тем более глубокие котлованы не откапывают, необходимости выполнять данные расчеты нет. При строительстве по

принципу I расчет зоны влияния нового строительства на напряженно-деформированное состояние оснований окружающих зданий допускается не выполнять. Расчеты следует выполнять при строительстве по принципу II, при устройстве фундаментов в котловане глубиной более 5 м.

При строительстве на многолетнемерзлых грунтах важным является определение зоны теплового влияния строящегося (реконструируемого) здания на окружающую застройку. Для оценки теплового влияния выполняются теплотехнические расчеты, с определением изменения температуры грунтов основания, как в период строительства, так и при эксплуатации сооружения. Расчеты выполняют в соответствии с СП 25.13330-2020 или на автоматизированных расчетных комплексах. При определении температурных полей под сооружениями окружающей застройки выполняется анализ влияния изменения температуры грунта в основании строящегося здания на окружающие сооружения: при понижении температуры возможно возникновение сил морозного пучения и деформаций пучения, при повышении температуры возможно снижение несущей способности фундаментов и возникновение дополнительных деформаций (осадок). При необходимости назначаются мероприятия по усилению сооружений окружающей застройки, устройству тепловых отсечных экранов, устройству дополнительных охлаждающих устройств (сезонно-охлаждающие устройства (СОУ), вентиляция, теплоизоляция и др.).

6. Мониторинг вечной мерзлоты — неотъемлемая часть успешной экономической политики освоения Арктики

6.1. Обоснование Концепции государственного межведомственного фонового и геотехнического мониторинга вечной мерзлоты АЗРФ

6.1.1. Состояние проблемы

В связи с интенсивным народнохозяйственным развитием Арктической зоны Российской Федерации, в основе которого лежат процессы освоения природных богатств, недропользование и формирование транспортно-логистических коридоров на суше и в акватории арктических морей, актуальность и важность опережающего изучения вечной мерзлоты и научного сопровождения крупномасштабных проектов в Арктике приобретает общегосударственное значение.

Криолитозона Российской Федерации занимает $\frac{2}{3}$ ее площади, являя собой неоценимый криогенный ресурс нашей страны и обеспечивая стабильность северных территорий от механического разрушения и опустынивания, защищая подземные воды, предоставляя строителям полускальное основание для проектируемых сооружений, открывая новые биологические и медико-биологические возможности [Мельников, 2014 и др.]. В то же время по условиям недропользования криолитозона относится к территориям со сложными и особо сложными геологическими и геоэкологическими условиями, связанными с разнообразными природными и природно-техногенными рисками и масштабным накоплением экологического ущерба [Мельников и др., 2015].

Примерно 85% территории Арктической зоны РФ (около 3,5 млн кв. км) относится к областям сплошного распространения многолетне-мерзлых горных пород. Мощность криолитозоны здесь изменяется от нескольких десятков метров до полутора километров. Температура вечной мерзлоты варьирует от отрицательных значений близких к 0 °С до –16 °С. Лдьистость мерзлых толщ нередко превышает значения в 40–50% и более. Строительство в этих регионах возможно только по первому принципу, т.е. с сохранением мерзлого основания.

Инженерно-геологическая, геокриологическая и гидрогеологическая изученность криолитозоны слабая. Около 50% зданий и инженерных сооружений в криолитозоне имеет недопустимые деформации.

О состоянии криолитозоны на шельфе арктических морей имеются ограниченные сведения.

Устойчивость криолитозоны к колебаниям климата или влиянию деятельности человека в процессе освоения зависит от температуры горных пород, от содержания и распределения в них подземного льда.

Анализ причин аварийности сооружений на вечномерзлых грунтах, даже в условиях относительной стабильности теплового состояния вечной мерзлоты, свидетельствует, что доля криогенной составляющей в нештатных ситуациях составляет в среднем около 30%.

Отечественный и зарубежный опыт освоения криолитозоны показал, что в условиях стабильных климатических условий территория вечной мерзлоты может успешно осваиваться и быть надежным фундаментом для различных инженерных сооружений и коммуникаций *при соблюдении определенных норм и правил, разработанных для этого периода времени*. Однако существующие нормы и правила не могут успешно применяться в эпоху климатических перемен, вне зависимости от направленности климатических процессов.

Современные изменения климата в высоких широтах, начавшиеся в 70–80-х гг. прошлого столетия, в настоящее время близки к своему максимуму, и эта тенденция, как показывают отечественные и зарубежные источники, может сохраниться, как минимум до середины столетия.

Вследствие повышения температуры многолетнемерзлых пород и потери их несущей способности существует реальная опасность выхода из строя огромного количества зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения.

Оценки возможного ущерба в результате потепления могут исчисляться к середине столетия триллионами рублей. При сохранении существующих строительных норм и правил, не учитывающих прогнозируемые изменения климата и состояния вечной мерзлоты в различных регионах Арктики, новые инвестиции в строительство проектируемых объектов в АЗРФ, могут кратно *увеличить ущерб от потепления*.

В текущем столетии по сравнению с предшествующим периодом отмечается:

- Значительное снижение объема работ мерзлотной направленности в системе Минприроды России. Региональные работы в Арктике не ведутся. Фоновый мониторинг осуществляется в объеме, не соответствующем современному уровню и темпам освоения Арктики. *Особо следует отметить реализацию в настоящее время*

Поручения Президента 1971 (п. 1в), сформированного по результатам ВЭФ 3 сентября 2021 г. Согласно этому Поручению, программой Минприроды (ФА Росгидромет, ФГБУ «ААНИИ») предусматривается в качестве наблюдательной сети фонового мониторинга строительство по одной наблюдательной скважине глубиной 25,2 м на территории 140 метеостанций, расположенных в криолитозоне страны. Научная неполноценность такого подхода заключается в том, что площадки метеостанций и их ближайшие окрестности в подавляющем большинстве не являются репрезентативными для постановки геокриологических исследований. Региональное разнообразие мерзлотных обстановок на прилегающих территориях, как правило, требует изучения и постановки мониторинговых наблюдений в скважинах от 15–18 до 24–26 единиц, различной глубины от 20 м до 250 м на севере Западной Сибири и до 600 м в Восточной Сибири для вскрытия подошвы мерзлой толщи. Кроме того, программа Минприроды не предусматривает изучение и мониторинг опасных мерзлотных процессов, разработку геокриологических прогнозов и составление карт геокриологического содержания. Только перечисленные недостатки программы, представленной Минприроды, относят ее к научно необоснованным документам, требующих принципиальной переработки;

- Минстрой РФ не имеет целевых программ изучения накопленного опыта строительства и эксплуатации градостроительных агломераций в Арктике и Субарктике. Мониторинг ответственных градостроительных объектов в Арктике не ведется;
- Отсутствуют координация и регулирование работ недропользователей по ведению «геотехнического мониторинга» в границах геологических, горных и иных промышленных земельных отводов;
- Исследовательские работы РАН и профильных вузов способны сформулировать лишь самые общие закономерности формирования и развития криолитозоны Арктики, поскольку экспериментальный потенциал весьма ограничен;
- Полностью исключен межведомственный обмен геологической информацией, массивы данных инженерных изысканий скрыты за грифом «коммерческой тайны» и недоступны для экспертного и научного сообщества.

Климатические вариации в Арктике обусловили формирование новой (измененной) геокриологической обстановки по сравнению с зафиксированной ранее. Подавляющее большинство данных о состоянии криолитозоны (в том числе карт геокриологического содержания) устарело и нуждается в обновлении и актуализации.

Современное потепление климата в высоких широтах значительно повысило риски в строительстве и недропользовании в АЗРФ. Отмечается повышение температуры мерзлых грунтов, увеличение деформаций зданий и инженерных сооружений, увеличение эпидемиологических и экологических рисков на осваиваемых территориях [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014; Третий оценочный доклад... 2022].

Возможное в дальнейшем похолодание климата приведет к промерзанию протаявших грунтов оснований зданий, нефте- и газопроводов, инженерных сооружений, что обусловит непредсказуемые, катастрофические последствия.

Страна, две третьих территории которой расположены в криолитозоне, активно осваивающая сырьевые богатства северных регионов, не может не заниматься изучением проблем вечной мерзлоты, или «русского сфинкса», как это явление когда-то назвали на Западе. *Экологические кризисы и катастрофы наступают там, где темпы научного обеспечения значительно уступают темпам освоения.*

Влияние криолитозоны на формирование экологической обстановки при хозяйственном освоении Арктики, в основе которого лежит недропользование, априори является определяющим. Это не требует в настоящее время дополнительных доказательств, это необходимо просто знать и принимать при разработке научных программ и нормативных документов.

Методологической основой разработки системы геокриологического мониторинга являются представления о криолитозоне, как части геологической среды с особыми свойствами. Под влиянием природных процессов, меняющегося климата, а также при техногенных воздействиях могут происходить негативные изменения в криолитозоне. Предупреждение таких явлений возможно при знании закономерностей природных процессов, их параметров и составлении прогнозов. Необходимая для решения этих задач информация может быть получена на основе геокриологического мониторинга.

С целью снижения природных рисков и вероятности экологических катастроф, связанных с освоением криолитозоны, необходима разработка и принятие Концепции изучения вечной мерзлоты в виде федеральной межведомственной программы «Криолитозона России» и «Закона о вечной мерзлоте».

6.1.2. Экологические вызовы и риски освоения арктической криолитозоны

Основные проблемы и риски хозяйственного освоения Арктики на основе недропользования обусловлены:

- сложностью и мозаичностью геокриологического, гидрогеологического строения и теплового состояния криолитозоны, включая шельф арктических морей;
- недостаточной изученностью осваиваемых регионов криолитозоны, в том числе новых, ранее неизвестных свойств мерзлоты, касающихся микробиологического и газового составов вмещающих пород, как полезных, так и крайне опасных для экологической обстановки осваиваемых территорий;
- отсутствием:
 - единой нормативной базы прогнозов изменения климата и состояния криолитозоны, а также экологических последствий освоения на периоды среднесрочной и долгосрочной перспективы;
 - унифицированной методики ведения добывающими компаниями «геотехнического мониторинга криолитозоны» в рамках лицензий на право пользования недрами;
 - исследований по подведению итогов хозяйственного освоения и недропользования на ранее нетронутых территориях Арктики;
 - единых геокриологических баз данных, механизма их формирования и межведомственного обмена информацией;
 - открытых слушаний по крупным проектам, реализуемым в криолитозоне Арктики;
- значительным снижением уровня финансирования и объемов работ по изучению и исследованиям вечной мерзлоты в системе Минприроды, Минстроя, Минобрнауки и РАН;
- отсутствием в Минстрое РФ программ изучения накопленного опыта строительства и эксплуатации градостроительных агломераций в Арктике и Субарктике;
- неизменно низким уровнем проектирования и культуры строительства в криолитозоне;
- кадровой проблемой мерзлотных работ [Второй оценочный доклад Росгидромета... 2014, Мельников и др., 2015, Разработка и принятие... 2018; Третий оценочный доклад... 2022].

6.1.3. Цель разработки Концепции

Разработка Концепции преследует следующие цели:

- сопряжение различных ведомств и координация их деятельности в части многопланового изучения вечной мерзлоты Арктики как одного из основополагающих факторов рисков освоения и одновременно формирования устойчивой экологической обстановки быстро развивающихся регионов АЗРФ;
- создание государственной межведомственной структуры мониторинга вечной мерзлоты Арктической зоны для обеспечения экологической безопасности.

гически безопасного и устойчивого функционирования объектов недропользования, градостроительства, промышленных объектов и транспортных систем на территории арктической криолитозоны страны;

- комплексирование методов мониторинговых и региональных работ для ускоренного доизучения и картографирования инженерно-геокриологических и гидрогеологических условий территорий как не соответствующих современному уровню опережающего экономического развития АЗРФ;
- сохранение и использование криогенного технологического и микробиологического потенциала вечной мерзлоты, предотвращение и ликвидация медико-биологических угроз в Арктике.

6.1.4. Архитектура государственного межведомственного мониторинга вечной мерзлоты АЗРФ в рамках разработанной Концепции

6.1.4.1. Общие положения

Согласно Концепции, государственный мониторинг вечной мерзлоты АЗРФ (мониторинг криолитозоны) представляет собой межведомственную систему регулярных наблюдений, сбора, накопления, обработки и анализа информации, оценки состояния вечной мерзлоты Арктики в естественных условиях и на освоенной территории, составления прогнозов ее изменений под влиянием естественных природных факторов, недропользования, промышленного, гражданского строительства и жилищно-коммунального хозяйства и разработки методов регулирования состояния вечной мерзлоты для охраны и рационального использования криогенных ресурсов и устойчивого развития АЗРФ.

В рамках Концепции мониторинг криолитозоны подразделяется на «**фоновый**» и «**геотехнический**» (объектный).

Фоновый мониторинг. Фоновый мониторинг вечной мерзлоты — комплекс наблюдений за параметрами вечной мерзлоты, определяющими ее состояние в естественных (ненарушенных) условиях, достаточных для разработки геокриологических прогнозов и составления исходных прогнозных карт.

Проведение этого мониторинга преследует цель получения данных о влиянии климатических вариаций в различных регионах на тепловое состояние мерзлых толщ и развитие криогенных процессов как основных факторов природной, техногенной и экологической устойчивости криолитозоны

Объектами фонового мониторинга являются все компоненты геологической среды: состав ММП и их температурный режим, подземные

воды, геодинамические процессы, включая криогенные, а также сопряженные с геологической средой поверхностные воды, почвы и напочвенные растительные покровы, снег и т.п., на которые освоение территории может оказывать негативное влияние.

Ведение фонового мониторинга должны осуществлять специализированные геологические предприятия, имеющие в своем составе специалистов геокриологов (мерзлотоведов).

Геотехнический мониторинг вечной мерзлоты — комплекс наблюдений за параметрами вечной мерзлоты, определяющих ее состояние в нарушенных условиях, на застроенной территории, а также состоянием вечномерзлых грунтов оснований и объектов инфраструктуры, возведенных на многолетнемерзлых грунтах, для обеспечения надежности зданий и инженерных сооружений на всем протяжении их жизненного цикла.

Ведение геотехнического мониторинга является функцией предприятия, осуществляющего пользование недрами в рамках лицензионного соглашения или оказывающего техногенное влияние на состояние мерзлых толщ, и финансируется им за счет собственных средств. *Исключением из этого правила должен стать геотехнический мониторинг уже введенного в строй жилищного фонда городских и муниципальных агломераций. В этом случае финансирование мониторинга не должно осуществляться за счет жителей.*

Геотехнический мониторинг выполняется либо собственными службами недропользователя и промышленных предприятий (различных форм собственности), либо с привлечением на контрактной основе геологических предприятий, специализирующихся на решении этих задач.

Мониторинг криолитозоны является составной частью (подсистемой) комплексной системы мониторинга окружающей природной среды.

6.1.4.2. Цель и задачи государственного мониторинга криолитозоны

Целью государственного мониторинга криолитозоны является:

- обеспечение экологически безопасного функционирования объектов недропользования, промышленного, гражданского строительства и ЖКХ, транспортных систем на территории арктической криолитозоны страны, включая мелководную зону шельфа северных морей;
- ускоренное доизучение и картографирование инженерно-гео-криологических и гидрогеологических условий территорий как не

соответствующих современному уровню опережающего экономического развития АЗРФ;

- сохранение и использование криогенного технологического и микробиологического потенциала вечной мерзлоты, предотвращение и ликвидация медико-биологических угроз в Арктике;
- информационное обеспечение государственных структур власти, органов местного самоуправления и граждан информацией о состоянии вечной мерзлоты в АЗРФ.

Основные задачи мониторинга криолитозоны:

- получение, сбор, обработка и анализ данных о состоянии криолитозоны;
- оценка состояния криолитозоны и прогнозирование его изменений;
- своевременное выявление и прогнозирование развития природных и техногенных процессов, влияющих на состояние криолитозоны;
- разработка эффективных мероприятий по предотвращению или снижению негативного воздействия опасных геологических процессов на осваиваемой территории;
- регулярное информирование органов государственной власти, организаций, субъектов хозяйственной деятельности и граждан об изменениях состояния криолитозоны в установленном порядке;
- межведомственное взаимодействие и международное сотрудничество в сфере обмена информацией по экологически безопасному приурочиванию в Арктике.

6.1.4.3. Структура государственного мониторинга

Структура государственного мониторинга включает три основных блока:

- Блок сбора исходной информации;
- Блок обработки информации, решения комплекса прогнозных и критериальных задач и подготовки информации для принятия управляющих решений;
- Блок принятия решений по контролю и регулированию состояния вечной мерзлоты на различных народнохозяйственных объектах в Арктической зоне РФ.

Государственный мониторинг вечной мерзлоты должен иметь собственные и интегрированные наблюдательные сети, федеральный и региональные центры обработки мониторинговой информации, составления геокриологических прогнозов и подготовки материалов для принятия решений.

Эти вопросы будут рассмотрены ниже.

6.1.5. Основополагающие документы Концепции

6.1.5.1. Разработка Программы

Для обеспечения экологически безопасного освоения Арктики (и в соответствии с задачами «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года») необходимо разработать межведомственную программу **«Вечная мерзлота АЗРФ»**.

Эту программу следует рассматривать в качестве пилотного проекта государственной программы **«Криолитозона России»**.

Функционирование Программы в качестве долгосрочного или постоянно действующего государственного документа должно быть обеспечено на законодательном уровне. С этой целью необходимо актуализировать существующее законодательство и разработать новые законы относительно кооперации и взаимодействия различных государственных ведомств и частных предприятий при работе в малоизученных регионах Арктики и Субарктики.

6.1.5.2. Ответственные исполнители Программы мониторинга

Ввиду многообразия разноплановых задач создания комплексного мониторинга вечной мерзлоты, включая фоновые и геотехнические аспекты наблюдений и исследований, **в настоящее время в стране отсутствует организация федерального уровня, которая самостоятельно смогла бы обеспечить их решение.** Это наглядно подтверждает пример исполнения Поручения Президента 1971 (п. 1в).

ФА Росгидромет не обладает необходимой компетенцией и опытом в этой области, и примеров подобной практики в мире не существует. За рубежом (в США, Канаде, Швейцарии, Норвегии, КНР) геофизиологический мониторинг, даже в его фоновой части, проводится на базе **научных и геологических организаций совместно с государственными предприятиями.** Передача проекта Росгидромету является непродуманным, нерациональным и непрофессиональным решением.

С учетом сложности существующих научных и организационных проблем их решение возможно **на условиях межведомственной кооперации, закрепленной на законодательном уровне.** С учетом масштабов криолитозоны Российской Федерации и новых климатических вызовов реорганизация существующих ведомственных систем мониторинга криолитозоны **требует создания новой структуры управления и системы финансирования этих работ.** Такой структурой могло бы стать **«Федеральное агентство по вечной мерзлоте»** (или Комитет, как было в тридцатые годы), **аккредитованное при Правительстве РФ,** с полно-

мочиями, обеспечивающими создание в Арктике и Субарктике межведомственной системы мониторинга с интеграцией в нее сетей различных ведомств и предприятий и соответствующими законодательными правами. Важнейшей составляющей этого подхода является создание *Федерального (межведомственного) аналитического центра и не менее шести региональных филиалов в крупных городах Заполярья* (а в дальнейшем *трех-четырех филиалов в южных областях криолитозоны страны*).

Ответственными исполнителями осуществления межведомственного мониторинга вечной мерзлоты предполагаются государственные структуры в лице:

- Федерального агентства по вечной мерзлоте (ФАМ) при Правительстве РФ (*не создано*);
- Министерства развития Дальнего Востока и Арктики;
- Министерства природных ресурсов и экологии РФ (ФА Роснедра, ФА Росгидромет, ФА Росприроднадзор);
- Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ;
- Министерства энергетики РФ (Минэнерго);
- Министерства науки и образования РФ (ФАНО, РАН, вузы).

6.1.5.3. Функции Федерального агентства по вечной мерзлоте (ФАМ) при Правительстве РФ, учитываемые в Программе

- Федеральное агентство по вечной мерзлоте (ФАМ) при Правительстве РФ является головной организацией в создании и функционировании межведомственного мониторинга вечной мерзлоты как государственной системы и составной части экологического мониторинга страны.
- Возглавляет разработку государственной межведомственной Программы мониторинга «**Криолитозона России**», включая ее пилотный проект «**Вечная мерзлота АЗРФ**».
- Обосновывает и осуществляет финансирование, координацию и контроль работ по Программе мониторинга «Вечная мерзлота АЗРФ», а в дальнейшем — «Криолитозона России».
- Осуществляет проведение мониторинговых работ в Арктике собственными силами. Накопление, анализ и окончательная обработка мониторинговой информации, полученная от различных ведомств и обобщение этих материалов на федеральном уровне.
- Иницирует тематику НИР и НИОКР в рамках мониторинговых исследований и их финансирование и софинансирование.

- Проводит рассмотрение государственных прогнозов изменения климата и утверждение прогнозов состояния криолитозоны на периоды среднесрочной и долгосрочной перспективы.
- Осуществляет геологический и геоэкологический контроль в ходе освоения и использования криолитозоны в границах среднесрочной и долгосрочной перспективы.
- Осуществляет формирование и ведение единого банка информационных ресурсов о состоянии криолитозоны.
- Отвечает за разработку предельно допустимых нагрузок на вечномерзлые грунты в различных регионах, включая площади застройки, этажности зданий, тепловыделяющих и водосбрасывающих комплексов и т.п.
- Выполняет анализ и обработку предлагаемых управляющих решений по результатам мониторинга, подготовку и передачу соответствующих документов в Правительство РФ.
- Проводит разработку законодательных инициатив в части совершенствования нормативно-правовой базы функционирования государственного мониторинга криолитозоны Арктики.

6.1.5.4. Функции Министерства развития Дальнего Востока и Арктики, учитываемые в Программе

- Участие в разработке пилотного проекта межведомственной Программы мониторинга «**Вечная мерзлота АЗРФ**».
- В рамках дорожной карты по Программе мониторинга «Вечная мерзлота АЗРФ», согласованной с ФАМ при Правительстве РФ, совместно с Министерством строительства и ЖКХ РФ, оказывает всестороннюю помощь в размещении сети мерзлотных станций на территории АЗРФ, включая предоставление зданий для долгосрочной аренды и, в случае необходимости, земельных отводов на льготных условиях.
- Предоставляет Федеральному аналитическому центру ФАМ на безвозмездной основе сведения о состоянии зданий и сооружений градостроительных агломераций в арктической зоне, нормативные документы и перспективные планы размещения народнохозяйственных объектов, для формирования подпрограмм опережающего геоэкологического доизучения территорий АЗРФ и постановки мониторинговых наблюдений.
- В рамках своих компетенций оказывает всестороннюю помощь в организации и проведении (включая софинансирование), совместно с проектными и строительными организациями, ***полупромышленных экспериментов*** по апробации региональных природозащитных инженерных мероприятий по предотвращению развития опасных геоэкологических процессов на геотехнических объектах.

- Формирует совместно с Министерством строительства и ЖКХ в Арктической зоне «мерзлотные инспекции» (с правами котлонадзора), участвует в разработке положения об их работе, для осуществления на регулярной основе контроля за выполнением правил эксплуатации зданий и сооружений, построенных по I принципу строительства на мерзлых грунтах.
- Участвует совместно с Министерством строительства и ЖКХ в разработке и утверждении требований к организации территории градостроительных и муниципальных образований, в соответствии с рисками, обусловленными изменением климата и состоянием мерзлоты в северных широтах.

6.1.5.5. Функции Минприроды РФ, учитываемые в Программе

- Совместно с ФАМ разработка и утверждение стратегии комплексного *регионального и мониторингового гидрогеологического, инженерно-геологического, геокриологического изучения криолитозоны* на ближайшую и среднесрочную перспективу ее хозяйственного освоения в процессе разведки, добычи и транспортировки полезных ископаемых, строительства объектов добывающей инфраструктуры.
- Участие в осуществлении фоновых мониторинга криолитозоны (силами ФА Роснедра) на специальных стационарах и полигонах в соответствии с утвержденными Программами.
- Координация и регулирование работ недропользователей (и получение искомой информации) по ведению геотехнического мониторинга в границах геологических, горных и иных промышленных земельных отводов.
- Обоснование и выделение необходимых этапов и объемов опережающих региональных и фоновых мониторинговых работ во вновь осваиваемых и недостаточно изученных регионах криолитозоны, включая шельф арктических морей.
- Разработка сценариев региональных прогнозов изменения климата на периоды средне- и долгосрочной перспективы (ФА Росгидромет) для оценки прогнозного состояния криолитозоны силами ФАМ.
- Осуществление геологического и экологического контроля в ходе освоения и использования криолитозоны на периоды среднесрочной и долгосрочной перспективы.
- Формирование и ведение базы информационных ресурсов о состоянии криолитозоны в границах собственной компетенции.
- Четкое распределение полномочий при детализации Программы между ФА Роснедра, ФА Росгидромет, ФС Росприроднадзор.

6.1.5.6. Функции Министра РФ, учитываемые в Программе

- Совместно с ФАМ создание системы геотехнического (градо-строительного) мониторинга в Арктике и Субарктике на основе функционирования региональных мерзлотных станций и обеспечения устойчивости и надежности использования зданий и сооружений в условиях техногенного воздействия и меняющегося климата.
- Осуществление мониторинга на основе собственной наблюдательной сети и на совместных с ФАМ точках наблюдений по единой согласованной методике мониторинга.
- Формирование и ведение базы информационных ресурсов о состоянии криолитозоны в границах собственной компетенции.
- Воссоздание на новой основе региональных проектно-технологических центров по ремонту и восстановлению зданий и сооружений, деформированных в результате воздействия природных и техногенных факторов (по примеру прежних центров в Норильске, Воркуте).
- Стандартизация комплекса полевых и лабораторных исследований по определению основных показателей физико-механических и теплофизических свойств мерзлых пород.
- Разработка средств и мероприятий инженерной защиты объектов инфраструктуры от воздействия опасных геологических процессов криогенного ряда и проведение полупромышленных экспериментов по их апробации.
- Создание новых нормативных документов, в частности по научному сопровождению инженерных изысканий и проектирования и актуализация имеющихся — закон от 23 ноября 1995 г. № 174-ФЗ «Об экологической экспертизе», СП 25.13330.2012 и др.
- Закрепление проведения всех видов строительства в Арктике только по первому принципу использования ММП в качестве оснований зданий и инженерных сооружений согласно СП 25.13330.20012, т.е. с охранением грунтов оснований в мерзлом состоянии и др.
- Совместно с ФАМ восстановление инспекций оценки состояния мерзлотной обстановки на всех строящихся и эксплуатируемых объектах в Арктике.
- Совместно с соответствующими министерствами и ведомствами введение административной ответственности за нарушение существующих федеральных и региональных нормативных документов по строительству и эксплуатации зданий и инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах.

6.1.5.7. Функции Министерства энергетики РФ, учитываемые в Программе

- Создание системы геотехнического мониторинга на объектах нефтегазовой промышленности, включая площадные и линейные сооружения в Арктической и Субарктической зонах страны. Совместно с ФАМ и с учетом требований лицензионных соглашений на право пользования недрами (Минприроды РФ, ФА Роснедра) создание дополнительных наблюдательных сетей на подведомственных объектах.
- Осуществление мониторинга на основе собственной наблюдательной сети и совместных с ФАМ точек наблюдений по единой согласованной методике мониторинга.
- Предоставление Федеральному аналитического центру ФАМ на безвозмездной основе сведений о состоянии зданий и сооружений и перспективных планов размещения отраслевых объектов для формирования подпрограмм опережающего геоэкологического доизучения территорий АЗРФ и постановки мониторинговых наблюдений.
- Разработка средств и мероприятий инженерной защиты объектов инфраструктуры от воздействия опасных геологических процессов криогенного ряда.
- Организация и проведение совместно с ФАМ, проектными и научными организациями (Минобнауки, РАН) полупромышленных экспериментов по апробации инженерных мероприятий по предотвращению развития опасных геоэкологических процессов на геотехнических объектах.
- Формирование и ведение базы информационных ресурсов о состоянии криолитозоны в границах собственной компетенции.

6.1.5.8. Функции подразделений Минобрнауки (ФАНО, РАН, ВУЗ), учитываемые в Программе

Профильные структуры Минобрнауки (ФАНО, РАН, ВУЗ) по согласованным заданиям ФАМ совместно с Минприроды РФ, Минстроем РФ, Минэнерго на договорной основе должны быть задействованы в выполнении НИР в рамках системы государственного мониторинга вечной мерзлоты:

- по созданию сертифицированных лабораторных центров для унифицированного и единообразного определения нормативных теплофизических и физико-механических свойств мерзлых пород для вновь осваиваемых регионов Арктики;
- по разработке методики долгосрочных государственных прогнозов изменения климата и состояния криолитозоны;

- по оценке экологических последствий хозяйственного освоения криолитозоны на периоды среднесрочной и долгосрочной перспективы;
- по научному сопровождению инженерных изысканий и проектирования объектов в криолитозоне Арктики;
- по разработке структуры и ведению единой базы данных (фонда) информационных ресурсов геокриологических данных на унифицированной основе.
- по осуществлению научно-исследовательских работ в области изучения и мониторинга криолитозоны на подведомственных наблюдательных объектах.

6.1.6. Новые законодательные акты в связи с разработкой и реализацией Программы создания государственной системы мониторинга вечной мерзлоты РФ (Совет Федерации и Государственная Дума Федерального Собрания РФ)

Существующие проблемы новых климатических вызовов и геологической «недоизученности» криолитозоны Арктики и Субарктики нельзя отнести на счет регионов, поскольку из 35 млн кв. км криолитозоны на планете Земля, около 11 млн кв. км приходится на территорию России, что превышает площадь таких стран, как Китай, США или Канада. Мерзлота занимает около 65% территории Российской Федерации, проникая в недра до полутора километров. Такие масштабы проблемы не могут считаться региональными; эта проблема общегосударственная. Кроме того, экономическую деятельность и решение проблем экологии, устойчивости зданий и сооружений, природопользования в криолитозоне осуществляет ряд федеральных ведомств и крупных компаний национального уровня. С учетом сказанного обеспечение научно обоснованного подхода к решению проблем создания государственной системы мониторинга криолитозоны Арктики и Субарктики требует разработки федерального закона и подзаконных актов.

Существует два варианта реализации закона.

Вариант I. Подготовка изменений и дополнений к Федеральному закону № 7-ФЗ об охране окружающей среды (в ред. от 27 декабря 2019 г.). Именно так в настоящее время были рассмотрены и утверждены в третьем чтении ГД Федерального Собрания РФ изменения к упомянутому закону в соответствии с Поручением Президента (1971, п. 1в, от 3 сентября 2021 г.). Однако с таким решением невозможно согласиться, поскольку трактовка изменений и дополнений к ФЗ-7 могут только отчасти регулировать положения о мониторинге вечной («мно-

голетней» в тексте закона) мерзлоты в его фоновой части, в то время как в Поручении Президента говорится о мониторинге в целом, т.е. включая наблюдения на освоенной территории (геотехнический мониторинг).

Вариант II. В «Рекомендации парламентских слушаний» на тему «Совершенствование правового регулирования вопросов многолетней (вечной) мерзлоты» от 11 апреля 2023 г. в п. 2 сказано: Правительству РФ «рассмотреть вопрос о разработке проекта федерального закона “О регулировании хозяйственной и иной деятельности в области вечной мерзлоты”, в котором определить полномочия органов государственной власти в области мониторинга, в том числе геотехнического, и охраны мерзлоты, формы взаимодействия с организациями, выполняющими задачи мониторинга, надзора (лицензирование мониторинговой деятельности, определение ответственных научных организаций, структур исполнительной власти и т.п.). В 2024 году подготовить проект о создании Федерального закона “О регулировании хозяйственной и иной деятельности в области вечной мерзлоты”».

Безусловно, отдельный Закон (ФЗ о вечной мерзлоте) не только предпочтителен, он является единственным безальтернативным вариантом законодательного обеспечения сложной, многофункциональной и многоплановой научной и производственной деятельности при создании и функционировании межведомственного мониторинга (фонового и геотехнического) вечной мерзлоты, учитывая масштаб народнохозяйственных задач, решаемых в Арктике и криолитозоне в целом.

Закон должен регламентировать не только широкий круг проблем, связанных с вечной мерзлотой на всей территории ее распространения в РФ, но и отражать взаимодействие с другими законами, указами Президента и распоряжениями Правительства РФ (№ 7-ФЗ, № 118-ФЗ, № 730-р и др.).

Учитывая межведомственный характер отношений при реализации Программы «Криолитозона России», Закон о вечной мерзлоте должен концептуально закрепить, а подзаконные акты Правительства РФ — строго регламентировать ответственность и обязанности каждого ведомства.

Представляется необходимым возложить на:

ФА по вечной мерзлоте (ФАМ) — функции главного исполнителя и координатора, по Программе «Криолитозона России» и ее пилотного проекта «Вечная мерзлота АЗРФ», включая методическое сопровождение работ по комплексному мониторингу вечной мерзлоты Арктики и Субарктики и его финансовому обоснованию в различных ведомствах;

Минвостокразвития — выполнение функций головного ведомства по реализации Программы мониторинга «Вечная мерзлота АЗРФ»,

с формированием соответствующего Положения в Уставе Министерства о выполнении работ по комплексному мониторингу вечной мерзлоты (фоновому и геотехническому) в Арктике;

Минприроды (ФА Роснедра, ФА Росгидромет, ФА Росприроднадзор):

- **ФА Роснедра** — выполнение функций головного ведомства осуществления совместно с **ФАМ «фонового» мониторинга** криолитозоны в рамках подсистемы «Государственного мониторинга состояния недр» на территориях «Опорных зон опережающего экономического развития АЗРФ», включая разработку технических заданий по **геотехническому мониторингу (ГТМ)** в границах горных (и иных) отводов недропользователей в соответствии с лицензиями на право пользования недрами;
- **ФА Росгидромет** — право на выполнение функций головного ведомства осуществления совместно с **ФАМ «фонового» мониторинга криолитозоны** на территории **реперных** (более 100 лет наблюдений) гидрометеорологических станций на территории криолитозоны РФ;
- **ФА Росприроднадзор** — право на выполнение функций головного ведомства в осуществлении экологического контроля на объектах государственного мониторинга вечной мерзлоты в Арктической и Субарктической зонах страны, взаимодействия с мерзлотными инспекциями и геологическим (геокриологическим) контролем **ФАМ**;

Минстрой РФ — право на выполнение функций головного ведомства осуществления **геотехнического (градостроительного) мониторинга криолитозоны**. Совместно с **ФАМ** воссоздание региональных проектно-технологических центров по ремонту и восстановлению зданий и сооружений, разработке средств и мероприятий инженерной защиты объектов инфраструктуры от воздействия опасных геологических процессов криогенного ряда и проведение полупромышленных экспериментов по их апробации;

Минэнерго — право на выполнение функций головного ведомства создания системы геотехнического мониторинга на объектах нефтегазовой промышленности. Совместно с **ФАМ** и с учетом требований лицензионных соглашений на право пользования недрами (Минприроды РФ, ФА Роснедра) создание дополнительных наблюдательных сетей на подведомственных объектах, а также проведение **полупромышленных экспериментов** по апробации инженерных мероприятий по предотвращению развития опасных геокриологических процессов;

Минобрнауки РФ — выполнение функций головного ведомства осуществления научно-исследовательских работ по изучению и мониторингу криолитозоны на подведомственных наблюдательных объектах,

а также участия на договорной основе в постановке и проведении согласованных с ФАМ НИР на пунктах фонового и объектного мониторинга криолитозоны с целью научного сопровождения производственной деятельности в сложных природных условиях, разработки унифицированной базы данных и информационных бюллетеней о состоянии криолитозоны и сбора в единый государственный фонд данных о состоянии окружающей среды и ее загрязнения.

Разрабатываемый федеральный закон в целом должен регламентировать действия и ответственность государственных ведомств и хозяйствующих субъектов во вновь осваиваемых районах криолитозоны, определить условия межведомственного обмена геокриологической информацией, а также необходимость проведения работ по изучению криолитозоны на основе долгосрочных или постоянно действующих программ, сопровождающихся научно-исследовательскими работами. Такие программы должны выполняться на принципе софинансирования государства (через указанные выше ведомства) и бизнеса. При этом расходы государства должны планироваться по защищенной статье, поскольку цена освоения Арктики чрезвычайно высока. При освоении арктических регионов криолитозоны строительство в среднем дорожает в 3–8 раз по сравнению с «немерзлыми» регионами, не считая убытков за счет восстановления нарушенных земель, животного мира, растительности, подземных и поверхностных вод.

Опыт освоения Арктической зоны хозяйствующими субъектами (от различных министерств в конце прошлого века до акционерных обществ в настоящее время) наглядно указывает на несовершенство и недостаточность сложившейся практики проведения государственной экспертизы проектов освоения малоизученных регионов Арктики. При этом проектными организациями зачастую не привлекаются и не используются материалы научно-исследовательских организаций и опыт экспертов, что, безусловно, пагубно сказывается на качестве проектных материалов. В связи с этим представляется, что наряду с проведением «государственной экспертизы проектной документации» необходимо организовать *комиссии независимых экспертов* и определить площадку для обсуждения крупных проектов недропользования и другого промышленного освоения криолитозоны Арктики, включая береговую зону и шельф арктических морей.

Подготовить материалы для внесения в Закон положений о включении в проект освоения месторождений в криолитозоне в качестве обязательных разделов:

- проведения полупромышленных экспериментов с целью предпроектной апробации природоохранных мероприятий;
- применения новых строительных материалов и технологий.

6.1.7. Наблюдательные сети межведомственного мониторинга вечной мерзлоты АЗРФ

6.1.7.1. Общие положения

Методологической основой создания наблюдательной сети новой системы государственного (межведомственного) мониторинга вечной мерзлоты АЗРФ является полигонный метод. Этот метод известен и широко применяется в мировой практике в экологических, биологических, климатических исследованиях. Определяющим здесь является видовой набор изучаемых параметров исследуемых процессов, комплексность и сопряженность методов изучения, масштаб экспериментов и возможность экстраполяции полученных данных.

Применительно к задачам мониторинга вечной мерзлоты на территории недостаточно изученных регионов Арктики и Субарктики особенность метода полигонов заключается в организации наблюдательной сети и проведении мониторинга в естественных условиях (фоновый мониторинг) и на освоенных или перспективных к освоению площадях (геотехнический мониторинг), который выполняется одновременно с комплексной геокриологической съемкой и картированием в мелком-среднем масштабе. Именно отсутствие на указанных территориях карт геокриологического содержания необходимых масштабов возводит эту задачу в ранг особо актуальных, поскольку без типизации территории невозможна экстраполяция результатов мониторинга и прогноза.

В естественных условиях состояние мерзлых толщ детально изучаются на геокриологических стационарах и региональных профилях из наблюдательных скважин (протяженностью до сотни километров) и площадок периодического посещения, позволяющих экстраполировать полученные мониторинговые данные на всю незастроенную территорию полигона.

Одновременно, по аналогичным методикам, проводятся наблюдения за состоянием мерзлых толщ на освоенной территории: геотехнический мониторинг (ГТМ) на объектах промышленной застройки, мерзлотные станции — в пределах ответственности жилищно-коммунального хозяйства городов и муниципальных образований. Здесь, так же как и в естественных условиях, используется метод «ключей и ландшафтов», только ландшафтов промышленных, типизация которых осуществляется на основе комплекса геотехнических признаков: параметры зданий, тип фундаментов, характер тепловыделений, влажностный режим технологий производства, коммуникационная сеть, организация территории и т.п.

Проведение наблюдений в естественной обстановке и на участках промышленного воздействия позволяет целенаправленно оценивать

вклад природной и техногенной составляющей в изменение состояния многолетнемерзлых пород и грунтов оснований зданий и сооружений в период их эксплуатации.

Организация мониторинговых наблюдений и получение исходной информации по приведенной схеме, безусловно, является строгим и наиболее полным научным обоснованием для разработки мерзлотных прогнозов различной степени детальности от объектных (локальных) до региональных.

Полученная информационная база мониторинговой сети наблюдательных геокриологических, инженерно-геологических и гидрогеологических скважин является главной основой для построения карт соответствующего содержания, как для отдельных участков полигона, так и для всей его территории в целом.

В свою очередь, фактологическое содержание полигонных исследований, по своей сути является ключевым для понимания и картирования недостаточно изученной территории криолитозоны Арктики в более мелком (1:1 000 000 и 1:2 500 000) масштабах, включая обзорные карты.

По комплексному подходу получения и дальнейшего использования мониторинговой информации в естественных условиях и на освоенной территории проектируемый полигонный метод создания государственного (межведомственного) мониторинга вечной мерзлоты не имеет аналогов в мировой практике.

6.1.7.2. Наблюдательная сеть геокриологического полигона

Полигон представляет собой наиболее типичные части территорий крупных региональных геологических (геоморфологических) структур I (II) порядка, гидрогеологического бассейна или его части, расположенные в одной природно-климатической подзоне, *характеризующиеся единством геологического и тектонического строения, сходством гидрогеологических, инженерно-геологических и геокриологических условий и общим режимом опасных геологических процессов*. На этой территории осуществляется мониторинг за основными составляющими природной обстановки в фоновом режиме или под воздействием техногенеза для установления качественных тенденций, количественных показателей и трендов изменения недостаточно изученных региональных особенностей геологической среды, включая параметры гидрогеологических, инженерно-геологических и геокриологических условий. Площадь полигонов должна составлять десятки тысяч кв. км (до 1, реже 2 листов карты М — 1:500 000).

Создание наблюдательных полигонов предполагает соблюдение определенных требований, главными из которых являются:

- перспективность освоения и развития региона как крупного промышленно-экономического объекта;

- наличие природных опасностей при освоении территории и, как следствие, необходимость детального изучения (доизучения) геологических условий на основе мониторинговых наблюдений и исследований;
- изученность территории или отдельных ее частей (в том числе и стационарными методами), позволяющая выполнить предварительную типизацию ландшафтно-климатических и мерзлотно-геологических и гидрогеологических условий региона в мелком и среднем масштабах;
- перспективность применения научно-методических разработок и результатов наблюдений для других регионов криолитозоны.

В целом, территория полигона определяется границами экстраполяции и репрезентативности наблюдаемых региональных параметров геологической обстановки.

Полигоны как высшее иерархическое звено государственного мониторинга вечной мерзлоты объединяют в себе **фоновые региональные геокриологические стационары и наблюдательные объекты геотехнического мониторинга** (недропользования, промышленных сооружений, транспортных систем, городских и муниципальных образований). Кроме этого, полигоны имеют собственную фоновую наблюдательную сеть, состоящую из опорных наблюдательных инженерно-геокриологических и гидрогеологических скважин и площадок периодического обследования.

Геокриологический стационар представляет собой относительно небольшую территорию (25–30 км²), ограниченную протяженностью однодневного пешеходного маршрута, в пределах которой в круглогодичном режиме выполняется максимально возможный комплекс геокриологических (а также гидрогеологических и инженерно-геологических) наблюдений и исследований в тесной взаимоувязке с комплексом гидрометеорологических наблюдений в данном районе. Элементы наблюдательной сети более низкой иерархии (точки, скважины, площадки, профили) в пределах стационара размещаются в строгом соответствии с особенностями ландшафтного строения территории, с тем, чтобы максимально полно охарактеризовать в его пределах режим геокриологических условий.

Наблюдательные объекты геокриологического стационара являются объектами фонового мониторинга. Они представлены буровыми скважинами и наблюдательными (за криогенными процессами) площадками.

На площадь стационара составляются карты фактического материала (со схемой наблюдательной сети) ландшафтные и геокриологического районирования в масштабе 1:10 000. Эти и другие вспомогательные **карты обосновывают теплофизическую и геоэкологическую модели территории стационара.**

Выбор мест размещения стационаров должен проводиться на основе материалов региональных работ с учетом доступности изучаемой территории, близости населенных пунктов и гидрометеорологических станций. Эти территории должны охватывать как наиболее типичные природно-территориальные комплексы (ПТК), включая доминантный тип, а также участки с максимальным проявлением криогенных геологических процессов. Если инженерно-геологические карты на территорию исследования отсутствуют, то место для размещения стационара выбирают по имеющимся картографическим материалам, с широким использованием аэровизуальных и авиадесантных работ, к проведению которых в качестве эксперта должен быть привлечен специалист-геокриолог, хорошо знающий данный регион.

Региональные профили опорных наблюдательных скважин площадок периодического посещения. Опорные инженерно-геологические наблюдательные скважины располагаются на территории полигона на крестообразных профилях, пересекая основные формы рельефа и соответствующие типы многолетнемерзлых толщ с целью геокриологического доизучения региона, а также взаимоувязки и экстраполяции мониторинговой информации с геокриологических стационаров на территорию полигона. Скважины на профилях дополняются наблюдательными площадками для изучения динамики криогенных процессов и периодического полевого определения теплофизических характеристик ММП, напочвенных растительного и снежного покровов.

Мерзлотная станция — аналог геокриологического стационара в геотехническом мониторинге вечной мерзлоты, наблюдательная сеть которых располагается на территории муниципальных (градостроительных) образований. Имеет собственную опорную сеть наблюдательных скважин и площадок, расположенных на застроенной территории градообразующих агломераций и в рекреационных зонах. Кроме этого, мониторинговую сеть дополняют скважины, точки и профили геофизических исследований на участках аварийных зданий и сооружений.

На площадь работ мерзлотной станции составляются карты фактического материала (со схемой наблюдательной сети) и карты геотехнического районирования застроенной территории в масштабе не ниже 1:10000. По аналогии с фоновыми геокриологическими стационарами эти карты также обосновывают теплофизическую и геоэкологическую модели городской и селитебной территории.

6.1.7.3. Размещение геокриологических полигонов на территории АЗРФ

На *Европейском Севере и в Западной Сибири, Восточной Сибири и Чукотке* предлагается создать и реанимировать следующие геокриологиче-

ские полигоны и стационары: Печорский, Воркутинский, Ямальский (стационары Марре-Сале, Сабетта), Гыданский, Уренгойский, Ванкурский, Норильский, Хатангский, Саскылакский (Тиксинский), Депутатский, Жиганский, Черский, Магаданский, Анадырский.

6.1.8. Выводы

1. Реализация Концепции изучения вечной мерзлоты в связи с освоением Арктической зоны Российской Федерации в рамках **«Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года»** в виде федеральной межведомственной программы **«Вечная мерзлота АЗРФ» и ФЗ «О регулировании хозяйственной и иной деятельности в области вечной мерзлоты»** позволит системно подойти к решению стратегически важных проблем взаимодействия крупномасштабных объектов техногенеза с вечной мерзлотой в условиях быстроменяющегося климата.

2. Формирование пространственно-распределенной наблюдательной сети мониторинга криолитозоны в АЗРФ на основе создания системы геокриологических полигонов ГМСН, учитывающих развитие «опорных зон экономического развития», климатические регионы и районирование криолитозоны, во взаимосвязи с результатами наблюдений геотехнического мониторинга, будет иметь непреходящее значение и многократно обогатит современную региональную фактологическую базу данных геокриологических исследований.

3. Поэтапная реализации настоящей Концепции позволит на научной основе существенно снизить риски возникновения экологически опасных ситуаций в процессе освоения регионов АЗРФ.

7. Основные параметры архитектуры и методические аспекты строительства государственной системы мониторинга вечной мерзлоты

7.1. Архитектура межведомственного фонового и геотехнического мониторинга вечной мерзлоты

Согласно принятой Концепции (раздел 6), государственный мониторинг вечной мерзлоты АЗРФ должен представлять собой межведомственную систему регулярных наблюдений, сбора, накопления, обработки и анализа информации, оценки состояния вечной мерзлоты Арктики *в естественных условиях (фоновый мониторинг, или ФМ) и на освоенной территории (геотехнический мониторинг, или ГТМ)*, составления прогнозов ее изменений под влиянием естественных природных факторов, недропользования, промышленного, гражданского строительства и жилищно-коммунального хозяйства и разработки методов регулирования состояния вечной мерзлоты для охраны и рационального использования криогенных ресурсов и устойчивого развития АЗРФ.

Целью государственного мониторинга криолитозоны должно явиться:

- обеспечение экологически безопасного функционирования объектов недропользования, промышленного, гражданского строительства и ЖКХ, транспортных систем на территории арктической криолитозоны страны, шельфа северных морей;
- ускоренное доизучение и картографирование инженерно-геокриологических и гидрогеологических условий территорий как не соответствующих современному уровню опережающего экономического развития АЗРФ;
- сохранение и использование криогенного технологического и микробиологического потенциала вечной мерзлоты, предотвращение и ликвидация медико-биологических угроз в Арктике;
- информационное обеспечение государственных структур власти, органов местного самоуправления и граждан информацией о состоянии вечной мерзлоты в АЗРФ.

Основными задачами мониторинга криолитозоны являются:

- получение, сбор, обработка и анализ данных о состоянии криолитозоны;

- оценка состояния криолитозоны и прогнозирование его изменений;
- своевременное выявление и прогнозирование развития природных и техногенных процессов, влияющих на состояние криолитозоны;
- разработка эффективных мероприятий по предотвращению или снижению негативного воздействия опасных геологических процессов на осваиваемой территории;
- регулярное информирование органов государственной власти, организаций, субъектов хозяйственной деятельности и граждан об изменениях состояния криолитозоны в установленном порядке;
- межведомственное взаимодействие и международное сотрудничество в сфере обмена информацией по экологически безопасному природопользованию в Арктике.

Структура государственного мониторинга включает три основных блока:

- 1) Блок сбора исходной информации;
- 2) Блок обработки информации, решения комплекса прогнозных задач и подготовки информации для принятия управленческих решений;
- 3) Блок принятия решений по контролю и регулированию состояния вечной мерзлоты на различных народнохозяйственных объектах в Арктической зоне РФ.

Основным принципом получения исходной информации следует считать единство изучаемых параметров в естественной обстановке и при техногенезе; обеспеченность и качественный уровень приборов и оборудования для наблюдений; единство методик наблюдений.

Одной из сверхзадач при создании нового облика государственного мониторинга вечной мерзлоты в Арктической зоне является разработка такого подхода, который бы позволял решать озвученные выше актуальные проблемы на межведомственном уровне и направлять потоки мониторинговых данных в единые центры обработки информации и подготовки управленческих решений.

Этот подход заключается в создании системы геокриологических полигонов как высшего иерархического звена государственного мониторинга вечной мерзлоты, объединяющих в себе фоновые геокриологические стационары и наблюдательные объекты геотехнического мониторинга (недропользования, промышленных сооружений, транспортных систем, городских и муниципальных образований). Кроме этого, полигоны имеют собственную наблюдательную

сеть, состоящую из опорных наблюдательных инженерно-геокриологических и гидрогеологических скважин и площадок периодического обследования. Строительство этих скважин имеет двоякую цель. Первоначальная — это доизучение геокриологического и гидрогеологического строения разреза до глубины распространения макроледяных тел и получения сведений о мощности мерзлых толщ и состоянии первого подмерзлотного водоносного горизонта. Эти сведения необходимы для картирования территории полигона и повышения кондиционности карт среднего и мелкого масштабов. Второй целью бурения опорных скважин является перевод их в режим мониторинговых наблюдений для разработки постоянно действующей региональной модели теплового состояния мерзлых толщ. Периодически территории полигонов фиксируются высокоразрешающей многозональной космической съемкой с целью оценки макромасштабных изменений условий на поверхности или загрязнения окружающей среды.

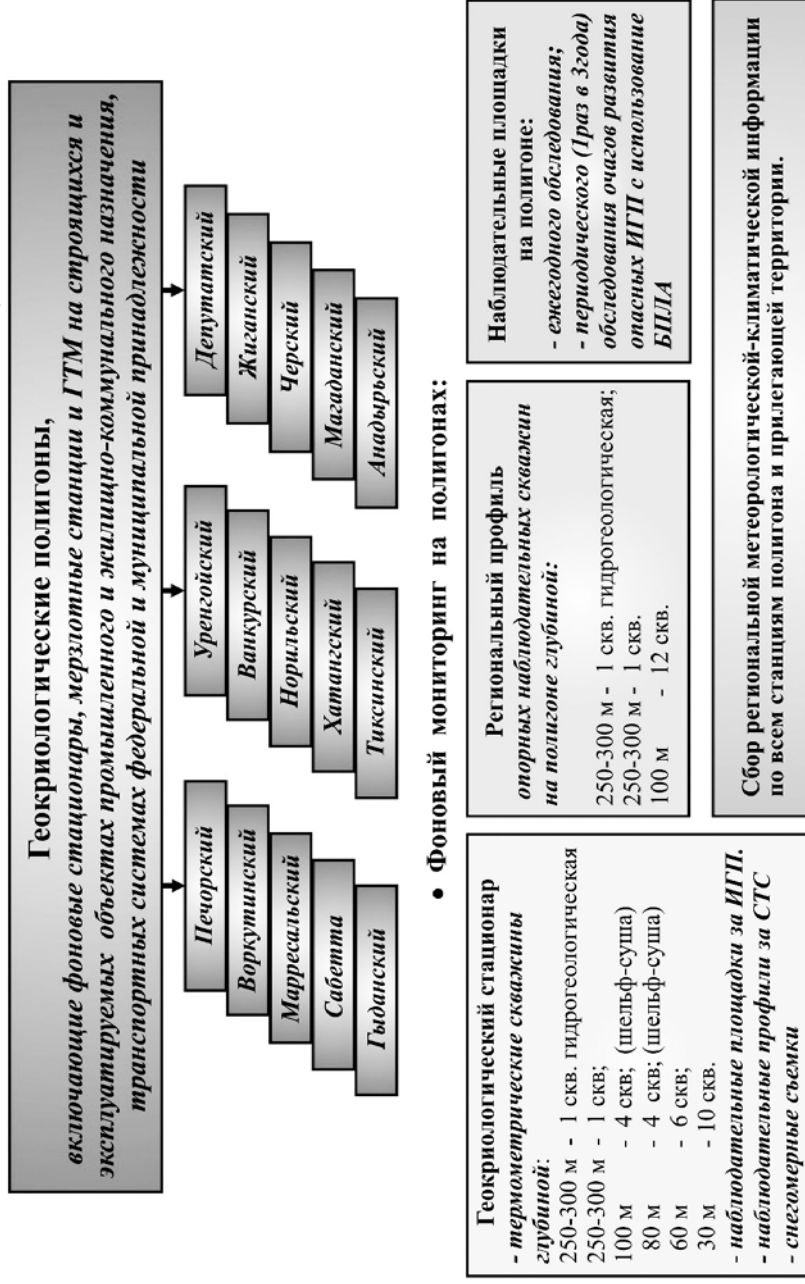
Дополнительными источниками мониторинговой геокриологической информации должны явиться деятельность мерзлотных станций в крупных городских и муниципальных образованиях и мерзлотных инспекций, а также работа региональных центров проектирования защиты и реконструкции зданий и сооружений.

7.1.1. Блок сбора исходных данных

Содержание «Блока сбора исходных данных» представлено на рис. 7.1–7.2. Геотехнический мониторинг на схеме представлен объектами топливно-энергетического комплекса. Основными источниками мониторинговой информации этого блока являются:

- фоновый мониторинг на геокриологических стационарах и полигонах, включая мелководную зону шельфа северных морей;
- материалы комплексной геокриологической съемки масштаба 1:500 000 на территории геокриологических полигонов;
- геотехнический мониторинг на объектах недропользования, промышленного и гражданского строительства и ЖКХ, транспортных систем;
- работы по научному сопровождению изыскательских и проектных работ;
- мерзлотные станции в городах и муниципальных образованиях;
- мерзлотные инспекции в регионах;
- работы региональных центров проектирования и реконструкции зданий и сооружений;
- контрольные наблюдения и работа по научному сопровождению полупромышленных экспериментов.

1. БЛОК СБОРА МОНИТОРИНГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ



• Геотехнический мониторинг на объектах топливно-энергетического комплекса

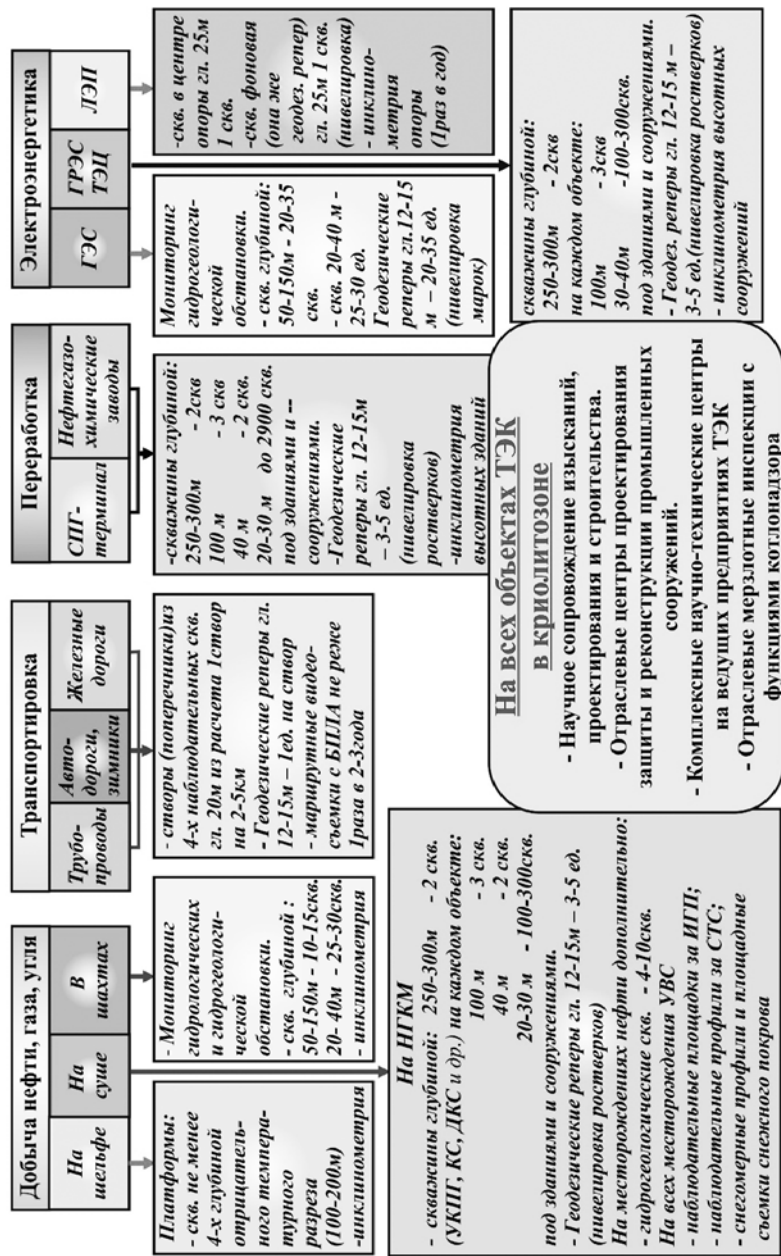


Рис. 7.2. Блок сбора геотехнической мониторинговой информации на геокриологических полигонах на объектах топливно-энергетического комплекса

7.1.1.1. Мерзлотные станции

Основатель мерзловедения М. И. Сумгин считал мерзлотные станции необходимым и важным инструментом исследований вечной мерзлоты. Обоснование создания мерзлотных станций, их актуальность, структура и задачи определяются конкретным регионом и объектом наблюдения — его сложностью, ценностью, материальной, социальной, политической значимостью.

Одним из первых научно-исследовательских центров, созданных в 1927 г. по инициативе М. И. Сумгина была Сковородинская мерзлотная станция. В 1975 г. на базе Сковородинской мерзлотной станции была открыта Тындинская мерзлотная станция, работающая в системе РЖД и сегодня.

В 1930 г. была создана Игарская научно-исследовательская мерзлотная станция (ИНИМС) по инициативе знаменитого инженера треста «Северстрой» Н. И. Быкова.

Анадырская научно-исследовательская мерзлотная станция была организована в 1935 г. при участии С. П. Качурина на Чукотке, а возглавил ее сначала чл.-корр. П. Ф. Швецов, а затем А. П. Соловьёв.

Воркутинская научно-исследовательская мерзлотная станция (ВНИМС) была создана в 1936 г. Руководителем был В. К. Яновский, заместителем — Л. А. Братцев, а начальником производства — В. А. Кудрявцев, создавший в 1953 г. на геологическом факультете Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова первую в мире кафедру мерзловедения.

Алданская научно-исследовательская мерзлотная станция (АлНИМС) была организована в 1953 г. в пос. Чульман в связи с промышленным освоением железных руд и каменных углей Южно-Якутского угольного бассейна. Первым начальником станции был выдающийся исследователь В. М. Пономарев.

Мерзлотная лаборатория появилась в Норильске 1936 г. при геологическом управлении комбината. Она занималась в том числе новыми методами строительства на вечной мерзлоте.

Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция (г. Магадан) ведет начало с момента, когда в 1945 г. на Аркагале открыли Центральную мерзлотную станцию треста «Дальстрой». Здесь проводились исследования закономерностей формирования, распространения, строения многолетнемерзлых пород, таликовых зон и подземных вод на территории Верхояно-Колымской горно-складчатой области, происхождения льдистых толщ равнин северо-востока России, их реакции на изменение климата и антропогенное воздействие.

Вилюйская научно-исследовательская мерзлотная станция (пос. Чернышевский) сосредоточена в настоящее время на создании методики

и техники геофизического контроля состояния горных пород криолитозоны и гидротехнических сооружений в Западной Якутии. На станции накоплен материал о развитии процессов фильтрации в основаниях и береговых примыканиях ГТС.

Сегодня воссоздание и актуализация сети мерзлотных станций и практическая направленность их работы в крупных населенных пунктах или на территориях освоения в Арктике и Сибири является насущной и крайне своевременной задачей. Значительное число ранее построенных зданий и сооружений уже подвергаются деформациям из-за постепенной потери несущей способности фундаментов ввиду медленно развивающейся ползучести грунтов оснований, а также климатических воздействий на строительные конструкции. Повышение температур воздуха и, соответственно, мерзлых грунтов, наблюдающееся в последние десятилетия в криолитозоне почти повсеместно, будет приводить к выходу из строя значительной части жилых и промышленных зданий, инженерных сетей и коммуникаций, газо- и нефтепроводов, причем эти процессы будут ускоряться. Необходимо создание в ближайшее время высокотехнологичной и профессиональной сети геокриологического мониторинга, а также разработка технических решений, которые позволят сохранить обширную инфраструктуру Российской Арктики. Эту задачу могут решить только мерзлотные станции, нацеленные на местные или региональные проблемы и расположенные непосредственно на местах.

7.1.1.2. Мерзлотные инспекции

Вечномерзлые грунты в качестве оснований зданий и сооружений (далее — зданий) используются на протяжении ряда столетий. Опыт эксплуатации зданий и связанные с этим специфические проблемы привели к постановке основной задачи — сохранение работоспособного состояния зданий и сооружений, расположенных на вечномерзлых грунтах, обеспечивающего нормальную эксплуатацию.

Нормативно-правовыми актами Российской Федерации (ст. 3 Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений») сформулированы минимальные требования к зданиям и сооружениям:

- 1) механической безопасности;
- 2) пожарной безопасности;
- 3) безопасности при опасных природных процессах и явлениях и/или техногенных воздействиях;
- 4) безопасных для здоровья человека условий проживания и пребывания в зданиях и сооружениях;
- 5) безопасности для пользователей зданиями и сооружениями;

- 6) доступности зданий и сооружений для инвалидов и других групп населения с ограниченными возможностями передвижения;
- 7) энергетической эффективности зданий и сооружений;
- 8) безопасного уровня воздействия зданий и сооружений на окружающую среду.

Большая часть данных требований обеспечивается за счет проектных решений, в том числе в плане использования грунтового основания как конструктивного элемента здания.

Жизненный цикл здания — это период, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция, капитальный ремонт, снос здания или сооружения. Процесс эксплуатации жилых зданий регулируется жилищным законодательством. При этом определена многоуровневость контрольно-надзорной деятельности. Начальный этап — эксплуатационный контроль состояния зданий на уровне собственников, далее — муниципальный контроль и государственный надзор.

Целью специализированной организации в данном случае и будет осуществление контрольно-надзорных мероприятий по обеспечению сохранности и эксплуатационной пригодности зданий, в качестве грунтового основания у которых выступает вечная мерзлота.

Для осуществления указанных полномочий мерзлотными инспекциями всех уровней в соответствии с действующим законодательством о градостроительной деятельности необходимо внести ряд уточнений в Градостроительный кодекс, связанный с Федеральным законом от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Необходимо дополнить состав градостроительной деятельности, включив в список «геотехнический (мерзлотный) мониторинг».

7.1.1.3. Научное сопровождение полупромышленных экспериментов

При освоении криолитозоны арктических регионов удорожание строительства по сравнению с «немерзлыми» регионами происходит за счет нарушения региональных регламентов содержания объектов строительства, многочисленных ошибок проектирования, неучета опыта освоения территорий-аналогов и остающейся низкой культуры проведения строительных работ.

Несмотря на кажущуюся достаточность теоретических проработок тех или иных вопросов устойчивости зданий и сооружений в различных по сложности природных условиях, все же полного обеспечения надежности строительства расчетными методами достичь пока не удастся. Свидетельствами этого являются многочисленные случаи промышлен-

ных аварий на дорогах, трассах трубопроводов, оснований зданий и сооружений.

В связи с этим осуществление на практике масштабных экспериментов по отработке методов предупреждения и защиты от проявления неблагоприятных и опасных экзогенных процессов представляется актуальным в течение всего периода освоения недостаточно изученных арктических регионов.

Первые попытки проведения полупромышленных экспериментов в Западной Сибири относятся ко времени начала освоения газоконденсатного месторождения «Медвежье». Так в 1975 г. между УКПГ-4 и УКПГ-5 на трассе межпромыслового газового коллектора был запроектирован лупинг протяженностью 4,5 км. На этом участке предполагалось осуществить прокладку трубопровода двенадцатью различными способами с применением искусственных теплоизоляционных материалов и способов рекультивации нарушенных территорий. Заблаговременно, а именно за год, на экспериментальном полигоне по трассе прокладки лупинга институтом ВСЕГИНГЕО (Министерства геологии СССР) были организованы термометрические створы из скважин глубиной 12 м, оборудованных связками ртутных и электрических термометров. Одновременно на этой территории была выполнена инженерно-геокриологическая съемка и составлены карты в крупном и детальном масштабах. Несмотря на то что экспериментальный участок был выбран проектировщиками в относительно благоприятных условиях, результаты промышленных испытаний могли бы иметь непреходящее значение. Но, увы, проведение экспериментов вначале переносили, а через несколько лет проект был закрыт.

В дальнейшем эксперименты в системе Министерства газовой промышленности продолжались в весьма ограниченных объемах и без привлечения сторонних профильных научно-исследовательских организаций.

В настоящее время, с учетом резко возросших темпов освоения новых недостаточно изученных арктических территорий, проведение полупромышленных экспериментов должно занять свое достойное место.

Осуществление фрагментов строительства должно выполняться инвесторами и проектировщиками в рамках разрабатываемых проектов с привязкой к наиболее сложным в инженерно-геокриологическом отношении участкам, миновать которые при возведении линейных и других сооружений не представляется возможным. При этом проведение контрольных мониторинговых работ за состоянием ПТС, включенных в эксперимент, должны выполнять профильные институты иных ведомств (РАН, ВУЗ и др.) на договорной основе. Таким образом, экспериментальный подход, при сопровождении его комплексом научно обоснованных наблюдений, даст исчерпывающий ответ по разработке ме-

тодов и способов защиты инженерных сооружений и их устойчивости на длительную перспективу.

Практика настоящего времени требует осуществить подготовку материалов для внесения законопроекта о включении в проекты освоения месторождений в криолитозоне Арктики в качестве обязательных разделов проведения полупромышленных экспериментов с целью предпроектной апробации природоохранных мероприятий, применения новых строительных материалов и технологий.

7.1.1.4. Центры проектирования и реконструкции зданий и сооружений

Актуальность воссоздания центров проектирования и реконструкции зданий и сооружений в Арктической зоне страны не вызывает сомнений, поскольку деградационные процессы в основаниях инженерной инфраструктуры на вечномерзлых грунтах под влиянием изменений климата уже обусловили серьезный экономический ущерб, который будет возрастать кратно, если не предпринимать специальных мер на государственном уровне.

Безусловно, здесь необходимо использовать опыт проведения подобных работ, ранее выполнявшихся на Воркутинской мерзлотной станции и, особенно, в Норильской мерзлотной лаборатории. Первым зданием, построенным в Норильске на сваях с проветриваемым подпольем, и одним из первых в СССР и мире стал в 1937 г. кирпичный завод. В 1966 г. инженеры из Норильска были удостоены Ленинской премии за внедрение прогрессивных индустриальных методов при строительстве комбината и г. Норильска в условиях вечномерзлых грунтов. На базе мерзлотной лаборатории комбината в 1997 г. было решено создать геокриологическую лабораторию ГМОИЦ.

Представляется, что в настоящее время в связи с необходимостью создания государственной системы межведомственного мониторинга вечной мерзлоты следует актуализировать на новой методологической и технической основе работу сохранившихся предприятий, специализирующихся на разработке проектов реконструкций и ремонтов зданий в криолитозоне Арктики. Обеспеченность высококвалифицированными кадрами этих предприятий является на сегодня одной из острых нерешенных проблем.

7.1.2. Блок обработки мониторинговой информации. Федеральный банк региональных баз данных

Блок обработки информации, решения комплекса прогнозных и критериальных задач и подготовки информации для принятия управляющих решений представлен на рис. 7.3 и включает в себя:

2. БЛОК ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА МОНИТОРИНГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

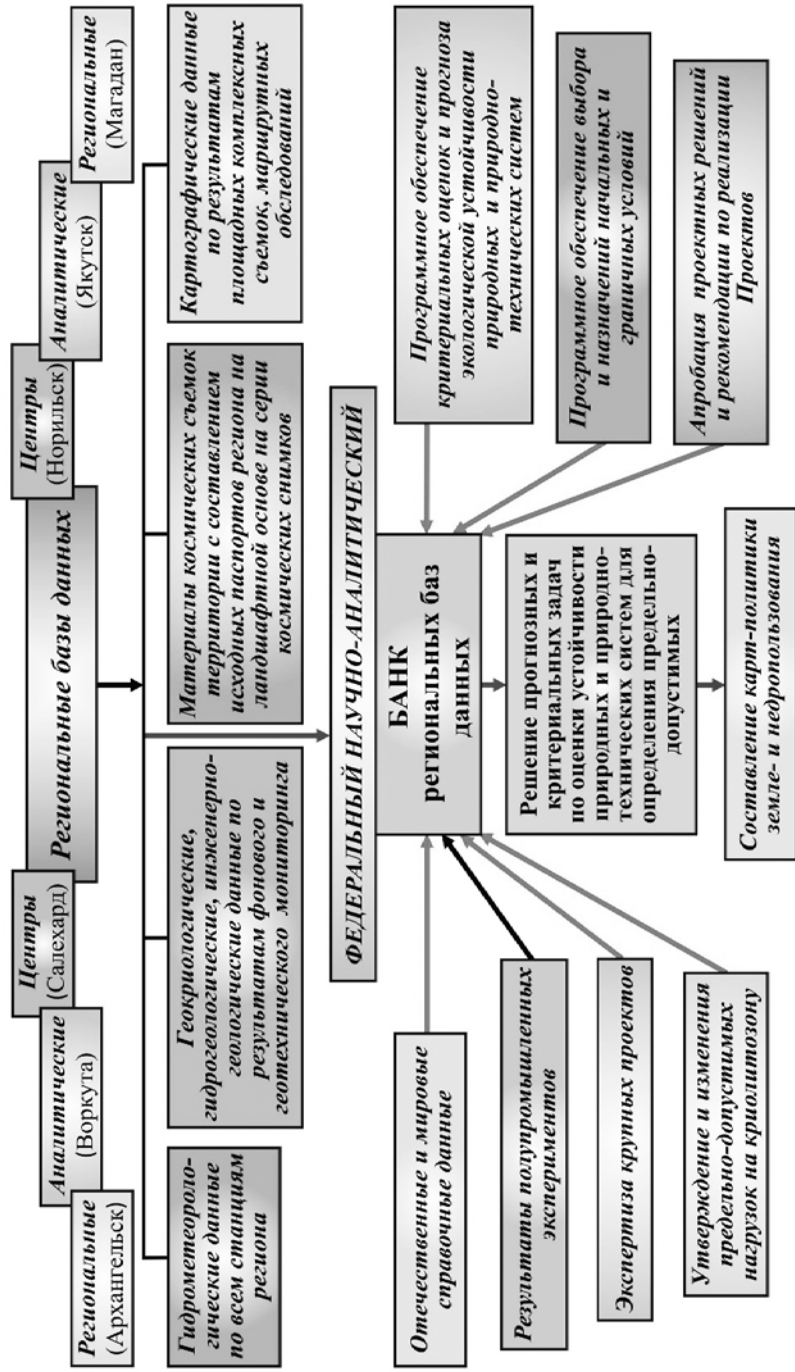


Рис. 7.3. Блок обработки и анализа мониторинговой информации

- Базы региональных данных мониторинговой и региональной геолого-съемочной информации в региональных аналитических центрах, в том числе:
 - *региональные климатические данные;*
 - *результаты фонового геоэкологического мониторинга и региональных съемок;*
 - *результаты геотехнического мониторинга на объектах недропользования, промышленного и гражданского строительства и ЖКХ, транспортных систем, региональных космических снимков и видеосъемок с применением БПЛА;*
 - *материалы полупромышленных экспериментов;*
 - *отечественные и мировые справочные данные;*
 - *решение прогнозных и критериальных задач по оценке устойчивости региональных природных систем для определения предельно допустимых техногенных нагрузок;*
- Центральный банк региональных баз данных в головном аналитическом центре, выполняющем:
 - *оценки макромасштабных изменений и устойчивости геоэкологической обстановки в различных регионах и выявление прогнозных критических ситуаций в Арктической зоне РФ в целом;*
 - *утверждение и изменения предельно допустимых нагрузок;*
 - *разработку и составление карт политики земле- и недропользования;*
 - *разработку проектов комплексного использования и рекультивации территорий;*
 - *апробацию новых проектных решений и реализацию проектов;*
 - *проведение экспертизы крупных национальных проектов освоения Арктической зоны РФ;*
 - *сопряжение деятельности с надзорными органами (федеральными и региональными отделениями Ростехнадзора, Росприроднадзора, авторского надзора проектных организаций);*
 - *подготовку материалов для принятия управляющих решений;*
 - *разработку предложений, методов и технологий по гарантированному преодолению критических ситуаций.*

7.1.3. Блок принятия решений

Блок принятия решений осуществляет:

- *детальный анализ материалов, поступивших на рассмотрение;*
- *проведение ускоренной экспертизы независимыми профильными экспертами с выездом комиссии на объекты с прогнозируемой нештатной ситуацией;*
- *подготовку соответствующих приказов и распоряжений Правительства РФ о приостановке производственно-хозяйственной де-*

тельности на объектах, представляющих, согласно прогнозным оценкам по данным государственного мониторинга криолитозоны и независимых экспертиз, реальную угрозу экологической обстановке в регионе;

- утверждение порядка выхода из сложившейся критической ситуации.

7.2. Региональные работы и картирование полигонов — составная часть мониторинга

7.2.1. Иерархия картографических моделей как основа пространственно-временной характеристики регионов

Важнейшим признаком направленности развития экологической обстановки в северных регионах страны является состояние и динамика природных и техногенных геосистем криолитозоны. Они определяются взаимодействием геологической среды с внешними по отношению к ней сферами Земли — атмосферой, гидросферой, биосферой, а также с техническими системами. Оценить пространственно-временные параметры этих взаимодействий возможно с помощью системы картографических и информационных моделей, которые реализуются в виде электронных карт с соответствующими базами данных, в том числе в виде карт районирования. Пространственная картографическая модель служит задачам представления, и экстраполяции информации, а их достоверность зависит от обеспеченности фактическим материалом. Статистические критерии позволяют количественно оценить правомочность переноса данных с заданной доверительной вероятностью. Поэтому количественная и качественная мониторинговая информация о вечной мерзлоте (о многолетнемерзлых горных породах и их свойствах, об экзогенных процессах, о криогенных ландшафтах) обретает реальную практическую и научную ценность только будучи привязана, с одной стороны, как к конкретным геологическим и ландшафтным объектам, так и к соответствующим типам, а с другой — к объектам инфраструктуры, взаимодействующим с природными средами.

Разнообразные карты являются наиболее распространенной формой представления информации о природной среде и вписанных в нее техногенных объектах, которые можно рассматривать как пространственную модель наблюдаемой обстановки. В общем виде включенная в систему мониторинга природной среды картографическая модель обязана для любой точки территории с заданной точностью и надежностью давать информацию о фоновых и текущих природных и техногенных условиях, а также быть основой для прогноза изменений геоэкологиче-

ских параметров геосистем — для получения текущих и прогнозных геокриологических и геоэкологических параметров [Дроздов, 2004].

Хозяйствование в северных широтах предопределяет необходимость решения ряда задач геоэкологического характера, в целом оценивающих опасность и степень риска природопользования в арктических регионах с учетом флуктуаций климата и техногенеза [Дубровин, 2003]. Конечной целью этих исследований является своевременное получение достоверной информации о происходящих изменениях на основе постоянно действующей геоэкологической модели региона — концептуальной и картографической. Эта система должна интегрировать и обобщать информационные потоки мониторинговых наблюдений применительно к геологическим и геотехническим объектам.

Отсюда встает вопрос, с одной стороны, о пространственном охвате таких моделей и, с другой стороны, о детальности представляемой и актуализируемой при мониторинге информации. Очевидно, что достаточно точный экономически оправданный для проектирования результат может быть получен только для ограниченной площадки. Оценочные данные для территориального планирования можно собрать для площади территориально-производственного комплекса. Для перспективных прикидок в масштабах страны или региона важны общие закономерности пространственно-временного распределения характеристик окружающей среды. Соответственно, следует говорить об иерархии картографических моделей, объектов и систем мониторинга природных сред вообще и криолитозоны в частности.

Это в свою очередь соответствует целям, задачам и возможностям разномасштабного картографирования осваиваемой территории криолитозоны и требует совершенствования принципов геокриологической типизации и районирования. При этом можно говорить о двух типах информационных потоков между разноуровневыми моделями: «снизу вверх» — более частная информация обобщается и пополняет картографическую модель высокого уровня; «сверху вниз» — на низкий уровень передаются сведения о принадлежности объектов к крупным геологическим, ландшафтным, прочим классификационным подразделениям, гидрометеорологические данные и т.д.

Таким образом, обеспечение экологической безопасности освоения и разработки недр криолитозоны Арктики требует пересмотра или решения ряда новых крупных научно-методических и организационно-технических задач, касающихся принципов комплексирования и взаимоувязки региональных (площадных) и стационарных (мониторинговых) методов исследования: размещения и структуры наблюдательных сетей; унификации наблюдений на основе применения современных автоматизированных и дистанционных технологий сбора данных; мно-

гофакторного моделирования процессов для определения степени риска освоения территории; разработки правовых основ для оценки геоэкологического ущерба для осваиваемых территорий и акваторий.

Отсутствие полноценных геокриологических и гидрогеологических исследований и опережающих полупромышленных экспериментов в период предпроектной подготовки, предопределяет низкую эффективность самих проектных решений. В современных условиях, когда получение новой полевой съемочной геокриологической информации происходит в крайне ограниченном количестве, увеличивается актуальность максимального использования всех ранее накопленных данных, что может быть обеспечено ведением баз геокриологических данных и использованием ГИС-технологий.

Ориентируясь на пространственный охват, можно говорить о базах геокриологических данных, соответствующих ГИС и картографическим моделям глобального, регионального, локального и элементарного (по-объектного) уровней.

Обзорные и глобальные ГИС — соответствуют полушариям Земли, материкам или их крупным частям (масштаб 1:2 500 000—1:40 000 000). Пример — тематические циркумполярные карты и карты СССР и России. Информационная составляющая содержится в легендах, экспликациях и сводных таблицах к этим картам, например, Геокриологическая карта СССР [1991].

Региональные ГИС ведутся для крупных природных регионов и единиц административного деления (масштаб 1:500 000—1:5 000 000). Их основу составляют компьютерные карты районирования с сопутствующими базами данных, содержащими обобщенную ландшафтно-геологическую, геокриологическую и геоэкологическую информацию, например, ГИС «Геокриология Якутии» [Железняк, 2011], база данных по природоохранным районам полуострова Ямал [Александров, 1997].

Отметим здесь, что климатическими и метеоданными геокриология обеспечена в удовлетворительном для построения функциональных и корреляционных зависимостей объеме только на глобальном и, частично, на региональном уровнях. Однако и такая детальность показывает, что связи климатических, метеорологических и геокриологических параметров весьма неодинаковы в различных секторах Российской Арктики и областях криолитозоны. Тренды изменения температур воздуха и многолетнемерзлых пород по-разному соотносятся в разных регионах. Поэтому очевидно, что механическое перенесение опыта освоения из одного региона в другой недопустимо.

Локальные базы данных и ГИС содержат первичную информацию для районов крупных хозяйственных объектов, например территорий газовых месторождений, промышленных районов и пр. — описания точек

наблюдения (скважин, измерительных постов и т.д. (масштаб 1:25 000—1:200 000). Первичная картографическая информация представляется цифровыми картами фактического материала, картами геосистем и производными картами геологического, геоэкологического и иного содержания.

Элементарные (пообъектные) базы данных содержат первичную информацию об изысканиях, режимных и стационарных наблюдениях, контрольных работах (масштаб 1:500—1:25 000).

Применительно к задачам мониторинга региональные ГИС должны обеспечивать работу полигонов мониторинга, а локальные и элементарные — работу геокриологических стационаров и наблюдательных площадок регулярного посещения. Группы локальных или элементарных ГИС поддерживают формирование региональных ГИС, обеспечивая движение фактографической и обобщенной информации «вверх» и «вниз» между иерархическими уровнями.

Локальные *базы данных геокриологической информации* и картографические модели, основанные на генерализации содержащихся в них сведений, составляются для территорий хозяйственных объектов и комплексов (например, конкретных месторождений), охраняемых территорий, территорий административных районов. Содержание и состав отображаемой информации и набор соответствующих параметров определяются местными природными и техногенными условиями и поставленными инженерными или научными задачами.

Следует отметить, что целевым задачам мониторинга мерзлоты соответствуют преимущественно карты-модели регионального уровня, отображающие пространственно-временные закономерности распределения геокриологических характеристик, необходимые для принятия стратегических и принципиальных решений территориального планирования. А пообъектные и локальные карты-модели со своими базами данных обеспечивают как собственно процесс мониторинговых наблюдений, так и решение геокриологических и проектных задач на конкретных площадках и объектах.

7.2.2. Цифровые ландшафтные и геокриологические карты локального и элементарного уровня

В настоящее время имеется широкий спектр цифровых ландшафтных и геокриологических карт локального уровня генерализации, составленных по дешифрированию ДЗЗ разного разрешения. Они составлены по территориям нескольких крупных экономических объектов в криолитозоне России. Это территории Уренгойского, Заполярного, Бованенковского, Восточно-Мессояхинского месторождений углеводородов (с включением полос транспортировки газа на юг); расширенные

полосы транспорта газа от Ванкорского месторождения на север (нереализованный проект) и на юг; полоса ВСТО (нефтепровода Восточная Сибирь—Тихий океан); Норильский промышленный регион (рис. 7.4, см. с. XXV цв. вклейки).

Видно, что эти площади охватывают существенно различающиеся в мерзлотном и морфологическом отношении ландшафты (и геосистемы) в большинстве регионов России. Локальными моделями не представлены северо-восток страны и южное горное обрамление российской криолитозоны. Частично их отсутствие компенсируется локальными (элементарными) картами-моделями полиметального месторождения Кючюс (Восточная Якутия) и Назаровского углеразреза КАТЭКа.

Электронные цифровые карты геосистем исполнялись путем векторизации растрового изображения, полученного при сканировании бумажного оригинала, трансформировались в требуемую координатную систему для корректировки дефектов бумажной основы и для совмещения с атрибутивной базой данных, региональными и глобальными картами геосистем. Для типов геосистем (ландшафтов, ПТК) по базе данных давалась комплексная геокриологическая и геоэкологическая характеристика. Ситуационная привязка обеспечивалась электронными слоями гидросети и рельефа. Наличие качественной ситуационной привязки позволило откорректировать оцифрованные карты, исправив неточности и ошибки в рисовке контуров геосистем. На карту выносилась информация о техногенных объектах. Итоговые цифровые карты природных геосистем представляются в многослойном варианте (табл. 7.1):

Таблица 7.1.

Типовая структура среднемасштабной электронной цифровой карты природных и техногенных геосистем осваиваемой территории в криолитозоне

Расположение слоя	Тип отображаемой геосистемы	Геокриологические характеристики	Объекты в слое	Заливка
1. Вспомогательный слой	Гидросеть		Линии, полигоны, подписи	Закраска как принято в топографии
2. Вспомогательный слой	Рельеф		Линии	—
3. Верхний слой	Типы урочищ	Температура, влажность/льдистость ММП; талики; состав, мощность, влажность СТС	Полигоны, границы тонкие сплошные, подписи (индексы)	—

Расположение слоя	Тип отображаемой геосистемы	Геокриологические характеристики	Объекты в слое	Заливка
4. Средний слой	Типы местностей	Литолого-фациальные комплексы и свойства пород	Полигоны, границы полужирные пунктирные; подписи (индексы)	—
5. Нижний слой	Типы ландшафтов	Стратиграфо-генетические комплексы и состав пород	Полигоны, границы полужирные сплошные; подписи (индексы)	Закраска по легенде для равнинных районов
6. Вспомогательный слой	Ландшафтные подпровинции	Геолого-генетические комплексы и мощность мерзлоты	Полигоны, границы полужирные сплошные; подписи (индексы)	Закраска по легенде для карты природных зон
7–30. Вспомогательные слои	Техногенная нагрузка в соответствии с текущим состоянием нарушений и проектной инфраструктурой	Изменения в геологической среде (состояние, температура), техногенно переотложенные, техногенно измененные породы	Линии, полигоны, подписи (дороги, зимники, трубопроводы, ЛЭП, площадки кустов скважин, объекты инфраструктуры, карьеры и пр.)	В соответствии с легендой к технологическим схемам

В качестве модельного региона можно рассмотреть север Западной Сибири, характеризующийся многообразием природных условий. Он охватывает несколько ландшафтных подзон, а также освоен мощной индустрией газодобывающего комплекса. Регион представляет собой идеальный полигон для отработки методики и практической реализации систем наблюдения за естественным состоянием и техногенными изменениями геокриологических характеристик с использованием геосистемного подхода. Создание базы данных геокриологического опробования по площади Уренгойского, Заполярного, Бованенковского и других месторождений углеводородов за разные годы и соответственно разные этапы освоения месторождения позволяет подойти к построению серии картографических моделей геокриологических условий, пользуясь средствами геоинформационных систем (ГИС) и формализованных методов обработки информации.

К созданию базы данных инженерно-геокриологических условий по этому району обращались трижды: в 1980-х гг., на рубеже XX и XXI вв., в 2020-е гг. Были получены достаточно обширные массивы, но они не

охватывали всю имеющуюся информацию, оставляя как пространственные лакуны, так и типологические — не охарактеризованы остались многие типы геосистем, включая целые ландшафты и даже ландшафтные подпровинции. Базы данных должны помочь восполнить этот пробел, создав единый массив данных ретроспективной информации по геокриологическим скважинам разового и регулярного обследования для ландшафтных и геоэкологических условий от северной тайги до тундры [Мониторинг криолитозоны, 2013]. В принципе массивы данных должны включать не только геокриологические, но и экологические и геоэкологические сегменты [Melnikov, et al., 2018; Khomutov, et al., 2018, Цифровые карты... 2018].

Система накопления данных и управления ими организованы средствами BASIC, Excel, PARADOX, ARC-GIS и пр. в зависимости от возможностей и технических средств исполнителей [Дроздов, 1982, 2004; Дроздов, Коростелев, Ананьева, 1999] и предполагает преобразование всех данных в ARC-GIS (рис. 7.5). Основной единицей в массиве являются инженерно-геокриологическая скважина.

Панель задач для Windows

Файл Правка Вид Таблицы Записи Свойства Сервис Динамо 2

Таблица: ОБЪЕКТ.DB

ОБЪЕКТ	№ка	Obj	Ku	KU	№ка	Num	Ku	Skv
1	Бованенковское	01-27	1	1	330	01-27	01	
2	Бованенковское	02-27	2	1	331	01-27	02	
3	Бованенковское	03-27	3	1	332	01-27	03	
4	Бованенковское	04-27	4	1	333	01-27	04	
5	Бованенковское	05-27	5	1	334	01-27	05	
6	Бованенковское	06-27	6	1	335	01-27	06	
7	Бованенковское	07-27	7	1	336	01-27	07	
8	Бованенковское	08-27	8	1	337	01-27	08	

Таблица: KU.DB

MP	Num	Dep	Temp
1	216	1.50	-4.90
2	216	2.00	-4.80
3	216	3.00	-6.70
4	216	3.50	-6.30
5	216	4.00	-6.40
6	216	5.00	-6.20
7	216	6.00	-6.10
8	216	7.00	-5.20

Таблица: KOL.DB

KOL	Num	Depth	W
1	216	1.40	
2	216	2.10	
3	216	2.60	
4	216	3.10	
5	216	3.50	
6	216	4.00	
7	216	4.30	
8	216	5.00	
9	216	5.50	
10	216	6.00	
11	216	6.50	
12	216	7.00	
13	216	7.50	
14	216	8.00	

Таблица: SKV.DB

SKV	Num	Skv	Land	Mest	Ur	Abs	X	Y	Deep	Date
1	216	01	III m	Ж11	661	15.40	209.00	211.00	12.00	09.07.1987
2	217	1a	III m	Ж11	662	11.20	209.50	211.50	10.00	10.07.1987
3	218	2	III m	Ж11	661	20.60	211.00	209.50	10.00	08.07.1987
4	219	03	II	Б11	361	9.10	208.00	208.00	10.00	11.07.1987
5	220	04	III	Ж11	662	9.00	204.00	200.00	10.00	12.07.1987

Таблица: LIT.DB

LIT	Num	Sloy	Skv	Krov	Pod	Index	Lit	Ktd	Десг
1727	598	1	18	0.00	0.90	а III(3-4)	4	0	Песок желтовато-серый, галечный, ожелезнен в виде желтых
1728	598	2	18	0.90	1.30	а III(3-4)	4	1	Песок желтовато-серый, галечный, ожелезнен в виде желтых
1729	598	3	18	1.30	1.80	а III(3-4)	4	6	Песок серый, галечный, с отдельными прослоями органики
1790	598	4	18	1.80	3.40	а III(3-4)	4	1	Песок серовато-желтый, галечный, с едвоочными взращениями

Таблица: SV1.DB

SV1	Num	Sloy	Obel	Kr	Podos2	2_05	05_025	025_01	01_005	005_001	001_0005	<0005	Ps	Wgig	W1	W1
94	332	11	2	6.00	6.20	2.90	5.90	10.70	26.80	14.80	40.90	2.42	0.46	62.00		38.00
95	820	4	2	1.60	2.00	8.10	0.10	0.10	2.60	30.10	15.50	29.80	2.42	4.15	71.90	42.00
96	831	2	1	0.30	0.70	0.30	0.30	3.70	18.00	40.10	10.50	13.30	2.42	2.37	44.90	32.20
97	1040	1	1	0.10	0.50	0.10	0.20	52.90	33.00	8.60	5.20	2.42	1.55	33.90		30.60
98	1095	4	1	3.00	3.50	0.10	4.50	9.00	17.10	20.70	4.20	3.30	2.42	2.79		

Таблица: SV2.DB

Ku2	Podos2	Cl	So4	Neos3	Ca	Mg	K_na	Ph	Deal
2.20	2.40	0.37	0.09	0.06	0.01	0.00	0.29	7.80	0.81
4.10	4.30	0.52	0.08	0.05	0.01	0.01	0.37	7.65	1.02
7.90	8.20	0.60	0.10	0.05	0.01	0.01	0.43	7.50	1.19
1.50	1.70	0.01	0.01	0.03	0.00		0.02	7.35	0.07

Запись 2 из 1090

Пуск | NetHASP License Manag... | ArcView GIS 3.2a | (D:\BQVA) - Far | Paradox для Window

Рис. 7.5. Первичная информация по инженерно-геокриологической скважине (8 связанных таблиц PARADOX)

Привязка скважины включает плановые координаты и отметку устья скважины, указывается также глубина разведочной геокриологи-

ческой скважины (обычно не более 12 м), привязка к иерархии геосистем, дублированная по картам среднего и крупного масштаба (1:25 000 и 1:100 000). Это делается для учета уровня генерализации ландшафтной структуры при работе в этих масштабах и оценки корректности перехода от масштаба к масштабу при обобщениях. В фактографический блок заносится наиболее массовая информация регулярного опробования скважин по глубине. Указываются: а) возраст и генезис (геологический индекс); б) литологический тип породы (суглинок, песок мелкий и пр.); в) состояние пород (мерзлое или талое) и криогенное строение (криотекстура); г) весовая влажность, рассчитанная как отношение массы воды к массе влажной породы; д) плотность скелета (сухого) грунта, е) температура пород [Изменчивость инженерно-геологических свойств... 1987], ж) засоленность, и) при наличии: теплофизические характеристики, показатели прочности и деформируемости, реологические свойства. В дополнение к перечисленным данным для мерзлых пород рассчитывается и вводится величина возможной суммарной осадки при оттаивании.

Ввод данных, а также различные операции по сортировке данных сопровождаются контролем запрещенных значений и/или запрещенных сочетаний различных единиц информации. Оператор ввода и пользователь информируются также об обнаруженных маловероятных значениях или сочетаниях значений информации. Количественные данные задаются в числовых значениях. Буквенно-числовые индексы геосистем, характеристика граничных условий, элементы геологической и геокриологической обстановки кодируются в виде присвоенных числовых номеров и рангов, поскольку сложные геологические и ландшафтные индексы неэффективны при идентификации, так как в разное время и/или разными операторами они могут быть записаны по-разному. Содержательные описания приводятся в текстовом виде или в виде раstra.

Данные разовых наблюдений в скважинах позволят в автоматическом или полуавтоматическом режиме получить статистики геокриологических характеристик для различных типов геосистем (ландшафтов) разного уровня, и на основе этих статистик и карты геосистем генерировать синтетические или покомпонентные геокриологические карты. Примером может служить ГИС Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения на Центральном Ямале, включающая комплект природоохранных карт, которая с 1999 г. использована при реализации 11 проектов освоения (рис. 7.6) [Дроздов, 2004; Дроздов и др., 2001]. Аналогичные карты построены для аналогичных по масштабу месторождений. Соответствующие базы данных содержат примерно по 1000 скважин разового наблюдения.



Рис. 7.6. Образ комплекта ГИС-карт территории Бованенковского месторождения, Ямал [Дроздов и др., 2001]

Если в пределах такой территории выполняются мониторинговые наблюдения, то на основе базового комплекта геоэкологических карт можно составить обновленные временные срезы на произвольные сроки согласно а) фактически измеренным параметрам и б) общим закономерностям взаимозависимости климатических и мерзлотных характеристик для региона на фоне потепления климата. При этом необходимый объем мониторинговых наблюдений может быть относительно небольшим, количество скважин регулярных наблюдений составляет первые проценты от количества скважин разового обследования. Пример — серия карт температуры горных пород на несколько временных срезов для территории Уренгойского НГКМ (рис. 7.7, см. с. XXV цв. вклейки), которые демонстрируют тенденцию к деградации ММП с поверхности.

Здесь в 1972–1977 гг. выполнена инженерно-геоэкологическая съемка, в 1992–1993 гг. на локальных площадках проведена повторная съемка. В условиях общего потепления климата ландшафтная экстраполяция результатов комплексного геоэкологического мониторинга позволила выделить в пределах южной лесотундры обширные территории с опусканием кровли мерзлоты, а в северной лесотундре прогнозировать начало этого процесса в первую очередь на тех площадях, где идет про-

движение на север лиственничных редколесий [Украинцева и др., 2012 и др.]. Представленные обобщения по температурам грунтов и протаиванию основаны на 10-летних циклах наблюдений, однако тенденции последних трех лет наблюдений ставят вопрос о переходе к 5-летнему циклу обобщений.

На территориях опережающего экономического развития в пределах АЗРФ, а также Арктики и Субарктики в целом размещаются геокриологические стационары и полигоны, необходимые, чтобы охарактеризовать мерзлотные условия, влияющие на хозяйствование и геоэкологическую обстановку. В границах листов топографических карт масштаба 1:500 000, на которых размещаются стационары и полигоны, составляется комплект карт масштаба 1:500 000 геокриологического и смежного содержания, чтобы охарактеризовать текущие фоновые природные условия и их современную реакцию на имеющийся техногенез. Для выбора конкретных объектов геокриологического мониторинга комплект дополняется специальной картой районирования криолитозоны масштаба 1:8 000 000.

Карты составляются с использованием геосистемного подхода на ландшафтной основе с широким привлечением материалов ДЗЗ преимущественно камеральным путем с заверочными натурными работами на ключевых участках [Методическое руководство... 1978; Методические рекомендации... 1977]. Исполняются карты в ГИС-формате и совместно с базами данных являются графической и информационной основой ведения мониторинга.

7.2.3. Инженерно-геокриологические карты масштаба 1:500 000

Инженерно-геокриологическая карта масштаба 1:500 000 является картографической моделью общих инженерно-геокриологических условий территории и используется как основа для решения широкого круга федеральных и региональных задач в сфере земле- и недропользования, а также природоохранных мероприятий.

Целью инженерно-геокриологического картографирования является построение картографической модели, отображающей:

- инженерно-геокриологические условия (ИГУ), состав, состояние и свойства мерзлых и талых пород, оценку благоприятности территории для хозяйственного освоения на основе комплексных оценок ИГУ;
- региональные инженерно-геокриологические закономерности формирования и пространственного распространения состава, состояния свойств горных пород как оснований сооружений и среды нахождения техногенных элементов;

- специфические свойства пород, влияющих на устойчивость зданий и сооружений в криолитозоне (степень засоленности и сорбционной способности грунтов зоны аэрации, агрессивность и коррозионную способность подземных вод и пр.);
- эндогенные и экзогенные геологические процессы, их режим и периодичность;
- тенденции и оценку изменения ИГУ под влиянием комплекса природных и техногенных факторов и условий;
- прогноз ИГУ.

Основными материалами комплекта инженерно-геокриологических карт масштаба 1:500 000 являются:

А. Основные карты:

- инженерно-геокриологических условий;
- инженерно-геокриологического районирования;
- схема техногенной нагруженности.

Изучению и картографированию подлежат: а) геологические компоненты (стратиграфо-генетические и формирующие их комплексы и типы пород; структурно-тектонические элементы; гидрогеологические условия; геоморфологические условия; геокриологические условия; парагенетические ассоциации экзогенных (в том числе геокриологических) и эндогенных процессов и явлений; техногенные изменения геологической среды, включая активизацию ЭГП, региональные нарушения компонентов ландшафта, загрязнение геологической среды и пр.); б) компоненты сред, смежных с геологической.

Б. Дополнительные карты.

Результаты оценок основных геологических опасностей освоения территорий и возможных изменений ИГУ под влиянием техногенеза, отраженные на следующих дополнительных картах, которые, по сути, являются отдельными слоями карты инженерно-геокриологических условий:

- интегральной оценки геологических условий, направленности региональных изменений геологической среды и геологических опасностей;
- оценки устойчивости геологической среды к техно-природным нагрузкам.

В. Вспомогательные карты.

Базы данных инженерно-геокриологической картографической и фактологической информации отражаются на вспомогательных картах.

Работы по составлению инженерно-геокриологических карт масштаба 1:500 000 выполняются, главным образом, при камеральной обработке, анализе и синтезе информации, содержащейся в материалах инженерно-геологических, инженерно-геокриологических, геолого-гидрогеологических, ландшафтных, геоморфологических, геоэкологических и других работ, исследований и изысканий, проведенных ранее на этой территории в мелком и среднем масштабах. Существенные с инженерно-геокриологической точки зрения данные дает гидрометеорологическая информация (температуры воздуха и воды, осадки, ветер, параметры снега), карты лесов, болот, торфяников, землепользования, хозяйственной инфраструктуры, сельского хозяйства.

Все это позволяет детальнее локализовать пространственные и временные особенности состава и свойств горных пород и, в первую очередь, пространственную специфику теплообмена геологической среды с внешними по отношению к ней средами. Выявляемые особенности обычно подчиняются некоторым общим и/или местным закономерностям, увязанным с геолого-географическими данными. Это, в свою очередь, позволяет говорить о существовании на границе раздела литосферы и атмосферы так называемых геосистем (или природно-территориальных комплексов ПТК), которые могут быть типизированы и для которых может быть предложена некоторая иерархия, в том числе для участков, затронутых техногенезом. Свойства таксонов варьируют в некоторых пределах, чем ниже уровень таксона, тем он однороднее. Наличие у таксонов как внутренних свойств (свойств геологической среды), так и внешних (физиономических) признаков допускает широкое использование ДЗЗ — преимущественно посредством ландшафтной индикации. Для масштаба 1:500 000 ландшафтный или геосистемный подход к картированию наиболее эффективен.

Для территорий со сложными ИГУ, низким уровнем комплексной изученности геологической среды, интенсивным характером хозяйственного освоения и, соответственно, мощной существующей и/или планируемой техногенной нагрузкой, следует предусматривать организацию и проведение полевых работ с целью получения уточняющей информации. Наземные работы концентрируются на так называемых ключевых участках, где должна быть получена информация об индикационных возможностях, а также о точности и достоверности индикации тех или иных геокриологических характеристик по физиономическим признакам. Масштаб работ ключевых участков в 5–20 раз крупнее масштаба картирования, закладываются участки общего назначения и специализированные (для совершенствования методики и для изучения уникаль-

ных образований). Количество ключевых участков может быть рассчитано на основании статистических критериев.

7.2.4. Карта инженерно-геокриологических условий

Общая по содержанию синтетическая карта инженерно-геокриологических условий представляет графическую модель пространственного распределения комплекса факторов, определяющих специфику ИГУ на изучаемой территории.

На карте и разрезах должны быть показаны: стратиграфо-генетические комплексы (СГК) пород коренной основы и поверхностных отложений, отраженные на геологических картах третьего поколения — их возраст, стратиграфические границы, инженерно-геологические группы пород, современные природные и техно-природные процессы и явления, специфика тектонических, неотектонических, геоморфологических и гидрогеологических условий, границы сплошного и островного развития многолетнемерзлых пород, территории с фоновой сейсмичностью свыше 5 баллов.

Геологические образования, близкие по составу, генерализуются в инженерно-геологические группы пород, характеризующиеся физико-механическими и прочностными свойствами, типами связи между агрегатами, прочностью, деформируемостью, водопроницаемостью и приуроченностью к ним тех или иных проявлений природных и природно-техногенных процессов. Для криолитозоны принципиально важно выделение границ комплексов, различающихся по характеру распространения массивов многолетнемерзлых пород, температурному режиму, развитию полигонально-жильных и пластовых льдов, а также по степени прерывистости мерзлоты. Необходимо также отражать глубину сезонного промерзания и протаивания.

Карта ИГУ сопровождается инженерно-геокриологическими разрезами — даются в искаженном (укрупненном) вертикальном масштабе с показом всего комплекса геологических, геокриологических и гидрогеологических условий. Детальность отображения площадных объектов 10×10 мм в масштабе карты, ширина линейно-вытянутых объектов — 2 мм в масштабе карты.

Карта ИГУ может составляться как синтетическая и как покомпонентная. ГИС-технология обеспечивает многовариантность представления картографического материала в удобных для потребителя сочетаниях.

Основой и в значительной степени макетом для инженерно-геокриологических карт масштаба 1:500 000 могут служить материалы начавшихся в Гидроспецгеологии в 2020 г. работ по «Созданию комплектов гидрогеологических и инженерно-геологических карт мас-

штаба 1:1 000 000 по группе листов территории Российской Федерации» для территории криолитозоны. К концу 2023 г. составлены и подготовлены к изданию карты листов Q-41 (Воркута) и Q-42 (Салехард) [Дроздов и др., 2022; Адаптация... 2023], на ближайшие годы запланирована подготовка еще нескольких листов по Западной Сибири и Якутии.

На инженерно-геологической карте геокриологическая нагрузка выделена в виде отдельного тематического листа с обособленной легендой и зарамочным оформлением. Картирование геокриологических условий осуществлено на ландшафтной основе и отражает распространение, мощность, температуру и льдистость ММП, талики, криопэги, процессы, тип сезонного промерзания-оттаивания. В такой компоновке тематический лист оказывается несколько перегружен. Поэтому в зарамочном пространстве размещены покомпонентные врезки масштаба 1:2 500 000 для облегчения анализа соответствующих параметров. Приведена также прогнозная (по экстраполяционной методике) карта температуры горных пород на середину XXI в. (рис. 7.8, см. с. XXVI–XXVII цв. вклейки).

7.2.5. Карта инженерно-геокриологического районирования

Для комплекта мелкомасштабных карт инженерно-геокриологической направленности целесообразно применить общее генетико-морфологическое инженерно-геокриологическое районирование. Это общая синтетическая многоцелевая карта, предназначенная для обоснования широкого круга вопросов, связанных с обеспечением безопасности населения и объектов экономики при планировании и проектировании строительного освоения территорий на субрегиональном уровне.

Если не задана целевая функция районирования, то в качестве соответствующей карты может выступать карта геосистем [Методические рекомендации... 1977].

Геосистемы, будучи типизированы по внешним физиономическим особенностям, служат индикаторами определенного комплекса геокриологических условий. Геосистемы ранга ландшафтной провинции индицируют генетические комплексы приповерхностных отложений; ландшафты, выделяемые по принадлежности к геоморфологическим уровням, индицируют стратиграфо-генетические комплексы (СГК); местности, выделяемые по принадлежности к геолого-геоморфологическим областям, индицируют лито-фациальные комплексы; урочища, выделяемые по характерным признакам покровов, индицируют состав пород сезонно-талого и сезонно-мерзлого слоя, распределение

и мощность торфа, а также температуры, влажность, льдистость многолетнемерзлых пород (ММП) [Методические рекомендации... 1977].

Опираясь на этот геосистемный подход, делается следующий принципиальный шаг — геосистемы со всем комплексом присущих им свойств становятся основным объектом изучения и картирования в криолитозоне [Изучение инженерно-геологических... 1992]. Соответственно, карта геосистем становится основной пространственной (плановой) моделью приповерхностной части криогенной толщи [Ландшафты криолитозоны, 1983]. Располагая такой ГИС-картой-моделью, можно построить производные карты любого заданного содержания или по любому заданному параметру, если имеется соответствующая информация о геосистемах.

На базе карты геосистем можно произвести традиционное районирование по типологической, по однородной и двухрядной схемам, в зависимости от сложности инженерно-геокриологических обстановок и характера техногенных трансформаций. Регионы различных порядков выделяются по структурно-тектоническим признакам. Области различных порядков выделяются по геоморфологическим признакам. Районы различных порядков выделяются по составу инженерно-геокриологических комплексов и подрайоны по пораженности проявлениями различных типов и видов ЭГП.

В экспликации к схеме районирования следует предусматривать текущие и прогнозные оценки изменения ИГУ при техногенезе и привести общие рекомендации по мероприятиям, обеспечивающим безопасное освоение.

7.2.6. Карты эколого-геологического районирования

Основой при составлении карты эколого-геологического районирования может служить карта природных геосистем. Для значения всех показателей (характеристик), характеризующих геосистемы выбранного уровня экспертным путем условия ранжируются по уровню сложности (неблагоприятности), например 1 — наиболее простые условия; 5 — наиболее сложные условия. Для каждого типа геосистемы баллы всех показателей по некоторому алгоритму складываются. Получается суммарный балл сложности компонентов инженерно-геологических условий геосистем территории. Суммарным баллам придается изобразительное средство, например «светофорная» раскраска, и в соответствии с ней закрашивается карта [Дроздов и др., 2001]. Набор показателей, исходные баллы и алгоритм суммирования могут зависеть от целевого назначения районирования (рис. 7.9, с. XXVIII–XXIX цв. вклейки).

7.2.7. Схема техногенной нагруженности

Представляются преобладающие виды техногенных объектов; проявления техногенно обусловленных процессов; изменение гидро-геологических условий; оценка геоэкологического состояния территорий; экспертное зонирование по уровню геоэкологической опасности. Для оценки опасности производится двухрядная типизация инженерно-геокриологических обстановок, при которой совместно оцениваются:

- природные факторы устойчивости массивов горных пород (состав, состояние и свойства, сейсмичность, энергетика рельефа, пораженность, наличие ослабленных зон, характер увлажнения и обводненности, геокриологические особенности);
- характер и интенсивность существующих и ожидаемых природно-техногенных трансформаций без дополнительного увлажнения, при подтоплении и при изменении уровня режима; дифференцированно рассматриваются статические и динамические нагрузки, пригрузки, разгрузки, изменение и колебание уровня режима, размывы и аккумуляция, тепловое загрязнение и пр.

Ячейкам таблицы приписываются категории опасности (например, по «светофорному» принципу), и с привязкой к геосистемам закрашивается карта.

При картировании в более крупном масштабе могут быть оконтурены небольшие по площади техногенные образования, связанные точечными и линейными инженерными объектами. Их многообразие существенно. Будучи наложенным на крупномасштабную ландшафтную карту, многообразие этих изменений еще больше (однотипные изменения на разных ПТК). Изменения разного рода накладываются друг на друга и на разнотипные ландшафты, что дополнительно умножает варианты техногенеза.

Примером может служить карта масштаба 1:25 000 природных и техногенных геосистем окрестностей одного из наиболее рационально обустроенных участков Уренгойского месторождения. Всего здесь насчитывается 75 разновидностей нарушений, причем суммарная площадь, затронутая линейным техногенезом (дороги, трубопроводы и зоны их влияния) ~5,5%, а площадным (сооружения, карьеры) ~1,5% (рис. 7.10, с. XXX цв. вклейки).

Анализ наиболее интенсивно освоенных участков (за исключением городских территорий) показал, что при визуальной оцениваемой весьма сильной техногенной пораженности территорий реальные площади нарушений составляют до 10% территории (на примере площадки УКПГ-12, табл. 7.2).

Таблица 7.2.

**Нарушенность территории, прилегающей к УКПГ-12 Уренгойского
НГКМ, всеми видами техногенеза**

Ландшафтная подзона, ландшафт, местность	Тип урочища или комплекс урочищ	Площадь, занимаемая типом урочища, км ² , S _{ПТК}	Процент нарушения по- верхности дорогами, %	Процент нарушения поверхности трубопрово- дами, %	Процент площадных нарушений поверхности отсыпками, %	Процент площадных нарушений поверхности карьерами, %	Сумма нарушений, %
СЛТ:0а: А	2г	2,00	0,96	1,53		3,99	6,48
	6а, 2г и 6б	0,79	2,55	1,03		0,00	3,58
СЛТ: IIIа: В	2в	0,24	1,27	0,60		0,38	2,25
	3г	0,16		5,75		7,78	13,53
	6а	2,16	2,19	1,26		1,22	4,67
	6в	0,27	7,17				7,17
	6е	1,08	3,85	9,92		5,19	18,96
СЛТ: IVм: Е	1б, 6в	3,61	4,84	1,42	0,48	6,01	12,75
	1б, 6е	1,04	5,05			5,20	10,25
	2в	1,40	1,77	1,33			3,10
	3б	1,02	9,10	0,67			9,77
	3г	1,46	6,51		0,53	0,12	7,16
	4д	1,40	2,03				2,03
	6а	0,98	1,03	0,95	0,005		1,98
	6в и 6д, 6г	0,80	7,85	0,66			8,510
	6е	15,54	3,88	2,75	2,05	0,88	9,56
	6з	11,69	2,19	1,96	1,16	0,69	6,00
	6з, 3г	2,74	6,16	2,43	2,65	0	11,24
	6н	0,12	3,43	8,33			11,76
Все ПТК		48,47	3,56	2,15	1,19	0,45	7,35

Техногенные объекты оказывают свое влияние на фоне природного повышения температуры ММП. В некоторых случаях оно весьма существенно. В непосредственной близости от сооружений температура по-

род повышается на 1–2 °С и более относительно фона, достигая +0,2...+0,5 °С на лесных и –0,3...–0,8 °С на тундровых участках.

Заметное повышение температуры пород отмечается в карьерах, у обваловок газопровода, в приграничных частях отсыпок на кустах газодобывающих скважин, т.е. там, где существуют благоприятные условия для снегонакопления. Температура ММП варьирует в этих условиях от –0,3 °С в южной лесотундре до –0,7 °С, а в северной до –2,6 °С в северной.

Мало отличаются от фоновых температуры ММП в пределах отсыпок дорог и площадок на кустах эксплуатационных скважин. На насыпях, проложенных через болота и ровные тундровые участки, температура практически равна фоновой. Наиболее повышенная температура отмечается на участках переходов через лога (–1,1 °С) и в пределах бугристых тундр (–1,1...–1,8 °С).

Помимо изменений температуры ММП вблизи инженерных объектов в результате хозяйственной деятельности на территории Уренгойского месторождения произошла также активизация ряда экзогенных процессов как криогенного, так и некриогенного ряда: дефляции, эрозии и термоэрозии, термокарста, заболачивания и подтопления. Основные причины активизации — нарушение естественных покровов, изменение рельефа, нарушение стока поверхностных и грунтовых вод.

Наибольшее развитие на осваиваемой площади получила дефляция. Большинство современных песчаных раздувов приурочено к карьерам, дорогам и кустам скважин. Их размеры 0,1–6 км. Второе место по интенсивности занимают техногенное заболачивание и затопление. Дорожные насыпи и обваловки трубопроводов перехватывают поверхностный и грунтовый сток даже в незначительных, морфологически практически невыраженных понижениях, приводя к образованию болот и узких вытянутых озер.

Нарушение теплообмена при снятии почвенно-растительного покрова активизирует термокарст. Широко развиты две его формы: а) термокарстовые западины, озерки; б) «четкообразный дренаж» (термокарст по руслу ручьев). Очагами активизации являются вездеходные колеи, зимники, опоры ЛЭП, траншеи и т.д.

Резкая активизация эрозии связана с прокладкой дорог, зимников, трубопроводов, а также с эксплуатацией карьеров. Появляется она преимущественно в возникновении и очень быстром росте молодых оврагов в прибровочных частях террас и в бортах долин малых рек за счет сосредоточения поверхностного стока. Если поверхностный сток концентрируется в пределах полигональных торфяников, то эрозионный процесс дополняется термоэрозией.

7.2.8. Карты ландшафтного и геокриологического районирования в масштабе 1:500 000

Отсутствие в настоящее время практики опережающих наземных исследований геокриологических условий осваиваемых районов криолитозоны требует тщательного выявления существующих и прогноза вероятных опасностей в пределах этих районов. Одним из путей решения подобных задач является ландшафтное и последующее геокриологическое районирование осваиваемых территорий. При этом надо отметить, что достоверность ландшафтной индикации геокриологических условий по ландшафтным признакам возможна лишь на основе знания специалистами общих и частных закономерностей формирования и динамики различных компонентов геокриологических условий региона и района картографирования. Иными словами, специалисты должны иметь определенный опыт работы в конкретном регионе.

Различаются два принципа районирования: индивидуальное и типологическое. При индивидуальном районировании территория разделяется на части, различающиеся по комплексу признаков районирования (например, по геолого-тектоническим структурам или морфоструктурам I порядка, т.е. макрорельефу). При типологическом районировании выделяются районы, территориально разобщенные, но характеризующиеся общими признаками, выбранными за основу районирования. Типологическому районированию должны предшествовать таксономия — выявление иерархии объектов — и классификация — разделение объектов одного ранга на группы, однородные по какому-либо признаку или ряду признаков.

Еще в начале 50-х гг. прошлого столетия В. А. Кудрявцев отмечал, что «микрорайонирование» является основным методом мерзлотной съемки. По определению В. А. Кудрявцева, «под районированием территории многолетнемерзлых пород понимается разделение ее на части, в пределах которых качественные и количественные характеристики мерзлых толщ, являющиеся признаками районирования, одинаковы и отличаются от подобных характеристик других выделенных частей [Общее мерзлотоведение... 1978].

В 60-х гг. метод районирования стал широко использоваться при региональном изучении криолитозоны Западной Сибири различными научными организациями, проводившими полевые съемочные работы (ВСЕГИНГЕО, ПНИИС, ЮЖНИИгипрогаз, МГУ, НИИОСП, ВНИИСТ, Фундаментпроект и др.).

Параллельно с ландшафтным районированием разрабатывались методические основы геокриологического районирования криолитозоны, которое должно сводиться к расчленению ее на участки, различаю-

щиеся условиями тепломассообмена горных пород с атмосферой и литосферой и, как следствие, комплексом геокриологических условий, а также реакцией геологической среды на техногенные воздействия. При этом территориально разобщенные участки, характеризующиеся близкими условиями тепломассообмена, оказываются подобными как в геокриологическом, так и в эколого-геологическом отношении.

Многолетние геокриологические исследования, проводившиеся ВСЕГИНГЕО в разных районах Западной Сибири, позволили выявить устойчивую связь комплекса геокриологических условий с ландшафтными типами местностей и урочищ и разработать принципы и методику типизации мерзлых толщ разного ранга. Было установлено, что наиболее тесная связь комплекса геокриологических условий с ландшафтным строением территории характерна для ПТК в ранге типов местностей [Крицук и др., 2003].

Местности представляют собой своеобразные морфоструктуры, сформировавшиеся за счет дифференцированных неотектонических движений блоков фундамента и платформенного чехла и комплекса криогенных и посткриогенных процессов. Местности разных типов имеют четкие дешифровочные признаки (характер и степень эрозионного расчленения рельефа), обычно разделены между собой разрывными неотектоническими нарушениями, освоенными речной или озерной сетью, и поэтому выделение их на фото- и космоснимках разного масштаба не представляет собой особого труда и имеет объективный характер. К тому же разные местности характеризуются различными морфогенетическими типами озер (или их комплексами). По характеру микро-рельефа, дренированности земной поверхности, растительного покрова, состава грунтов верхней части геологического разреза и др. местности разделяются на составные ландшафтные части — урочища. Различные местности и их физиономические части, очевидно, характеризуются специфическими геокриологическими условиями и потому могут быть использованы при составлении разномасштабных карт геокриологического районирования.

Типы мерзлых толщ являются главным элементом районирования на карте геокриологического районирования, несущим основную геокриологическую нагрузку, как текстовую (в таблице-экспликации), так и значковую на карте (в контурном окрасе и условных знаках — сведения о подземных льдах, типах берегов и основных криогенных процессах). Они характеризуются закономерным сочетанием основных геокриологических характеристик и близкой реакцией на техногенные воздействия. Типы мерзлых толщ генетически связаны с элементами геокриологического районирования более высокого ранга. Типы мерзлых толщ показываются на картах специальными знаками в цветовой гамме соот-

ветствующего уровня. На составленных картах в выборе знаков для различных типов мерзлых толщ был заложен генетический смысл. Так, холмистые (линейно-эрозионные) типы показаны различной линейной штриховкой, тогда как типы местностей озерного расчленения — различным «горохом». Подобный выбор изобразительных средств оказался весьма наглядным, позволяющим легко ориентироваться в особенностях ландшафтного строения и геокриологических условий любого участка картируемой территории.

Первым удачным опытом применения разработанной методики геокриологического районирования явилось составление в 1990 г. на основе ландшафтной карты типов местностей обзорной «Карты природных комплексов севера Западной Сибири для целей геокриологического прогноза и планирования природоохранных мероприятий при массовом строительстве (масштаб 1:1 000 000)». На этой карте впервые в истории геокриологического картографирования удалось схематически отразить не только зональные, но и региональные особенности геокриологических условий столь большой территории с достаточно высокой степенью объективности, определявшейся уровнем их знания на период составления и масштабом карты.

Составные части местностей урочища являются минимальным таксоном (на средне- и крупномасштабных картах), выделяемым на ландшафтных картах. Они различаются характером рельефа, его дренированностью, набором растительных и почвенных покровов, составом пород сезонно-талого слоя, их влажностью и, как следствие, геокриологическими условиями: глубиной сезонного промерзания-протаивания, составом и льдистостью ММП, их температурой и криогенными процессами. Вследствие этого ПТК в ранге урочищ позволяют индизировать части типов мерзлой толщи — подтипы мерзлой толщи (или криолитологические разрезы).

Таким образом ПТК представляют собой комплексные ландшафтные индикаторы геокриологических условий, которые для определения скрытых внутренних компонентов используют несколько совместно взятых внешних компонентов ПТК или всю их совокупность. Глубина геокриологической индикации зависит от размера ПТК и изменяется от нескольких метров до 10–15 м (для ПТК в ранге урочищ) и до нескольких десятков метров (для ПТК в ранге типов местностей).

Криогенные явления выступают прямыми индикаторами криогенных процессов (происходивших в прошлом или происходящих в настоящее время). Они хорошо дешифрируются на АФС и КС высокого разрешения. О динамике этих процессов можно судить путем повторного дешифрирования АФС и КС.

Разномасштабные карты геокриологического районирования сопровождаются условными знаками и (в зарамочном оформлении) таблицами-

экспликациями, в которых отражены в числовом выражении основные компоненты геокриологических условий для всех типов и видов мерзлых толщ, отраженных на картах. Кроме того, карты геокриологического районирования сопровождаются пояснительными записками.

В табл. 7.3 приведен перечень основных компонентов геокриологических условий, отражаемых на разномасштабных картах геокриологического районирования.

Таблица 7.3.

**Перечень компонентов геокриологических условий
для карт разного масштаба (по А. И. Попову)**

Типы и масштаб карт	Типы морфоструктур (элементы рельефа)	Основной элемент геокриологического картографирования	Основные компоненты ГУ, отражаемые на картах районирования и в таблицах-экспликациях
Обзорные ≤ 1:1 000 000	Крупные морфоструктуры (геоморфологические уровни; группы типов местностей)	Группы типов мерзлых толщ	Региональные и зональные особенности ММП
Мелкомасштабные 1:500 000—1:200 000	Средние морфоструктуры (типы местностей, иногда — подтипы местностей)	Типы мерзлых толщ (иногда — подтипы мерзлых толщ)	Распространение с поверхности, прерывистость и мощность ММП; их состав, криогенное строение и льдистость; интервальные значения среднегодовых температур; специфика гидрогеологических условий; комплексы криогенных процессов
Среднемасштабные 1:100 000—1:50 000	1. Типы и подтипы местностей. 2. Отдельные урочища	1. Типы и подтипы мерзлых толщ. 2. Экстремальные типы криогенных разрезов	1. То же. 2. Участки близкого к поверхности залегания мощных залегающих льдов и активного проявления комплекса опасных криогенных процессов
Крупномасштабные 1:25 000 и крупнее	1. Подтипы местностей. 2. Доминантные урочища	1. Подтипы мерзлых толщ. 2. Типы криогенных разрезов	1. То же. 2. Состав пород СТС и СМС; их влажность и льдистость; температура ММП; макроледяные включения; ведущий криогенный процесс

По сравнению с другими видами карт цифровые карты геокриологического районирования, составленные по данной методике, наиболее предпочтительны для интегральной оценки состояния криолитозоны, разработки сценариев геокриологического прогноза и отражения вариаций прогнозных оценок. Выраженность в рельефе разнопорядковых морфоструктур является методической основой использования при районировании и картографировании территории криолитозоны материалов дистанционного зондирования Земли.

В настоящее время космические снимки являются основой при составлении ландшафтно-индикационных и геокриологических карт разного масштаба. Облик различных типов местностей полуострова Ямал с КС Landsat иллюстрирует рис. 7.11 (см. с. XXX цв. вклейки).

Здесь на космических снимках Landsat по характеру эрозионного расчленения рельефа, степени и типу заозеренности четко выделяются ПТК в ранге типов местностей, которые являются индикатором комплекса геокриологических условий (состава и льдистости грунтов, интервальных значений глубины сезонного протаивания мерзлых пород и промерзания талых, среднегодовой температуры ММП и гидрогеологических особенностей, а также комплекса криогенных процессов).

Ниже приведен пример таблицы-экспликации, составленной для «Карты геокриологического районирования полуострова Ямал в масштабе 1:500 000 (табл. 7.4).

Карты геокриологического районирования, составленные на основе вышеизложенных принципов, отражают основные закономерности формирования и пространственной изменчивости ведущих компонентов геокриологических условий картируемой территории. Карты являются синтетическими, поскольку в элементах картографирования заключены практически все компоненты геокриологических условий верхней части геологического разреза (от 10–20 м для средне- и крупномасштабных до глубины вреза гидросети для мелкомасштабных карт). Наличие материалов глубокого бурения увеличивает глубину изучения геологического разреза.

Карты геокриологического районирования, составленные на основе типизации территории по условиям тепломассообмена литосферы с атмосферой и гидросферой, позволяют судить о зональной и региональной изменчивости геокриологических условий; экстраполировать разрозненные данные наземных исследований (проводившихся в разные годы в различных частях криолитозоны) на еще не освоенные районы; прогнозировать динамику криогенных процессов в природных и техногенных условиях, оценивать степень устойчивости геологической среды при проектировании различных природно-технических си-

Таблица 7.4.
Геокринологическая характеристика типов местностей полуострова Ямал (типы мерзлых толщ)

Ландшафтная характеристика типов местности <i>(геокринологических участков)</i>	Тип мерзлой толщи	Геокринологические условия						Ведущие экзогенные (криогенные) процессы	Гидрогеологические особенности
		Распространение ММП и их мощность	Состав поверхностных отложений	Льдистость ММП	Подземные льды	Температура ММП (t, °C)	Мощность CTC (м)		
Плоские низкие поверхности: Лайда ²	Лайдовый Л 	75–100 (3–10 — верхнего слоя)	Засоленные илистые пески и суглинки; на высокой лайде местами маломощный торф	Льдистые (0,2–0,4)	На торфяниках редкие полигонально-жильные льды (ПЖЛ)	–5...–7	0,3 (в торфе); 0,6–0,8 (в песке)	Заболочивание; засоление почвы и грунтов	Напорные криоплэги на гл. от 3–4 м до 7–10 м; УГВ 1–5 м (M = 75–100 г/л)
Пойма ²	Пойменный П 	$\frac{75 - 85}{250 - 250}$	Пески р/з с линзами супесей, суглинков, на суглинках; местами торф	Льдистые (> 0,2)	ПЖЛ; линзы в буграх пучения; ЗПЛ на абс. отм. +8...–30 м (в тыловой части поймы)	–3,0...–7,0	0,3–0,9	Термокарст; многолетнее пучение, озерное наледообразование	Криоплэги (на разной глубине от 8–10 м до 120–180 м (3–49 г/л)
Водораздельные поверхности 1. Озерное расчленение рельефа: Озерно-котловинные . Плоские расчлененные поверхности, и волнистые поверхности, расчлененные многочисленными круглыми глубоокотловинными озерами, с редкой эрозионной сетью, с песчаными раздувами (встречаются на всех уровнях; характерны для III–IV террас)	Террасовые A_в 	$\frac{70 - 80}{250 - 350}$	Пески, подстилаемые глинами и суглинками, локально перекрытые маломощным торфом	Слабодистые и льдистые (0,2–0,4)	ЗПЛ (линзообразные и жильные) вокруг озер и в днищах логов; ПЖЛ в торфяниках. Мощные ледяные пласты возможны на гл. > 50 м	–5,0...–7,0	0,5–1,2	Термоэрозия, дефляция	Воды глубоких подозерных таликов (ВПТ); внутримерзлотные криоплэги

Ландшафтная характеристика типов местности <i>(геокриологических участков)</i>	Геокриологические условия							Тип мерзлой толщи
	Распространение ММП и их мощность	Состав поверхностных отложений	Льдистость ММП	Подземные льды	Температура ММП (t, °C)	Мощность CTC (м)	Ведущие экзо- генные (криоген- ные) процессы	
Волнистые и мелко-холмистые поверхности, расчлененные озерными котловинами и раз- реженной эрозионной сетью (фрагменты на IV равнине)	$\frac{80 - 85}{300 - 350}$	Супеси и суглинки, местами перекрытые песками	Льдистые ($> 0,4$)	ПЖЛ в торфяни- ках; ЗПЛ возмож- ны на большой глубине	$-5,0 \dots$ $-7,0$	$0,3 - 1,0$	Заболо- чивание; солифлюк- ция	То же
Озерно-болотные Плоские нерасчлененные (и сла- борасчлененные ложбинами стока с глубиной вреза до 1,5–2 м) по- верхности равнин и террас, преобладают на низких уровнях, фрагментами на IV равнине	$\frac{90 - 100}{300 - 350}$	Заторфо- ванные пески, супеси и суглинки под слоем торфа разной мощности	Льдистые, сильнольдистые ($> 0,4$)	ПЖЛ в торфя- никах	$< -5,0$	$0,3 - 0,8$	Термокарст по ПЖЛ; заболо- чивание, сезонное пучение	Таликовые воды под круп- ными озерами; внутримерзлот- ные криоплати
Хасырейные Плоские поверхности террас, расчлененные многочисленны- ми разновозрастными хасыре- ями, озерными котловинами и логами; с полигональными тундрами и песчаными раздува- ми между озерами (характерны для I–II террас; встречаются на всех уровнях, кроме лаиды)	$\frac{80 - 90}{300 - 350}$	Пески на гли- нах и суглин- ках (с линзами торфа)	Слабольшдистые ($< 0,2$)	Широкое разви- тие подземных льдов (жильных, линзобразных и пластовых) в днщцах логов и мелких долин, в буграх пучения и под песчаными раздувами	$-1,0 \dots$ $-3,0$ (в мо- лодых хасыреях)	$0,5 - 1,0$	Криогенное растрески- вание; тер- мозрозия; в днщцах хасыреев — промора- живание таликов; многолет- ное пучение	Криопатги в днщцах логов и хасыреев; внутримерзлот- ные криоплати

2. Озерно-линейное расчленение: Ложбино-долинные. Наклонные и волнистые поверхности террас, расчлененные оврагами, логами и долинами мелких рек с глубокой врезкой 3–10 м, нередко с песчаными раздувами (характерны для III террасы, встречаются на II и на IV равнине)	Придолинные Γ_a 	$\frac{> 95}{300}$	Пески на глинах и суглинках	Пески льдистые (0,2–0,4); глины (суглинки) слабольдистые	Широко развиты подземные льды: (линзы, жилы) в песках; пласты с глинами разной мощности	–5,0... –8,0 (в логах 1–1,5 (на во- доразделах))	0,5 (в логах); 1–1,5 (на во- доразделах)	Дефляция, термозрозия; забо- лачивание в логах	В логах криопэги
Плоские и слабонаклонные поверхности центральных частей водоразделов с разрезанной сетью долин ручьев и логов, слабо заболоченные (IV равнина)	Γ_6 	$\frac{100}{300}$	Супеси и суглинки, за- торфованные на песках	Льдистые (> 0,4)	ПЖЛ; ЗПЛ отсутствуют или глубоко залегают	< –5,0	0,5–0,8	Заболачивание; термозрозия; сезонное пучение	–
Слабонаклонные поверхности террас, расчлененные неглубокой сетью долин мелких рек и ручьев, с фрагментами болот, с редкими плоскими хасырями, мелкими озерами (встречаются на всех террасах Ямала)	Γ_s 	$\frac{> 95}{250 - 300}$	Пески разной мощности с прослоями супеси и суглинка, на заболоченной поверхности линзы торфа	Слабодистые и льдистые	ПЖЛ	< –5,0	0,5 (в логах); 0,8–1,2 (на во- доразделах)	Дефляция, термозрозия	В логах и долинах возможны криопэги
3. Линейное расчленение рельефа: Мелко-холмистые. Поверхности с мелкими холмами, дробно расчлененные логами, глубиной до 10–15 м, с мелкими четко-видными озерами в днищах, с солфлюкционными террасками и сплывинами по склонам (характерны для III и IV террас)	Водо-раздельные E 	$\frac{> 95}{200 - 400}$	Супесчано-суглинистые отложения	Сильнольдистые в логах и в СТС (> 0,4) на холмах; ниже слабольдистые	Малоомощные линзы льдогунтов или ЗПЛ в логах среди торфяников	От –1,5... –2,0 (в днищах логов) до –4,5... –7,0 (на холмах)	0,3–0,5 (в логах); 0,8–1,2 (на во- доразделах)	Термозрозия, солфлюк-ция	В логах возможны криопэги

стем и осуществлять гидрогеологическое и геоэкологическое районирование и картографирование в любом масштабе.

Научно-методические основы геокриологической типизации территории были разработаны для криолитозоны Западной Сибири. Однако они с успехом могут быть использованы для других низменных районов криолитозоны (Европейский Север, приморские низменности Восточно-Сибирской платформы, Лено-Вилуйская низменность и др.). Однако при составлении объективных таблиц-экспликаций для средне- и крупномасштабных карт необходимо иметь результаты заверочного наземного исследования района съемки с определением состава и льдистости поверхностных отложений, их мощности и температуры.

7.2.9. ГИС-ориентированная карта районирования криолитозоны масштаба 1:8 000 000 для выбора объектов геокриологического мониторинга

Адаптация и актуализация топоосновы. Для составления «Карты геокриологического районирования криолитозоны...» необходимо было провести анализ опубликованных картографических материалов и привязать их к топооснове масштаба 1:8 000 000. Затем привести все электронные карты к единой картографической проекции версии Arc Gis'a. Для этого необходима адаптированная топооснова рабочего масштаба (1:8 000 000) со всеми необходимыми картографическими слоями: рельефом, гидросетью, озерами, границами административного деления РФ и границами береговой линии.

Адаптации к необходимому масштабу подверглась топооснова масштаба 1:2 500 000. С этой целью с топоосновы масштаба 1:2 500 000 были удалены реки III и IV порядков, большая часть озер и оставлена разреженная сеть абсолютных отметок, наиболее крупные города и районные центры.

Разработка информационной структуры карты, состава показателей. Основной целью составления мелкомасштабной карты геокриологического районирования является разделение территории по ведущим региональным и зональным факторам теплообмена горных пород с атмосферой, определяющим условия формирования и существования многолетнемерзлых пород и обуславливающим наиболее характерные и специфические особенности геокриологической обстановки на обширных территориях крупных регионов. Поскольку в пределах одной природно-климатической зоны специфика геокриологических условий определяется геолого-структурными и неотектоническими особенностями территории, то основными принципами составления подобной карты должны являться морфоструктурный и ландшафтно-индикационный методы исследования.

В соответствии с возможностями картографирования в заданном масштабе на карте геокриологического районирования выделены регионы трех порядков, что позволит охарактеризовать основные особенности ГУ с достаточной для данного масштаба степенью вероятности.

РЕГИОНЫ I порядка выделены по геолого-структурному принципу на основе анализа и использования опубликованных геолого-структурных карт мелкого масштаба (1:2 500 000—1:25 000 000). Выделено 11 регионов I порядка.

РЕГИОНЫ II порядка выделены по крупным морфоструктурам (т.е. выраженным в рельефе новейшим структурам). Для выделения этих морфоструктур были использованы разномасштабные неотектонические карты и схемы разных районов криолитозоны. Перечень их дается в таблице-экспликации. Всего выделено 58 регионов II порядка.

РЕГИОНЫ III порядка выделены по типу расчленения и абсолютным отметкам рельефа в пределах регионов II порядка. Всего выделено 13 типов регионов III порядка.

Разработка архитектуры ГИС и легенды карты. В композиции карты использовано 4 основных слоя (гидрография, рельеф, береговая линия, границы) и базы данных. Используются все топологические типы слоев: точечные, линейные, полигональные и растровые. Все слои приведены в единую систему координат.

Формирование базы данных и составление покомпонентных карт. Первоначально была составлена ландшафтно-индикационная карта масштаба 1:1 000 000, а затем на ее основе выполнены покомпонентные карты районирования криолитозоны России в масштабе 1:8 000 000. На этих картах отражены элементы геокриологического районирования криолитозоны России всех четырех уровней, предусмотренных легендой (зоны, области, районы, подрайоны), элементы техногенеза и геологические опасности. Вспомогательные карты комплекта в масштабе 1:8 000 000 включают:

- а) Карту геолого-тектонического районирования криолитозоны России;
- б) Карту морфоструктурно-геокриологического районирования криолитозоны России с объектами метеорологических и мерзлотных наблюдений;
- в) Карту полезных ископаемых;
- г) Карту криогенных (экзогенных) процессов криолитозоны.

На основной карте «Карта районирования криолитозоны масштаба 1:8 000 000 для выбора объектов геокриологического мониторинга» главное изобразительное средство — цвет — отдан регионам III порядка, которые по сути дела представляют собой группы типов

мерзлых толщ. Они характеризуются (в пределах одного региона I порядка и одной природно-климатической зоны) закономерным сочетанием интервальных значений основных компонентов геокриологических и гидрогеологических условий. Особенности геологического строения земной коры и ее дифференцированные (по знаку и скорости) неотектонические движения, а также связанные с ними особенности палео- и современных гидрогеологических условий и криогенного строения территории, обусловили своеобразие распределения по площади геокриологических подрайонов (групп типов мерзлых толщ) в пределах морфоструктур более крупного ранга.

7.3. Обоснование размещения наблюдательной сети мониторинга в Арктической зоне

7.3.1. Принципы размещения и выбор перспективных территорий для геокриологических полигонов

Согласно изложенной Концепции мониторинга вечной мерзлоты основу получения исходной информации должны составить наблюдения и исследования на геокриологических полигонах. При этом в рамках целевого направления работ решаются три главные задачи:

- проведение фонового мониторинга для оценки влияния изменений климата на тепловое состояние мерзлых толщ и развитие криогенных процессов в ненарушенной природной обстановке. На площади полигона фоновый мониторинг проводится за счет бюджетного финансирования на:
 - *геокриологических стационарах;*
 - *региональных профилях опорных инженерно-геокриологических и гидрогеологических скважин и площадках периодического обследования;*
- проведение геотехнического мониторинга для оценки влияния техногенеза на состояние мерзлых толщ и развитие криогенных процессов в условиях меняющегося климата. На площади полигона геотехнический мониторинг проводится на:
 - *территории городских и муниципальных агломераций силами мерзлотных станций за счет бюджетных средств и софинансирования Минстрой и ЖКХ;*
 - *территории недропользователей и собственников промышленных предприятий за счет собственных средств своими силами или по найму с учетом технических (геологических) заданий в рамках лицензий на право пользования недрами в границах горных, земельных и иных отводов;*

- проведение комплексной экспресс-съемки инженерно-геокриологического содержания и картирования территории полигона в масштабе 1:500 000. Это необходимо выполнить с целью доизучения геокриологических и гидрогеологических условий полигона как основы для экстраполяции мониторинговых данных и создания его теплофизической модели для прогнозных оценок.

В основу выбора мест расположения наблюдательной сети положены определенные принципы, главными из которых следует считать:

- перспективное экономическое развитие региона;
- типичность геокриологических условий и наличие рисков освоения региона, обусловленных состоянием многолетнемерзлых толщ различного типа;
- наличие предшествующих мерзлотных наблюдений и исследований, включая режимные наблюдения на мерзлотных станциях, стационарах и пр.;
- относительную доступность изучаемой территории, близость населенных пунктов и гидрометеорологических станций;
- необходимость составления карт геокриологического, инженерно-геологического и гидрогеологического содержания территории.

По совокупности задач перспективного экономического развития регионов Арктики и проблем устойчивости и реакции мерзлых толщ на климатические изменения система проектируемого государственного мониторинга должна охватывать все регионы Арктической зоны, включая Европейский Север, Западную Сибирь, Восточную Сибирь и Чукотку. Это хорошо коррелирует с планом создания зон опережающего экономического развития АЗРФ, утвержденного в 2013 г. в соответствии со «Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». К этим зонам относятся: Кольская, Архангельская, Ненецкая, Воркутинская, Ямало-Ненецкая, Таймыр-Туруханская, Северо-Якутская, Чукотская (рис. 7.12).

Из восьми приведенных выше крупных регионов, за исключением Архангельской и частично Мурманской областей, на остальной территории Арктики проблемы с вечной мерзлотой для безопасного освоения и экономического развития в условиях меняющегося климата имеют первостепенное значение. Дополнительным отягощающим эти проблемы моментом является слабая изученность региональных геокриологических, инженерно-геологических и гидрогеологических условий этих территорий в необходимых масштабах, а также отсутствие утвержденных планов выполнения геолого-съемочных работ и картирования по этому направлению.



Рис. 7.12. Опорные зоны экономического развития Российской Арктики

В связи с этим доизучение и составление карт геокриологического содержания на территорию проектируемых полигонов является одной из приоритетных задач создаваемой государственной системы мониторинга криолитозоны Арктики. Представляется, что с учетом природных сложностей Арктики для проведения геолого-съёмочных работ (удаленность и труднодоступность территории, отсутствие дорог и т.п.) оптимальным для картирования территории полигонов будет масштаб 1:500 000, с дополнительными, при необходимости, картами-врезками более крупного масштаба.

Проектируемые полигоны расположены во всех регионах опережающего экономического развития АЗРФ, начиная с европейской части и заканчивая Чукоткой. Наибольшее число полигонов приходится на север Западной и Восточной Сибири, где расположены многочисленные объекты недропользования, обогатительной и обрабатывающей промышленности, а также магистральные коридоры транспортировки углеводородного сырья.

При выборе мест размещения полигонов учтены предшествующие мерзлотные наблюдения и исследования, выполненные в различное время научно-исследовательскими институтами и отраслевыми предприятиями. Приняты во внимание необходимость доступности изучаемой территории, близость населенных пунктов и гидрометеорологических станций. Практически для всех территорий полигонов необходимо составление карт геокриологического, инженерно-геологического и гидрогеологического содержания.

С учетом материалов и карт размещения крупных месторождений полезных ископаемых, зон опережающего экономического развития, геокриологических карт масштабов 1:2 500 000—1:8 000 000 и климатиче-

ского районирования Арктической зоны было выбрано 15 геокриологических полигонов, размещенных на соответствующих картографических материалах (рис. 7.13–7.16, см. с. XXXII–XXXVIII цв. вклейки).

7.3.2. Полигон Печорский, лист: R-40-B6

Европейская территория России. В административном отношении — Ненецкий автономный округ. Природная подзона южной тундры. Область сплошного распространения ММП на водоразделах и редкоостровного распространения ММП в дельте р. Печора. Талики подозерные и подрусловые несквозного типа, в пойме р. Печора — сквозные. Установлено наличие субмаринной мерзлоты на предельном мелководье Печорской губы (бассейн Баренцева моря).

Мощность криолитозоны изменяется от 200 м на прибрежных террасах до 400 м на высоких водораздельных территориях. В разрезе мерзлых толщ повсеместно присутствуют криопэги. Температура пород на глубине годовых теплооборотов варьирует от $-0,5$ до -2 °С. Глубина сезонного протаивания в естественных условиях изменяется от 0,7 м в торфе до 1,6–2 м в минеральных грунтах.

Территория полигона представляет собой холмисто-увалистую равнину с обилием озер. Абсолютные отметки изменяются от 15 до 35 м. Генетические типы отложений представлены четвертичными ледово-морскими или морскими отложениями, преимущественно супесчано-суглинистого, реже песчаного состава. Породы содержат довольно значительное количество крупнообломочных включений — от гравийно-галечниковых до валунных. Мощность четвертичных отложений колеблется от нескольких метров до нескольких сотен метров. С поверхности отложения перекрыты прерывистым маломощным (меньше 0,5 м) торфом. Большие мощности торфа (1–5 м) характерны для болот, развитых в озерных котловинах в межхолмовых понижениях на водоразделах. Криогенные текстуры — массивная и линзовидная в песках и супесях, слоистая и сетчатая в суглинках, линзовидно-слоистая и микрошлировая в торфе. Криогенные процессы имеют широкое распространение на территории округа и играют существенную роль в формировании современного облика рельефа. Наиболее широко развиты морозобойное растрескивание, термоэрозия, термокарст, реже распространены солифлюкция и пучение.

Повсеместно развиты надмерзлотные подземные воды сезонно-талого слоя, которые полностью промерзают зимой. Реже встречаются надмерзлотные воды несквозных таликов (подозерных, подрусловых). Водопором надмерзлотных вод является кровля мерзлоты. Воды преимущественно пресные, гидрокарбонатные, в подозерных замкнутых таликах часто сильно обогащены органическим веществом. Минерализация, как правило, не превышает 0,1 г/л.

На территории проектируемого полигона распространены практически не нарушенные криогенные тундровые ландшафты, встречаются единичные колеи вездеходного транспорта в стадии зарастания. В непосредственной близости от полигона, в 40 км к востоку, в аналогичных природных и геокриологических условиях расположена территория крупного Южно-Хыльчюусского НГМ, которое в настоящее время разрабатывается. Надежная и безаварийная работа инженерных сооружений и инфраструктуры на территории месторождения связана во многом с устойчивостью толщи ММП. Геокриологический мониторинг на полигоне Болванский может быть полезен для сравнительной оценки характеристик мерзлых толщ и их динамики в естественных и техногенно нарушенных (антропогенно нарушенных) условиях.

Региональные карты геокриологического содержания для оценки изменения состояния криолитозоны отсутствуют, а имеющиеся картографические материалы устарели.

Территория полигона Болванский была обеспечена гидрометеорологической информацией до 1997 г., пока функционировала метеостанция Болванский. Ближайшая действующая метеостанция «Мыс Константиновский» расположена в 50 км к СВ, также в прибрежной зоне Печорской губы.

Организация геокриологического полигона здесь представляется актуальной (рис. 7.17).



Рис. 7.17. Общий вид на мыс Болванский и территорию полигона. Фото с квадрокоптера, 2018 г.

7.3.3. Полигон Воркутинский, лист: R-41, 3-4

Воркутинский мерзлотно-гидрогеологический полигон находится на северо-востоке европейской части РФ на территории Республики Коми за Полярным кругом, в Воркутинском промышленном районе. Работы на полигоне ведутся с 60–70-х гг. прошлого столетия.

Полигон представляет собой совокупность участков: на одних участках наблюдения выполняются по государственной программе (за счет средств федерального бюджета), на других — по программе геотехнического мониторинга недропользователями на собственные средства.

В настоящее время фоновый мониторинг состояния недр (ГМСН) осуществляется в естественных условиях на участках: Приполярно-тундровая зональная станция МГП, Лек-Воркутский подветренный; Восточно-Воркутский; Усинское водохранилище; Поднятие Чернова. Геотехнический мониторинг в техногенно нарушенных условиях выполняется на участках Озерный, Усинское водохранилище и Воргашорский.

В настоящее время необходимо восстановление и наращивание наблюдательных сетей на Воркутинском мерзлотно-гидрогеологическом полигоне, являющемся во всех отношениях уникальным: скважины с рядом наблюдений несколько десятилетий за режимом уровня, температурой ММП и таликов; относительная доступность участка; потенциальная возможность восстановления либо организации наблюдательной сети, в том числе и на сопредельной территории.

В настоящее время на полигоне необходимо восстановить вышедшие из строя наблюдательные скважины, пробурить новые на большую мощность мерзлых толщ, оборудовать их автоматизированной измерительной аппаратурой.

На территории полигона расположены ряд метеостанций, имеется большой архив разномасштабных картографических материалов геокриологического и гидрогеологического содержания. Перспективы региона связаны с развитием угледобывающей отрасли и формированием крупного логистического мультимодального хаба газотранспортной системы Ямал—Центр (МГ Бованенково—Ухта, ж/д Воркута—Москва и др.).

Организация геокриологического полигона в системе государственного мониторинга вечной мерзлоты представляется здесь безусловно актуальной и одной из первоочередных задач.

7.3.4. Полигон Ямальский (станционар Марре-Сале, Сабетта), лист: R-42

Эскиз проектируемого Ямальского полигона представлен на рис. 7.18. Согласно Концепции, полигон должен включать в себя действующий фоновый геокриологический стационар Марре-Сале, проектируемый стационар Сабетта, региональные профили опорных скважин, площадки периодического посещения и объекты геотехнического мониторинга газовой промышленности на месторождениях Ямала (Бованенковское, Харасавэйское, Новопортоское, Тамбейское и др.).

7.3.4.1. Геокриологический стационар Марре-Сале

Действующий с 1978 г. стационар Марре-Сале расположен в арктической тундре в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых толщ на западном побережье полуострова Ямал на территории одноименной полярной гидрометеорологической станции и выполняет функции фонового стационара в регионе, как для объектов нефтегазового недропользования, так и при изучении реакции криолитозоны в условиях современных вариаций климата.

Геолого-геокриологический разрез Марре-Сале, особенно в его верхней наиболее льдистой части, является опорным для значительной части Западного, Центрального Ямала и шельфовой зоны Карского моря и Байдацкой губы.

Подробная характеристика стационара, целевого направления мониторинговых исследований, решаемых задач, применяемой аппаратуры и полученных результатов приведена в разделе 3.2.2. На рис. 7.18 и 7.19 приведена схема размещения наблюдательной сети на стационаре Марре-Сале.

Следует отметить, что структура и наблюдательная сеть Марресальского геокриологического стационара наиболее полно отвечает разрабатываемым требованиям государственного мониторинга вечной мерзлоты Арктики.

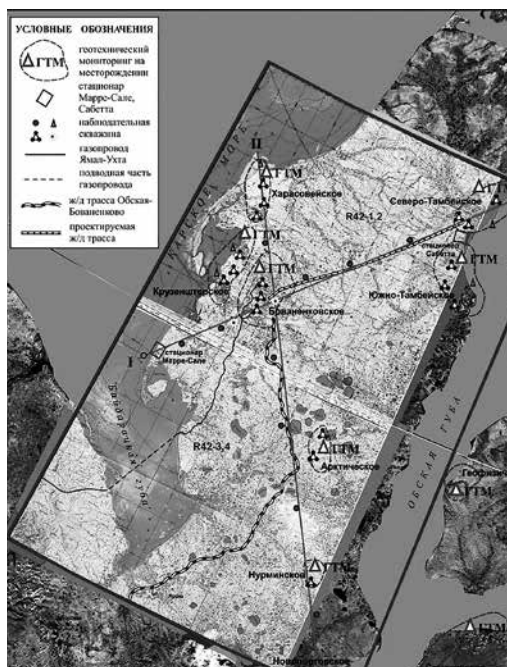


Рис. 7.18. Эскиз проекта Ямальского геокриологического полигона в системе государственного мониторинга криолитозоны ЯНАО



Рис. 7.19. Схема размещения наблюдательной сети на стационаре Марре-Сале

Расположение геокриологического стационара на территории полярной метеорологической станции, насчитывающей самые длинные ряды наблюдений на полуострове Ямал (с 1914 г.), обеспечивает репрезентативность как собственных наблюдений, так и прогнозных оценок изменений параметров криолитозоны с использованием метеорологических рядов.

В связи с этим расширение наблюдательной сети стационара, с продолжением начатых наблюдений в мелководной части шельфа Карского моря, формирование региональных профилей скважин на территории Ямальского полигона и увязка этих сетей с мониторинговыми объектами Бованенковского НГКМ, представляются в высшей степени актуальными и первоочередными задачами.

7.3.4.2. Геокриологический стационар Сабетта, съемочный лист: R-42-1,2

Проектируемый фоновый геокриологический стационар Сабетта географически располагается в Западной Сибири, на северо-востоке полуострова Ямал у южной оконечности бухты Тамбей (Обская губа) в районе п. Сабетта.

В административном отношении участок относится к Ямало-Не-нечскому автономному округу, а расположен в пределах Южно-Тамбейского лицензионного участка ОАО «Ямал СПГ» (АО «НОВАТЭК»).

Характерной особенностью современного рельефа территории, при-мыкающей к Обской губе, является ступенчатое строение поверхности. С запада на восток последовательно выделяются III лагунно-морская терраса (абс. отм. 22–35 м), II лагунно-морская терраса (абс. отм. 14–20 м), I лагунно-морская терраса (абс. отм. 5–12 м), а также лайда с от-метками 0,5–5 м и поймы рек. Поверхность лагунно-морских террас в целом плоская, в разной степени изрезана речной и овражной сетью, разбита полигональными трещинами, заозерена и заболочена.

В ландшафтном отношении район относится к классической север-ной тундре. Субгоризонтальные поверхности водоразделов заняты по-лигональными кочковатыми неравномерно дренированными травяно-мохово-лишайниковыми и осоково-моховыми тундрами (рис. 7.20).



Рис. 7.20. Относительно дренированная мохово-лишайниковая и травяно-осоково-моховая тундра на поверхности III лагунно-морской террасы

Поверхности террас, пойм, лайды подвергались воздействию крио-генных процессов (морозобойному растрескиванию, образованию ПЖЛ, термоэрозии, термокарсту, термоденудации и пр.).

На всей территории мерзлые породы (ММП) имеют сплошное рас-пространение. Сплошность мерзлых пород нарушается подозерными и подрусловыми таликами, а на лайде и в поймах рек участками развития охлажденных засоленных пород и криопэгов.

Наиболее характерный диапазон среднегодовых температур грунтов на водораздельных пространствах составляет $-5...-6^{\circ}\text{C}$. В понижениях

рельефа температура грунтов выше на $1-2^{\circ}\text{C}$. Минимальные температуры ($-6...-7^{\circ}\text{C}$) свойственны выпуклым водораздельным поверхностям и бровкам склонов, лишенным растительности, которые подвергаются зимнему выхолаживанию. Мощность мерзлых грунтов достигает 220 м. Верхняя часть разреза сложена мерзлыми глинами, суглинками, пылеватыми и мелкими пескам и супесями. Грунты часто, особенно в нижней части разреза, засолены. На первой лагунно-морской террасе и на лайде грунты засолены с поверхности. Здесь часто и на различных глубинах встречаются криопэги.

Грунты находятся преимущественно в твердомерзлом состоянии, реже в пластичномерзлом (сильнозасоленные), встречаются отдельные линзы охлажденных грунтов с высокой концентрацией солей в поровом растворе. Наличие засоления характерно для низких геоморфологических уровней (лайда, пойма низовий рек, прибрежные части I лагунно-морской террасы).

Пески, супеси и суглинки распространены на всех геоморфологических уровнях и во всех генетических типах отложений. Суммарная влажность песков изменяется от 20 до 30%, достигая в заторфованных слоях 700%. Суммарная льдистость песков составляет 0,4–0,5 д.е. Для супесей влажность изменяется в более широких пределах от 15 до 100% и существенно зависит от генезиса и глубины залегания. Льдистость за счет включений для супесей лагунно-морского генезиса 0,25–0,4 д.е., для озерно-болотных — 0,5–0,55 д.е. Засоленность изменяется от 0,03% на высоких геоморфологических уровнях до 0,5% на лайде. Суглинки, слагающие верхние части разрезов, имеют широкий диапазон изменения суммарной влажности: от 27% в лагунно-морских отложениях до 420% в озерно-болотных при средних значениях 30–40 и 55–65% соответственно. Льдистость за счет включений для лагунно-морских суглинков в среднем 0,25–0,35 д.е., в озерно-болотных — до 0,76 д.е. Засоленность суглинков второй и третьей террас не превышает 0,1%, первой террасы — 0,2–0,5%, а на лайде до 0,8% и выше. Подстилающие суглинки казанцевской свиты маловлажные (12–17%), более плотные (2,00–2,20 г/см³), средnezасоленные (0,4–0,5%, до 0,9%). Торф разной степени разложения встречается на всех террасах имеет высокую влажность (100–580%).

Проектируемый участок фонового мониторинга представляет комплекс из 3 фоновых наблюдательных площадок, расположенных по трансекту от берега Обской губы на запад. Площадки предполагается расположить на основных ландшафтно-геоморфологических уровнях: на I, II и III лагунно-морских террасах вне зоны техногенного воздействия, связанного с освоением месторождения. Общий вид территории проектируемого стационара приведен на (рис. 7.21).

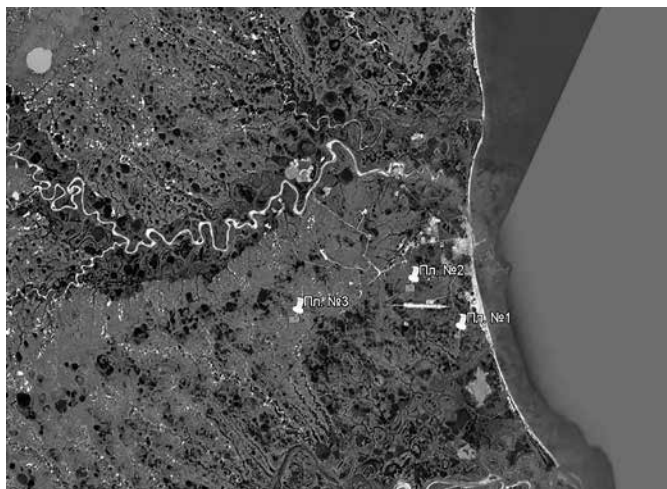


Рис. 7.21. Схема расположения площадок мониторинга на стационаре Сабетта

С учетом того, что на территории месторождения Ямал СПГ выполняет широкий комплекс работ по программе геотехнического мониторинга, расположение проектируемого участка фонового мониторинга позволит выполнить сравнительные исследования влияния климатических изменений и техногенеза на температурный режим мерзлых грунтов, динамику ландшафтов, слоя сезонного оттаивания и развития опасных природных процессов.

7.3.5. Полигон Уренгойский (Южный, Северный), листы: Q-43-1,2

Проектируемый полигон Уренгойский располагается на листах Q-43-1,2 и с севера на юг захватывает ландшафтные подзоны от южной тундры до северной тайги с изменчивыми геоэкологическими условиями от области сплошного распространения до редкоостровного. Территориально он наследует площадь опережающего и текущего обследования Уренгойского НГКМ. В целом, это террасированная поверхность озерно-аллювиальных и морских уровней от пойменного до V-го, сложенного песками, супесями, суглинками. На площади листов имеются как обширные природные ненарушенные территории, так и территории различной активности техногенеза, связанные с добычей углеводородов. По оси полигона в меридиональном направлении на 200 км протягивается собственно Уренгойское НГКМ.

Инфраструктуры полигона государственного геоэкологического мониторинга целесообразно увязать с имеющимися площадками регу-

лярного обследования на севере и на юге месторождения так, чтобы захватить ненарушенные участки поблизости с участками активного техногенеза, где ведется производственный мониторинг. Тем самым будут обеспечены мониторинговые пары «нарушенные/ненарушенные условия».

7.3.5.1. Площадка регулярного обследования «Уренгой Северный»

Площадка расположена на севере Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (центр — $67^{\circ}28.5' \text{ N}$, $76^{\circ}41.5' \text{ E}$) в 180 км к северу от г. Новый Уренгой, преимущественно на III морской равнине с абсолютными отметками до 35 м, сложенной с поверхности суглинистыми отложениями, которые на глубине 7–10 м подстилаются песками.

Территория относится к южной тундре. Сильнольдистые многолетнемерзлые породы (суммарная влажность суглинков до 60%, песков — 21–28%) имеют сплошное распространение. С середины 1970-х гг. функционируют 8 геокриологических скважин глубиной ~10 м (2 из которых утрачены и одна нарушена в последние годы в связи с бурением и обустройством эксплуатационных скважин (рис. 7.22).



Рис. 7.22. АФС площадки регулярного обследования «Уренгой Северный», вид с ВСВ

За прошедшее время температура мерзлоты повысилась с $-4,5 \dots -6^{\circ}\text{C}$ на $1,5-2,5^{\circ}\text{C}$. До настоящего времени во всех скважинах температура грунтов отрицательная, не выше $-3,5^{\circ}\text{C}$, за исключением скважины, расположенной в аномально теплых условиях на крутом склоне южной экспозиции (около -1°C). Глубина сезонного оттаивания обычно не превышает 1 м.

7.3.5.2. Площадка регулярного обследования «Уренгой Южный»

Размещена в южной лесотундре, центральной части Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (центр — $67^{\circ}18.9' \text{ N}$, $76^{\circ}54.4' \text{ E}$) в 40 км к северу от г. Новый Уренгой (рис. 7.23).



Рис. 7.23. АФС площадки регулярного обследования «Уренгой Южный», вид с ЗСЗ

Располагается преимущественно на IV озерно-аллювиальной равнине с абсолютными отметками до 65 м, сложенной с поверхности верхнечетвертичными суглинистыми, супесчаными и песчаными отложениями, которые на глубине 3–10 м подстилаются жирными суглинками среднечетвертичного возраста. С ними связаны формы пучения — бугры и гряды, и формы, относящиеся к этапу разрушения последних — термокарстовые озера и западины вокруг бугров. В ландшафтном плане поверхность представляет собой чередование фрагментов низких скрыто полигональных торфяников, кочковатых и бугристых тундр, березовых и лиственничных редколесий и редин и зарослей кустарников высотой 0,6–1 м. Поверхность расчленена мелкими долинками и логами с обширными болотами.

Связные породы имеют преимущественно высокую влажность, пески — маловлажны. Во время обустройства площадки в середине 1970-х гг. вечная мерзлота имела сплошное распространение с поверхности и температуру $-2...-3^{\circ}\text{C}$, хотя на отдельных участках в березовых и лиственничных редирах температура мерзлоты была около -0°C . За прошедшие 40 лет на лесных урочищах кровля мерзлоты оторвалась от подошвы слоя сезонного оттаивания, образовался непромерзающий надмерзлотный талик, изменились гидрогеологические условия. В остальных урочищах мерзлота пока сохраняется, но температура ее уже близка к -0°C .

7.3.5.3. Площадки периодического обследования на полигоне Уренгойский

Площадки расположены между участками «Уренгой Северный» и «Уренгой Южный» на автотрассе, идущей от г. Новый Уренгой на север до пос. Ямбург, что обеспечит удобную логистику получения легкодоступной мониторинговой геокриологической информации о иерархии ландшафтов и их литогенной основе для природных подзон от южной тундры до северной тайги, в том числе с органичной возможностью расширения наблюдательной сети. Близость объектов техногенеза обеспечивает наблюдение и обследование мониторинговых пар «нарушенные/ненарушенные условия», причем для широкого спектра вариантов техногенеза.

Создание геокриологического полигона Уренгойский является актуальным по той простой причине, что продолжение здесь наблюдений и исследований обеспечит получение и интерпретацию мониторинговой информации и результатов прогнозов на территорию экономически важного для страны региона, осуществляющего поставки природного газа не только на внутренний рынок, но и за рубеж.

7.3.6. Полигон Норильский, лист: R-45-3,4

В административном отношении — Таймырский Долгано-Ненецкий район Красноярского края.

В физико-географическом отношении проектируемый полигон Норильский относится к северо-западной части Среднесибирского плоскогорья. Рельеф местности сложный. Выделяются горы Хараелах и плато Путорана, имеющее облик столообразной поверхности со ступенчатыми склонами с максимальными высотами до 700–800 м. Со стороны оз. Пясино в виде небольшого клина заходит Таймырская низменность, явно выделяются три уровня. Первый — пойма, образует слабонаклонную поверхность с абсолютными отметками 40–45 м; следующий уровень — надпойменная терраса, имеющая отметки 50–70 м с многочисленными озерами. Третий уровень — надпойменная терраса с типичным моренным ландшафтом и абсолютными отметками 80–170 м. Высота района Центральный над уровнем моря — 60 м, района Талнах — 107 м, района Кайеркан — 188 м. Районы Кайеркан и Талнах считаются горными.

В тектоническом отношении территория, на которой находится г. Норильск, расположена на стыке двух крупнейших тектонических структур: Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. В сейсмическом отношении район является неактивным: вероятность землетрясений силой 5 баллов не превышает 1%.

Климат относится к области континентального влияния субарктического пояса. Разница в среднемесячных температурах января и июля

превышает 40 °С. Среднегодовая температура воздуха равна –9,2 °С. Абсолютный минимум температуры –60 °С.

Растительность, согласно геоботаническому районированию, относится к Евразийской хвойно-лесной области, Восточно-Сибирской подобласти светлососновых лесов. Большая часть территории в подзоне крайне северных редкостойных лиственничных лесов (лесотундра) и только на крайнем юго-востоке вклинивается подзона северотайжных редкостойных лесов. Напочвенный покров из мхов и лишайников развит слабо и образован зелеными мхами.

Территория относится к области сплошного распространения ММП. Характер распространения — преимущественно сплошное и сплошное с несквозными радиационно-тепловыми таликами. Мощность ММП от 100–200 на востоке и северо-западе и до 300–500 на юге. Температура на глубине годовых теплооборотов от –1...–3 °С до –3...–5 °С. Глубина сезонного протаивания от 0,9 до 2,5 м. Мерзлые генетические типы отложений: флювиогляциальные (пески, супеси, гравийно-галечные) четвертичного возраста и магматические, эффузивные, дочетвертичные. Талики радиационно-тепловые занимают менее 3% от всей площади. Встречаются криопэги в пределах глубин от 0 до 100 м.

Региональные карты геокриологического содержания для оценки изменения состояния криолитозоны отсутствуют, а имеющиеся картографические материалы устарели. Ближайшая действующая метеостанция расположена в г. Норильске.

Организация геокриологического полигона представляется актуальной в связи с активным развитием промышленного потенциала региона в границах средне- и долгосрочной перспективы.

7.3.7. Полигон Хатанга, лист: R-48-A

Административно территория относится к Таймырскому Долгано-Ненецкому муниципальному району Красноярского края, центр сельского поселения Хатанга. Расположено на р. Хатанге, один из самых северных населенных пунктов России. Имеется речной порт и аэропорт.

Проектируемый полигон расположен в Северо-Сибирской низменности, сформированной четвертичными оледенениями и морскими трансгрессиями. Рельеф низменности холмисто-грядовый и холмистовалистый с обширными аллювиальными депрессиями и плоскими аккумулятивными равнинами, в субширотном направлении осложнен многочисленной системой моренных гряд с абсолютными высотами 150–250 м.

Южная часть Таймырской низменности, где располагаются поймы рек Хета и Хатанга, занята лиственничными лесами, которые постепенно переходят в осоко-кустарничковые тундры. В Хатанге расположены

лиственничные леса — самые северные в мире. Они состоят из даурской лиственницы.

Климат субарктический. Среднегодовая температура $-13,0^{\circ}\text{C}$. Характерны сильные колебания температуры. Снежный покров лежит 8–9 месяцев в году.

Бассейны рек Хатанга и Котуй богаты природным газом и нефтью, каменным углем. Огромный спектр полезных ископаемых таится в отрогах гор Путорана и Анабарской возвышенности: медно-никелевые, свинцовые руды, самородное железо, уголь, слюда, гипс, драгоценные камни. Особенно богаты недра расположенной на территории Хатангского края Попигайской котловины, где обнаружено месторождение технических алмазов, золота, а также металлы платиновой группы. Общий вид пос. Хатанга представлен на рис. 7.24.



Рис. 7.24. Общий вид пос. Хатанга

Рассматриваемая территория относится к области сплошного распространения ММП. Мощность ММП от 400 до 700 м. Температура на глубине годовых теплооборотов от -5 до -11°C . Глубина сезонного протаивания от 0,7 до 1,8 м. Мерзлые толщи однослойные. Генетические типы отложений: четвертичные — флювиогляциальные (пески, супеси, гравийно-галечные); дочетвертичные — магматические и эффузивные. Подземные воды трещинно-пластовые в терригенных плотных породах. Талики — подозерные и подруловые, в основном несквозного типа. Сквозные талики развиты под крупными озерами и реками.

Региональные карты геокриологического содержания для оценки изменения состояния криолитозоны отсутствуют, а имеющиеся картографические материалы устарели. Ближайшая действующая метеостанция расположена в пос. Хатанга. Режимных наблюдений за тепловым режимом пород и криогенными процессами нет.

В связи с перспективными планами экономического развития региона в качестве минерально-сырьевой базы и транспортно-логисти-

ческого хаба на Северном морском пути организация геокриологического полигона представляется особо актуальной.

7.3.8. Полигон Жиганский, лист: Q-51-Б

Административно проектируемый полигон Жиганский относится к одноименному району Республики Саха (Якутия). В административном центре — Жиганске — имеется аэропорт, лесопункт, метеостанция, школы, предприятия торговли, общественного питания и бытового обслуживания. Жиганский улус располагает месторождениями бурого и каменного угля. Ведущее место в экономике занимают сельское хозяйство (оленоводство, звероводство) и пушной промысел. Местное население активно занимается охотой, рыбной ловлей и скотоводством.

В физико-географическом отношении территория приурочена к восточной части Среднесибирского плоскогорья, представляет собой всхолмленную, заболоченную, низменную равнину. Главной водной артерией территории является река Лена, судоходная на всем своем протяжении и играющая важную роль в хозяйственной и социально-экономической жизни района.

Растительный покров представлен северо-таежными редкостойными лиственничными лесами с небольшим участием ели сибирской, а также встречаются заболоченные луга, болота и ерники. Уязвимость природных комплексов к техногенным воздействиям оценена как высокая.

Климат района суровый, резко-континентальный с продолжительной холодной зимой и коротким, но жарким летом.

На рис. 7.25 представлен общий вид северотаежной зоны в районе Жиганска.

Среднегодовая температура воздуха может изменяться в широких пределах: самые высокие значения минус 0,2 °С, самые низкие — минус 13,3. В пределах съемочного листа многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение. Мощность мерзлой толщи изменяется от 400 до 500 м. Температура на глубине годовых теплооборотов варьирует от –2 до –6 °С. Глубина сезонного протаивания изменяется от 1,0 до 2,4 м.

Генетические типы отложений: четвертичные — флювиогляциальные (пески, супеси, гравийно-галечные), озерные и озерно-аллювиальные (супеси, суглинки, глины); дочетвертичные — осадочно-терригенные. Подземные воды трещинно-пластовые в карбонатных породах. На территории могут быть распространены криопэги.

Региональные карты геокриологического содержания для оценки изменения состояния криолитозоны отсутствуют, а имеющиеся картографические материалы устарели.

Организация геокриологического полигона для фонового мониторинга криолитозоны Арктики представляется актуальной.



Рис. 7.25. Типичный северотаежный ландшафт в пос. Жиганск

7.3.9. Полигон Саскылах, лист: R-50,1,2

Административно проектируемый полигон Саскылах относится к Анабарскому району и расположен в северо-западной части Республики Саха (Якутия). Участок расположен в среднем течении р. Анабар, в 30 км от п. Саскылах. Доступность через авиопорт в пос. Саскылах и речным транспортом.

Рельеф равнинный. Основная часть улуса расположена на восточной окраине Северо-Сибирской низменности. Плоские низкие равнины со средними высотами до 60–80 м над уровнем моря. Преобладают мохово-лишайниковые и частично кустарниковые тундры с редкой древесной растительностью, приуроченные преимущественно к суглинистым и глинистым породам на повышенных элементах рельефа.

Мощность мерзлых толщ изменяется от 165 до 450 м.

Вся территория Анабарского района лежит за Полярным кругом. Климат характеризуется резко выраженной континентальностью и суровостью. Территория в течение 8 месяцев находится под снежным покровом. Среднегодовая температура воздуха достигает -13°C .

Экономическое развитие региона связано с перспективой добычи редкоземельных металлов, россыпей алмазов. Региональные карты гео-криологического содержания для оценки изменения состояния криолитозоны отсутствуют.

В связи с перспективами развития территории в качестве крупного промышленного региона создание полигона государственного мониторинга вечной мерзлоты представляется актуальным.

7.3.10. Полигон Тикси, лист: R-52-1,2

В административном отношении проектируемый полигон Тикси расположен в Булунском районе Республики Саха (Якутия). Тикси — поселок городского типа, центр Булунского улуса. Крупный северный населенный пункт Якутии с международными морским и воздушным портами. Имеется метеостанция.

Район занимает крайнюю северо-западную часть Верхоянской области Северо-Восточной Сибири. Небольшие поднятия, сложенные глинистыми сланцами и песчаниками, чередуются с относительно широкими долинами и озерными котловинами. Абсолютные отметки не превышают в среднем 300—400 м.

Климат района Тикси является переходным от морского — арктических побережий Якутии — к резко континентальному внутренних районов Якутии. Зимой район находится под господствующим влиянием мощного сибирского антициклона, но нередко сюда доходят наиболее сильные циклоны с Атлантики, сопровождающиеся, как правило, осадками. Средняя годовая температура минус 11,2 °С. Растительность окрестностей Тикси характеризуется широким распространением сухих щепнистых и умеренно сырых пятнистых кустарничково-мохово-лишайниковых тундр (рис. 7.26). На увлажненных участках характерно развитие разнотравно-осоково-моховых тундр.



*Рис. 7.26. Общий вид тундры близ пос. Тикси.
Вдали отроги Приморского кряжа*

Территория относится к области сплошного распространения ММП. Мощность ММП от 600 до 800 м. Температура на глубине годовых теплооборотов от –8 °С до –11 °С. Глубина сезонного протаивания от 0,25 до

1,5 м. Мерзлые генетические типы отложений. Четвертичные: аллювиальные, флювиогляциальные (пески, супеси, суглинки, гравийно-галечные). Дочетвертичные: осадочные породы Тиксинской свиты Намюрского яруса нижнего отдела карбона. Свита сложена алевролитами, аргиллитами и мергелями, содержащими прослой известняков.

В гидрогеологическом отношении участок изучен слабо. Трещинные и порово-пластовые воды локализуются в пределах таликовых зон речных долин.

Региональные карты геокриологического содержания для оценки изменения состояния криолитозоны отсутствуют, а имеющиеся картографические материалы устарели.

С учетом выполнения здесь режимных наблюдений Институтом мерзловедения СО РАН им. П. И. Мельникова, а также планами развития Тикси в качестве стратегического логистического хаба Северного морского пути, организация геокриологического полигона представляется чрезвычайно актуальной.

7.3.11. Полигон Депутатский, лист: R-54-B

В административном отношении поселок Депутатский и территория проектируемого полигона расположена в Усть-Янском районе Республики Саха (Якутия).

Район расположен в северной части Яно-Оймяконской области Северо-Восточной Сибири. Здесь осуществлялась добыча олова в таких масштабах, что СССР перестал импортировать этот вид сырья. В настоящее время предполагается возобновление работы Депутатского ГОК. В поселке имеется аэропорт. В летнее и зимнее время связь осуществляется только воздушным путем. Ближайшая действующая метеостанция расположена в пос. Депутатский.

Территория района ограничена с севера и с запада Верхоянским хребтом, с юга — хребтом Черского. Местность имеет холмистый рельеф, отдельные высоты его достигают 500–1000 м. Поверхность сильно расчленена сетью рек бассейнов реки Яна и левобережных притоков реки Индигирка. Район относится к зоне, переходящей от тундры к лесотундре с суровыми и продолжительными зимами.

Климат суровый континентальный. Среднемноголетняя среднегодовая температура воздуха равна $-14,5^{\circ}\text{C}$.

В пределах съемочного листа многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение. Мощность их изменяется от 300–500 на равнинах до 500–700 на водораздельных территориях. Температура пород на глубине годовых теплооборотов варьирует -7 до -11°C . Глубина сезонного протаивания в естественных условиях изменяется от 0,7 до 1,6 м. Генетические типы отложений представлены: четвертичные — флювио-

гляциальными отложениями (пески, супеси, гравийно-галечные) и полигенетическими ледовыми комплексами (супеси и пески пылеватые); дочетвертичные: осадочные, эффузивно-терригенные.

Подземные воды трещинно-жильные в терригенных плотных породах, минерализация 1–10 г/л. Наличие очагового распространения криопэгов до глубины 100 м.

Региональные карты геокриологического содержания для оценки изменения состояния криолитозоны отсутствуют, а имеющиеся картографические материалы устарели.

В связи с планами экономического возрождения района организация геокриологического полигона представляется весьма актуальной.

7.3.12. Полигон Черский, лист: R-57-Г

В административном отношении территория проектируемого полигона Черский относится к Нижнеколымскому району Республики Саха (Якутия). Район расположен в Черской области Северо-Восточной Сибири. Поселок городского типа Чёрский является административным центром и крупнейшим населенным пунктом Нижнеколымского района. Расположен в нижнем течении Колымы, на правом берегу, у места впадения реки Пантелеихи. Административно включает морской порт Зеленый Мыс. В поселке имеется: автопредприятие «КолымТранс»; Северо-Восточная научная станция; речной порт; гидробаза; авиапредприятие (аэропорт). Черский связан сезонным автозимником с поселком Колымское.

Климат района суровый арктический, среднегодовая температура воздуха составляет $-13,5^{\circ}\text{C}$. Район относится к зоне лесотундры-тундры. В пределах съемочного листа многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение. Мощность многолетнемерзлой толщи от 200 до 400 м. Температура на глубине годовых теплооборотов от -5 до -9°C . Глубина сезонного протаивания варьирует от 1,0 до 2,4 м. Вид на окрестности пос. Черский представлен на рис. 7.27.

Отложения мерзлой толщи представлены: четвертичные — полигенетические ледовые комплексы (супеси и пески пылеватые); дочетвертичные — осадочные терригенные. Очаговое распространение криопэгов до глубины 100 м.

Региональные карты геокриологического содержания для оценки изменения состояния криолитозоны отсутствуют, а имеющиеся картографические материалы устарели. Ближайшая действующая метеостанция расположена в пос. Черский.

Организация геокриологического полигона представляется актуальной. Геокриологические наблюдения в ограниченном объеме проводит Институт мерзлотоведения СО РАН им. П. И. Мельникова.



Рис. 7.27. Типичный лесотундровый ландшафт в окрестностях пос. Черский

7.3.13. Полигон Магаданский, лист: Р-55-С, D

В административном отношении территория проектируемого полигона относится к Тенькинскому району Магаданской области. Природная подзона горных областей высотной поясности в зоне северной тайги и лесотундры.

Абсолютные высоты на территории варьируются от 780 до 1690 м, уклон склонов достигает 40°. Территория сложена осадочными и интрузивными породами. Четвертичный поверхностный покров представлен аллювиальными, элювиально-делювиальными и в малой степени пролювиальными отложениями.

Растительный покров территории значительно варьируется в зависимости от высоты, ориентации склонов. Каменные осыпи и тундры, покрывающие верхние части склонов и водоразделы, занимают около трети территории. Примерно четверть южных склонов занимает кедровый стланик. Лиственничные редколесья и леса с густым мохово-лишайниковым покровом распространены в нижних частях северных склонов и в долинах ручьев. Среднегодовая температура близка к $-11,5^{\circ}\text{C}$.

Территория относится к области сплошного распространения ММП. Мощность многолетнемерзлых пород варьирует от 300 до 450 м, глубина летнего протаивания составляет от 20 см в заболоченных низинах до 3 м в гольцовых зонах. Геокриологические условия являются типичными для обширной территории Верхней Колымы и прилегающих к ней горных районов северо-востока России и Восточной Якутии. На территории съёмочного листа расположена Колымская водно-балансовая станция, которая охватывает водосбор руч. Контактного площадью 22 км², расположенный в бассейне р. Кулу, правого притока р. Колымы в верхней части ее бассейна. Общий вид территории приведен на рис. 7.28.



Рис. 7.28. Общий вид на Колымскую водно-балансовую станцию

Региональные карты геокриологического содержания для оценки изменения состояния криолитозоны отсутствуют, а имеющиеся картографические материалы устарели.

Организация геокриологического полигона на месте ранее проводимых исследований представляется актуальной и позволит продлить полученные ранее ряды наблюдений за характеристиками мерзлоты, процессами взаимодействия поверхностных и подземных вод в криолитозоне.

7.3.14. Полигон Анадырский, лист: Q-60-Г

Проектируемый геокриологический полигон Анадырский в административном отношении относится к Чукотскому автономному округу.

Участок расположен в пределах Анадырско-Корякской области Корякско-Курильско-Камчатской физико-географической страны. В пределах съемочного листа многолетнемерзлые породы носят сплошной характер распространения. Мощность мерзлоты от 100 до 300 м. Температура на глубине годовых теплооборотов изменяется от -3 до -6 °С. Глубина сезонного протаивания — 1,0–2,1 м. Тип сезонного протаивания длительно-устойчивый, устойчивый. Общий вид типичного ландшафта района Анадыря приведен на рис. 7.29.

Генетические типы отложений: четвертичные — флювиогляциальные (пески, супеси, гравийно-галечные) и аллювиально-морские (супеси, пески, пылеватые суглинки); дочетвертичные — осадочные и терригенные породы. Преобладающие криогенные текстуры: массивная, линзовидная. Наличие криопэгов очаговое до глубины 100 м.

Региональные карты геокриологического содержания для оценки изменения состояния криолитозоны отсутствуют, а имеющиеся картографические материалы устарели. Ближайшая действующая метеостанция расположена в г. Анадырь.



*Рис. 7.29. Общий
вид тундры
в окрестностях
г. Анадырь*

Организация геокриологического полигона представляется актуальной. Есть работающие отдельные режимные скважины 1995 г., площадка CALM. Три площадки наблюдений за динамикой криогенных процессов (с 1994 г., 2008 г., 2010 г.). Есть площадки и скважины, где в 1936–1938 гг. велись режимные геокриологические наблюдения.

8. Основные виды наблюдений и их технико-экономические показатели в системе мониторинга криолитозоны

Структура и содержание фонового и геотехнического мониторинга в каждом конкретном регионе в значительной степени будет определяться сложностью структурно-тектонических, геолого-гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических условий осваиваемых территорий, включая промышленные зоны и месторождения полезных ископаемых и учитывая систему их разработки.

При этом *методика полевых исследований* в системе мониторинга должна базироваться на полном использовании всех современных методов изучения основных параметров криолитозоны, включающих горно-буровые, геофизические, геодезические, геохимические, гидрометеорологические, а также собственно геокриологические, гидрогеологические и инженерно-геологические.

В основе создания наблюдательной сети лежит строительство наблюдательных скважин для полного и всестороннего доизучения геологического (геокриологического, гидрогеологического и т.п.) разреза и обустройства скважины для регулярного наблюдения за температурой горных пород, являющейся одним из основных показателей состояния криолитозоны.

Геофизические методы дополняют геологическое изучение разреза, а в ряде случаев являются собственно мониторинговыми методами наблюдений. В частности, при определении динамики многолетнего оттаивания (промерзания) пород на участках, где размещение наблюдательных скважин по тем или иным причинам затруднено.

В прибрежных зонах применение сейсмических методов исследований является основным в определении конфигурации кровли ММП в пределах мелководного шельфа.

Термокаротаж или термометрические наблюдения в скважинах различной глубины, расположенных в пределах основных типов местности и типов мерзлых толщ, позволяют судить о состоянии и динамике теплового режима мерзлых пород на различных глубинах в годовом и многолетнем циклах в зависимости от формирования условий теплообмена на поверхности.

Методы дистанционной видеосъемки, с как помощью традиционных методов аэровидеонаблюдений, так и с применением радиоуправляемых

моделей беспилотных летательных аппаратов, являются перспективными для изучения и мониторингования очагов развития криогенных термоэрозийных и термоабразионных процессов, криогенных оползней-сплывов, динамики наледообразования и подтопления территории.

Важным методом исследования и оценки влияния на тепловой режим многолетнемерзлых толщ является изучение закономерностей формирования снежного покрова в естественных условиях, особенно в пределах осваиваемой и застроенной территории. Влияние перераспределения снега в арктической тундре по тепловому воздействию на ММП во много раз превышает воздействие климатических вариаций. Этот фактор, практически не учитывается в настоящее время при проектировании промышленных объектов в арктической криолитозоне. Следует отметить, что современные технические средства проведения снегомерных наблюдений в настоящее время не разработаны, так же как и методы их обработки и экстраполяции результатов. Перспективным в этом плане представляется использование автоматизированных теодолитов и видеокамер с форматом 3D для выполнения инструментальных съемок территории в летний и зимний периоды. Разница в высотах летних и зимних замеров даст искомую мощность снежного покрова на конкретном участке.

В связи с планами освоения нефтегазовых запасов арктического шельфа особую актуальность приобретают мониторинговые исследования геокриологического и гидрогеологического направления в его мелководной части. Здесь на первый план выходит постановка работ по изучению температурного режима донных отложений в разрезе до глубины 60–100 м и более.

Основным критерием для определения содержания и структуры мониторинга является степень опасности (технологической и экологической) разработки месторождений полезных ископаемых, масштабов промсооружений и накопленных промышленных отходов, возраста городской и муниципальной застройки.

Конкретные задачи мониторинга могут уточняться, при этом приоритет в изучении в ходе разработки мониторинга должен отдаваться тем процессам и параметрам геологической (гидрогеологической, инженерно-геологической, геокриологической) обстановки, которые определяют в данный момент или будут определять по прогнозному сценарию формирование неблагоприятной геоэкологической обстановки в целом.

Природные опасности и геологические виды наблюдений фонового и геотехнического мониторинга криолитозоны приведены в табл. 8.1, а перечень основных ЭГП криогенного ряда для равнинных территорий криолитозоны показан в табл. 8.2.

Таблица 8.1.

Опасности и геологические виды наблюдений фонового и геотехнического мониторинга криолитозоны

№ п/п	Опасности и виды наблюдений	Наблюдаемые параметры природной (геологической) среды		
1	Геокриологические: • фоновые изменения теплового состояния многолетнемерзлых толщ под влиянием вариаций климата; • тепловое загрязнение оснований промышленной и транспортной инфраструктуры; • проявление опасных природных и техногенно обусловленных ЭГП криогенного ряда	• термовлажностный режим грунтов; • режим геологических (включая криогенные) экзогенных процессов	• состав и влажность грунтов • температура грунтов в слое годовых теплооборотов, глубина протаивания-промерзания, тепловые потоки в грунтах; • индивидуальные показатели для каждого геологического (криогенного) процесса	• повышение или понижение средней годовой температуры ММП, деградация или аградация мерзлых толщ; • активизация или затухание воздействия криогенных процессов • изменение показателей ресурсной обеспеченности участка недр (региона) и качества подземных вод
2	Гидрогеологические: • истощение, загрязнение основных водоносных горизонтов; • несоответствие прогнозных и реальных балансовых показателей месторождения (в зоне ответственности недропользователя)	Режим подземных вод, включая перывый подмерзлотный горизонт	• уровень (напор), дебит (расход), температура, физические свойства, химический состав; • пластовое давление полмерзлотных горизонтов	
3	Геохимические: загрязнение геологической и пограничной среды: — воздуха, биоты, поверхностных вод, донных осадков. Сточные воды, сбрасываемые в поверхностные водные объекты, их физические свойства, химический состав и температура	Показатели геохимического загрязнения пограничных сред	• подземных вод; • поверхностных вод; • донных отложений и грунтов; • биоты; • воздуха	• Характеристика показателей загрязнения в соответствии с ПДК

Таблица 8.2.

Криогенные процессы и наблюдаемые параметры в системе мониторинга

Криогенные процессы (КП)	Парагенетический комплекс процессов	Формы проявления	Наблюдаемые параметры в системе мониторинга	Инструменты
Сезонное протаивание (промерзание)	Сезонные: пучение, термокарст, криогенное растрескивание, сортировка грунтов, солифлюкция, наледообразование	Слой СМС–СТС с разными формами микрорельефа	Глубина сезонного протаивания (промерзания), см	Шуп
Многолетнее пучение	Криогенное растрескивание, термокарст, термоэрозия, солифлюкция	Бугры (гидроласколлиты, булгуны, пинго), гряды и площадки пучения	Размеры бугров по высоте и в плане, м	Топогеодезические, БПЛА
Термокарст	Термоабразия, термосолифлюкция, образование трещин отседания	Термокарстовые западины (хасырей, аласы) с озерами и без	Размеры западин по глубине и в плане, м	Топогеодезические, БПЛА
Солифлюкция	Криогенная сортировка грунтов, термоэрозия, оползание грунтовых блоков по склону, пучение в основании склонов	Солифлюкционные уступы, языки, потеки, террасы, валы, покровы	Фиксация микрорельефа, влажность и плотность грунтов СТС	Проботборники, топогеодезические, БПЛА, сейсмопрфилирование
Оползни-сплывы	Быстрое оползание или сплыв грунтов СТС, термоэрозия, термокарст	Термосолифлюкционные кары и термоширки, потоки и террасы (лишенные растительного покрова)	Влажность и плотность грунтов СТС, уровень воды в СТС в летний период	Проботборники, топогеодезические, БПЛА, сейсмопрфилирование, уровень воды
Термоэрозия	Вытаивание ледяных жил, термосолифлюкция, оползание по поверхности мерзлых пород, наледообразование	Термоэрозионные борозды и овраги, обрывы льдистых пород по берегам рек, озер и морским побережьям	Размеры овражной сети по глубине и в плане, м	Топогеодезические, БПЛА

8.1. Наблюдаемые параметры при геокриологическом мониторинге

Перечень параметров, контролируемых на стационарных постах мониторинга, как фонового, так и геотехнического, определяется необходимостью их использования при оценке состояния вечной мерзлоты и ее количественного прогноза. Их можно разделить на четыре группы: 1) физико-геологические и ландшафтные; 2) геокриологические; 3) метеорологические; 4) геотехнические.

К физико-геологическим и ландшафтным относятся:

- крутизна и экспозиция склона;
- параметры микрорельефа (высота элемента, число элементов на 1 кв. м площади, углы направления расположения элемента и др.);
- мощность (толщина) и плотность снежного покрова (и его теплофизические характеристики);
- видовой состав, высота и плотность растительного покрова лесного и кустарничкового яруса;
- видовой состав, высота и плотность (степень проективного покрытия, или СПП) напочвенного растительного покрова (и его теплофизические характеристики в талом и мерзлом состоянии);
- мощность и характеристика (содержание органического материала) торфяных и почвенных горизонтов (и их теплофизические характеристики в талом и мерзлом состоянии);
- глубина (при наличии) водоема (водного покрова);
- уровень грунтовых вод, температура, минерализация (при наличии).

К геокриологическим параметрам относятся:

- температура грунтов;
- плотность и влажность грунтов ненарушенного сложения (весовая или объемная);
- плотность теплового потока;
- глубина сезонного протаивания (или промерзания);
- теплофизические характеристики грунтов в талом и мерзлом состоянии;
- поровое давление в талых грунтах (при наличии на участке);
- уровень льда на участках распространения наледей;
- деформации пучения и осадки;
- горизонтальная деформация на склонах.

Большинство параметров, кроме характеристик растительных покровов, вертикальной и горизонтальной деформации поверхности и др., регистрируются в автоматическом режиме с записью результатов в энергонезависимую память и возможностью скачивания результатов на фи-

зический электронный носитель информации (флешка, съемный диск и т.п.) и/или передачи информации через сотовую или спутниковую связь. Вертикальную и горизонтальную деформацию поверхности допустимо определять по результатам периодических геодезических измерений смещения меток с применением наземной съемки или съемки с применением БПЛА.

К метеорологическим параметрам относятся:

- атмосферное давление;
- температура воздуха;
- влажность воздуха;
- скорость ветра;
- направление ветра;
- температура поверхности почвы (ненарушенная растительность);
- количество жидких атмосферных осадков;
- прямая коротковолновая радиация;
- отраженная солнечная радиация;
- суммарная длинноволновая радиация.

Эти параметры могут регистрироваться в автоматическом режиме с записью результатов в энергонезависимую память и возможностью скачивания результатов на физический электронный носитель информации и/или передачи информации через сотовую или спутниковую связь.

К геотехническим параметрам относятся:

- плотность, влажность и теплофизические характеристики грунтов насыпей, отсыпок и грунтов обратной засыпки в талом и мерзлом состоянии;
- деформации элементов конструкций зданий и инженерных сооружений;
- деформации откосов насыпей и выемок;
- давление (напряжение) в основании здания или инженерного сооружения, а также в слоях дорожной одежды;
- растягивающие деформации на нижней границе монолитных слоев (для насыпей дорог);
- влажность грунта основания здания или инженерного сооружения, земляного полотна и слоев дорожной одежды (ППС);
- температура слоев дорожной конструкции (слоев из асфальтобетона, слоев основания, грунта земляного полотна);
- температура воздуха и грунтовой поверхности в проветриваемом подполье зданий.

Большинство параметров могут измеряться в полуавтоматическом режиме с записью результатов в энергонезависимую память и возмож-

ностью скачивания результатов на физический электронный носитель информации и/или передачи информации через сотовую или спутниковую связь.

Периодичность измерений определяется периодами значимых изменений параметров, используемых для проведения оценочных или прогнозных расчетов. Она может составлять от нескольких часов (для метеорологических параметров) до суток (температура грунтов), недель и месяцев (параметры снежного и напочвенного растительного покрова, деформации), и даже лет (теплофизические параметры многолетнемерзлых грунтов).

В качестве примера приведена структурная схема стационарного поста мониторинга для насыпи автомобильной дороги на рис. 8.1.

8.2. Наблюдения за температурным режимом пород

В системе мониторинга вечной мерзлоты наблюдения за температурным режимом ММП имеют первостепенное значение, поскольку именно тепловое состояние мерзлых толщ по глубине, наряду с составом и льдистостью дисперсных пород, является определяющим в оценке устойчивости разреза, несущей способности грунтов оснований сооружений и экологических последствий хозяйственного освоения территории.

Температурный режим верхних слоев криолитозоны определяется структурой радиационно-теплогового баланса поверхности, тепловым влиянием наземных покровов (снег, растительность, поверхностная вода), теплотокотом из недр земли, а также процессами тепломассопереноса в массиве пород. Основными параметрами, характеризующими температурный режим пород, являются средняя годовая температура, амплитуда колебания температуры грунта на различных глубинах в течение годового цикла и глубина проникновения этих колебаний вглубь массива (так называемая глубина нулевых годовых амплитуд). При этом за глубину нулевых годовых амплитуд принимается глубина, на которой амплитуда колебания температуры за год не превышает $0,2^{\circ}\text{C}$. В зависимости от изменения значений среднегодовой температуры пород по глубине, определяется стационарность температурного режима: в случае постоянства этих значений режим признается стационарным, при их изменении — нестационарным.

Более высокие значения среднегодовой температуры пород до глубины нулевых амплитуд свидетельствуют о процессе потепления, тогда как более низкие значения — о похолодании.

В связи с этим важно знать основные закономерности формирования температурного режима горных пород как одного из главенствующих

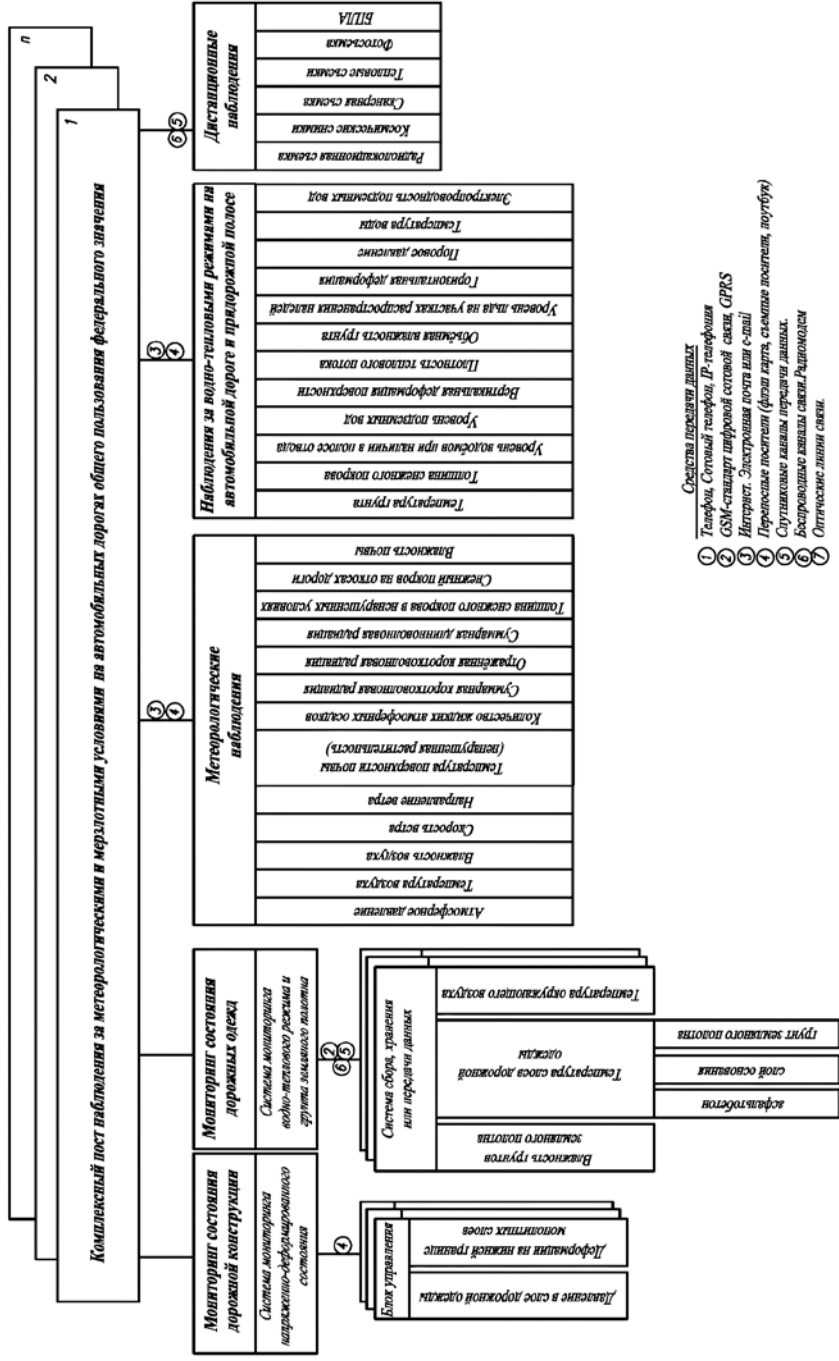


Рис. 8.1. Стационарный пост мониторинга. Схема структурная

щих факторов состояния криолитозоны и устойчивости мерзлых толщ, поскольку именно температурный режим определяет как физико-механические свойства ММП, так и развитие и протекание многочисленных криогенных процессов, в том числе опасных.

8.2.1. Наблюдения за температурным режимом пород на геокриологических стационарах и полигонах

Для изучения температурного режима ММП в годовом и многолетнем циклах на геокриологических стационарах и полигонах осуществляется строительство системы наблюдательных скважин. Проходка скважин осуществляется укороченными рейсами с полным отбором керна для последующих лабораторных исследований и испытаний мерзлых грунтов. Оптимальным диаметром проходки скважин считается 112–146 мм в зависимости от проектной глубины выработки. Диаметр технической колонны не должен превышать 60 мм. Затрубное пространство скважины должно засыпаться сухим песком во избежание образования пустот. В скважинах глубиной до 30 м в качестве технической колонны можно использовать полиэтиленовые трубы. В более глубоких скважинах следует использовать металлические трубы, поскольку обсадка пластиковыми трубами затруднена. Для предотвращения влияния охлаждения или перегрева верхней части технической колонны из металла на датчики термодатчиков целесообразно на глубине 0,2–0,3 м от поверхности в техническую колонну вмонтировать муфту из капролона, прочного и плохо проводящего тепло материала. В этом случае указанная муфта будет выполнять роль прерывателя теплового потока по технической колонне.

Общее количество буровых скважин на стационаре оставляет около 25 шт., из которых 10 — глубиной от 60 м до 120 м. Две скважины должны вскрыть всю мощность мерзлой толщи, при этом одна бурится на самой высокой абсолютной отметке территории, где, как правило, отмечается максимальная мощность мерзлоты, а вторая — наоборот, на самых низких отметках, например в долине реки, где следует ожидать минимальную мощность ММП. Остальные скважины бурятся в доминантных природно-территориальных комплексах до глубины, примерно в 2–3 раза превышающей мощность годовых теплооборотов (30–40 м), образуя с опорными (80–120 м) скважинами наблюдательные профили и поперечники. Наблюдательные скважины на стационаре должны максимально полно охарактеризовать как геокриологическое строение территории, так и изменчивость теплового поля мерзлых толщ.

Выполнить эту задачу с помощью одной скважины глубиной 25,2 м, как это предусмотрено Программой ФА Росгидромет, невозможно даже теоретически. Это положение наглядно иллюстрируют графики измене-

ния среднемесячных температур ММП в 10 наблюдательных скважинах на геокриологическом стационаре Марре-Сале (рис. 8.2, см. с. XXXI цв. вклейки) в различные сезоны года.

Как видно из приведенных рисунков, наибольшая изменчивость теплового поля в грунтах отмечается в середине зимнего периода в феврале. Это связано с процессами снегонакопления и перераспределения его в результате метельных переносов. Для Заполярья, кроме февраля, в такой же мере это будет характерно для всех зимних месяцев — с декабря по апрель. По этой причине ответить на вопрос, какая из приведенных скважин является главной и соответствует представлениям Росгидромета, не представляется возможным.

Характерной особенностью полигонных исследований является организация и проведение наблюдений за режимом геокриологических условий на региональных профилях, располагаемых в широтном и меридиональном направлениях, что позволяет в конечном итоге разработать постоянно действующую пространственно-временную модель крупной территории, как правило, не в полной мере обеспеченной (либо не обеспеченной вовсе) материалами государственной геологической, гидрогеологической и инженерно-геологической съемки среднего масштаба. На региональном профиле предполагается осуществить строительство не менее 12–16 опорных наблюдательных скважин. Из общего числа скважин не менее 2–3 скважин являются гидрогеологическими и проходятся до первого подмерзлотного водоносного горизонта, а остальные, глубиной 100 м, проходятся в пределах основных типов местностей (геокриологических участков) на всех геоморфологических уровнях.

Наблюдательная сеть геотехнического мониторинга проектируется промышленными предприятиями, недропользователями в соответствии с технологическими особенностями добывающих и перерабатывающих производств.

Мониторинговая информация, полученная на объектах ГТМ по ответственным производствам, должна в полном объеме транслироваться в региональные аналитические центры. Это необходимо делать для анализа и контрольной проверки оценок состояния грунтов оснований и устойчивости промышленных объектов, составленной на производствах. Как правило, глубина наблюдательных скважин, практически во всех известных проектах ГТМ в среднем составляет 10–15 м, в отдельных случаях — 20 м.

По мнению проектировщиков, этой глубины скважин достаточно для принятия решений о разработке мер по оперативному воздействию на нештатные ситуации у отдельных зданий. Однако этой глубины скважин явно недостаточно, чтобы оценить интегральное влияние всей за-

стройки на тепловое состояние подстилающих мерзлых толщ в целом, что крайне важно для разработки упреждающих проектных решений на длительную перспективу. Однако такие задачи не ставятся в рамках проектов ГТМ как не соответствующие перечню задач. В противном случае — нецелевое использование средств.

Сеть ГТМ на крупных промышленных сооружениях и объектах недропользования необходимо расширить за счет включения в государственные лицензионные соглашения дополнительных требований по созданию специализированной наблюдательной сети термометрических скважин и последующей передачи получаемой мониторинговой информации в региональные центры сбора.

Эти требования должны быть поддержаны на законодательном уровне. Представляется, что наблюдательная сеть скважин в границах геотехнического мониторинга, позволяющая оценить «интегральное» изменение температуры мерзлых толщ в пределах инфраструктурной застройки (такой как компрессорные станции, пункты подготовки газа и др.) по сравнению с фоновыми (климатическими) изменениями должна состоять, как минимум, из 4 скважин. Три скважины располагаются в центральной части промзоны, а одна — в рекреационной. Для получения «интегральных» значений температуры грунтов в рассматриваемом варианте глубина скважин должна быть не менее 80—100 м.

В процессе строительства наблюдательных скважин должен быть выполнен полный объем полевого и лабораторного инженерно-геологического опробования мерзлых пород: состав, льдистость (влажность), плотность, осадка при оттаивании и т.д. Наблюдательные скважины оборудуются автономными автоматизированными средствами для регистрации и накопления температурных данных.

Результаты мониторинговых термометрических наблюдений по этим скважинам, а также по ряду других более мелких скважин, пробуренных для ведения геотехнического мониторинга, должны в согласованном порядке передаваться региональным и далее центральным подразделениям службы государственного мониторинга для контрольной оценки теплового состояния грунтов оснований наиболее значимых технических сооружений.

Полученная таким образом информация позволит в кратчайшие сроки составить и актуализировать все имеющиеся разномасштабные и разновременные карты инженерно-геологического и геокриологического содержания для территории криолитозоны. Кроме того, данные мониторинговых наблюдений за температурным режимом пород будут положены в основу прогностической модели территории, позволяющей на базе натурных данных оценивать возможные изменения теплового содержания мерзлых толщ в реальных масштабах и периодах времени.

8.2.2. Регламент наблюдений на геокриологических стационарах и полигонах

Наблюдения в скважинах, с применением автономных автоматизированных измерительных комплексов в течение двух-трех лет следует проводить 4 раза в сутки и снизить опрос наблюдений в дальнейшем в глубоких скважинах до 1 раза в сутки после того, как будут получены достоверные данные надежной обеспеченности среднесуточных значений по данным одного замера. Наблюдения в скважинах глубиной 30–40 м, особенно в сочетании с температурными наблюдениями по оценке влияния напочвенных растительного и снежного покровов, следует проводить от 4 раз в сутки и более на постоянной основе. Это особенно необходимо для определения и уточнения тепловой модели различных природно-территориальных комплексов, а также для достоверных данных при разработке расчетных методов оценки температурного поля в мерзлых толщах различного типа. Кажущийся избыток мониторинговой информации совершенно не отягощает их получение, поскольку такой режим работы автоматизированных приборов регистрации и накопления информации (к примеру, «Логгер LPC»), никоим образом не снижает их производительности. В то же время не используемая в настоящее время столь детальная информация может быть бесценна в последующем при изменении методов и расчетных схем оценки тепловых полей в ММТ.

Интервал глубин измерения температуры по скважинам составляет: 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0; 12,0; 14,0; 16,0; 18,0; 20,0; 22,0; 24,0; 26,0; 28,0; 30,0; 35,0; 40,0; 45,0; 50,0; 60,0; 70,0; 80,0; 90,0; 100,0; 120,0. Далее через 20 м, а на подошве мерзлой толщи частота замеров может быть существенно увеличена. В верхней части разреза (на глубинах 0,0; 0,5; 1,5 и даже более частых) замеры следует проводить в скважинах, расположенных на специальных теплобалансовых площадках в процессе проведения НИР. Для основных мониторинговых скважин приведенные интервалы наблюдений за температурным режимом мерзлых толщ являются, на наш взгляд, оптимальными.

Исследования температурного режима грунтов проводятся с использованием сведений о климатических характеристиках (температура воздуха и поверхности, количество осадков, высота и плотность снежного покрова). Необходимую информацию могут дать материалы наблюдательной сети Росгидромета и использование автоматических метеорологических станций. Анализируются данные ближайших метеостанций за многолетний период наблюдений.

В изучении термического режима поверхности почвы и наземных покровов, тепло- и влажностного режима грунтов сезонно-протаивающего слоя рекомендуется применять логгерные системы регистрации температуры, теплового потока и влажности, позволяющие записывать

в памяти данные в течение года. Для исключения влияния конвекции следует применять обсадные колонны скважин малого диаметра (57 мм, а для скважин глубиной более 200 м — 76 мм). Для снижения влияния тепловых помех в металлических трубах необходимо использовать тепловые прерыватели — соединительные муфты из прочных искусственных материалов с низкой теплопроводностью, например из капролона (полиамид-6), не уступающего по прочности стали.

Состав и влажностный режим грунтов слоя сезонного протаивания изучается при помощи проходки мелких скважин с прободоотборниками. Мелкие скважины задаются в каждом урочище рядом с термометрической скважиной. Отбор проб на влажность и объемную массу осуществляется методом режущих колец из отобранных образцов грунта. В мерзлых грунтах пробы отбираются из кернов при колонковом бурении скважин. Глубина и динамика изменения сезонно-талого слоя пород определяется металлическим шупом в первые 2–3 года через 10 дней, а в дальнейшем 1 раз в месяц. После получения надежных данных, характеризующих темпы протаивания в течение теплого периода года, можно ограничиться измерениями только максимальной глубины протаивания с наступлением первых заморозков на почве.

Снегомерные работы включают определение высоты и плотности снежного покрова при помощи снегомерных реек и плотномера. Частота замеров определяется конкретно решаемой задачей. Рекомендуется проводить снегомерные съемки не реже 1 раза в месяц.

8.2.3. Наблюдательные скважины и их технико-экономические показатели для типовых геокриологического стационара и полигона

В соответствии с обоснованием размещения геокриологических стационаров и полигонов на территории АЗРФ (раздел 6) предполагается создание 15 геокриологических полигонов и стационаров: Печорский, Воркутинский, Марресальский, Сабетта, Гыданский, Уренгойский, Ванкурский, Норильский (Снежногорский), Хатангский, Саскылакский (Тиксинский), Депутатский, Жиганский, Черский, Магаданский, Анадырский.

При оценке затрат на создание и содержание инфраструктуры и наблюдательной сети скважин стационаров и полигонов было сделано разделение их на две группы: первую — Европейскую и Западно-Сибирскую; вторую — Восточно-Сибирскую и Чукотскую. Это обусловлено тем, что эти регионы значительно отличаются по мощности мерзлых тош, а это влечет за собой некоторое увеличение объемов бурения при строительстве наблюдательных скважин и соответственно возрастание затрат на лабораторные работы, геофизические исследования, стоимость термизмерительной аппаратуры и т.п.

Состав и необходимое количество наблюдательных скважин для проектируемых геокриологических стационаров и полигонов основано на многолетнем опыте ведения мониторинговых работ на Европейском Севере, в Западной и Восточной Сибири и на Чукотке.

8.2.3.1. Строительство наблюдательных скважин, полевое и лабораторное опробование керна, геофизические исследования и оборудование выработок автономной измерительной аппаратурой на типовом геокриологическом стационаре и полигоне на Европейском Севере и в Западной Сибири

Геокриологический стационар

С учетом изменчивости ландшафтных условий и геокриологического строения типичных территорий Европейского и Западносибирского Севера на площади геокриологического стационара предполагается осуществить строительство наблюдательных скважин глубиной 250 м (2 скв.), 100 м (4 скв.), 80 м (4 скв.), 40 м (6 скв.) и 30 м (10 скв.). До глубины 70 м проходку скважин рекомендуется осуществлять с продувкой воздухом, а далее с промывкой. Бурение вести укороченными рейсами с полным отбором керна.

Скважины глубиной (ориентировочно) 250 м предназначены для полного вскрытия толщи ММП. Одна из скважин — гидрогеологическая, бурится для изучения состава и изменчивости напоров подмерзлотного водоносного горизонта в годовом и многолетнем циклах. Вторая скважина — полностью термометрическая, предназначена для изучения особенностей температурного градиента в наиболее представительных природно-территориальных комплексах (ПТК) на площади геокриологического стационара.

Скважины глубиной 100 м и 80 м являются опорными для доизучения геокриологического разреза и располагаются в доминантных ПТК, охватывающих крупные элементы ландшафтного строения территории. Скважины глубиной 40 м и 30 м располагаются в субдоминантных ПТК, включая очаги развития опасных экзогенных процессов криогенного ряда.

Итого на геокриологическом стационаре предполагается строительство 26 скважин общим объемом бурения 1760 п/м.

В качестве обязательных полевые и лабораторные определения состава и свойств ММП должны включать:

- определение влажности и плотности сложения ММП методом режущего кольца (1 опред. на 2 м бурения, всего 880 определений);
- отбор и упаковку монолитов мерзлых грунтов (на глубинах: 2, 4, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 250 м, всего 332 монолита;

- полный комплекс определений физических, физико-механических свойств мерзлого грунта с определением прочности и деформируемости длительным испытанием на одноосное сжатие на 332 монолитах;
- определение теплофизических свойств рыхлых и скальных грунтов в мерзлом и талом состоянии, всего 166 определений.

В затратах полевых работ, с учетом удаленности геокриологических стационаров от логистических центров, необходимо предусмотреть транспортировку монолитов в региональные аналитические центры с места полевых работ вертолетным транспортом (Ми 8-Т). Один полет вертолета на расстояние 350 км туда-обратно.

В процессе строительства скважин и после его завершения на площади стационара выполняется комплекс геофизических работ, включающих:

- наземную сейсморазведку (летом) 15 п/км;
- сейсмический каротаж 1760 п/м;
- наземную электроразведку (электротомография) 15 п/км;
- наземную электроразведку для определения нижней границы ММП методом зондирования становления поля в ближней зоне (метод ЗСБ) 15 п/км;
- электрокаротаж методом ВИК (высокочастотный индуктивный каротаж) 1760 п/м.

После завершения буровых и геофизических работ наблюдательные скважины оборудуются измерительной аппаратурой. С учетом точности измерений в широком диапазоне внешних и измеряемых температур (0,1 °C от минус 40 °C до плюс 50 °C), надежности и длительности эксплуатации (10 лет без поверки и 7–10 лет без замены питания в зависимости от типа) в качестве измерительной аппаратуры был выбран программно-аппаратный комплекс на базе «Логгер LPC», с соответствующими глубине скважин термокосами с медными датчиками ЭСМ-50. Для удобства эксплуатации термоизмерительной аппаратуры предпочтение было отдано комплектам с дистанционным съемом данных по ЗВ связи (раздел 8.3).

С учетом изложенного, для обеспечения мониторинга теплового состояния мерзлых толщ в пробуренных скважинах потребуются комплекты LPC-ZB-s с антенно-фидерными устройствами:

- с 1 косой 250 м и датчиком пластового давления для гидрогеологической скважины;
- с 1 термокосой 250 м с 38 датчиками ЭСМ-50;
- с 4 термокосами 100 м с 28 датчиками ЭСМ-50;
- с 4 термокосами 80 м с 26 датчиками;
- с 6 термокосами 40 м с 22 датчиками;

- с 10 термокосами 30 м с 20 датчиками.

В затратах на данный вид полевых работ необходимо предусмотреть монтажные, пусконаладочные работы и контрольные замеры, выполняемые специализированной организацией, имеющей допуск от предприятия изготовителя аппаратуры.

Геокриологический полигон

Территория каждого из проектируемых геокриологических полигонов, как правило, будет равняться 1–2 листам карты масштаба 1:500 000, что для Заполярья в среднем составит 80–150 тыс. км². Учитывая недостаточную изученность геокриологических условий Арктики, включая зоны перспективного экономического развития регионов, где как раз и планируется организация мониторинга вечной мерзлоты, на территории геокриологических полигонов предполагается строительство опорных наблюдательных скважин с целью доизучения строения мерзлых толщ, картирования и составления теплофизической модели полигона, интер- и экстаполяции мониторинговых данных. Предполагается строительство 14 опорных скважин, из которых две вскрывают мощность мерзлой толщи, а остальные, глубиной 100 м, размещаются в наиболее представительных природно-территориальных комплексах на площади геокриологического полигона. Общий объем бурения здесь составит 1700 п/м.

Все сопутствующие исследования (лабораторные, геофизические) и оборудование скважин термоизмерительной аппаратурой выполняются на полигоне по аналогии с работами на геокриологическом стационаре.

8.2.3.2. Строительство наблюдательных скважин, полевое и лабораторное опробование керна, геофизические исследования и оборудование выработок автономной измерительной аппаратурой на типовом геокриологическом стационаре и полигоне в Восточной Сибири и на Чукотке

Главное отличие в строительстве наблюдательной сети на Европейских и Западносибирских стационарах и полигонах от Восточносибирских заключается в том, что мощность мерзлых толщ на востоке может достигать 550–600 м. В этом случае затраты на строительство, лабораторные, геофизические работы и оборудование измерительной аппаратурой скважин, вскрывающих мощность мерзлой толщи, существенно возрастает. С целью снижения затрат было принято решение ограничить вскрытие мерзлой толщи одной скважиной на стационарах и одной на полигонах, а глубину термометрической скважины для оценки температурного градиента сократить до 250 м, так же как и в Западной Сибири и Европейском Севере. Что касается остальных скважин, глубиной 100,

80, 40 и 30 м, то количество их на объектах мониторинга остается неизменным, а стоимостные показатели — близкими.

Геокриологический стационар

Объемы горно-буровых, лабораторных и геофизических работ и оборудования скважин на стационарах в Восточной Сибири составят:

- строительство 26 скважин общим объемом бурения 2110 п/м;
- определение влажности и плотности сложения ММП методом режущего кольца (1 опред. на 2 м бурения, всего 1055 определений);
- отбор и упаковка монолитов мерзлых грунтов (на глубинах: 2, 4, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 420, 440, 460, 480, 500, 520, 540, 560, 580, 600 м, всего 350 монолита;
- полный комплекс определений физических, физико-механических свойств мерзлого грунта с определением прочности и деформируемости длительным испытанием на одноосное сжатие на 350 монолитах;
- определение теплофизических свойств рыхлых и скальных грунтов в мерзлом и талом состоянии, всего 175 определений;
- сейсмический каротаж 2110 п/м;
- электрокаротаж методом ВИК (высокочастотный индуктивный каротаж) 2110 п/м.

Наземные геофизические работы останутся как в Западной Сибири по 15 п/км.

Геокриологический полигон

Общий объем бурения на полигоне в Восточной Сибири и на Чукотке составит 2050 п/м. Соответствующим образом возрастут затраты на лабораторные, геофизические исследования и оборудование скважин термоизмерительной аппаратурой.

Основные показатели объемов и стоимости работ на всех объектах мониторинга приведен в табл. 8.3.

8.3. Технические средства мониторинга. Регламент наблюдений

8.3.1. Технические средства измерений на базе «Логгер LPC» (ООО «Геотехцентр»)

В качестве базовых технических средств для построения автоматизированной системы ГТМ с дистанционным съемом информации ООО «Геотехцентр» представляет измерительную аппаратуру на базе «Логгер LPC»

Таблица 8.3.

Основные технико-экономические показатели создания наблюдательной сети скважин для типовых геокриологических стационаров и полигонов на Европейском Севере, в Западной и Восточной Сибири и на Чукотке

№ п/п	Наименование работ и затрат (все стоимости в разделах приведены в тыс. руб., без учета НДС 20%)	Ед. изм.	Стоимость ед., тыс. руб.	Кол-во	Сметная стоимость
1	1 Строительство наблюдательных скважин на типовом стационаре на ЕС и Западной Сибири	п/м скв.	18	1760 26	31 680
	2 Полевые и лабораторные работы	усл. ан.	11,772	1710	20 130
	3 Геофизические работы наземные	усл. п/км	452,3333	45	20 354
	4 Каротаж	усл.100 п/м	190	35,2	6688
	5 Оборудование скважин автономной термоизмерительной аппаратурой	усл. компл.	393,31	26	10 226
	Итого				89 078
2	1 Строительство наблюдательных скважин на геокриологическом стационаре в Восточной Сибири	п/м скв.	18,7	2110 26	39 457
	2 Полевые и лабораторные работы	усл. ан.	11,772	1810	21 307
	3 Геофизические работы наземные	усл. п/км	452,3333	45	20 354
	4 Каротаж	усл.100 п/м	190	42,2	8018
	5 Оборудование скважин автономной термоизмерительной аппаратурой	усл. компл.	421,15	26	10 950
	Итого				100 086
3	1 Строительство наблюдательных скважин на типовом полигоне на ЕС и Западной Сибири	п/м скв.	18,7	1700 14	31 790
	2 Полевые и лабораторные работы	усл. ан.	11,772	1700	20 012
	3 Геофизические работы наземные	усл. п/км	452,333	43	19 450
	4 Каротаж	усл.100 п/м	190	34	6 460
	5 Оборудование скважин автономной термоизмерительной аппаратурой	усл. компл.	474,857	14	6 648
	Итого				84 360
4	1 Строительство наблюдательных скважин на типовом полигоне в Восточной Сибири	п/м скв.	18,7	2050 14	38 335
	2 Полевые и лабораторные работы	усл. ан.	11,772	2050	24 132
	3 Геофизические работы наземные	усл. п/км	452,333	43	19 450
	4 Каротаж	усл.100 п/м	190	41	7 790
	5 Оборудование скважин автономной термоизмерительной аппаратурой	усл. компл.	538,428	14	7 538
	Итого				97 245
	ВСЕГО по пп. 1–4				370 769
	ВСЕГО на 15 стационарах и полигонах в АЗРФ				5561 535

Комплексы измерительные программно-аппаратные на базе логгеров LPC (далее по тексту — комплексы или комплексы на базе логгеров LPC) предназначены для непрерывных многозонных измерений температуры горных пород, грунтов, воздушной и водной среды, а также измерений аналоговых сигналов от милливольтовых и омических устройств постоянного тока.

Принцип работы комплексов основан на измерении и преобразовании при помощи логгеров LPC сигналов, поступающих от термопреобразователей сопротивления, омических и милливольтовых устройств постоянного тока, установленных в термоподвесках, в цифровые сигналы с последующей записью в памяти логгера и возможностью передачи измеренной информации на персональный компьютер при помощи интерфейса RS-232 или по каналам беспроводной связи стандартов GSM, GlobalStar и ZigBee.

Комплексы относятся к проектно-компонуемым средствам измерений и состоят из логгеров LPC различных исполнений, термокос и, при необходимости, модулей связи и локальных коммутаторов, формирующих датчиковые сети.

Логгеры LPC выполнены в виде цилиндра в металлическом корпусе (все исполнения за исключением исполнения LPC-Н). Внутри корпуса логгера расположены печатные платы с элементами электрической схемы, опорный источник питания, прецизионный высокостабильный резистор, энергонезависимая память. В основании корпуса расположен 32-контактный резьбовой разъем для подключения термокос, модулей интерфейса, модулей связи и локальных коммутаторов.

Логгеры LPC выпускаются в следующих исполнениях:

- LPC-F — базовое исполнение, предназначенное для работы в условиях Крайнего Севера, имеет опрос всех датчиков с периодом от 1 минуты; сохранение информации о градуировках датчиковых сетей в памяти логгера, объем памяти от 800 тыс. до 1,6 млн измерений, связь с логгером осуществляется посредством интерфейса RS-232;
- LPC-Fm — «морское» исполнение базовой модели логгера LPC-F для работы в водоемах и на шельфе при глубине погружения до 500 м;
- LPC-Н — «ручное» исполнение для проведения контрольных измерений с визуальным отображением результатов, внесением комментариев к измерениям с последующей передачей данных в базу данных;
- LPC-GSM — исполнение на базе модели LPC-F, предназначенное для передачи измеренных данных в центр сбора информации по каналам сетей GSM;

- LPC-GS — исполнение на базе модели LPC-F, предназначенное для передачи измеренных данных в центр сбора информации через спутниковые каналы связи GlobalStar;
- LPC-ZB-T (LPC-ZB-Ts) — исполнение на базе модели LPC-F, предназначенное для организации локальных сетей по технологии ZigBee;
- LPC-ZB-I (LPC-ZB-Is) — исполнение аналогичное LPC-ZB-T (LPC-ZB-Ts) с дополнительными инклинометрическими датчиками и антенной.

Термокосы ТК состоят из датчиков температуры на основе индивидуально градуированных стабилизированных медных термопреобразователей сопротивления типа М50 (по ГОСТ 6651-2009), включенных по четырехпроводной схеме с количеством датчиков на встроенном коммутаторе до 10 штук и до 990 штук на локальных коммутаторах. Также в термокосу дополнительно могут быть встроены выводы для подключения омических и милливольтовых устройств постоянного тока.

Таблица 8.4.

Диапазоны измеряемых величин и точности

Измеряемый параметр	Шкала	Точность	Примечание
Сопротивление	0...61,2 Ом	$\pm 0,008$ Ом	
Напряжение	-80...+70 мВ	± 75 мкВ	
Частота	75 Гц...300 кГц	$F(\text{кГц})/24,576$ (%)	Входной сигнал: ТТЛ уровень или открытый коллектор
Прием цифрового кода	16 разрядов		

Например, при использовании в качестве датчика температуры ЭЧМ-0183 (паспорт 405212.002ПС) с характеристиками преобразования по ГОСТ Р 6651-94 и схемой соединения по ГОСТ Р 50353-92 логгер обеспечивает измерение температур в диапазоне от минус 40,0 °С до плюс 55,0 °С с разрешающей способностью 0,020 °С и абсолютной погрешностью измерений не хуже $\pm 0,1$ °С, а при использовании в качестве датчиков положения инклинометров серии NB3 компании Seika Mikrosystemtechnik GmbH логгер обеспечивает измерения углов отклонения от вектора силы тяжести, ограничиваемые характеристиками самого датчика: диапазон измерения $\pm 30^\circ$, разрешающая способность не хуже $\pm 0,005^\circ$.

Проводная часть датчиковых сетей организовывается любыми кабелями, имеющими высокое сопротивление изоляции с техниче-

скими условиями, удовлетворяющими предполагаемым условиям эксплуатации. Может быть рекомендован кабель КСПВ 27 (ТУ 16-505148-75).

Допускается погружение датчиковой части аппаратуры в воду на глубину до 50 м. Защищенность от пыли и влаги IP 68 (ГОСТ 14254-80).

Сопротивление изоляции термокос между измерительными цепями или корпусом при нормальных климатических условиях — не менее 500 МОм при воздействии влаги не менее 20 МОм.

Время автономной работы логгера зависит от количества подключенных датчиков и частоты опроса. Потребление в межсеансном интервале менее 8 мкА, потребление при проведении сеанса измерений до 10 мА. Время проведения измерений одного датчика — порядка 0,12 с. Таким образом, емкость батареи логгера обеспечивает питание комплекта оборудования из 55 датчиков температуры при одном измерении в сутки в течение 120 месяцев. Срок службы логгера без изменения объявленных характеристик — 10 лет.

Все применяемые компоненты имеют промышленное исполнение, прошли входной контроль и дополнительные отбраковочные испытания, что обеспечивает высокие показатели безотказности.

Технология ZigBee на сегодняшний день является единственной стандартизированной беспроводной технологией разработанной и реализованной, ориентируясь на задачи мониторинга, управления, эксплуатации многопрофильных мультиинтерфейсных датчиковых сетей, систем промышленной и домашней автоматики. Обладая отработанными математическими и алгоритмическими моделями, протокол позволяет создавать уникальные проекты мониторинга и дистанционного сбора информации медленно меняющихся физических параметров практически любых объектов с высокой достоверностью.

Датчиковые сети. За счет универсальности применяемых технических средств при одном и том же их наборе путем перепрограммирования можно получать измерительную систему с разнообразными свойствами.

Конструктивное исполнение представлено на рис. 8.3–8.14.



Рис. 8.3. Общий вид логгера LPC-F

Рис. 8.4. Общий вид логгера LPC-H



Рис. 8.5. Термокоса и логгер LPC ZB-T в сборе



Рис. 8.6. Грунтовая деформационная марка (ГДМ-Д)



Рис. 8.7. Деформационная марка ЛРС ЗВ-І с элементами крепления



Рис. 8.8. Грунтовые деформационные марки на ПК 710+88

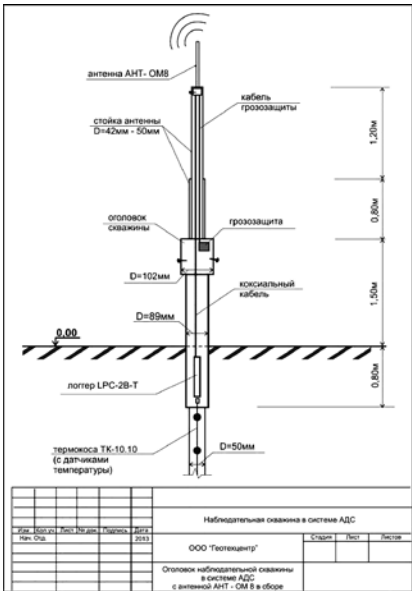


Рис. 8.9. Сборочный чертеж оголовка наблюдательной термометрической скважины в системе АСД ГТМ



Рис. 8.10. Монтаж оголовка скважины



Рис. 8.11. Термометрическая скважина и деформационные марки на трубе на ПК 710



Рис. 8.12. Деформационные марки на КУ 1420 на КС «Байдарацкая»



Рис. 8.13. Деформационные марки на КУ 159 на КС «Байдарацкая»



Рис. 8.14. Деформационные марки на КУ 159 на КС «Байдарацкая»

Обслуживающая программа логгера ZigBee.

Программа предназначена для работы с системой сбора данных на основе логгеров моделей LP4Fxxx-ZB. Программа позволяет:

- получать из логгера информацию о топологии датчиковых сетей, хранить ее в виде информационной базы данных для последующей работы;
- осуществлять непосредственную работу с логгером: программирование, запуск логгера на проведение сеансной работы, съем информации, собранной логгером, проведение разовых замеров;
- осуществлять работу с логгером дистанционно через сеть ZigBee: съем информации, собранной логгером, изменение режима измерительных сеансов;
- проводить работу с собранной логгером информацией, обрабатывать ее, получая конкретные физические величины по каждому из подключенных датчиков, просматривать обработанные данные, по желанию сохранять их для дальнейшего использования, в том числе и в виде Excel-таблицы;
- выполнять некоторые сервисные функции: получать информацию о подключенном к компьютеру логгере, останавливать работу логгера.

Логгер является устройством реального времени. Для поддержания режима реального времени в программе предусмотрено использования модуля GPS, который обеспечивает получение со спутника информации о точном текущем времени. Программа предусматривает возможность вместо единого времени использовать время часового пояса, установленного на компьютере пользователя. В этом случае синхронизация работы приборов обеспечивается пользователем. В отсутствии модуля GPS для корректной работы программы необходимо следить за точностью часов компьютера.

8.3.2. Технические средства измерений на базе измерительной аппаратуры ООО «Эталон» (г. Омск) и «Сколково»

ОАО НПП «Эталон» выпускает портативные и стационарные контроллеры. Контроллер предназначен для считывания результатов измерения температуры с термокос.

Контроллер цифровых датчиков портативный ПКЦД (далее — ПКЦД) выпускается в двух исполнениях: ПКЦД-1/16, ПКЦД-1/100 — в зависимости от количества одновременно подключенных датчиков температуры и длины линии связи.

ПКЦД-1/16 может работать с сетями длиной до 25 м, объединяющими до 16 датчиков, и считывать результаты измерения от 3 до 60 с. Прибор может идентифицировать каждый цифровой датчик и расстояние до него.

В отличие от ПКЦД-1/16 контроллер ПКЦД1/100 позволяет устойчиво считывать измерения с датчиков на расстоянии 100 м и более, а также поддерживает от 1 до 100 датчиков в сети с интервалом опроса от 3 с до 10 мин. Связь с ПК можно осуществлять через СОМ-порт и посредством USB. При подключении к USB контроллер может работать без элемента питания.

ПКЦД представляет собой устройство, способное считывать, отображать, записывать и сохранять информацию во внутреннюю память. ПКЦД обеспечивает индикацию температуры объекта с разрешением 0,06 °С на жидкокристаллическом индикаторе с подсветкой, обеспечивает связь с IBM-совместимым компьютером. Просмотр содержимого в энергонезависимой памяти можно осуществить как на индикаторе контроллера, так и на компьютере в виде таблицы или графика. При подключении к ПК строятся температурные графики в режиме реального времени, выводятся ранее сохраненные результаты в виде таблиц. Для оформления отчетов возможен экспорт данных в Excel (рис. 8.15 и 8.16, табл. 8.5).



Рис. 8.15. Портативные контроллеры цифровых датчиков ПКЦД-1/16 и ПКЦД-1/100



Рис. 8.16. Термокаса (МЦДТ 0922) с контроллером (ПКЦД-1/100) и термокаса (МЦДТ 0922)

Таблица 8.5.

Метрологические и технические характеристики МЦДТ 0922

Основные технические данные	
Диапазон измеряемых температур, °C	–50 ... +100
Пределы абсолютной погрешности –50...–30, °C	$\pm(0,1+0,014(I \text{ t } I-30))$
Пределы абсолютной погрешности –30...+30, °C	$\pm 0,1$
Пределы абсолютной погрешности +30...+100, °C	$\pm(0,1+0,014(I \text{ t } I-30))$
Показатель тепловой инерции, с, не более	25
Материал защитной арматуры: сталь	12X18H10T
Корпус измерительного преобразователя	изолированный
Степень защиты от воздействия пыли и воды по ГОСТ 14254-96	IP56
Количество зон	от 3 до 250
Общая длина, м	от 0,5 до 120
Вид климатического исполнения	У1, У3, Т1, Т3
Средняя наработка до отказа, ч, не менее	36 000

Примечание: $I \text{ t } I$ — абсолютное значение температуры, °C, без учета знака

Аналогичную аппаратуру выпускает предприятие «Сколково», при этом рекомендуется для передачи данных использование технологии IoT.

8.3.3. Рекомендации по применению средств мониторинга

Аппаратура, выпускаемая предприятиями «Эталон» и «Сколково», изготавливается на базе полупроводниковых цифровых датчиков. Однако даже лучшие модели полупроводниковых цифровых датчиков, используемых в термокосах в качестве первичных преобразователей, имеют существенно низкие точности. Например, для DS18B20 производитель объявляет точность $\pm 0,5^\circ\text{C}$ без указания долговременной стабильности, а ADT7320 имеет точность $\pm 0,25^\circ\text{C}$ с объявленной кратковременной стабильностью.

Известно, что в мире не выпускают цифровые датчики, обеспечивающие точность $0,1^\circ\text{C}$. Как при этом упомянутые производители могут добиваться сертификации по точности $0,1^\circ\text{C}$, а по долговременной стабильности 4 года и 5 лет (соответственно), никому не известно!

Использование технологии IoT для создания распределенных сетей, например, сбора геотехнической информации, базируется на наличии того или иного канала связи. В качестве каналов связи могут применяться как существующие, так и вновь создаваемые проводные или радиоканалы, например каналы сетей мобильной связи.

При этом необходимо помнить, что проводные каналы имеют ограниченное применение в силу низкой эффективности по критерию цена-качество, особенно для вновь создаваемой инфраструктуры, что продиктовано высокими капитальными затратами.

Построение систем на базе существующих сетей мобильной связи требует наличия зоны уверенного приема, что зачастую нереализуемо в труднодоступной и отдаленной местности в силу высоких капитальных затрат на создание инфраструктуры, размещение и поддержание ее в работоспособном состоянии.

Кроме того, оборудование сетей мобильной связи должно обеспечивать предоставление услуг связи, соответствующее как минимум технологии LTE или перспективных систем 5G, глобального покрытия сети спутниковой связи, предоставляющей широкополосный доступ в Интернет.

Покрытие значительных зон обслуживания средствами технологии WiFi также малоэффективно по аналогичным причинам.

Таким образом, практическая реализация технологии IoT в отдаленных местностях, вероятнее всего, потребует больших инфраструктурных вложений, являющихся зачастую самой дорогой частью проекта, а низкая интенсивность (массовость) использования увеличит сроки окупаемости практически до бесконечности.

Кроме того, следует добавить существенную долю расходов на оплату услуг провайдера связи.

Аппаратура, выпускаемая ООО «Геотехцентр», относится к прецизионной и обеспечивает высокую точность измерений с передачей данных по протоколу ZigBee (2,4 ГГц) в широком спектре изменения внешних температур без необходимости проведения поверки в течение 10 лет (сертификат № 19.000.0641).

Начиная с 2012 г. этой аппаратурой оснащена мониторинговая сеть скважин I и II ниток магистрального газопровода Бованенково—Ухта. Здесь на протяжении более 500 км работают около тысячи приборов на базе «Логгер LPC».

При выборе измерительных приборов того или иного предприятия следует руководствоваться прежде всего *наличием длительной стабильности и точности показаний применяемых первичных преобразователей — датчиков в термодатчиках*.

Такие датчики могут изготавливаться либо из состаренной меди, либо из платины. Первые имеют преимущества не только по цене, но и по линейным характеристикам в более широком диапазоне внешних температур.

8.4. Наблюдения за динамикой мерзлотных (криогенных) процессов

В криолитозоне развиты многочисленные экзогенные геологические процессы, часть из них имеют собственно криогенное происхождение, для части процессов криогенные и некриогенные факторы их протекания сочетаются, часть процессов развивается безотносительно мерзлого состояния горных пород. При этом большинство процессов ведет к преобразованиям поверхности и ландшафтов, а некоторые развиваются скрыто, без внешних проявлений.

8.4.1. Рельефообразующие процессы

К рельефообразующим криогенным процессам относят:

- термокаст;
- криогенное растрескивание и образование полигонально-жильных льдов;
- сезонное и многолетнее пучение;
- линейная эрозия (оврагообразование);
- речная боковая эрозия;
- термоабразия морских берегов;
- термоденудация на склонах;
- криогенные оползни и солифлюкция;

- образование воронок газовых выбросов;
- наледи.

8.4.1.1. Термокарст

Под термокарстом обычно понимают совокупность физических процессов, связанных с оттаиванием внутригрунтовых льдов и просадкой поверхности. Термокарст может развиваться как в естественных условиях из-за изменения условий теплообмена на поверхности, так и при техногенных/антропогенных нарушениях. Термокарст представляет «процесс протаивания мерзлых льдистых грунтов и подземных льдов, сопровождающийся образованием просадочных, провальных форм рельефа» [Дубиков и др., 2003, с. 120]. Развитие термокарста связано достижением глубины протаивания льдистых грунтов или подземных льдов. В стабильных участках между границей сезонно-талого слоя и верхней границей льдистых грунтов или подземных льдов существует так называемый защитный [Ефимов, Граве, 1940], или промежуточный, слой [Шур, 1988]. Основной функцией этого слоя является защита подземных льдов от протаивания.

Первоначально термокарст обнаруживается происходящими локальными просадками грунтов на изменяющихся участках. Это могут быть округлые западины, или полигональные бугристо-западинные образования. Со временем эти первоначальные термокарстовые формы микрорельефа могут преобразоваться в термокарстовые озера.

Наиболее заметно термокарст проявляется при оттаивании полигонально-жильных льдов и просадке грунтов над поверхностью ледяных жил с их обводнением (рис. 8.17) или просадке грунтов мерзлотных полигонов при неизменности поверхности ледяных жил (рис. 8.18).



Рис. 8.17. Термокарст по полигонально-жильным льдам



Рис. 8.18. Термокарст мерзлотных полигонов

Нередко термокарсту оказываются подвержены грунты с весьма высокой льдистостью или с так называемыми пластовыми льдами, если лед попадает в зону сезонного или многолетнего оттаивания. Образующиеся при этом западины на ровных поверхностях заполнены водой, на наклонных могут быть полностью дренированы, но при этом обнаженной может оказаться высокольдистая оплывающая стенка, где поддерживается термокарст и сопутствующие процессы. Обычно же в естественных условиях, как правило, термокарст со временем затухает [Шур, 1988], том числе и под озерами благодаря накоплению на дне теплоизолирующей грунтовой массы (таберальных отложений).

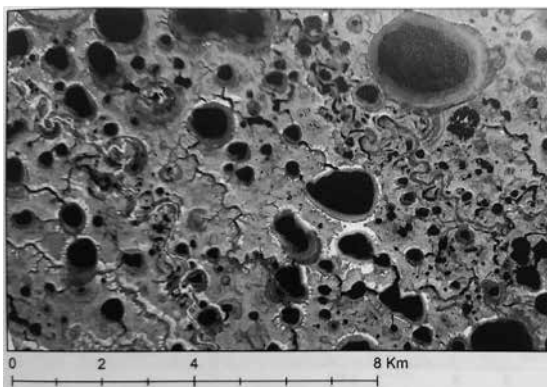


*Рис. 8.19. Озерно-термокарстовая равнина, полуостров Ямал
[Математическая морфология... 2016]*

Термокарст активно развивается под озерами. Здесь, вследствие оттаивания льдосодержащих грунтов и их осадки, происходит формирование подозерного талика и опускание дна озера. Глубина подозерного талика зависит от глубины озера. Часто все или большинство озер в криолитозоне относят к термокарстовым, однако это не так. В области рас-

пространения многолетнемерзлых пород существует множество озер не термокарстового генезиса.

Поскольку процесс развития термокарста связан с оттаиванием и осадкой мерзлого грунта, он хорошо поддается расчету и прогнозу как в отношении конкретного проявления, так и статистически в структуре ландшафта [Математическая морфология... 2016].

Мониторинг термокарста. Пораженность территории хорошо определяется на основании дешифрирования аэро- и космоснимков среднего (до 30 м на пиксель) и высокого разрешения. Оценки пораженности территории целесообразно проводить для естественных условий (фоновый мониторинг) один раз в 2–5 лет в зависимости от скорости развития термокарста. На участках текущей или ожидаемой техногенной нагрузки оценки пораженности необходимо выполнять ежегодно или даже чаще, в зависимости от степени техногенной нагрузки.

Наблюдательная сеть за развитием термокарста включает контрольную площадку с ненарушенным типичным зональным типом ландшафта и участок, затронутый термокарстом. Перечень контролируемых параметров: высотные отметки маркеров, глубина воды, температура грунтов и глубина сезонного протаивания. Для наблюдений за пространственными изменениями используются нивелирование, высокоточная GPS-привязка, ДЗЗ, съемка с коптера. Для комплексного определения количественных характеристик термокарста перспективен метод лидарной съемки.

Регулярность наблюдений можно корректировать в зависимости от сложности процесса. Обязательное измерение проводится в конце теплого периода. На сухом с поверхности месте можно проводить весеннее измерение, чтобы учитывать зимнее пучение. Из косвенных наблюдений желательны: ландшафтная, или геоботаническая, съемка ежегодно или один раз в 3–5 лет, измерение весовой или объемной влажности грунтов, измерение уровня воды в пьезометрической трубке.

Выходная информация показывает темпы развития термокарста, это графики изменений отметок, топографические карты, расчет объемов проседания, рост площади водоема. Обязательные измерения — один раз в год, обычно в конце теплого периода.

8.4.1.2. Криогенное растрескивание и образование полигонально-жильных льдов

Под криогенным растрескиванием понимают процесс образования трещин в мерзлых грунтах под действием растягивающих напряжений, превышающих предел прочности на растяжение, из-за зимнего охлаждения грунтов. Система трещин образует морозобойные полигоны. После образования первичной трещины в нее весной могут попадать поверх-

ностные воды, замерзать и фиксироваться в ней в виде тонкого ледяного клина. В последующие годы процесс трещинообразования многократно повторяется, глубина трещин увеличивается, размеры ледяного клина возрастают. Таким образом формируется полигонально-жильная структура многолетнемерзлых пород. Размеры ледяных жил по верху составляют от нескольких десятков сантиметров (на участках молодых жил) до нескольких метров (на Европейском Севере и севере Западной Сибири) и до 10 м в Якутии (рис. 8.20).

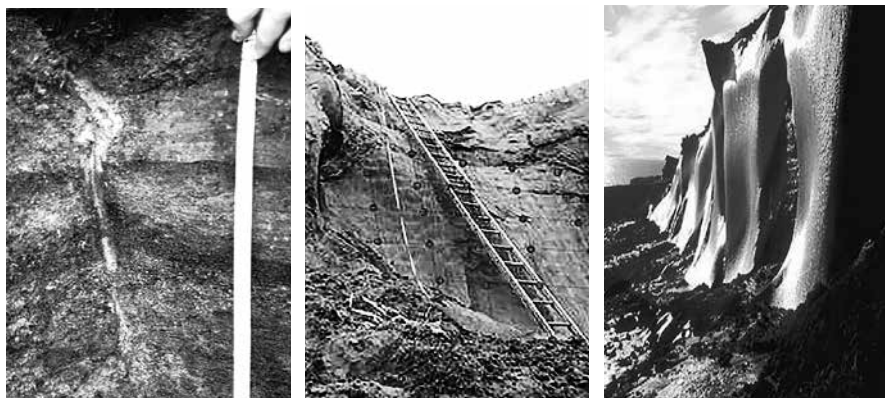


Рис. 8.20. Полигонально-жильные льды. Слева — Европейский Север, в центре — Ямал, справа — Северная Якутия

Глубина жил составляет от нескольких метров до 40 м и более. На Европейском Севере глубина ледяных жил достигает 5–7 м, в Западной Сибири — 6–12 (редко до 20 м), в Якутии — до 45 м.

Мониторинг криогенного растрескивания. Параметры криогенного растрескивания представляют интерес для оценки условий работы линейных сооружений (подземные кабели, заглубленные и полузаглубленные газо- и нефтепроводы), поэтому этот вид мониторинга, как правило, включается в состав геотехнического мониторинга и для научных целей. К основным характеристикам криогенного растрескивания, подлежащим мониторингу, относят: пораженность, раскрытие трещин, размеры полигонов, напряжения в грунтах при трещинообразовании. Методами наблюдений являются дешифрирование периодических космоснимков высокого разрешения (каждые 3–5 лет), установка трещиномеров, измеряющих раскрытие трещин, и установка измерителей напряжений и деформаций в грунтах.

8.4.1.3. Сезонное и многолетнее пучение

Криогенное пучение — это комплекс процессов, обусловленный промерзанием грунта и включающий криогенную и напорную миграцию

влаги, ее промерзание и увеличение объема промерзшего грунта [Гречищев и др., 1980]. Различают сезонное пучение, которое реализуется ежегодно при промерзании грунтов сезонно-талого слоя, и многолетнее пучение, которое вызывает образование бугров пучения. Сезонное пучение выражается в поднятии дневной поверхности при промерзании. Этот процесс во многих случаях обратим — приподнятая поверхность после летнего протаивания вновь опускается до исходного положения. Грунты в криолитозоне подвержены пучению в разной степени. Наибольшее пучение присуще влажным мелкодисперсным грунтам пылеватого состава, наименьшее — дренированным пескам. Глины занимают промежуточное положение. Величина пучения решающим образом зависит от состава и увлажненности грунтов (рис. 8.21, см. с. XXXVIII цв. вклейки).

Сезонное пучение представляет собой серьезную угрозу при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений за счет необратимого выпучивания свайных оснований и фундаментов (рис. 8.22), а также неравномерного пучения в основании зданий и сооружений.



Рис. 8.22. Незатухающее выпучивание опор и деформация напорного нефтепровода Новый Порт—Мыс Каменный

В некоторых случаях деформации зданий и сооружений принимают недопустимый характер. Наблюдения за сезонным пучением в Российской Арктике показали, что потепление климата приводит к существенному возрастанию пучения, главным образом в супесчаных грунтах, но также и в глинистых грунтах [Гречищев и др., 1980].

В условиях высокого влагонасыщения и относительно большого сезонного оттаивания грунтов может реализоваться многолетнее пучение с образованием бугров пучения. В зависимости от конкретных условий могут образоваться мелкие (рис. 8.23, слева) или крупные (рис. 8.23, справа) бугры пучения — гидролакколиты.



Рис. 8.23. Многолетние бугры пучения: слева — район Надыма, справа — район южного Гыдана

Многолетние бугры пучения не подвержены постоянному росту, они проходят стадии активного роста, стабилизации и разрушения. Наблюдения показывают, что скорость разрушения многолетних бугров пучения (понижения их поверхности) в зонах южной тундры и северной тайги может достигать 8–15 см/год (рис. 8.24). Как правило, разрушение многолетних бугров пучения связано с протаиванием верхней льдистой толщи и осадкой грунтов.

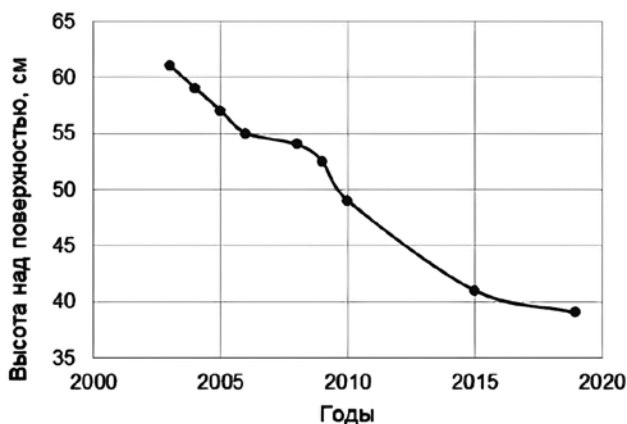


Рис. 8.24. Понижение поверхности бугра пучения, район Надыма

Мониторинг пучения. К основным характеристикам пучения грунтов относятся пораженность территории процессами пучения, величина пучения, влагосодержание пучинистых грунтов в сезонно-талом слое перед началом промерзания — так называемая предзимняя влажность. Пораженность территории хорошо определяется по данным дешифрирования аэрофото- и космоснимков высокого разрешения, фотопланам,

полученным со съемок дронами. Наиболее перспективным является анализ радиолокационных изображений методами дифференциальной интерферометрии и текстурного анализа спутниковых изображений [Чимитдоржиев и др., 2013].

8.4.1.4. Линейная эрозия

Линейная эрозия (оврагообразование) развивается в результате размывания оттаявших грунтов концентрированным водным потоком и выноса размываемого материала к базису эрозии [Термоэрозия... 1982]. Как правило, развивается на склонах при нарушении условий теплообмена на поверхности. В криолитозоне овраги могут достигать протяженности в несколько сотен метров и даже нескольких километров. Глубина оврагов достигает десятков метров, обычно — 2–5 м, ширина поверхности в устьевой части оврагов — метры и несколько десятков метров (рис. 8.25). Скорость роста оврагов может достигать 10–15 и более метров в год. Обычная скорость составляет 2–5 м/год [Сидорчук, Баранов, 1999].

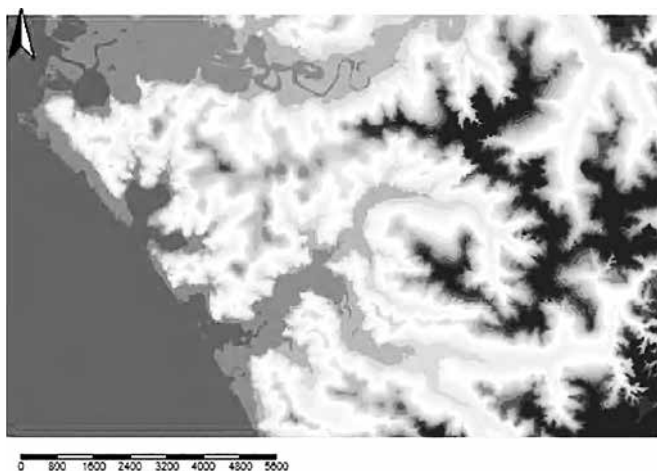


Рис. 8.25. Линейная эрозия

Процесс линейной эрозии переживает три этапа: 1) концентрирование поверхностного стока и зарождение оврага, 2) быстрый рост оврага, 3) затухание оврагообразования и стабилизация.

Мониторинг линейной эрозии. Характеристиками линейной эрозии являются: пораженность территории, протяженность оврагов, их глубина, скорость нарастания оврагов (скорость продвижения «головы» оврага) и уклон тальвега оврага. Пораженность территории, особенно на участках техногенного воздействия, может превышать 30%, что делает такие участки непригодными для промышленного освоения. Для оценки общей пораженности территории используются актуальные кос-

моснимки высокого и среднего разрешения. В случаях активного оврагообразования для оценки динамики пораженности необходимо делать периодическое (ежегодно или два раза в год) дешифрирование космоснимков. Эффективно применение съемки с БПЛА. Геометрические характеристики оврагов определяются на основании тахеометрической съемки или по данным наблюдений на закрепленных створах. Уклоны тальвега определяются на основании прямых геодезических измерений лазерным тахеометром.

8.4.1.5. Речная боковая эрозия. Перестройка речной сети

Речная боковая эрозия (размывание берегов) повсеместно распространена в криолитозоне. Разрушение речных берегов наиболее активно встречается на высоких берегах, сложенных рыхлыми льдистыми породами (рис. 8.26). Наибольшая скорость разрушения наблюдается в период весеннего половодья и может достигать нескольких десятков метров на участках распространения отложений ледового комплекса с льдистостью до 80%. В районе с. Казачье (Северная Якутия) ежегодное отступление берега р. Яны составляет более 10 м. Обрушение подмытого берега происходит мерзлыми блоками размером 2–4 м. Развитие боковой эрозии на каждом конкретном участке происходит, как правило, в течение нескольких десятков лет до изменения гидрологического режима реки и изменения русла.



Рис. 8.26. Боковая эрозия речных берегов. Южная часть Гыданского полуострова. Фото сделано в межледниковый период

Перестройка речной сети на многолетнемерзлых породах. Изменения русловой сети на территории распространения многолетнемерзлых пород (ММП) происходят на сливающихся и несливающихся ММП. На топографических картах 1979 г. масштаба 1:100 000 отображена гидрографическая сеть, включающая временные и постоянные русловые потоки.

Сравнительные измерения с космоснимками высокого разрешения 2010–2018 гг. показали значительные изменения за прошедший период (31–39 лет). Гидроморфометрическими измерениями установлено, что во всех природных зонах и подзонах, от северной тайги до южной тундры, включая лесотундру, произошли изменения верхних звеньев русловой сети. На многих водотоках изменения произошли по всей длине водотоков. Кроме этого образовались новые водотоки длиной до 0,5–2,0 км. Часть водотоков с постоянным русловым стоком после заболачивания стали временными водотоками или перешли на подземный сток. Значительный рост русловой сети происходит за счет образования новой русловой сети между озерами и на поверхности вновь образовавшихся хасыреев.

1. На четырех исследованных малых реках бассейна р. Пур в 1979 г. длина речной сети составляла 46 км, в 2010–2018 гг. длина увеличилась на 52 км (113%). Основной прирост произошел при образовании проток между озерами и за счет образования русловой сети во вновь образовавшихся хасырях. Увеличение длины истоков рек за счет временных и постоянных водотоков составляет немного меньше, чем за счет проток между озер. Менее всего изменений внутри бассейнов рек.

2. Аналогичные исследования на притоках р. Казым в его верхнем течении (водораздел Сибирских Увалов) показали, что русловая сеть увеличилась по длине на 78%. Измерения проведены на 4 реках общей площадью 120 км². Основной прирост русловой сети произошел за счет увеличения длины притоков первого порядка. Значительные изменения произошли в основных руслах водотоков за счет изменения положения русла в бассейне реки, перехода постоянного стока во временный или подземный. Около 10% изменения руслового стока связано с раздвоением основного русла.

Изменения связаны со следующими геокриологическими факторами или условиями.

1. Прирост длины верхних звеньев временной и постоянной русловой сети происходит при совместной деятельности термоэрозии и термокарста на сливающихся ММП, в основном по ПЖЛ. Прирост русловой сети в этом случае происходит за счет термоэрозии, а ее расширение — за счет термокарста и эрозии.

2. При протаивании ММП и переходе их в несливающиеся может происходить уменьшение длины постоянной русловой сети. На любом из участков рек первого порядка на стадии протаивания ММП возможно заболачивание русла и переход постоянного стока во временный или подземный.

3. На сливающихся ММП изменения положения русел в среднем или нижнем течении происходит при образовании останцов при линей-

ной термоэрозии, боковом «съемании» водным потоком массива ММП, эрозионно-термокарстовых процессах.

4. На несливающихся ММП русловые процессы часто связаны с заболачиванием и болотной солифлюкцией.

5. Исчезновение поверхностного постоянного и временного руслового стока выявлено только на несливающихся ММП при заболачивании русел водотоков. Заболачивание возможно на любом расстоянии от истока, но преобладает в верхнем течении малых рек.

6. Образование новой русловой сети происходит в основном на сливающихся ММП, а ее уменьшение — на несливающихся ММП. Основными русловыми процессами на стадии роста русловой сети и образования поверхностного руслового стока являются термоэрозия и термокарст. На стадии перехода поверхностного стока в подземный — заболачивание и болотная солифлюкция.

Мониторинг речной боковой эрозии. Мониторинг боковой эрозии обычно не вызывает затруднений, поскольку отступление берега хорошо определяется на местности и сравнительно легко поддается измерениям. Характерными показателями боковой эрозии являются протяженность подмываемых берегов и скорость отступления. Протяженность разрушающегося берега определяется методами дешифрирования космоснимков среднего и высокого разрешения или по измерениям на снимках, сделанных БПЛА. Скорость и величина отступления также определяются по снимкам или по данным прямых наблюдений на закрепленных на местности створах. Оцениваются средние и максимальные величины отступления берега. Возможно применение периодической тахеометрической съемки и съемки позиции береговой линии методами DGPS. DGPS-технология позволяет с высокой точностью определить координаты и высоту географических точек. От обычной GPS отличается установкой референтной станции на постоянной позиции с точно определенными координатами. Во время измерений DGPS-приемник постоянно связывается не только со спутниками глобального позиционирования, но и референтной станцией. При таких условиях резко повышается точность определения координат географических точек, например на кромке речного обрыва, а также их высотное положение. Даже простые DGPS-системы имеют пространственное разрешение не хуже 20 см, а высотное — менее 1 см.

8.4.1.6. Воронки газового выброса

Воронки (кратеры) газового выброса — явление, на которое на суше обратили внимание совсем недавно — в 2014 г. — после образования таковой близ Бованенковского месторождения на Ямале в коридоре регулярных полетов вертолета. Явление это, видимо, редкое, достоверно зафиксированы лишь несколько десятков таких кратеров. Они все совсем

молодые (годы и десятки лет), так как образующаяся форма очень быстро преобразуется, становясь неотличимой от обычных озерных понижений на ровных и наклонных поверхностях. Возможно, так называемые «пок-марки» на морском дне — законсервированные аналоги воронок выброса. Несмотря на редкость явления, колоссальная мгновенно высвобождающаяся энергия выброса вызывает справедливые опасения у работающих в Арктике.

Первая научно задокументированная воронка газового выброса (ВГВ) на Центральном Ямале (N 69°34'58", E 68°13'20" в координатах системы WGS 84) образовалась в результате взрыва в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород в период с 9 октября 2013 г. по 1 ноября 2013 г. [Leibman, et al., 2014]. ВГВ расположена в 40 км к югу от куста газовых скважин 610 Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения, в 65 км к северо-востоку от метеостанции Марре-Сале (рис. 8.27) и в 4 км к востоку от действующего магистрального газопровода Бованенково—Ухта.

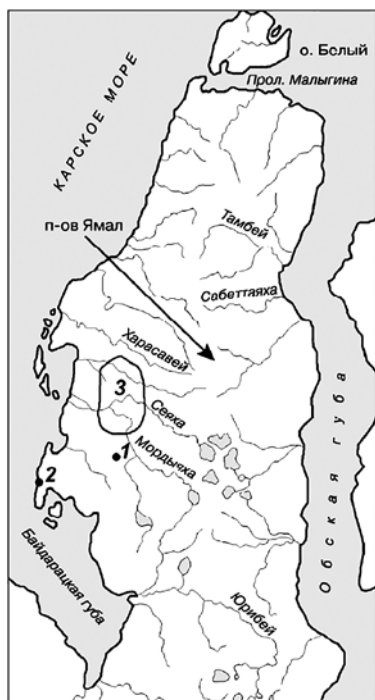


Рис. 8.27. Воронки газового выброса на Ямале. 1 — район воронки газового выброса, 2 — метеостанция Марре-Сале, 3 — территория Бованенковского газоконденсатного месторождения (фото М. О. Лейбман, 2014)

Поскольку радиус разброса вылетевших из ВГВ фрагментов породы и, вероятно, льда, составляет 120 и более метров, то ясно, что потенциальная опасность для людей и сооружений в зоне образования такой воронки крайне велика. Поэтому происхождение этой формы является предметом активного обсуждения [Leibman, et al., 2014], особенно в свя-

зи с тем, что на севере Западной Сибири обнаружены еще несколько аналогичных воронок и отсутствуют представления о том, где, когда и с какой частотой подобные явления могут повторяться.

Объект исследования — воронка газового выброса (ВГВ). Ямальская воронка газового выброса (ВГВ) на момент первого обследования в июне 2014 г. представляла собой цилиндрическое углубление глубиной более 50 м с раструбом в верхней части, окруженное грунтовым брусстером. Диаметр цилиндрической части с вертикальными стенками составил 18–20 м. Образовавшаяся воронка пространственно совпадает с положительной формой рельефа, существовавшей на этом месте до 1 ноября 2013 г. Диаметр основания бугра составлял 45,0–58,0 м, относительная высота — 5–6 м [Кизяков и др., 2015]. В ноябре 2014 г. глубина воронки составляла уже 25,5 м, а в нижней части северной вертикальной стенки на глубине 20,5 м хорошо был виден грот в виде усеченной сферы высотой 5,0 м и радиусом 2,0 м. О том, что грот имел большие размеры, свидетельствуют кадры видеосъемки в момент первого обследования воронки. Съемка проводилась портативной камерой, которая опускалась на тросе в кратер. Предполагаемая высота грота могла составлять более 30,0 м (рис. 8.28).

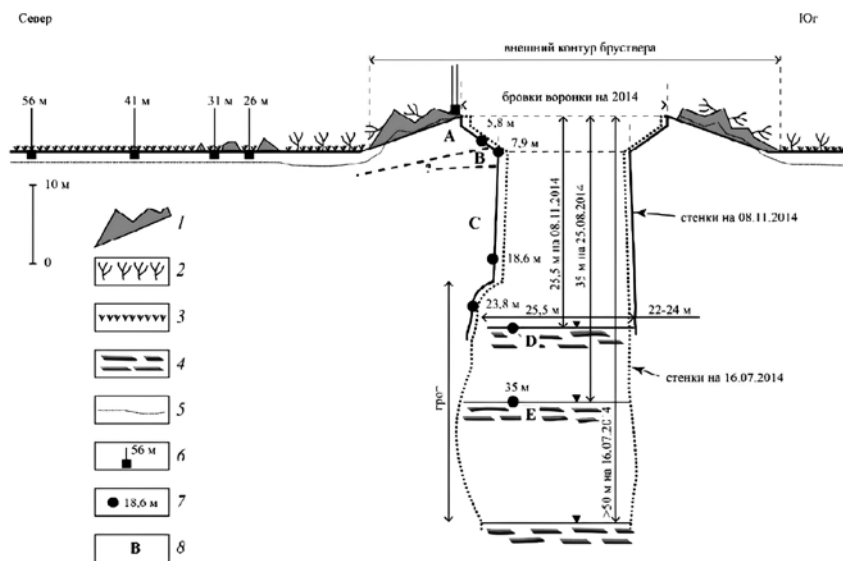


Рис. 8.28. Принципиальная схема строения воронки в 2014 г. и точки отбора образцов. Условные обозначения: 1 — выброшенный из воронки материал, 2 — кусты ивы, 3 — травяная растительность, 4 — вода озера в воронке, 5 — подошва сезонно-талого слоя, 6 — точки отбора проб пород из закопушек и расстояние от бровки воронки в июле 2014 г., 7 — точки и глубина отбора проб льда из стенки воронки и воды из озера в воронке в ноябре 2014 г., 8 — горизонты льда (A, B, C) и уровень воды в кратере: D — август 2014 г.; E — ноябрь 2014 г.

К началу сентября 2015 г. (через 2 года после газового выброса) воронка представляла собой круглое озеро правильной формы диаметром 45,0–55,0 м, окруженное вертикальными стенками высотой до 6,0 м. По периферии сохранился бруствер, однако его ширина и высота существенно сократились. За 2014 г. уровень озера от дна воронки поднялся примерно на 24,0 м, а до сентября 2015 г. — еще на 20,0 м. Таким образом, стенки воронки постоянно и постепенно оттаивают; талые воды с частицами породы стекают вниз по стенкам и заполняют воронку. За счет отступления стенок вскрылся иной по строению и составу разрез с пластовыми льдами обычного для региона облика. С глубины 3,5 м лед в стенках воронки представляет собой чередование слоистого (с включениями глины) и стекловидного.

Методы исследования. Отбор образцов производился для определения комплексного химического анализа пород и водорастворимых солей во льду, значений стабильных изотопов кислорода и водорода воды из расплавов льда и озерной воды для определения количества метана, заключенного в пузырьках во льду и воздухе. Первая коллекция образцов была собрана при посещении объекта в июле 2014 г. Образцы пород и почв слоя сезонного оттаивания отбирались из шурфов на бруствере вокруг кратера и на расстоянии 26,0; 31,0; 41,0 и 56,0 м от воронки. Анализ шести образцов пород проведен в Центре лабораторного анализа и технических измерений по Уральскому федеральному округу Национального центра изучения Арктики (г. Салехард, Тюменская область). В ноябре 2014 г. исследовалась стенка воронки и вода из озера внутри воронки. По характеру включений, слоистости и цвету льда стенка воронки была разделена сверху вниз на несколько горизонтов от поверхности: от 0,5 до 7,0 м (слой А), от 7,0 до 10,0 м (слой В), от 10,0 до 20,5 м (слой С), от 20,5 до 25,5 м (слой D). На глубинах 5,8, 7,6, 18,6 и 23,8 м отобраны монолиты льда (см. рис. 8.28). Часть образцов льда хранилась и транспортировалась в виде монолитов, а часть — в виде талой воды. Вода из озера, расположенного на глубине 35 м от края ВГВ, была отобрана в августе 2014 г., и на глубине 25,5 м от края ВГВ в ноябре 2014 г. (см. рис. 8.28, D, E). В третье посещение в августе–сентябре 2015 г. исследовался состав воды из небольших озер в районе ВГВ и еще раз отобрана вода из озера на глубине около 6 м от края воронки. Гидрохимический анализ 16 образцов льда и воды был выполнен в лаборатории физико-химических исследований ВСЕГИНГЕО (п. Зеленый, Московская область). Определения значений изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и дейтерия (δD) расплава льда (37 образцов) и озерной воды (51 образец) были выполнены в Институте полярных и морских исследований им. А. Вегенера (Потсдам, Германия). Для 21 дубликата образцов контрольные определения значений изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и дейтерия (δD) выполнены в Лаборатории изотопных и ядерных методов ВСЕГИНГЕО (п. Зеленый, Московская область). Ре-

зультаты изотопных исследований в двух независимых лабораториях показали хорошую сходимость, разница в значениях изотопов кислорода не превышала 0,5‰, а дейтерия — 1‰. Концентрация метана в воздухе определялась в кратере с помощью портативного газоанализатора во время первого посещения воронки 16 июля 2014 г. Для определения содержания метана в мерзлых стенках воронки и фоновых значений метана в воздухе был проведен пробоотбор в ноябре 2014 г. Газ из пузырьков льда выделялся и консервировался методом «Headspace». Определение количества метана во льду по 28 образцам выполнено с помощью газового хроматографа ХПМ-4 с пламенно-ионизационным детектором в Институте физико-химических и биологических проблем почвоведения (г. Пушкино, Московская область).

Полученные данные позволили: 1) сопоставить результаты исследования льда стенок ВГВ с результатами исследований подземных льдов, поверхностных и атмосферных вод Ямала; 2) установить место концентрации газа; 3) объяснить различие между объемом воронки и объемом выброшенного материала; 4) оценить вероятность возникновения подобного процесса в будущем.

Полученные данные позволили сказать:

- мощные, залегающие неглубоко от поверхности, линзы пресного пластового льда — характерная особенность четвертичного разреза полуострова Ямал, в том числе и для района ВГВ;
- так как изотопный состав льда стенок воронки значительно легче, чем озерная вода Ямала, то современные озерные воды не могли быть источником воды при формировании льда воронки;
- существование и форма «грота» на глубине 20 м, имеющего больший диаметр, чем жерло воронки, свидетельствует о полости, в которой мог накапливаться газ и находиться минерализованная вода, криопэг. Метан находился в полости воронки до ее разрушения, об этом свидетельствуют его высокое содержание в воздухе внутри кратера воронки в июле 2014 г. и резкое уменьшение этого показателя в ноябре 2014 г. О накоплении метана во льду на глубине свидетельствует и высокое его содержание в воздушных пузырьках самого верхнего слоя льда (А), который был поднят на поверхность при взрыве и локализовался в границах бугра, разрушающегося сейчас на поверхности;
- о существовании линзы минерализованной воды и ее излиянии на поверхность при взрыве свидетельствует повышенная концентрация хлор-иона в породах сезонно-талого слоя на расстоянии 26,0 м от воронки.

Совместный анализ материалов полевых обследований в разные сезоны (рис. 8.29) и серии космических снимков с построением цифровых мо-

делей рельефа «до» и «после» образования воронки позволил достаточно точно датировать время ее образования (рис. 8.30) и сделать ряд выводов.

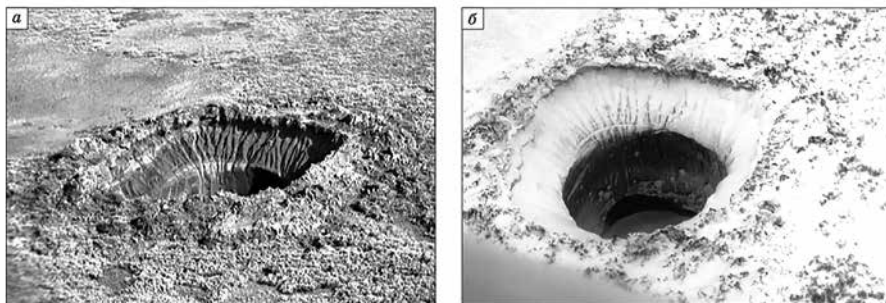


Рис. 8.29. Внешний вид воронки газового выброса: а — 25 августа 2014 г. (фото М. О. Лейбман); б — 8 ноября 2014 г. (фото А. И. Кизякова)

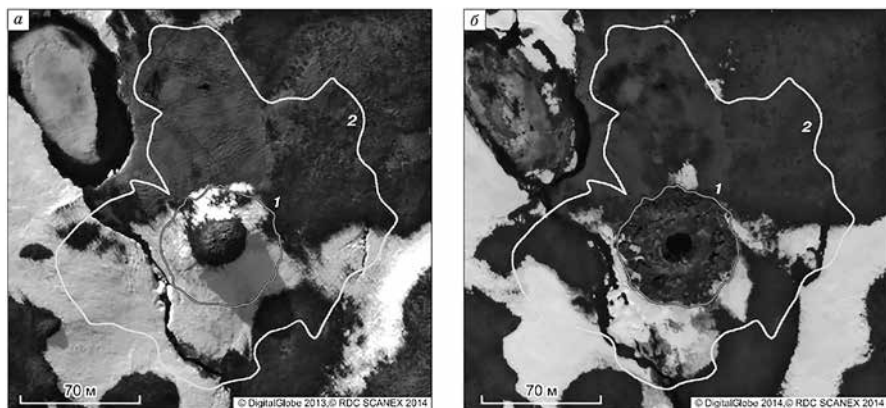


Рис. 8.30. Отображение изучаемого участка на космических снимках сверхвысокого разрешения: а — состояние участка до образования воронки (снимок WorldView-1 от 9 июня 2013 г.); б — существующая воронка (снимок WorldView-1 от 15 июня 2014 г.); 1 — внешняя граница бруствера воронки; 2 — граница зоны разброса материала из воронки

1. Воронка газового выброса на Центральном Ямале образовалась в период с 9 октября 2013 г. по 1 ноября 2013 г.

2. Изучаемая воронка пространственно совпадает с бугром (положительной формой рельефа), существовавшим на этом месте до 9 октября 2013 г. Размеры бугра составляли: диаметр основания — 45–58 м, относительная высота — 5–6 м.

3. Верхняя часть воронки, представляющая собой раструб, расположена в пределах существовавшего ранее бугра. Граница между цилиндрической частью воронки и раструбом совпадает по высоте с уровнем поверхности, на которой был расположен бугор. Таким образом, раструб сформирован в пределах отложений, слагавших бугор.

4. Размеры воронки на начало теплого сезона 2014 г. составляли: диаметр цилиндрической части — 15–16 м, диаметр по бровкам раструба — 25–29 м, диаметр бруствера — около 70 м, глубина от бровок до поверхности озера на дне превышала 50 м. К концу 2014 г. диаметр цилиндрической части увеличился до 22–23 м, глубина сократилась до 26 м.

5. За 2014 г. уровень озера на дне воронки поднялся примерно на 24 м.

6. Объем вынесенного материала (выброшенного из воронки и частично разрушенного бугра) составляет 11 200 м³. Это почти в 6 раз больше объема материала, отложившегося по периферии воронки (1940 м³). Большая часть выброшенного материала (9260 м³) представляла собой лед, который по результатам полевых наблюдений вскрывается в стенках цилиндрической части воронки.

Предположительно, именно процесс формирования, расширения и заполнения воронок, активность которого относится к наиболее теплomu периоду голоцена (примерно 8–10 тыс. лет назад), отвечает за формирование части озер Ямала, имеющих округлую форму и аномальную глубину. Однако данная воронка в последующем округлого изометричного глубокого озера не сформировала. Образовавшееся озеро имеет 2 ортогональные субпрямолинейные стороны и замыкается линией причудливой конфигурации.

Подходы к *мониторингу воронок (кратеров) газового выброса* в настоящее время вырабатываются. В. И. Богоявленский, чл.-корр. РАН, полагает, что образование воронок связано с буграми пучения, часть из которых имеет генезис, связанный с притоком газа проблематичного происхождения: «Предсказывать появление новых воронок — наша цель, мы над ней работаем. Пока еще это очень сырая тема, не созревшая, о каких-либо конкретных технологиях говорить рано. В целом, по результатам наблюдений из космоса, на Ямале нами выявлено более 7 тысяч бугров пучения. Это не значит, что каждый из них будет взрываться — только их небольшая часть. Также ясно, что по всем буграм проводить исследования невозможно, так что будем концентрироваться на тех объектах, которые расположены вблизи инфраструктурных объектов, чтобы, прежде всего, предотвратить опасность. Из этих 7 тысяч, условно говоря, будут выделены несколько процентов наиболее важных объектов для анализа и мониторинга» (<https://www.angi.ru/news/2851477-Василий-Богоявленский-О-предсказании-мест-появления-новых-воронок-на-Ямале-говорить-еще-рано/>).

8.4.1.7. Термоденудация на склонах

Под термоденудацией понимается комплекс процессов, связанных с оттаиванием мерзлых сильнольдистых пород и выносом оттаявшего материала вниз по склону. При этом формируются специфические фор-

мы рельефа, называемые термоцирками. Обязательным условием формирования термоцирков является наличие подземных льдов. В Западной Арктике термоцирки обычно развиваются на участках распространения пластовых льдов, залегающих близко к поверхности (рис. 8.31, 8.32, 8.33), в Восточной термоцирки могут формироваться на склонах, сложенных мощным высокольдистым ледовым комплексом (рис. 8.34).



Рис. 8.31. Течение структурных, пластичных и жидких грунтовых масс в транзитной части термоденудационного цирка на трассе Бованенково—Байдарацкая, Центральный Ямал



Рис. 8.32. Обширный термоцирк, развивающийся на участке близкого залегания пластовых льдов. Западный Таймыр



Рис. 8.33. Пластовые льды в стенке термоцирка. Мыс Шпиндлера, Югорский полуостров



Рис. 8.34. Обширный термоцирк «Батагайский кратер», развивающийся в отложениях ледового комплекса. Северная Якутия

Размеры термоцирков в плане могут достигать нескольких сотен метров (до 1 км и более), скорость перемещения фронта термоцирка составляет до 10 м/год и более. Развитие термоденудации инициируется, как правило, подрезкой склонов вследствие естественных причин или из-за изменения условий теплообмена на поверхности и начавшегося оттаивания грунтов и выноса их вниз по склону. На верхних фотографиях (см. рис. 8.31 и 8.32) термоденудация развивается из-за подрезки склона морем. В Северной Якутии термоденудация активизировалась после вырубки леса и увеличения сезонного оттаивания грунтов. Наблюдения показали, что термоденудация развивается циклически, с периодами активизации и затухания процесса. На рис. 8.31 хорошо видна линия (подчеркнута красным) более раннего периода активизации термоденудации и формирования обширнейшего термоцирка диаметром более 2 км. Современный термоцирк показывает активизацию процесса термоденудации только в части более древнего термоцирка.

Мониторинг термоденудации. Термоденудация характеризуется геометрическими размерами, скоростью отступления фронта термоцирков и объемом выносимого материала. Для мониторинга используются методы дешифрирования космоснимков высокого разрешения (не хуже 1 м), тахеометрическая съемка лазерным тахеометром, наблюдения на закрепленных на местности створах, DGPS-съемка и лидарная съемка.

8.4.1.8. Крип, солифлюкция и оползни скольжения

Криогенный крип (десерпция) представляет собой сползание рыхлых масс по склону в результате изменения их объема под воздействием процессов промерзания-протаивания. Сущность процесса заключается в том, что пучение породы при их промерзании происходит перпендикулярно склону, а движение частиц вниз при протаивании — по вертикали, т.е. под углом к склону меньше 90° (рис. 8.35).

В результате цикла процесса промерзания-оттаивания частица породы (m1), лежащая на поверхности, окажется перемещенной вниз по

склону на расстояние $m \cdot l \cdot m^3$. Величина смещения частиц уменьшается к подошве слоя протаивания. Сползание отложений будет больше на крутых склонах по сравнению с пологими и в более пучинистых грунтах. В суровых условиях резко континентального климата движение частиц происходит и в течение суток: ночью — промерзание, днем — оттаивание. Результатом криогенного сползания и одновременной дифференциации мелкоземистого и щебнистого материала является наличие на склонах различных структурных грунтов, а при выносе водой мелкозе-ма — каменных скоплений.

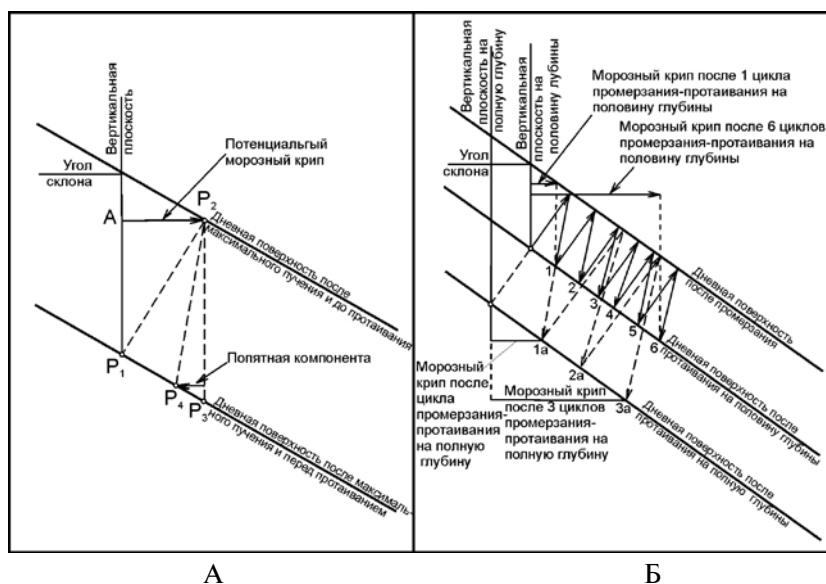


Рис. 8.35. Схема развития криогенной десерпции (крип).

А — развитие морозного крипа в течение одного цикла промерзания-протаивания; Б — развитие морозного крипа в процессе нескольких циклов промерзания-протаивания

На склонах, сложенных скальными породами, накопление щебнисто-глыбовых отложений принято называть курумами. Развитие курумов включает ряд процессов, приводящих к дроблению каменного материала, движению его по склону и накоплению на пониженных участках рельефа: физическое выветривание, криогенную (и температурную) десерпцию, подповерхностный смыв, сползание глыб и пр. Курумы приурочены к склонам крутизной от 3—5 до 25—30°. Они могут располагаться на обширных каменистых склонах, образовывать каменные потоки, слагать обширные каменные поля. При накоплении «критической» массы крупноглыбовые отложения приходят в движение и сползают вниз по

склону. Этому процессу могут способствовать резкое увеличение количества атмосферных осадков в горных районах или землетрясения в сейсмически активных зонах. Поэтому строительство сооружений на курумах, в первую очередь железных дорог, чревато катастрофами.

Солифлюкция. Так называется процесс вязкого и вязкопластичного течения дисперсного материала, пропитанного водой, вниз по склону. Ее развитию способствуют наличие мерзлого субстрата и накопление на нем воды, которая не может уходить вглубь отложений. Солифлюкция может развиваться как на задернованных склонах, так и на почти ровных аккумулятивных поверхностях, развивается она чаще всего в пылеватых грунтах и супесях. Интенсивность солифлюкции зависит от крутизны склона, глубины оттаивания пород, состава отложений, количества атмосферных осадков и пр. Максимальная мощность отложений, накапливающихся в результате этого процесса, наблюдается в нижних частях склонов.

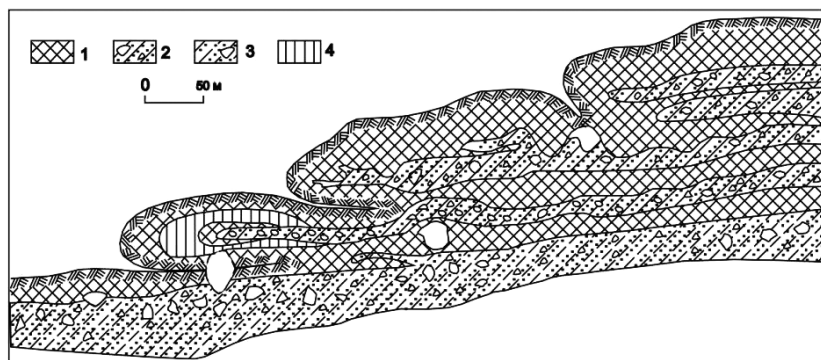


Рис. 8.36. Строение солифлюкционного натека в Усть-Бельских горах (по Т. Н. Каплиной [1965]). 1 — торфяно-дерновый слой и погребенные гумусовые горизонты; 2 — суглинок с дресвой и щебнем; 3 — суглинок со щебнем, песчанистый; 4 — грубопесчаный грунт

Различают два вида солифлюкции: покровную (аморфную) и дифференциальную (структурную). Первая представляет собой медленное вязкопластичное течение переувлажненных дисперсных пород, захватывающее весь оттаивающий слой. Этот вид солифлюкции характеризуется скоростями до 10 см/год и проявляется на склонах средней крутизны. Основной особенностью этого вида солифлюкции является то, что движение материала происходит без существенного нарушения внутреннего строения грунта. Дифференциальная солифлюкция, в отличие от покровной, хорошо выражена на местности в виде характерных форм микро- и мезорельефа: солифлюкционные языки, террасы, полосы и пр. Механизм структурной (по Г. Ф. Гравису) солифлюкции обусловлен со-

четанием следующих процессов: 1) выдавливание грунтовой массы на поверхность при неравномерном промерзании достаточно мощного переувлажненного слоя грунта; 2) перемещение в связи с этим грунтовой массы, зажатой между мерзлыми слоями вниз по склону; 3) оплывание грунтовой массы, выдавленной на поверхность (рис. 8.36). Развитие такого вида солифлюкции возможно на очень пологих склонах.

В пределах криолитозоны наряду с рассмотренными видами выделяют также быструю солифлюкцию (спływ), обусловленную вязким течением оттаивающих дисперсных грунтов по склонам значительной крутизны (15–25°). Скорости течения грунта при сплыве могут достигать нескольких метров в минуту, при этом происходит нарушение его структуры, образуются разрывы в почвенном покрове (рис. 8.37). Нередко сплывы проявляются на склонах горных выработок, карьеров.



Рис. 8.37. Солифлюкция (структурная, или дифференциальная) на склоне. Ямал

8.4.1.9. Криогенные оползни скольжения (КОС)

Склоновые криогенные процессы делятся на «медленные» и «быстрые» [Лейбман, 2005 и др.]. К быстрым процессам относятся криогенные оползни различных типов в районах широкого развития с поверхности высокольдистых песчаных и глинистых пород и залежеобразующих льдов. Криогенные оползни — это образование криогенных оползней течения (КОТ, термин В. Ф. Болиховского и В. В. Кюнтцеля [1990]) и криогенных оползней скольжения (КОС, термин Т. Н. Каплиной [1965]), отличающихся по механизму, по образуемым формам, по причинам и по цикличности.

Разработаны концептуальная и статистическая климатическая модели криогенного оползания [Лейбман, 2005]. Первая основана на многолетних наблюдениях, вторая — на анализе климатических рядов, на базе установленной взаимосвязи активизации процесса с определенным сочетанием климатических параметров.

Совокупность физико-геологических процессов на склонах с ледяными льдами приводит к формированию специфических форм рельефа — термоцирков и оползневых цирков. При этом в оползневых цирках формируются благоприятные условия для развития растительности за счет концентрации стока и химического обогащения верхних горизонтов пород, снегонакопления и повышения их температуры. Чрезвычайно высокая активность криогенных оползней на Центральном Ямале была использована в качестве натурального эксперимента М. О. Лейбман [2005].

В криолитозоне существование КОТ предопределено постоянно из года в год формирующейся «ослабленной зоной» — контактом между многолетнемерзлыми и сезонно-талыми породами. Поэтому криогенные оползни являются результатом не только высокой влажности пород (порового давления), но и динамики СТС. На территории России наиболее комплексно КОС изучены на Центральном Ямале, где в 1989 г. произошло их катастрофическое проявление (рис. 8.38). Это послужило основанием для создания опытного полигона по изучению этого процесса в этом районе. Здесь до 2% суммарной поверхности склонов было поражено современными оползнями, которые как естественные плотины перекрыли многие водотоки.



Рис. 8.38. Криогенный оползень скольжения близ Бованенковского м-ния, Центральный Ямал, 1979 г., ширина ~350 м

На оголившихся поверхностях скольжения начали развиваться и деструктивные процессы, такие как термоэрозия и делювиальный смыл, и конструктивные — формирование новых растительных сообществ и почвы (рис. 8.39). Зона влияния оползней распространилась и на участки выноса оползневого материала, и дальше, в зону охвата поверхностным и подземным стоком.



Рис. 8.39. Зарастающие криогенные оползни скольжения на геокриологическом стационаре Васькины Дачи, Центральный Ямал, 2010-е гг.

Катастрофические оползневые события, аналогичные современным, могли иметь место и в прошлом. Об этом свидетельствуют переработанные оползнями, но уже заросшие склоны, а также склоны, на которых растительность и почвы почти полностью восстановились, однако морфологические признаки древнего оползания сохранились.

КОС связаны с быстрым протаиванием льдонасыщенных пород в основании СТС. Накопление сегрегационного льда в нижней зоне СТС происходит благодаря миграционным процессам и межгодовым вариациям глубины протаивания. Мощный импульс тепла во второй половине лета и обильные дожди, приуроченные к этому периоду, приводят к относительно быстрому протаиванию льдистого горизонта в основании СТС, образовавшегося в предшествующий холодный сезон (или несколько сезонов). Выделяющаяся в процессе протаивания льдистой породы вода не успевает отжиматься вверх и фильтроваться вниз по склону из-за плохой водопроницаемости пылеватых или глинистых пород СТС. Таким образом, формируется повышенное поровое давление, которое ослабляет силы сцепления. Гравитационные силы приводят в движение блоки, «плавающие» на слое с повышенным поровым давлением. Блоки сохраняют целостность благодаря структурным связям, образовавшимся в процессе многократного промерзания-протаивания, увлажнения и испарения влаги, а также низкой влажности в средней зоне СТС, являющейся результатом двухстороннего промерзания.

Концептуальная модель криогенных оползней течения и развития термоцирков сформулирована на основании наблюдений за активизацией нескольких термоцирков на Югорском полуострове. Формирование термоцирков является результатом комплексной деструкции, однако ведущим процессом при этом служит КОТ по пластовым льдам.

Мониторинг криогенных оползней скольжения. Исследования криогенных оползней проводятся полевыми, лабораторными и камеральными методами. Полевые методы исследования включают ландшафтную съемку на ключевых участках, описание и опробование естественных обнажений и разрезов скважин и шурфов, мониторинг сезонно-талого слоя, съемку, картирование и описание форм проявления склоновых процессов: термоцирков, оползневых цирков и отдельных оползней, точное картирование с использованием геодезического оборудования, спутниковой навигации, дронов. Лабораторные методы включают геохимические анализы льдов, пород, почв, воды и растительности, а также радиоуглеродный и дендрохронологический анализы. Камеральные методы состоят в составлении и обработке баз данных по измерению глубины протаивания, параметров оползней и термоцирков, результатов лабораторных определений ионного и изотопного состава различных объектов, климатических параметров, в составлении карт на основе дешифрирования аэрофото- и космоснимков и полевого картирования и в моделировании склоновых процессов.

8.4.1.10. Термоабразия морских берегов

Под термоабразией морских берегов понимается комплекс береговых процессов, обуславливающих их разрушение и отступление [Арэ, 1980]. Иногда под термином «термоабразия» понимают только процесс собственно термоабразии — разрушение берега вследствие теплового и механического воздействия морских волн. Реальные наблюдения показывают, что термоабразия в чистом виде реализуется очень редко, как правило, разрушение морских берегов сопровождается термоденудацией береговых обрывов (оттаиванием мерзлого клифа и выносом оттаявшего материала к основанию обрыва), осыпями и обрушениями отложений береговых обрывов. Термоабразия вызывается воздействием морских волн на основание обрыва, нарушением равновесного состояния и непрерывным поступлением оттаявшего материала в море в виде наносов. Скорость отступления морских берегов зависит главным образом от энергии ветрового волнения, продолжительности безледного периода, состава отложений и их льдистости. Потепление климата мало влияет непосредственно на скорость разрушения морских берегов, увеличивая термоденудацию. Но вклад термоденудации, особенно на относительно малоледистых берегах, составляет около 25–30% [Васильев и др., 2011].

По особенностям динамики морские берега разделяются на стабильные, медленно отступающие и быстро отступающие. В рамках Международного проекта ACD (Arctic Coastal Dynamics) были выполнены оценки скорости разрушения морских берегов для всей Арктической зоны [Lantuit, et al., 2012]. Российские участники выполнили оценки скоростей разруше-

ния морских берегов Российской Арктики (рис. 8.40, см. с. XXXVIII цв. вклейки).



Рис. 8.41. Морские берега, сложенные относительно малоледистыми породами, со скоростью отступления около 1,7 м/год. Западный Ямал



Рис. 8.42. Морские берега, сложенные высоколедистыми породами, со скоростью отступления более 10 м/год. Северная Якутия

На рис. 8.41 и 8.42 приведены примеры берегов, сложенных относительно малоледистыми породами и сильноледистыми породами с содержанием льда до 80%. Отступление морских берегов в зависимости от их ледистости и других характеристик изменяется от 0,5 м/год на малоледистых берегах до 10 м/год и более на берегах, сложенных «ледовым комплек-

сом», в котором содержание льда может достигать 80% и более. Разрушение морских берегов характеризуется очень высокой пространственной и временной изменчивостью, что необходимо принимать во внимание при организации мониторинга. Величина стандартного отклонения может достигать 60% и более от средних значений. Во временных изменениях скорости отступления берегов наблюдаются некоторые зависимости.

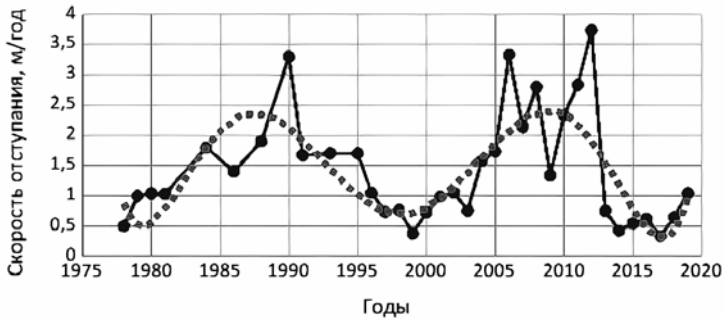


Рис. 8.43. Циклическое изменение скорости отступления морского берега. Западный Ямал

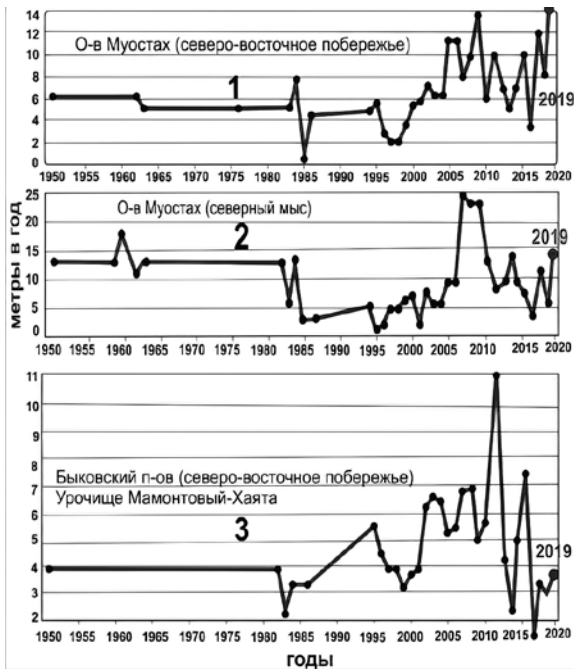


Рис. 8.44. Изменение скорости отступления морских берегов моря Лаптевых [Григорьев, Максимов, 2019]

Многолетние наблюдения за отступанием морского берега протяженностью около 4,5 км на Западном Ямале показали, что увеличение и замедление скорости отступления берега демонстрирует некую периодичность (цикличность), которая не связана напрямую с климатическими характеристиками (рис. 8.43).

Долговременные наблюдения за динамикой берегов моря Лаптевых показывают иные закономерности их развития во времени (рис. 8.44).

Здесь не выделяется регулярная цикличность, возможно, это связано с гораздо большим вкладом термоденудации в разрушение берегов.

В связи с большой временной и пространственной изменчивостью скорости разрушения морских берегов в Арктике принято представлять результаты не только в виде диаграмм и графиков, но и в виде позиций береговых линий для разных годов на крупномасштабных космоснимках или фотосхемах с БПЛА (рис. 8.45, см. с. XXXIX цв. вклейки, и 8.46). Это позволяет наглядно оценить темпы отступления и возможное влияние разрушения берегов на береговую инфраструктуру.



Рис. 8.46. Положение береговой линии по данным наблюдений на аэрофотоснимке 9 сентября 1951 г. Северная Якутия

Мониторинг термоабразии морских берегов. Характеристиками процессов термоабразии представляются скорость отступления (средние, максимальные и минимальные величины, стандартное отклонение), площадь утраченных земель, углы наклона берегового обрыва, позиция береговых линий на разные временные срезы. Основными методами мониторинга являются дешифрирование актуальных высокоразрешающих космоснимков и снимков с БПЛА, ежегодные наблюдения за отступанием бровки берега на закрепленных на местности створах, измерений позиции бровки берега, его основания и линии соприкосновения моря и суши DGPS. Может применяться высокоточная тахеометрия лазерным тахеометром. Перспективна также лидарная съемка.

Экспедиционный мониторинг динамики берегов и темпов развития криогенных процессов в береговой зоне проводился несколькими основными методами. Первый — оборудование реперами опытных площадок и береговых створов на ключевых участках для производства одноразовых измерений, наблюдений раз в несколько лет или ежегодных. Второй — теодолитная съемка подошвы и бровки термоабразионных клифов, контуров термотеррас, термоденудационных уступов, термоэрозионных оврагов и других активно развивающихся экзогенных форм мерзлотного рельефа. Третий — использование разновременных аэрофотоснимков. Четвертый — использование разновременных космических снимков. Пятый — использование наиболее старых аэрофото- и космоснимков с проведением полевых исследований и выявление расстояния между старыми и современными береговыми линиями или бровками береговых уступов.

Оценка средних темпов отступления берегов осуществляется на репрезентативных участках, на основе полевых наблюдений и измерений, а также сравнении дистанционных материалов (за разные периоды). Определяются морфологические параметры берегов: абсолютные высоты береговых уступов и склонов, их крутизна, расчлененность и т.д.

Реперные створы устанавливаются в виде серии профилей из вбитых колышков (лучше металлические реперы, забитые в мерзлоту), установленных обычно по нормали к береговой бровке термоабразионного или термоденудационного клифа. Этот метод имеет существенные недостатки. Такие профили недолговечны, они разрушаются человеком, транспортом и природными факторами. Из-за быстрого отступления берегов такие профили в течение 5–20 лет уничтожались в полосе берега шириной 50–250 м. Поэтому предпочтительней использовать природные объекты, четко определяемые на аэрофото- или космических снимках и находящиеся достаточно далеко от активных береговых клифов. Обычно выбираются небольшие тундровые озера с выразительными берегами, видными на АФС и КС, например с далеко выступающими береговыми мысами, один из которых будет ключевой точкой для многолетнего мо-

мониторинга динамики береговых криогенных процессов. Для этой же цели используются места сочленения тальвегов малоактивных оврагов, отчетливо определяемые на АФС и КС. И те и другие относятся к достаточно стабильным точкам, когда речь идет о первых десятилетиях.

Исследование *береговой динамики низких аккумулятивных берегов* является более сложной задачей. В районах распространения обширных осушек, в зависимости от режима сгонно-нагонных ветров и конфигурации берегов, береговая линия в пределах низких аккумулятивных образований меняет свое положение относительно незатапливаемого побережья на величину от нескольких сотен метров до десяти километров. К таким районам относятся западные и восточные берега дельты Лены, отдельные песчаные банки в открытом море, мелководный Селляхский залив, северные осушки полуострова Широкостан и о-ва Бол. Ляховский и др. Например, в восточной части дельты Лены на многих участках идет выдвигание аккумулятивных берегов и закрепление их растительностью и морозной литификацией дисперсного материала. Образуются небольшие довольно стабильные береговые уступы, высотой 0,2–0,5 м, которые можно зафиксировать на месте и обнаружить на дистанционном материале. Несмотря на общее выдвигание берега, такие уступы подвержены периодической эрозии с образованием довольно четких бровок. Эти эрозионные уступы удобны для проведения теодолитных съемок, к тому же по тону растительности они часто видны на АФС, что позволяет проводить сравнительный анализ полевых и дистанционных материалов.

Чаще всего применяется метод сравнения дистанционных материалов (ДМ) различных периодов съемки, для одного и того же участка. На ДМ последнего периода съемки определяются границы береговых форм, это обычно бровки и подошвы береговых уступов. Затем эти границы переносятся на соответственно масштабированный ДМ первого периода съемки. При этом используются современные ГИС-технологии и компьютерные программы. Такой метод позволяет оценить среднюю многолетнюю скорость изменения береговых форм и их границ. Этот метод из-за ограниченной разрешающей способности дистанционных материалов менее точный, чем полевые измерения, но он позволяет охватить большие береговые сектора и получить дополнительную информацию вне участков натурных экспедиционных исследований.

Для наблюдения за развитием таких криогенных береговых процессов, как термоэрозионное расчленение берегов, солифлюкционные (криосолифлюкционные) склоновые процессы, формирование термотеррас, также используются *реперные сети и материалы теодолитных съемок*. Изучение динамики бровок и подошв термотеррас используется как один из методов изучения темпов отступления всей береговой системы, поскольку скорость преобразования дистальных форм береговой зоны оказалась тес-

но связанной с динамикой фронтальных форм — термоабразионных клифов. Для анализа современных изменений положения эрозионных берегов используются современные компьютерные программы.

Имеется ряд методических особенностей изучения динамики термоабразионных и термоденудационных процессов. Анализ натурных данных по криогенной деструкции береговых бровок показывает, что среднегодовые темпы разрушения и отступления отдельных секторов термоабразионного берега могут различаться почти на порядок, даже при однотипном геокриологическом и геоморфологическом строении берегов, в пределах одного участка протяженностью от нескольких сотен метров до нескольких километров. Поэтому получить кондиционную информацию о темпах термоабразии можно лишь путем многолетних наблюдений, проводимых с учетом общей прибрежной гидrolитодинамической ситуации и анализа материалов дистанционных исследований. Так же желательна оценка изменения всего берегового контура, включая его динамически активные и пассивные части, а не только какого-либо локального берегового клифа, и за возможно более длительный промежуток времени.

Все более быстрое разрушение криогенными процессами берегов арктических морей (увеличившееся в последние 20 лет в полтора раза) ставит серьезную проблему в связи с опасностью разрушения навигационных, инженерных сооружений, населенных пунктов и коммуникаций, находящихся вблизи береговой зоны. Расширение наблюдательной сети за этими процессами позволит более точно оценить риски для прибрежных объектов и дать более точный прогноз развития деструктивных природных процессов.

Следует подчеркнуть, что метод дистанционного анализа изменения береговых линий часто предпочтительней. Наличие необходимых картоматериалов и ДМ позволяет оценить большие участки берегов, вплоть до 100%-го охвата всей береговой зоны моря. Однако есть и существенные минусы. Во-первых, такое количество дистанционных материалов (кондиционных для анализа берегов) трудно найти или слишком дорого приобрести. ДМ до сих пор не покрывают всю береговую зону арктических морей, особенно их не хватает на регион побережья морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского. Во-вторых, решающая способность и качество карт и снимков часто не способны удовлетворить потребность в более-менее точной привязке современных береговых линий и форм рельефа и сравнении с такими линиями и формами прежних лет. Особенно это относится к берегам с малоактивной динамикой. Рассмотреть, даже с применением современных компьютерных и программных методов, на ДМ 2–5-метровое изменение береговой линии практически невозможно. Собственно говоря, именно поэтому часто применяются полевые измерения берегов с помощью реперных сетей и теодолитных съемок на ключевых участках.

**8.4.1.11. Мониторинг рельефообразующих ЭГП
по материалам обработки данных БПЛА
в пакетах Agisoft Metashape Professional и ГИС Спутник
как общее методическое средство мониторинга ЭГП**

Рассматривая все морфологически выраженные криогенные процессы, следует обратить внимание на недавно появившееся общее техническое и методическое средство — беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые позволяют быстро, точно, очень недорого получить хорошо привязанные к местности снимки поверхности практически с любой, потребной исследователю, временной дискретностью (день, неделя, месяц, сезон, год и т.д.). Получаемые видео- и фотоматериалы доступны как визуальному анализу специалиста, так и стандартизованному формальному количественному анализу.

В настоящее время существует целый ряд программных средств, применяемых для тематической обработки данных, получаемых с помощью БПЛА, которые позволяют получать дополнительную информацию о пространственных особенностях экзогенных процессов, необходимую для их мониторинга в криолитозоне.

Наибольший интерес представляют взаимосвязанные пакеты Agisoft Metashape Professional компании Geoscan и ГИС Спутник Geoscan.

Agisoft Metashape Professional — это передовое программное обеспечение, максимально раскрывающее возможности фотограмметрии, а также включающее в себя технологии машинного обучения для анализа и пост-обработки, что позволяет получать максимально точные результаты.

Спутник — это система визуализации трехмерных геопространственных данных, получаемых, как правило, из Agisoft Metashape. Базовое покрытие на поверхности Земли, а также поддержка стандартов OGC позволяет загружать данные в единое геоинформационное пространство.

Поддержка протокола WMS позволяет подключать данные с OGC-совместимых серверов.

Основной формат ГИС Спутник — **KML** — открывает широкие возможности по визуализации трехмерных объектов и данных в режиме реального времени.

Подсчет площади в ГИС Спутник намного удобнее. К тому же программа Спутник позволяет проводить другие расчеты с ЦМР: построение изогипс, профилей, карт уклонов.

В качестве примера использования перечисленных программ выбран участок в районе метеостанции Марре-Сале, около дизельной станции, где развивается термоденудационная котловина (цирк). Развитие цирка происходит за счет солифлюкционно-суффозионных процессов по краям котловины и вытаивания льдистых грунтов (термокарст) в центральных частях котловины (рис. 8.47).

Наблюдения проводились в течение 5 лет (2015–2019 гг.).



Рис. 8.47. 3D-модель термоденудационного цирка (ТДЦ) рядом с помещением дизельной. Цифрами обозначены маркеры и их номера

С помощью измерительного инструмента ГИС Спутник «Прямоугольная линейка» проведено измерение превышений маркеров над береговой косой. На инструменте отображаются горизонтальные проложения, кратчайшее расстояние и уклоны между двумя точками модели (рис. 8.48).

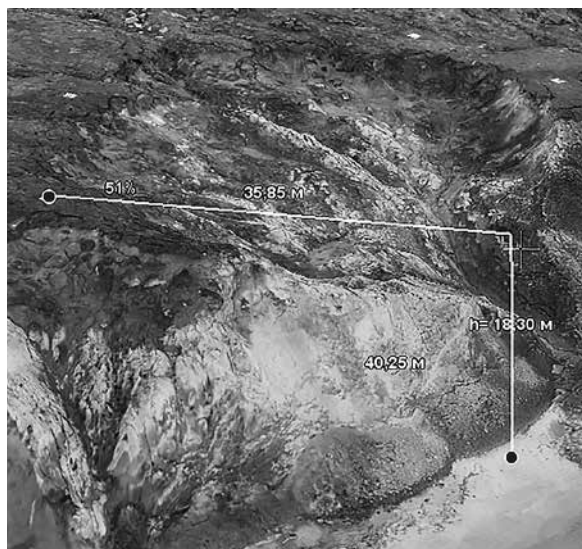


Рис. 8.48. Высота маркера № 1 над береговой косой — 18,3 м

Аналогичным образом промеряются все основные маркеры. Результаты измерений приведены в табл. 8.6.

Таблица 8.6.

Относительная высота маркеров над береговой косой

Маркер и его номер	Относительная высота маркера, м
1	18,30
2	19,06
3	16,30
4	15,47

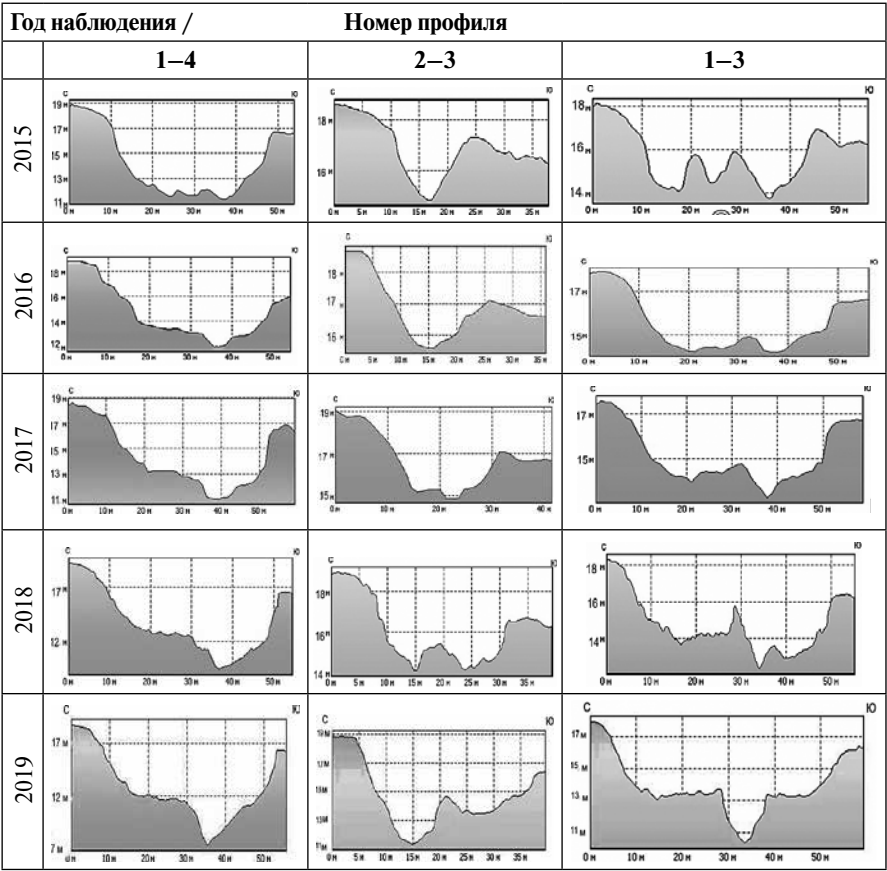


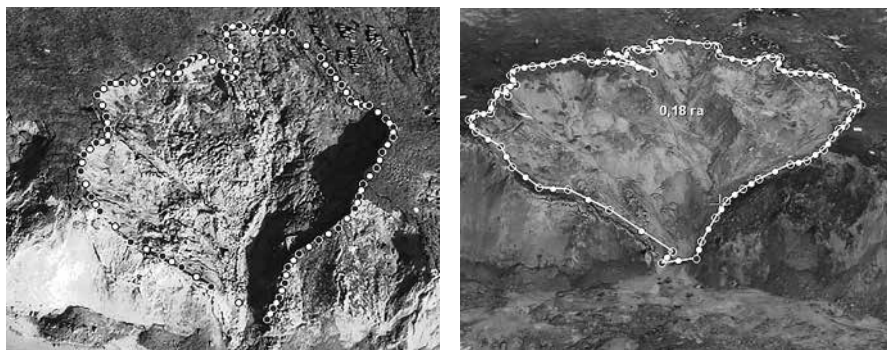
Рис. 8.49. Профили через термоденудационный цирк по годам

На ортофотопланах для каждого года наблюдений между маркерами с помощью специального инструмента были построены за каждый год наблюдений профили рельефа внутри цирка (рис. 8.49) и составлены по-

лигоны для измерения площади и объемов смещенного грунта в годовом цикле в термоденудационном цирке (рис. 8.50).

На рис. 8.51, А и Б, изображены цирки в 2015 и 2019 гг. с горизонталями через 1 м. Видно, что размеры цирка существенно увеличились и конфигурация изменилась. Произошло увеличение размеров цирка на север, юг и восток. Увеличилась глубина цирка у южного склона (табл. 8.7).

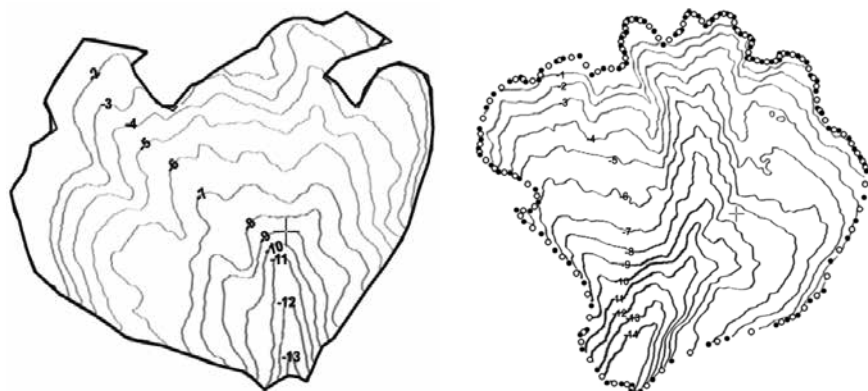
Кромка ТДЦ вдоль профиля 1–4 в сторону маркера № 1 продвинулась за 5 лет на 5,0 м, а в сторону маркера № 4 — на 4,5 м. Вдоль профиля 2–3 кромка ТДЦ продвинулась в сторону маркера № 2 на 5,0 м, а в сторону маркера № 3 — на 15 м.



А

Б

Рис. 8.50. Полигоны для измерения площади и объемов смещенного грунта. А — 2017 г., Б — 2019 г.



А

Б

Рис. 8.51. Горизонтالي рельефа внутри термоденудационного цирка с шагом 1 м. А — 2015 г., Б — 2019 г.

Таблица 8.7.

Площадь и объем ТДЦ по годам наблюдений

Вид наблюдения	Год наблюдения				
	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
Площадь цирка в плане, м ²	1065,9	1439,4	1598,4	1605,5	1750,2
Объем цирка, м ³	2569,84	2678,75	4164,05	4666,63	5963,10

Анализ мониторинговых данных по измерению площадей и объемов термоденудационного цирка по годам наблюдений, позволяет сделать следующие выводы:

- с сентября 2015 по сентябрь 2016 г. площадь ТДЦ значительно увеличилась, на 374 м², тогда как объем изменился всего на 109 м³, это может быть связано с активизацией суффозионно-солифлюкционных процессов, преимущественно небольшой верхней части разреза, не приводящих к выносу больших объемов грунта;
- с сентября 2016 по сентябрь 2017 г. площадь ТДЦ увеличилась на 150 м², меньше чем в предыдущий год, а объем существенно возрос на 1485 м³. Такую ситуацию можно объяснить тем, что в днище ТДЦ вскрылись сильнольдистые грунты, активное вытаивание которых привело к значительному росту глубины цирка и соответственно увеличению его объема;
- с сентября 2017 по сентябрь 2018 г. площадь ТДЦ увеличилась всего на 7 м², а объем — на 503 м³. Такое соотношение объясняется практической остановкой суффозионно-солифлюкционных процессов и продолжающегося термокарста в днище цирка;
- с сентября 2018 по сентябрь 2019 г. площадь ТДЦ увеличилась на 145 м², а объем — на 1246 м³. Такое соотношение указывает на значительное увеличение процесса термокарста в южной части цирка и соответствующего увеличения его площади.

Мониторинг ТДЦ позволяет делать заключения о геокриологическом строении участка в разные интервалы времени.

8.4.2. Криогенные процессы, не выраженные в рельефе

К криогенным процессам, развитие которых не отражается в рельефе, относятся:

- просадка дневной поверхности при оттаивании льдистых грунтов;
- заболачивание территории;
- деградация многолетнемерзлых пород и опускание кровли мерзлоты.

8.4.2.1. Осадка дневной поверхности

Осадка дневной поверхности наблюдается, если увеличивающееся сезонное оттаивание грунтов затрагивает высокольдистые горизонты

ММП, залегающие непосредственно под сезонно-талым слоем. Оттаивающие высокольдистые грунты подвержены осадке и уплотнению. Процесс осадки дневной поверхности протекает сравнительно медленно и определяется только инструментальными методами. Скорость осадки дневной поверхности составляет около 1,5 см/год [Каверин и др., 2017]. На рис. 8.52 приведены результаты наблюдений за динамикой опускания дневной поверхности в районе Воркуты.

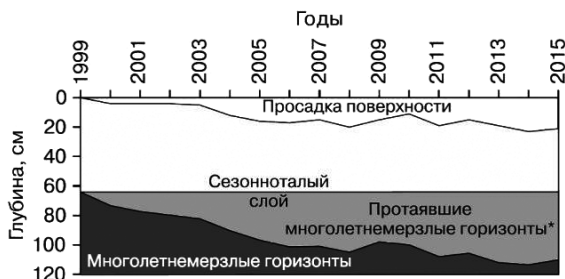


Рис. 8.52. Осадка дневной поверхности при оттаивании высокольдистого горизонта в основании сезонно-талого слоя

Поскольку осадка дневной поверхности характеризуется малыми величинами, как правило, мониторинг этого процесса выполняется только на участках расположения особо ответственных сооружений.

Мониторинг осадки дневной поверхности. Процесс характеризуется скоростью и абсолютной величиной осадки поверхности. Основными методами мониторинга являются инструментальные наблюдения с помощью высокоточного нивелирования или тахеометрической съемки с закрепленного неподвижного репера, DGPS-съемка. Перспективна и лидарная наземная съемка, но пока опыта ее использования применительно к оседанию дневной поверхности нет.

8.4.2.2. Заболачивание территории

Вся территория Российской Арктики относится к области избыточного увлажнения, поэтому для нее характерно медленное заболачивание (рис. 8.53). В естественных условиях процесс развивается исключительно медленно, устанавливается только по данным повторных высокоточных крупномасштабных съемок в течение длительного периода.

На рис. 8.54 приведено изменение площади болот на одном из участков мониторинга в районе г. Надым.

Как видно из рисунка, скорость увеличения площади болот в данном случае составляет около 0,06%/год.

При нарушении условий дренирования вследствие промышленного освоения территории скорость заболачивания резко возрастает, возникают обширные участки новообразованных болот.



Рис. 8.53. Заболачивание территории. Район Надыма

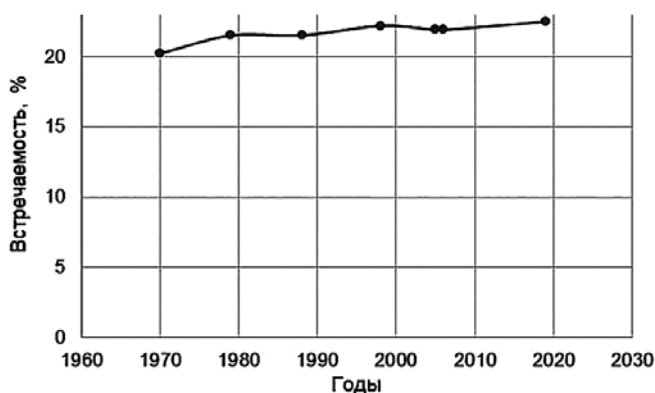


Рис. 8.54. Увеличение площади болот в естественных условиях с 1970 по 2019 г. Район Надыма

Мониторинг заболачивания. Заболачивание характеризуется увеличением площади болот и скоростью протекания процесса. Наблюдения за заболачиванием территории организуются только при освоении территории. Мониторинг осуществляется методами повторного дешифрирования площади болот по снимкам, полученным с БПЛА или методом периодической ландшафтной съемки.

8.4.2.3. Деградация мерзлоты и опускание ее кровли

Деградация мерзлоты развивается при потеплении климата. Среднегодовая температура ММП повышается, в верхних горизонтах становится выше нуля. Мерзлота начинает протаивать сверху. Кровля мерзлоты опускается. Это наиболее опасный и значимый в инженерном смысле

процесс. При этом полностью или частично теряются несущие свойства грунтов, наблюдаются необратимые деформации зданий и сооружений.

Процесс развивается достаточно быстро, скорость опускания кровли составляет от 0,1 м/год до 0,75 м/год в зависимости от конкретных условий (рис. 8.55, см. с. XXXIX цв. вклейки).

Мониторинг мерзлоты и опускания ее кровли. Деградация мерзлоты и опускание ее кровли характеризуется толщиной слоя оттаявших пород (она же глубина залегания кровли ММП) и скоростью опускания кровли. Мониторинг осуществляется при проведении регулярных (непрерывных) наблюдений за термическим режимом ММП в скважинах глубиной не менее 10 м. Опускание кровли фиксируется по данным механического зондирования поверхности мерзлоты металлическим щупом или с помощью контрольного бурения отдельными скважинами или по профилям. Для оценки положения кровли ММП применяются геофизические методы: георадарное профилирование или сейсмоакустические методы.

8.4.2.4. Оценка состояния изученности и прогноза опасных криогенных процессов

Как следует из предшествующего описания, криогенные процессы характеризуются разнообразным проявлением, масштабами процессов и разными скоростями. Анализ опубликованной литературы, архивных материалов и опыт исследований показывают, что мониторинг криогенных процессов осуществляется, как правило, в рамках геотехнического мониторинга, применительно к задачам обеспечения устойчивой работы промышленных и гражданских объектов и предупреждения аварий и катастроф. В фоновом режиме в естественных условиях мониторинг криогенных процессов не проводится или проводится по ограниченному набору процессов в научных целях. Наиболее хорошо, хотя и недостаточно, развита система наблюдений за разрушением берегов, в меньшей степени — пучения. Остальные процессы систематически не изучаются, система их мониторинга практически отсутствует.

Состав мониторинга криогенных процессов представлен в табл. 8.8.

Анализ опубликованной литературы и архивных данных показал, что современное состояние изученности опасных криогенных процессов совершенно недостаточно для количественной оценки их проявления и прогноза. В основном все сводится к качественному описанию проявления процессов, приводятся их показатели — площадь распространения, иногда скорость процесса, отдельные количественные характеристики. Не разработаны модели развития процессов, плохо изучены факторы природной среды и климата, определяющие активизацию криогенных процессов. Почти по всем процессам нет даже научных подходов к прогнозированию процессов или хотя бы количественных оценок.

Состав мониторинга криогенных процессов

Тип криогенных процессов	Криогенный процесс	Наблюдаемые характеристики	Методы наблюдений
Рельефообразующие	Термокарст	Пораженность, опускание поверхности, амплитуда микрорельефа	Дешифрирование актуальных космоснимков каждые 2–5 лет. Нивелирование поверхности лазерными теодолитами, нивелирование по закрепленным маркам и по профилям
	Криогенное растрескивание	Пораженность, размеры полигонов, раскрытие трещин, напряжения в грунтах	Дешифрирование актуальных космоснимков каждые 3–5 лет, трещиномеры, измерители напряжений
	Сезонное пучение	Пораженность, измерение величины сезонного пучения	Дешифрирование зимних и летних космоснимков, обработка снимков методами интерферометрии, пучиномеры, нивелирование по профилям с использованием закрепленных высотных реперов, измерения DGPS
	Многолетнее пучение	Пораженность, измерение высоты и плановых размеров	Дешифрирование космоснимков при организации наблюдений, нивелирование и/или тахеометрическая съемка, измерения DGPS
	Линейная эрозия (оврагообразование)	Пораженность, протяженность оврагов, геометрические характеристики оврагов, в том числе уклон тальвега, скорость перемещения «головы» оврага	Дешифрирование космоснимков или снимков с БПЛА, тахеометрическая съемка, измерения на закрепленных створах
	Речная боковая эрозия	Протяженность подмываемых берегов, скорость отступания берега	Крупномасштабные карты, актуальные космоснимки, тахеометрическая съемка, измерения DGPS, измерения на закрепленных на местности створах

Тип криогенных процессов	Криогенный процесс	Наблюдаемые характеристики	Методы наблюдений
Рельефообразующие	Термоабразия морских берегов	Ежегодная скорость отступления берега, позиция кромки берегового обрыва, углы наклона берегового клифа, площадь утраченных земель	Актуальные космоснимки высокого разрешения, ежегодная тахеометрическая съемка, измерения DGPS, измерения на закрепленных на местности створах, лидарная съемка
	Термоденудация на склонах	Геометрические размеры термоцирков, скорость отступления фронта, объем выносимого материала	Актуальные космоснимки высокого разрешения, ежегодная тахеометрическая съемка, измерения DGPS, измерения на закрепленных на местности створах, лидарная съемка
	Криогенные оползни и солифлюкция	Геометрические размеры, углы наклона поверхности, площадь	Актуальные космоснимки высокого разрешения, ежегодная тахеометрическая съемка, измерения DGPS, измерения на закрепленных на местности створах, лидарная съемка
	Образование воронок газовых выбросов	Геометрические размеры, скорость преобразования геометрии, газовый состав, состав воды на разных глубинах	Актуальные космоснимки высокого разрешения, измерения DGPS, лидарная съемка
Криогенные процессы, не проявляющиеся в рельефе	Осадка поверхности	Абсолютная отметка дневной поверхности	Высокоточное весеннее и зимнее нивелирование поверхности или тахеометрическая съемка по профилям и маркам, измерения абсолютных высот с помощью DGPS
	Заболачивание территории	Площадь болот	Дешифрирование снимков с БПЛА, повторные ландшафтные съемки
	Опускание кровли мерзлоты	Глубина залегания кровли мерзлоты	Термометрические наблюдения в скважинах, ежегодное опробование шупом, контрольное ручное бурение, георадарное профилирование, малоглубинная сейсмоакустика

Слабая изученность криогенных процессов обуславливает необходимость постановки НИР для изучения процессов, разработки количественных оценок и прогнозных моделей. Из всего перечня криогенных процессов в наибольшей степени необходима и перспективна постановка НИР по изучению термоденудации и образования термоденудационных цирков на пологих склонах, опасных криогенных процессов на морском побережье, осадки дневной поверхности при деградации мерзлоты.

8.5. Лабораторные исследования грунтов

8.5.1. Общие положения

Мерзлое состояние грунтов, изменения их свойств при промерзании и протаивании приходится учитывать при любой хозяйственной деятельности (строительство, сельское хозяйство, поиск и разведка полезных ископаемых, горное дело и др.) и оценке экологического состояния природных и измененных ландшафтов. (Настоящий раздел написан на основе методической литературы по исследованию свойств и состояния многолетнемерзлых пород [Общее мерзлотоведение... 1978; Геокриология СССР, Т. 1, 1988; Пендин, 2008].)

Мерзлотоведение (геокриология) как естественно-историческая наука геологического цикла, изучающая закономерности формирования и развития во времени и пространстве толщ мерзлых грунтов, их состава, криогенного строения и свойств, а также мерзлотно-геологических процессов, дает для этого теоретические и методические основания, а нормативная документация — конкретные методические реализации.

8.5.2. Термины мерзлых грунтов

Термины (по ГОСТ 25100-2017):

- криолитозона — зона распространения многолетнемерзлых грунтов, территория, на которой в природных условиях возможно образование массивов многолетнемерзлых грунтов или их сохранение;
- грунт многолетнемерзлый (вечномерзлый) — грунт, находящийся в мерзлом состоянии постоянно в течение более двух лет;
- слой сезонного промерзания (оттаивания) — поверхностный слой грунта, промерзающий зимой (оттаивающий летом);
- морозное пучение грунтов — увеличение объема дисперсных грунтов при промерзании;
- шлиры льда — включения льда в мерзлом грунте, представленные прожилками, прослойками, линзами разной ориентировки. Шлиры льда образуют криогенные текстуры;

- криогенная текстура — совокупность признаков сложения мерзлого грунта, обусловленная наличием, размерами, ориентировкой, относительным расположением текстурообразующего льда и минеральных агрегатов. Устанавливается при визуальном описании мерзлых грунтов;
- кровля многолетнемерзлых пород — поверхность, отделяющая сверху многолетнемерзлые грунты от сезонно-талых или талых грунтов;
- талик — толща талых грунтов в зоне распространения многолетнемерзлых пород, существующая непрерывно более года. Талики, пронизывающие насквозь всю мерзлую толщу, называются сквозными, подстилаемые снизу мерзлыми породами — несквозными. Встречаются также межмерзлотные талики — талые слои, заключенные в толще многолетнемерзлых грунтов;
- криопэги (криогалинные воды) — природные (подземные) соленые воды, имеющие отрицательную температуру;
- подмерзлотные воды — воды первого от подошвы мерзлой толщи водоносного горизонта, комплекса, трещиноватой зоны;
- надмерзлотные воды — воды, залегающие над толщей многолетнемерзлых пород, которая, в большинстве случаев служит водопором;
- перелеток — линза мерзлых пород, сохраняющаяся на некоторой глубине как остаток слоя сезонного промерзания в течение всего теплого периода года или нескольких лет;
- температура многолетнемерзлых пород — распределение температуры в массиве мерзлых грунтов. Определяется в соответствии с ГОСТ 25358;
- термометрия скважин — запись изменения температуры с глубиной, получаемая при опускании в скважину термометрического оборудования. Производится по ГОСТ 25358. Длительность выстойки скважины — время, необходимое для восстановления и стабилизации естественной температуры грунта после проходки в нем горной выработки.

Общие термины

Лед — природное образование, состоящее из кристаллов льда с возможными примесями обломочного материала и органического вещества не более 10% (по объему), характеризующееся криогенными связями.

Природные льды подразделяются на две группы: наземные и подземные. Для нас наибольший интерес имеют подземные льды, к которым относят ледяные тела мощностью более 0,3–0,5 м и которые в свою

очередь делятся на жильные, инъекционные, миграционные, пещерные и погребенные.

Жильные льды формируются в результате заполнения возникающих в мерзлых породах трещин влагой.

Инъекционные льды образуются при кристаллизации свободных подземных вод, внедрившихся под напором. Они обычно слагают залежи пластовой, линзовидной и штоковой форм.

Миграционные льды формируются при благоприятных условиях промерзания и миграции воды к фронту льдовыделения, образуя ледяные тела мощностью до нескольких метров.

Пещерные льды могут быть различного генезиса: инфильтрационные, сталагмиты и сталактиты (ледяные), аблимационные и др.

Погребенные льды являются остатками сформировавшихся на дневной поверхности льдов различного происхождения (речных, озерных, ледниковых и др.).

Под криогенной текстурой понимается совокупность признаков сложения мерзлого грунта, обусловленная ориентировкой, относительным расположением различных по форме и размерам ледяных включений и льда-цемента.

Криогенные текстуры скальных пород определяются главным образом их трещиноватостью, особенностями заполнения трещин влагой и ее замерзанием. Это, как правило, унаследованные криогенные текстуры.

Пробы грунта из скважин и горных выработок отбираются из каждой литологической разности и агрегатного состояния, но не реже, чем через 2 м.

8.5.3. Свойства мерзлых грунтов

Дисперсные мерзлые грунты представляют собой многофазную, многокомпонентную систему, которая в отличие от талых грунтов содержит лед, цементирующий минеральные частицы и увеличивающий их прочность. Наличие в грунте как жидкой, так и твердой фазы, изменение их соотношения в зависимости от химико-минерального и гранулометрического состава, температуры и давления во многом определяют физические, физико-механические и теплофизические свойства грунтов. Поэтому для мерзлых грунтов определяют дополнительно к стандартным ряд специфических показателей, рассмотренных ниже.

8.5.3.1. Водно-физические свойства грунтов

Влажность, льдистость, плотность и пористость — основные физические показатели, характеризующие инженерно-геологические особенности мерзлых и оттаивающих грунтов.

Суммарная влажность (W_{tot}) мерзлого грунта принимается равной отношению массы всех видов воды и льда, содержащихся в мерзлом грунте, к массе сухого грунта. Она определяется по формуле:

$$W_{\text{tot}} = W_i + W_{\text{ic}} + W_w = W_i + W_m,$$

где W_i — влажность мерзлого грунта за счет ледяных включений; W_{ic} — влажность мерзлого грунта за счет порового льда (льда-цемента); W_w — влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды (содержание незамерзшей воды); W_m — влажность мерзлого грунта, расположенного между льдистыми включениями.

При определении суммарной влажности используются два способа: бороздки и средней пробы. Влажность мерзлого грунта, расположенного между льдистыми включениями, определяется точечным методом, а содержание незамерзшей воды — калометрическим. В тех случаях, когда отсутствуют экспериментальные данные, W_m для незасоленных грунтов принимают равной $W_p + 0,03$, где W_p — влажность на границе раскатывания. Содержание незамерзшей воды в таких случаях может быть рассчитано по формуле:

$$W_w = k_w \times W_p,$$

где k_w — коэффициент, принимаемый по таблице в зависимости от числа пластичности и температуры грунта.

Суммарная льдистость мерзлого грунта (I_{tot}) принимается равной отношению всех видов содержащегося в нем льда к объему мерзлого грунта. Она определяется по формуле

$$I_{\text{tot}} = I_c + I_{\text{ic}},$$

где I_i — льдистость грунта за счет ледяных включений, I_{ic} — льдистость грунта за счет порового льда.

В зависимости от величины льдистости за счет ледяных включений грунты подразделяются на слабольшдистые — $I_i < 0,2$; льдистые — $I_i = 0,2-0,4$; сильнольдистые — $I_i = 0,4-0,6$; исключительно сильнольдистые — $I_i = 0,6-0,9$.

Плотность мерзлого грунта (ρ_p) — масса единицы его объема в естественном ненарушенном состоянии. Плотность мерзлого грунта в сухом состоянии ($\rho_{\text{др}}$) — отношение массы твердой фазы грунта к его объему.

Степень заполнения объема пор мерзлого грунта льдом и незамерзшей водой вычисляется по формуле:

$$S_i = (1,1 \times W_{\text{ic}} + W_w) \rho_s / e_f \times \rho_w,$$

где ρ_s — плотность частиц грунта, ρ_w — плотность воды, e_f — коэффициент пористости мерзлого грунта.

Пористость — суммарный объем всех пор в единице объема грунта, независимо от величины этих пор и степени их заполнения. Коэффициент пористости — отношение объема пор к объему твердой компоненты.

8.5.3.2. Теплофизические свойства грунтов

Теплофизические характеристики мерзлых и талых грунтов, коэффициент теплопроводности и объемная теплоемкость определяются опытным путем. Допускается определять эти характеристики в зависимости от плотности сухого грунта, суммарной влажности грунта и его вида.

Коэффициент теплопроводности характеризует способность грунта переносить тепловую энергию и численно равен потоку тепла, проходящего через единицу площади породы в единицу времени при температурном градиенте, равном единице.

Под объемной теплоемкостью грунтов подразумевается количество тепла, которое необходимо сообщить единице объема грунта, чтобы изменить его температуру на 1 °С.

Теплофизические свойства грунтов существенно зависят от их состава, строения и состояния. Теплопроводность грунтов при прочих равных условиях уменьшается с увеличением дисперсности в такой последовательности: крупнообломочные—песчаные—супесчаные—суглинистые—глинистые—торф. При переходе грунта из талого в мерзлое состояние коэффициент теплопроводности возрастает, так как лед имеет теплопроводность в 4 раза выше воды.

Эти параметры характеризуют механизм кондуктивной передачи тепловой энергии. В общем случае процесс теплопередачи в грунтах может осуществляться с помощью излучения, конвекции или кондукции.

Тепловое излучение представляет собой процесс испускания электромагнитных волн нагретым телом в окружающее пространство. Доля тепла, переносимого излучением в грунтах обычно не превышает нескольких процентов от величины суммарного теплопотока.

Конвективный перенос тепла осуществляется жидкостью и газом, перемещающимися по порам, пустотам и трещинам. Причем доля тепла, переносимого в процессе миграции влаги в грунтах, обычно мала по сравнению с долей тепла, переносимого кондуктивным путем. В случае фильтрации воды и газа в трещиноватых скальных, грубообломочных и песчаных породах конвективный теплообмен имеет существенное значение.

Кондуктивный перенос тепла происходит за счет колебаний атомов и молекул кристаллической решетки, интенсивность которых возрастает с повышением температуры. Математически процесс стационарной кондуктивной теплопередачи описывается законом Фурье: $q_{kd} = -\lambda \text{ grad } T$, где q_{kd} — плотность кондуктивной составляющей теплового потока.

Основным параметром, характеризующим тепловое состояние грунтов, является температура (T). Ее распределение в грунтах называется температурным полем. Температурное поле определено, если извест-

ны значения T во всех точках грунта в каждый заданный момент времени t , т.е. известна функция $f = (x, y, z, t)$.

Поверхность равных T называется изотермой. Если температурное поле со временем не изменяется, то оно называется стационарным. В противном случае оно характеризуется как нестационарное.

На практике о температурном поле судят по данным замеров в скважинах через определенные интервалы времени. Строятся три типа температурных кривых, характеризующих:

1) изменение T с глубиной на фиксируемый момент времени:

$$T = f(z) \quad t = \text{const};$$

2) изменение T во времени на данной глубине:

$$T = f(t) \quad z = \text{const};$$

3) изменение глубины во времени для данной изотермы:

$$z = f(t) \quad T = \text{const} \text{ (термоизоплеты)}.$$

Интенсивность изменения T по нормали к изотермической поверхности называется градиентом I . Градиент T , обусловленный потоком тепла, идущим из недр Земли к поверхности, называется геотермическим градиентом. Величина, обратная геотермическому градиенту, называется геотермической ступенью. Она показывает, на каком расстоянии по вертикали T в массиве грунтов изменяется на 1°C .

Температурные колебания на поверхности вызывают колебания температуры в грунтах. Температурная волна затухает с глубиной, претерпевая постепенное уменьшение своей амплитуды. Максимальная глубина проникновения в грунты поверхностной температурной волны называется глубиной нулевых амплитуд T . Приповерхностные толщи, ограничивающиеся этой глубиной, называются слоем годовых колебаний температуры (рис. 8.56).

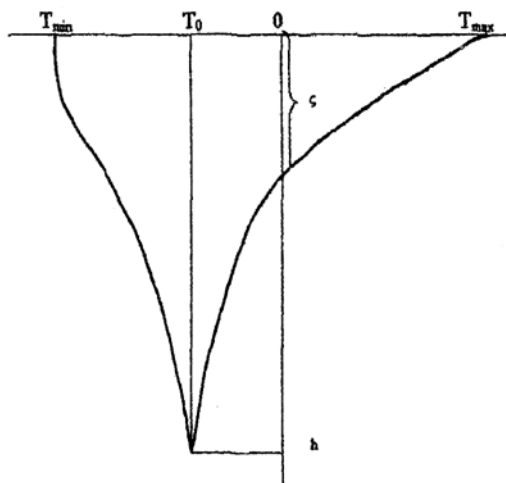


Рис. 8.56. Температурные кривые.

$T_{\min}$ — минимальная температура грунта;

$T_{\max}$ — максимальная температура грунта;

T_0 — температура грунта на глубине годовых нулевых амплитуд;

h — глубина годовых нулевых амплитуд;

ξ — глубина сезонно-талого слоя

Закономерности распространения температурных волн в грунтах описываются законами Фурье.

Первый закон Фурье определяет, что амплитуда температурных колебаний экспоненциально убывает с глубиной. Скорость затухания температурных колебаний с глубиной определяется свойствами среды: чем больше теплопроводность и чем меньше теплоемкость, тем медленнее затухает амплитуда и тем на большую глубину проникают температурные колебания.

Второй закон Фурье указывает, что температурные колебания в грунтах происходят со сдвигом фаз, пропорциональным глубине. Сдвиг колебаний по фазе с глубиной происходит вследствие ограничения скорости распространения температурной волны в грунтах. Эта скорость определяется теплофизическими свойствами грунта и периодом колебаний, а потому для однородных толщ постоянна по глубине и по времени.

Третий закон Фурье связывает глубину проникновения температурных колебаний с периодом и амплитудой колебаний волны на поверхности. Глубина проникновения колебаний оказывается тем большей, чем больше амплитуда и период колебаний.

Следует особо подчеркнуть, что все рассмотренные выше закономерности формирования температурного поля в грунтах не учитывают эффекта фазовых переходов влаги в них и наличия горизонтальных потоков тепла. Особенно значительные температурные градиенты в латеральной плоскости наблюдаются при переходе от одного элемента рельефа к другому, с иной ориентировкой по отношению к Солнцу, большим или меньшим уклоном, от суши к крупным водоемам, а также большим водотокам. Другими словами, в естественных условиях чаще всего приходится встречаться с 2- и 3-мерными температурными полями.

Значительно более сложными оказываются закономерности формирования температурного поля во влажных грунтах при переходе их температур через 0°C . Связано это с тем, что процессы замерзания воды или таяния льда в грунтах сопровождаются выделением или поглощением большого количества тепла, что существенно изменяет картину температурного поля. По сути в этом случае имеет место не просто процесс охлаждения или нагревания грунта, а значительно более сложный, получивший название процесса промерзания или протаивания влажных грунтов.

8.5.3.3. Механические свойства мерзлых грунтов

Механические свойства мерзлых грунтов выражаются обычно через количественные показатели, которые устанавливают функциональную

связь между величиной и видом механического воздействия и реакцией грунта на это воздействие.

Под **деформацией** понимается изменение формы и (или) объема тела без нарушения его сплошности. Деформации бывают **обратимыми** (исчезающими после снятия нагрузки) и **необратимыми** (остаточными, или пластическими). Обратимыми являются упругие и эластические деформации. Их природа различна. **Упругие** деформации обусловлены изменением расстояния между атомами, а **эластические** — изменением конформации макромолекул. **Закон упругости Гука** — это закон прямой пропорциональности между напряжением и деформацией, характерный для идеально упругого тела, моделью которого является спиральная пружина.

Остаточные деформации в кристаллических телах возникают в результате скольжения дислокаций за счет последовательного перескока атомов со своего места на соседнее. В грунтах остаточные деформации связаны в основном с изменением положения минеральных частиц и льда.

В механике грунтов под **реологическими** понимают процессы деформирования грунта, протекающие во времени и связанные в основном с остаточными деформациями. Развитие во времени объемных деформаций в немерзлых водонасыщенных грунтах в значительной мере определяется процессом отжатия или всасывания воды при изменении объема их пор. Развитие таких деформаций грунтов, определяемых только длительностью фильтрации воды, не относят к категории реологических. К реологическим следует относить только протекающие во времени деформации самого скелета. В глинистых грунтах реологические процессы обусловлены вязкими связями между частицами скелета грунта, в мерзлых — **течением льда**.

Явления, определяющие реологические свойства грунтов: ползучесть грунта, вязкость, пластичность, релаксация и длительная прочность.

Под **ползучестью** понимают деформируемость грунта во времени при постоянной нагрузке. **Пластичность** — способность материала принимать новую форму и размеры под действием внешних сил, не разрушаясь, и сохранять ее после снятия нагрузки. **Вязкость** — свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. **Упругость** — свойство тела деформироваться под действием нагрузки и восстанавливать первоначальную форму и размеры после ее снятия.

Поведение мерзлых грунтов под нагрузкой имеет сложный характер, в общем виде — **упруго-пластично-вязкий**. **Релаксацией** называют процесс расслабления (уменьшения) напряжений в грунтах при заданной неизменной деформации за счет ползучести. **Длительная прочность** — прочность грунтов при длительном действии на них нагрузки.

Модели, которые используются для представления деформирования грунтов, представлены на рис. 8.57.

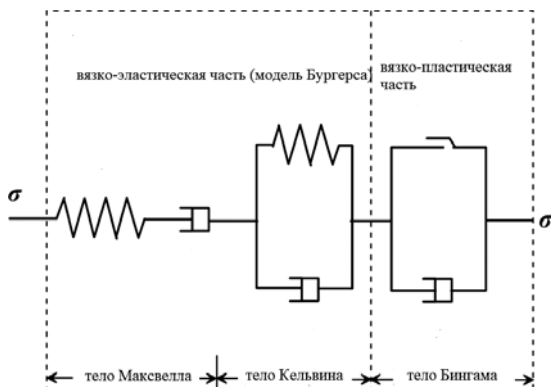


Рис. 8.57. Сложные модели деформирования грунтов

При воздействии механической нагрузки — при одноосном или трехосном сжатии, сдвиге, растяжении — развиваются деформации, величина которых зависит от вида испытаний, нагрузки и времени. Общий вид кривых ползучести представлен на рис. 8.58.

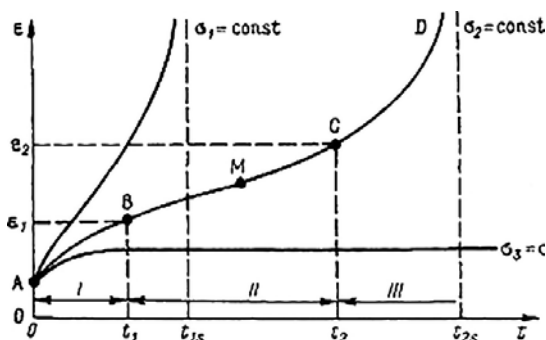


Рис. 8.58. Общий вид кривых ползучести льда и мерзлых грунтов.

Пояснения см. в тексте

Деформации ϵ при различных нагрузках σ могут развиваться с уменьшающейся (участок А-В на рис. 8.58), постоянной (участок В-С) или возрастающей (участок С-Д) скоростью. В первом случае она называется **затухающей ползучестью**, во втором и третьем — **незатухающей ползучестью**. Иногда они называются 1-й, 2-й и 3-й стадиями ползучести, или первичной, вторичной (течения с постоянной скоростью, или установившегося течения) и третичной (прогрессирующего течения) ползучестью. Большое число терминов объясняется тем, что эти стадии характерны и для других материалов.

На самом деле это деление условно, потому что фактически «затухающие» деформации после участка А-В переходят затем в «незатухающие». Поэтому незатухающая ползучесть на средней кривой на рис. 8.58 на самом деле включает три стадии: I — затухающей неустановившейся ползучести (участок А-В); II — установившегося течения (участок В-С); III — прогрессирующего течения (участок С-Д), причем последняя стадия заканчивается разрушением. Иногда стадия II может сразу переходить в стадию III, а иногда стадия I может длиться неограниченно долго.

Проявление всех стадий ползучести обусловлено двумя взаимно противоположными явлениями: упрочнением и разупрочнением грунта под действием внешней нагрузки.

Зависимости между скоростью установившейся ползучести ($\dot{\gamma}$) и напряжением (τ) называются **реологическими**. Отношение приращения величины действующего напряжения на каждом участке ($\Delta\tau$) к приращению скорости деформации ($\Delta\dot{\gamma}$) соответствует **коэффициенту вязкости** [Роман, 2002]. Течение возникает после того, когда напряжения превысят некоторый предел τ_k , называемый **пределом упругости**.

При дальнейшем увеличении напряжения до τ_f (**предел затухающей ползучести**) отмечается линейный участок с постоянной вязкостью (**Шведовой вязкостью**) $\eta_0 = (\tau - \tau_k) / (d\epsilon/dt)$. При $\tau > \tau_f$ происходит разрушение структуры, и наблюдается линейный участок (напряжение в интервале $\tau_s - \tau_f$) с постоянной вязкостью (**Бингамовой вязкостью**). Напряжение τ_s называют условным **пределом текучести** (или **предел линейной ползучести**). Напряжение τ_f соответствует разрушению структуры грунта.

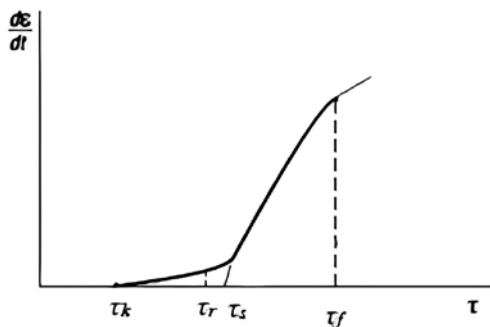


Рис. 8.59. Реологическая кривая.

Пояснения в тексте

С увеличением льдистости вязкость мерзлых пород увеличивается и достигает максимума при степени влажности 0,8–0,9. Далее вязкость снижается по мере увеличения льдистости и стремится к вязкости льда [Роман, 2002]. Однако появление льда при замерзании дисперсных горных пород приводит к увеличению вязкости в 100–1000 раз и более.

На рис. 8.58 представлены кривые ползучести при одноосном сжатии различных засоленных мерзлых грунтов: песка, супеси и суглинка.

Для песка при всех значениях степени засоленности ($D_{\text{sal}} = 0,03; 0,1; 0,2\%$; $W = 0,25-0,27$; $n = 0,25-0,27$) наблюдались три стадии деформирования: стадия затухающей ползучести, стадия течения с постоянной скоростью и стадия прогрессирующей ползучести. Переход в стадию течения с постоянной скоростью происходил при деформации 4–7%, а в стадию прогрессирующего течения — при 8–11%. На кривых ползучести мерзлой засоленной супеси (при $D_{\text{sal}} = 0,09; 0,2\%$; $W = 0,36-0,40$) стадии деформирования в исследованном интервале температур $-2...-4^\circ\text{C}$ не выделяются: наблюдается затухающая ползучесть до величины деформации 20% и более. Аналогично происходит деформирование мерзлого суглинка в интервале засоленностей $D_{\text{sal}} = 0,5-1,0\%$ в том же интервале температур.

Этой особенностью засоленные мерзлые породы отличаются не только от незасоленных пород, где, как правило, наблюдаются все три стадии деформирования, но и от сильнольдистых, где преобладает течение с постоянной скоростью.

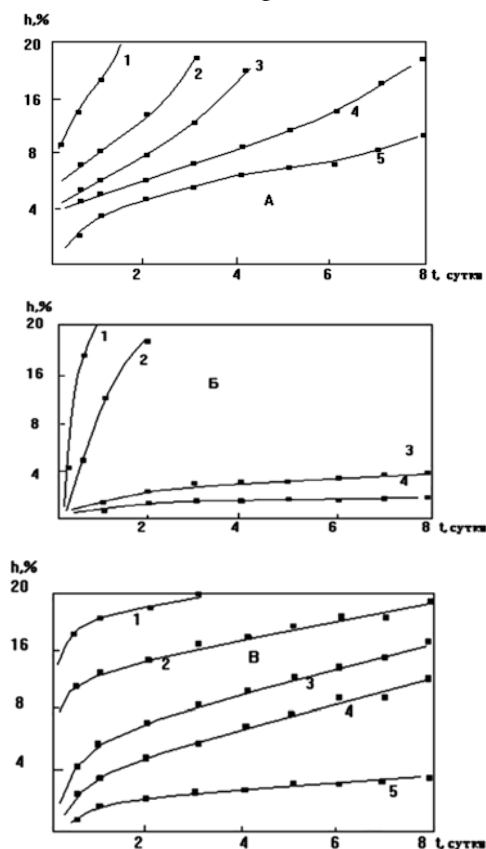


Рис. 8.60. Кривые ползучести при одноосном сжатии: А — песка при засоленности

$D_{\text{sal}} = 0,1\%$, температуре $t = -2^\circ\text{C}$ и нагрузке:

1 — 0,8; 2 — 0,7; 3 — 0,6; 4 — 0,5; 5 — 0,4 МПа;

Б — супеси при $D_{\text{sal}} = 0,2\%$, $t = -2^\circ\text{C}$ и нагрузке:

1 — 0,25; 2 — 0,15; 3 — 0,1; 4 — 0,05 МПа;

В — суглинка при $D_{\text{sal}} = 1\%$, $t = -3,8^\circ\text{C}$ и нагрузке:

1 — 0,4; 2 — 0,35; 3 — 0,3; 4 — 0,15; 5 — 0,12 МПа

Для аппроксимации кривых деформирования часто используется степенная зависимость, соответствующая так называемой *теории старения*:

$$\sigma = A(t)\varepsilon^m = \xi t^{-\alpha} \varepsilon^m, \quad (8.1)$$

где σ — напряжение, $A(t)$ — функция времени, ε — деформация, m — постоянная, называемая *коэффициентом упрочнения*, ξ — *коэффициент деформирования*, α — постоянная [Вялов, 2000].

Аппроксимация кривых ползучести засоленных мерзлых грунтов выражением (8.1) в некоторых случаях не вполне удовлетворительна. Изменения параметров α , ξ и m не носят отчетливо закономерного характера, например, при изменении гранулометрического состава грунтов.

В литературе имеется указание на то, что для сильнольдистых грунтов точки перегиба кривых $\ln(\sigma) - \ln(\varepsilon)$ связаны с так называемыми пределами ползучести. При этом выделяются две характерные точки перегиба: первая отвечает *пределу затухающей ползучести*, а вторая — *пределу линейной ползучести*. В засоленных мерзлых грунтах этого не наблюдается.

Как показано С. С. Вяловым [1953], а затем А. Г. Бродской [1962], мерзлые породы отличаются значительной сжимаемостью. Суммарный коэффициент сжимаемости мерзлых пород можно представить в виде [Ершов, 2002]:

$$A_0 = A_y + A_n + A_\phi + A_w, \quad (8.2)$$

где A_y , A_n , A_ϕ , A_w — частные коэффициенты относительной сжимаемости мерзлых пород за счет соответственно упругого сжатия, закрытия пор и дефектов, фазового перехода льда в незамерзшую воду и оттока незамерзшей воды.

На компрессионной кривой Н. А. Цытович [1973] предлагает выделять три участка, соответствующих различным стадиям упрочнения мерзлых пород: упругого деформирования (до *структурной прочности*), структурно-необратимых деформаций и участок упрочнения. Упругое деформирование составляет обычно от 10 до 30% от полной деформации, структурно-необратимые деформации — 70–90% [Цытович, 1973].

Величина A_y изменяется от 0,006 для песков до 0,015 МПа⁻¹ для глин [Ершов, 2002].

Величина A_n главным образом зависит от количества свободных пор в мерзлой породе и становится особенно заметной при влажности, меньшей полного водонасыщения.

Засоленные мерзлые породы обладают значительной сжимаемостью. *Коэффициент сжимаемости* во всем диапазоне засоленностей (от 0,05 до 1,5%) и температур (–2...–4 °С) выше значения 0,01 МПа⁻¹, которое является критерием *пластичномерзлого состояния* пород. Мерзлый морской засоленный суглинок из района пос. Амдерма при засоленности 0,45% при нагрузке 0,1 МПа и температуре –1 °С сжимается

на 0,146 от толщины, а при 3 °С — на 0,039. Это такие осадки, с которыми нельзя не считаться в инженерной практике. Для сравнения, по данным С. С. Вялова [1973], осадка незасоленного суглинка при той же нагрузке и температуре 1 °С составляет всего 0,01, т.е. почти на порядок меньше. Наибольшей сжимаемостью отличаются образцы, насыщенные солями NaCl и CaCl₂.

В соответствии со строгим решением теории пластичности [Ишлинский, 1944] для идеально связанных неупрочняющихся тел отношение твердости (прочности) к напряжению при пределе текучести можно принять за постоянную величину, а эквивалентное сцепление мерзлых пород $C_{\text{экв}}$ тогда, как показано Н. А. Цытовичем [1954], определяется выражением:

$$C_{\text{экв}} = 0,18P/\pi \times D \times S_t, \quad (8.3)$$

где P — нагрузка на шариковый штамп; D — диаметр шарикового штампа; S_t — величина осадки штампа. По мнению Н. А. Цытовича [1973], величину эквивалентного сцепления, определяемую шариковым штампом таким образом, следует считать комплексной характеристикой сил связности пластичных грунтов, причем, как показано С. С. Вяловым [1959], влиянием диаметра штампа и величиной нагрузки часто можно пренебречь и считать эквивалентное сцепление независимым от них. Определяют *мгновенное эквивалентное сцепление* (при времени вдавливания штампа 10–15 сек), *восьмичасовое* $C_{\text{экв}}$ (наиболее часто определяемая характеристика) и *длительное* $C_{\text{экв}}$.

На примере супеси (р. Се-Яха) было изучено влияние засоленности при –3 °С. При увеличении засоленности от 0,5 до 1% при влажности 0,33 восьмичасовое эквивалентное сцепление уменьшается от 0,63 до 0,24, а длительное — от 0,48 до 0,18 кг/см², т.е. более чем в два раза.

Величина *осадки при оттаивании* $h_{\text{ос}}$ выражается следующим образом:

$$h_{\text{ос}} = A \times h + a \times h \times G, \quad (8.4)$$

где A — *коэффициент оттаивания*, учитывающий деформации осадки без нагрузки; a — *коэффициент уплотнения*, учитывающий деформации осадки под нагрузкой; G — нагрузка; h — мощность оттаивающего слоя. Коэффициент оттаивания A является безразмерной величиной, меньшей 1 и характеризующей степень тепловой осадки при протаивании пород. По данным Р. Г. Кальбергенова, например, коэффициент оттаивания плотных морских глинистых пород салехардской свиты (при средней плотности 1,82–1,86 г/см³) меняется от 0,001 до 0,004.

Экспериментальные исследования *прочности мерзлых грунтов* начинались определениями так называемой кратковременной прочности, когда быстро прикладывалась нагрузка и немедленно происходило разрушение. По мере накопления опытных данных обнаружился факт сни-

жения прочности во времени, в процессе восприятия нагрузки. Оказалось, что мгновенная прочность может быть больше длительной более чем в 10 раз [Роман, 1987 и др.]. Первые исследования **длительной прочности** грунтов были выполнены в 30-х гг. Н. А. Цытовичем, в 40-х гг. М. Н. Гольдштейном [1948]. Затем С. С. Вяловым в 50-х гг. проведены комплексные исследования длительного сопротивления мерзлых грунтов нагрузкам, показано снижение прочности в процессе ползучести, установлены основные закономерности длительной прочности. Выявлена зависимость ее от температуры грунта [Вялов, 2000].

Для оценки длительной прочности мерзлых грунтов по данным кратковременных испытаний широко используется полученная С. С. Вяловым зависимость:

$$\int_0^{t_p} \exp\{-\beta[\theta(t)]/\sigma(\theta)\} dt = B, \quad (8.5)$$

где t_p — время до разрушения (долговечность); β и B — параметры, определяемые из опыта; $\sigma(\theta)$ — напряжение, вызывающее разрушение и зависящее от температуры; $\theta(t)$ — температура мерзлого грунта, зависящая от времени; t — время. Для условия постоянной температуры это уравнение упрощается в виде:

$$\sigma_t = \frac{\beta}{\ln(t/B)}. \quad (8.6)$$

Эти уравнения оказываются справедливыми для всех прочностных показателей мерзлых грунтов (сцепления, сопротивления сжатию, сдвигу), при их выводе механизм разрушения рассматривается как результат протекающего во времени «развития дефектов структуры — микро- и макротрещин, в процессе которого увеличивается степень поврежденности структуры грунта. Критерием разрушения является достижение поврежденностью критического значения, которое для данного вида грунта и температуры постоянно. Интенсивность процесса длительного разрушения зависит от скорости роста дефектов, которая в свою очередь является функцией действующего напряжения и времени» [Вялов, 2000]. Значение длительной прочности при неограниченном времени действия нагрузки, т.е. ее предельное значение, называется **пределом длительной прочности**. Для практических целей время действия нагрузки ограничено сроком службы сооружения.

В понятие «прочность мерзлых грунтов» вкладывают различный смысл в зависимости от решаемой задачи. Оно включает как разрушение, так и избыточную деформацию [Геотехнические вопросы освоения Севера, 1983]. Со времени исследования С. С. Вялова [1959] принято считать, что мерзлые породы при достаточно больших напряжениях разрушаются, что фиксируется увеличением скоростей деформирования при посто-

янной нагрузке. Причем для мерзлых пород характерно вязкое разрушение с большими деформациями и сплющиванием образца (образование «бочки») без нарушения сплошности. Поданным Н. К. Пекарской [1962], С. Э. Городецкого и Е. П. Шушеринной [1962], С. С. Вялова [1959] у мерзлых грунтов выражены все три стадии ползучести, а переход от затухающей к незатухающей ползучести четкий. Однако длительность стадии неустановившейся ползучести для мерзлых пород может составлять сотни и даже тысячи часов.

Для засоленных мерзлых пород даже при высоких нагрузках наблюдается в основном затухающая ползучесть. Поэтому в понятие прочности засоленных пород часто вкладывается смысл избыточной деформации. Основания для назначения деформационного критерия прочности имеются в работах С. С. Вялова [1956] и М. Н. Гольдштейна [1957]. Ими было высказано предположение, что разрушение грунта наступает тогда, когда накопление пластической деформации достигает некоторого постоянного предела, превышение которого ведет к разрушению. Так, для пластичных глин, по данным С. Муроямы и Т. Шиботы [1966], значение этой предельной деформации колеблется от 0,09 до 0,1.

По данным С. С. Вялова [2000], для мерзлой супеси значение предельной деформации — 0,16, для плотной мерзлой глины — 0,06. Для пластичных пород значение предельной деформации увеличивается. Если такую предельную деформацию использовать для оценки прочности мерзлых пород, С. С. Вялов [2000] рекомендует значение 0,2, т.е. **деформацию образца при одноосном сжатии в 20%**. При такой деформации если и не достигается визуального разрушения, нарушения сплошности, то деформации настолько велики, что образец можно считать потерявшим несущую способность. По данным Е. Nivon [1991] переход в стадию прогрессирующего течения у засоленных мерзлых пород, правда, при достаточно низких температурах $-5...-7$ °С, наблюдается либо около значения деформации 20%, либо (чаще) при деформациях 25–30% и выше, когда образец заметно изменяет форму и проводить эксперименты не вполне целесообразно, так как условия одноосных испытаний изменяются.

Использование других критериев прочности и понятий для засоленных мерзлых пород может также быть полезным. К. Ф. Войтковским [1999] было введено понятие **предела длительной ползучести**, при напряжениях ниже которого может происходить течение с постоянной или уменьшающейся скоростью, а при больших напряжениях установившаяся стадия переходит в стадию прогрессирующего течения с возрастающей скоростью. Таким образом, значение прочности, определенное по величине деформации 0,2 при затухающей ползучести, будет ниже либо равно пределу длительной ползучести по К. Ф. Войтковскому, а сам этот

предел для засоленных мерзлых пород может быть надежно определен только для засоленных песчаных отложений. Ряд авторов [Велли, 1973 и др.] используют понятия *предел затухающей ползучести* и *предел линейной ползучести* как проекции точки, где происходит увеличение скоростей деформирования.

До сих пор нерешенной проблемой механики грунтов является аппроксимация кривой длительной прочности и определение предела длительной прочности для практических целей. Использование выражения (8.6) все еще требует дополнительного экспериментального обоснования ввиду значительного числа деформированных зданий и инженерных сооружений в криолитозоне.

К деформационным характеристикам мерзлых грунтов относятся модули общей и упругой деформации, коэффициент Пуассона, показатели реологических свойств, коэффициенты вязкости и сжимаемости. К прочностным — кратковременные и длительные значения прочности грунта на сдвиг, сжатие, растяжение и эквивалентное сцепление.

Модуль общей деформации (E) имеет определенный физический смысл, отражая сопротивление мерзлого грунта развитию деформаций. Он уменьшается с увеличением напряжения и времени действия нагрузки. Увеличение дисперсности и повышение температуры также приводит к снижению модуля общей деформации.

Модуль нормальной упругости (E_y) отражает зависимость между напряжением и деформацией в упругой области. Он увеличивается при уменьшении дисперсности пород и понижении температуры.

Коэффициент Пуассона (μ) характеризует поперечную деформацию пород и отражает зависимость между поперечными и продольными деформациями. Для мерзлых песчано-глинистых пород значительное влияние на коэффициент Пуассона оказывает температура грунтов. Так, при повышении температуры он стремится к максимальной величине (0,5), а при понижении — к величинам, характерным для твердых тел — 0,2–0,3.

К прочностным свойствам мерзлых грунтов принято относить временное сопротивление сжатию, длительное сопротивление сжатию, растяжению или разрыву, сдвигу и эквивалентное сцепление.

Сопротивление мерзлых грунтов сдвигу (C) обусловлено не только силами сцепления, но и внутренним трением. В большинстве случаев сопротивление мерзлых грунтов сдвигу возрастает с понижением температуры. Предельно длительное сопротивление в 2,5–6 раз меньше мгновенного. Доля сцепления в общем сопротивлении сдвигу мерзлых грунтов очень значительна. Для мерзлых глин она колеблется в пределах 60–94%.

При промерзании влажных дисперсных грунтов на контакте поверхности конструкции с мерзлыми грунтами возникает особого рода

сцепление, которое получило название прочности смерзания. Оно характеризуется расчетным сопротивлением мерзлого грунта сдвигу на поверхности смерзания (R_{af}). Установление этой величины связано с расчетами несущей способности фундаментов на мерзлых грунтах и устойчивости конструкций на действие сил морозного пучения [Пендин, 2008, с. 8–23].

8.6. Геофизический мониторинг криолитозоны

В данном разделе приводится обоснование применения геофизических методов и их возможности для решения инженерно-геокриологических задач в криолитозоне, оценки состояния мерзлых и талых пород, определения физических свойств в них. Приведены примеры использования геофизических методов для решения обозначенных задач и их применения с целью мониторинга состояния криолитозоны.

8.6.1. Обоснование применения геофизических исследований в криолитозоне

При переходе температуры горной породы в область отрицательных температур происходит не только фазовый переход воды в лед, но и практически скачкообразно происходит глубокое качественное преобразование породы, которое проявляется прежде всего в отличии состава, текстуры, структуры и большинства свойств мерзлых пород от немерзлых или талых [Ершов, 2002]. При этом резко меняются физические и, соответственно, геофизические свойства [подробнее — Зыков, 2007; Фролов, 1998].

Физические свойства многолетнемерзлых горных пород определяются прежде всего их температурой, а также другими природными факторами (литологией, структурой, текстурой, пористостью, водонасыщенностью, минерализацией подземных вод и др.), а у льдов зависят от температуры и состава включений [Геофизика, 2018]. Например, плотность горных пород с увеличением льдистости уменьшается, так как лед имеет меньшую плотность (0,9–0,95 г/см³), чем вода (1 г/см³).

Удельное электрическое сопротивление ($УЭС$) льдов из пресных вод очень высокое (105–108 Ом·м), а льдов из минерализованных вод — ниже (102–104 Ом·м) и зависит от содержания в них солей и их состава. Поэтому при промерзании горных пород их $УЭС$ резко возрастает: для скальных пород — не более чем в 10 раз, тонкодисперсных рыхлых пород (глины, суглинки) — в 10–100 раз, грубодисперсных пород (пески, гравийно-галечниковые отложения) — в 100–1000 раз. Электрохимическая активность мерзлых и талых пород может значительно различаться вследствие наличия и движения надмерзлотных и межмерзлотных вод.

Вызванная поляризация мерзлых пород выше, чем талых, и достигает 2–3% для мелкодисперсных пород, 10% — для льда и 15% — для грубодисперсных пород.

Относительная диэлектрическая проницаемость воды равна 80, т.е. на порядок выше, чем для большинства породообразующих минералов, а для льда ее значение равно 4. Таким образом, при замерзании пород значение относительной диэлектрической проницаемости убывает с уменьшением содержания незамерзшей воды.

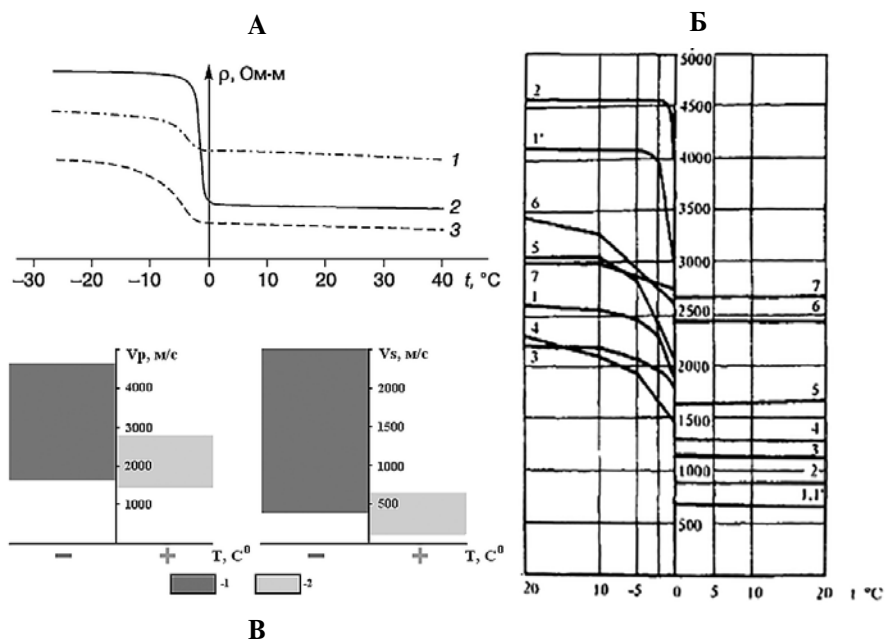


Рис. 8.61. Зависимости геофизических параметров водонасыщенных пород от температуры

А — удельного электрического сопротивления: 1 — скальные породы; 2 — пески; 3 — глины [Огильви, 1990]; Б — скорости продольных волн различных мерзлых пород (естественная влажность 10–15%): 1 — песок глинистый, 1' — кварцевый песок, 2 — галечник, 3 — переслаивание глины и песка, 4 — глина, 5 — песчаник, 6 — мергель, 7 — мел [Фролов, 1998]; В — диапазоны значений скоростей продольных и поперечных волн в мерзлых (1) и талых (2) водонасыщенных неконсолидированных песчано-глинистых породах [Садуртдинов, 2013]

Скорость распространения упругих волн при переходе пород в мерзлое состояние возрастает, потому что скорость продольных волн во льдах ($V_p \approx 3500\text{--}4000$ м/с, больше, чем в воде ($V_p \approx 1500$ м/с). При промерзании грубодисперсных пород значения V_p возрастают в 3–5 раз, тонкодисперсных — в 1,5–3 раза. При промерзании скальных пород зна-

чения V_p возрастают обычно не более чем в два раза, если они трещиноваты, а массивные талые и мерзлые породы по скорости практически не отличаются. Аналогичные закономерности отмечаются для скоростей поперечных волн (V_s). Характерно, что в любых мерзлых породах отношение V_s / V_p мало меняется (0,4–0,6).

Примеры температурных зависимостей удельного электрического сопротивления (УЭС) и скорости продольных волн представлены на рис. 8.61. Наиболее полно физические свойства мерзлых пород описаны в работе [Фролов, 1998].

К настоящему моменту накоплен большой опыт применения геофизических методов для решения геокриологических задач, как в России, так и за рубежом. Однако материалов именно геофизического мониторинга инженерно-геокриологических условий и состояния пород практически нет.

Российскими учеными, в том числе геофизиками, накоплен без преувеличения очень большой полевой и лабораторный опыт исследования мерзлых пород. К настоящему времени разработаны методики решения геокриологических задач геофизическими методами, эффективность которых доказана на практике. Наибольший вклад в разработку этих методик внесли сотрудники ИКЗ ТюмНЦ СО РАН, ИНГГ СО РАН, ИМЗ СО РАН, а также сотрудники отделения геофизики и кафедры геокриологии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова [Судакова и др., 2023].

Приведем примеры применения геофизических методов для решения геокриологических задач.

8.6.2. Определение положения кровли мерзлоты

Различия в электрических свойствах льда/воды/воздуха/грунта позволяют успешно применять геофизические методы, в частности георадар, при изучении первых 30 м разреза криолитозоны, а в ряде случаев и больше при понижении частоты. Граница фазового перехода воды будет очень контрастной для высокочастотных электромагнитных волн, изолирующие свойства льда обеспечивают малые потери, а следовательно, большую глубину проникновения электромагнитного сигнала. Например, в статье [Argson, 1998] приводятся данные, полученные с антенной 50 МГц, на которых присутствует ось синфазности, соответствующей глубине 80 м. Георадиолокационные исследования целесообразно комплексировать с сейсмическими и электроразведочными методами [Садуртдинов и др., 2016; De Pascale, et al., 2008; Fortier, et al., 2010].

При этом предпочтение следует отдавать комплексированию с сейсмическими методами. Эти методы позволяют наиболее уверенно иден-

тифицировать природу геокриологических границ и в условиях отсутствия данных бурения и могут рассматриваться в качестве опорных для уверенного определения мерзлого состояния пород.

Кроме задач картирования, георадиолокация может применяться для поиска локальных объектов, например, замерзших мамонтов [Makino, Miura, 2005].

На рис. 8.62 (см. с. XL цв. вклейки) приведен пример эффективно-го комплексирования георадиолокации и сейсморазведки МПВ для исследования разреза ММП в летний период в районе Кумжинского месторождения в дельте р. Печора [Садуртдинов и др., 2016]. Использовалась антенна 300 МГц, георадар «Зонд-12е». Радарограмма приведена после введения скоростного закона. На георадиолокационном разрезе хорошо прослеживаются ряд осей синфазности отраженных волн. Одна из них, на временах 100–250 нс, — наиболее контрастная, является отраженной от кровли ММП. Для получения опорных данных о глубине основных отражающих границ и для их геокриологической идентификации были выполнены сейсмические исследования с помощью преломленных волн на двух характерных участках профиля (пикеты 200 и 244 м). Полученные данные подтверждаются данными бурения в скважине в 10 м от пикета 250 м. Таким образом, с помощью данных сейсморазведки удалось идентифицировать опорные георадиолокационные границы. Комплекс георадиолокации и сейсморазведки показывает его высокую эффективность для изучения особенностей геокриологического разреза и определения природы исследуемых границ в условиях криолитозоны.

8.6.3. Мониторинг положения кровли мерзлоты и влажности в активном слое

На мониторинговых стационарах ИКЗ ТюмНЦ СО РАН проводятся ежегодные измерения положения кровли ММП и влажности в активном слое. В частности, на стационаре о. Кашин в устье р. Печора такие измерения проводились с помощью георадиолокации. В табл. 8.9 представлены обобщенные результаты измерений. Средняя температура на поверхности приведена по результатам измерений в непосредственной близости от площадки. На участке Кашин наблюдается корреляция между измерениями среднегодовой температуры и глубины протаивания и значениями влажности, полученными по результатам геофизических работ. Средняя мощность СТС в 2016 г. на площадке на 30% больше, чем в 2015 и в 2017 гг.; в 2017 г. средняя глубина протаивания практически «вернулась» к значению 2015 г. Средняя объемная влажность, напротив, на 30% меньше средних значений 2015 и 2017 гг.: аномально жаркий 2016 г. привел к «высыханию» активного слоя на площадке.

Обобщенные результаты мониторинга на площадке Кашин

Период	Средняя температура на поверхности, °С	Полевой сезон	Кашин (CALM R24A-1)	
			Мощность СТС, см	Объемная влажность активного слоя, %
14 августа 2014 г. – 13 августа 2015 г.	–1,6	Август 2015 г.	80	44
14 августа 2015 г. – 13 августа 2016 г.	–0,2	Август 2016 г.	109	32
14 августа 2016 г. – 13 августа 2017 г.	–1,6	Август 2017 г.	76	39

8.6.4. Поиск областей повышенной льдистости и ледяных жил

В работе [De Pascale, et al., 2008] приведен пример поиска областей повышенной льдистости в суглинках в зимнее время, когда весь исследуемый разрез находится в мерзлом состоянии. Авторы акцентируют внимание на преимуществах работы в сезон отрицательных температур, когда не только меньше потери энергии, но и тверже поверхность, по которой перемещаются исследователи и аппаратура. В работе приводится пример комплексирования георадиолокации и электроразведки.

Результаты интерпретации данных с выделением областей повышенной льдистости приведены на рис. 8.63 (см. с. XL цв. вклейки). Глубина исследования достигает 10 м. На радарограмме в левой и правой частях выделяются области повышенной амплитуды сигнала. Они соответствуют областям повышенного сопротивления и могут быть с уверенностью проинтерпретированы как массивный лед или области повышенной льдистости (слева) и линзы льда справа в разрезе. По центру разреза сопротивление много ниже, амплитудные аномалии отсутствуют. Здесь отмечается характерное понижение в рельефе, связанное с термокарстом. В некоторых случаях трехмерная визуализация георадиолокационных данных может значительно облегчить интерпретацию, анализ структурных и стратиграфических особенностей исследуемой среды. Ниже приведен пример применения псевдотрехмерной съемки для определения пространственно-глубинного расположения полигонально-жильных льдов в районе устья р. Печора (стационар о. Кашин) (рис. 8.64, см. с. XLI цв. вклейки) [Садуртдинов и др., 2018].

8.6.5. Поиск подошвы мерзлоты

Пример региональных изысканий с целью поиска и картирования подошвы многолетнемерзлых пород приведен в статье [Яковлев и др., 2018]. Здесь использовалась электроразведка методом МТЗ (магнито-теллурического зондирования). Пример одного из полученных разрезов приведен на рис. 8.65 (см. с. ХLI цв. вклейки). Региональные работы проводятся с большими расстояниями между точками физических наблюдений, здесь шаг по профилю составил 500 м. Слой мерзлых пород выделяется по относительно высоким значениям сопротивления (от 50 Ом·м и выше). Результаты исследований подтверждаются данными бурения и результатами электрокаротажа. Следует отметить, что региональные работы традиционным характеризуются большим уровнем сглаживания и укрупнения данных.

8.6.6. Выделение пластичномерзлых пород

Для выделения в разрезе пластичномерзлых песчано-глинистых пород («вялой» мерзлоты), когда даже данные бурения не позволяют однозначно определить физическое состояние пород, целесообразно применять сейсмические методы. В этом случае помимо значений скорости сейсмических волн для идентификации мерзлого/талого состояния грунтов необходимо использовать значение коэффициента Пуассона. Критической величиной коэффициента Пуассона между талым и мерзлым состоянием нелитифицированных водонасыщенных пород является интервал значений 0,45–0,46 [Садуртдинов, 2013; Скворцов и др., 2014].

Пример выделения криопэга по критическому значению $\mu = 0,46$ в песчаных отложениях на глубине более 90 м с использованием результатов сейсмического каротажа скважины № 1-95 на геокриологическом стационаре Марре-Сале (полуостров Ямал) приведен в [Melnikov, et al., 2010].

Данные бурения по скважине № 14-10 и результаты сейсмического каротажа в ней — еще одно подтверждение того, что диапазон значений $\mu = 0,45–0,46$ является граничным для пород, находящихся в мерзлом и талом состоянии (рис. 8.66). В интервале глубин 20–23 м значения коэффициента Пуассона достигают 0,46. На этой глубине по данным бурения вскрыт криопэг, где глинистые породы находятся в талом состоянии, хотя их температура равна $-4,5^{\circ}\text{C}$.

Интервал глубин 9–11 м, сложенный мерзлым маловлажным пылеватым песком. Малая влажность песка является причиной низких значений продольных волн. Используя только этот показатель, можно сделать ошибочный вывод о том, что породы в этом интервале являются талыми и водонасыщенными. Однако совместное рассмотрение значений скорости сейсмических волн и величины μ дает основание утверждать, что этот интервал разреза сложен мерзлыми породами.

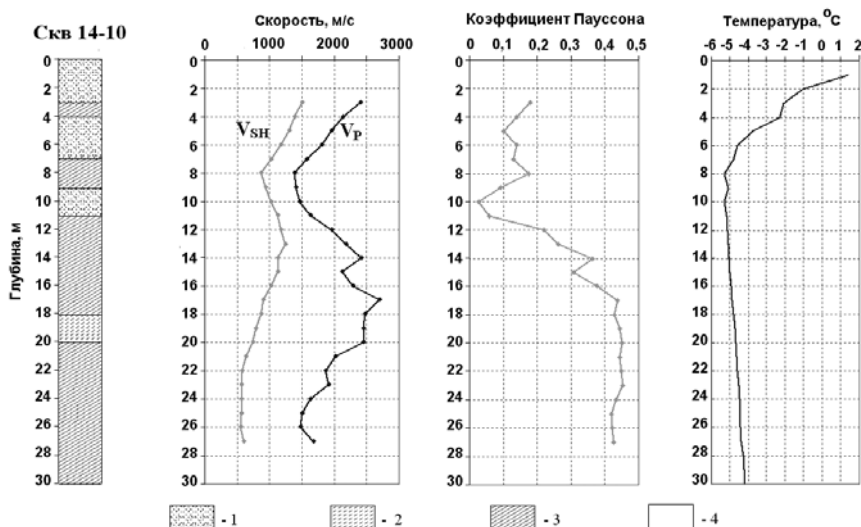


Рис. 8.66. Результаты сейсмического каротажа в скважине 14-10 на геокриологическом стационаре «Марре-Сале». V_P — график значений интервальных скоростей продольных волн; V_{SH} — график значений интервальных скоростей поперечных SH-волн. 1 — песок; 2 — суглинок; 3 — глина; 4 — область значений коэффициента Пуассона в талых водонасыщенных породах

Возможность использования коэффициента Пуассона для идентификации ММП подтверждена результатами наземных, скважинных и акваторных наблюдений.

8.6.7. Определение последствий техногенного влияния

Геофизические методы могут быть использованы для оценки влияния деятельности человека на температуру и состояние мерзлых пород. Так, в работе сотрудников ИНГГ СО РАН [Ельцов и др., 2017] приведен пример применения электротомографии для определения отепляющего эффекта газопровода (рис. 8.67, см. с. XLII цв. вклейки). Малым значениям УЭС (показаны синим) соответствуют грунты, находящиеся при положительной температуре на глубине 4 м. Растепление привело к «пучению» грунтов и деформации газопровода (образованию арки).

Накоплен положительный опыт использования сейсмических методов для определения конфигурации чаш протаивания под газопроводами в Западной Сибири и выделения техногенных таликов в городских условиях, в том числе непосредственно под домами и сооружениями на территории Норильска, Мирного, Якутска, Надыма и других городов.

8.6.8. Примеры геофизического мониторинга в криолитозоне

Выше рассмотрены возможности геофизических методов для решения инженерно-геокриологических задач. В настоящее время примеров геофизического мониторинга для их решения не так много в опубликованных источниках. Рассмотрим некоторые из результатов подобного мониторинга.

На рис. 8.68 (см. с. XLIII цв. вклейки) приведен пример использования сейсмических исследований методом преломленных волн (МПВ) для мониторинга кровли ММП. На стационаре в районе Уренгойского месторождения наземные наблюдения проводились вместе со скважинными сейсмическими исследованиями и термометрией. Достоверность определения положения кровли ММП в условиях этого высокотемпературного разреза по данным сейсмического каротажа выше, чем у термометрии. Наземные наблюдения дают более детальную информацию о динамике положения кровли ММП, чем скважинные. Наблюдается тенденция к опусканию кровли ММП, что подтверждено данными бурения. Глубина кровли ММП за 10 лет увеличилась на 1,8–3,8 м. На стационаре Кумжа на р. Печора в течение 4 лет также наблюдается тенденция к увеличению глубины кровли ММП в среднем на 30 см/год.

На рис. 8.69 приведены результаты георадиолокационного мониторинга по одному из профилей на геокриологическом стационаре Кашин

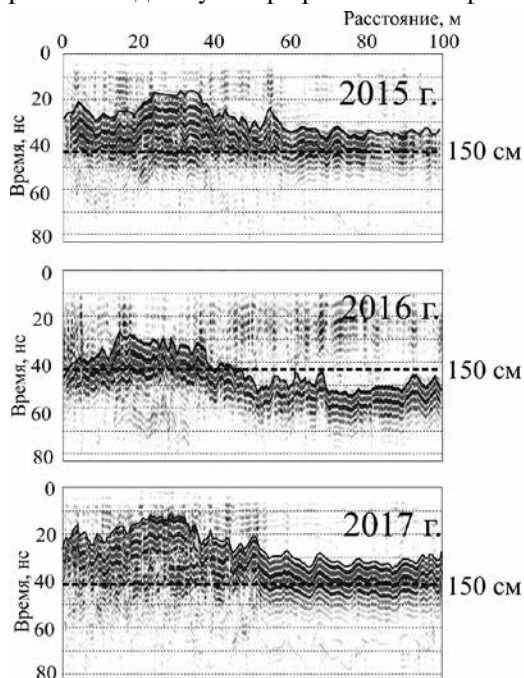


Рис. 8.69. Георадарограммы, полученные методом профилирования на геокриологическом стационаре Кашин в 2015–2017 гг. Черной линией показана ось симфазности, соответствующая подошве СТС. Пунктиром показана линия, соответствующая глубине 150 см с постоянной скоростью 7 см/нс

(Ненецкий автономный округ, устье р. Печора). Средняя мощность СТС в 2016 г. на площадке на 30% больше, чем в 2015 и в 2017 гг.; в 2017 г. средняя глубина протаивания практически вернулась к значению 2015 г. Рис. 8.70 (см. с. XLIV цв. вклейки) иллюстрирует изменение объемной влажности ($W_{об}$) на всей площадке. В 2016 г. он на 30% меньше средних значений 2015 и 2017 гг.: аномально жаркий 2016 г. привел к высыханию СТС [Sudakova et al., 2021].

Георадиолокационные исследования, очевидно, эффективно применять для мониторинга состояния вечной мерзлоты в основаниях автодорог и других линейных сооружений в составе геотехнического мониторинга (ГТМ). Иллюстрацией этому служит рис. 8.71 [Хомутов и др., 2019].

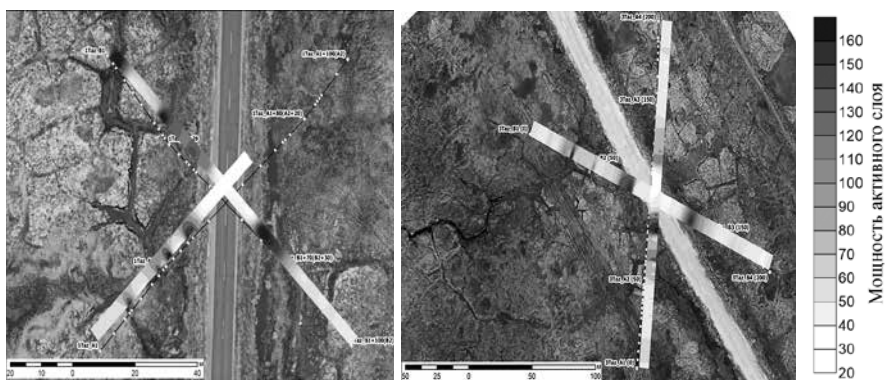


Рис. 8.71. Результаты георадиолокационного профилирования с целью определения мощности СТС. Пур-Тазовское междуречье

Электрометрический контроль состояния льдистых грунтов и пластовых льдов. В качестве примера применения ЭТ для мониторинга состояния мерзлых пород на рис. 8.72 приведены результаты наблюдений за изменением УЭС разреза в пределах рекультивированного участка развития термоэрозии. Исследуемый участок расположен на территории Бованенковского газоконденсатного месторождения (ГКМ) (полуостров Ямал). Развивающаяся по пластовым льдам термоэрозия угрожала опоре высоковольтной ЛЭП. На момент геофизических исследований там были закончены мероприятия по инженерной защите: образовавшийся овраг, подходящий вершиной к опоре ЛЭП, был засыпан песком, а поверхность покрыта слоем гидро- и теплоизоляции (полиэтиленовая пленка и пеноплэкс). В пределах участка по сети профилей выполнены исследования методом ЭТ. На геоэлектрическом разрезе по одному из профилей, полученному после рекультивации в 2014 г., выделяются локальные аномалии высокого УЭС, вызванные пластовыми льдами, по которым развивался овраг.

Вмещающие породы представлены мерзлыми супесями и глинами, имеющими низкое УЭС.

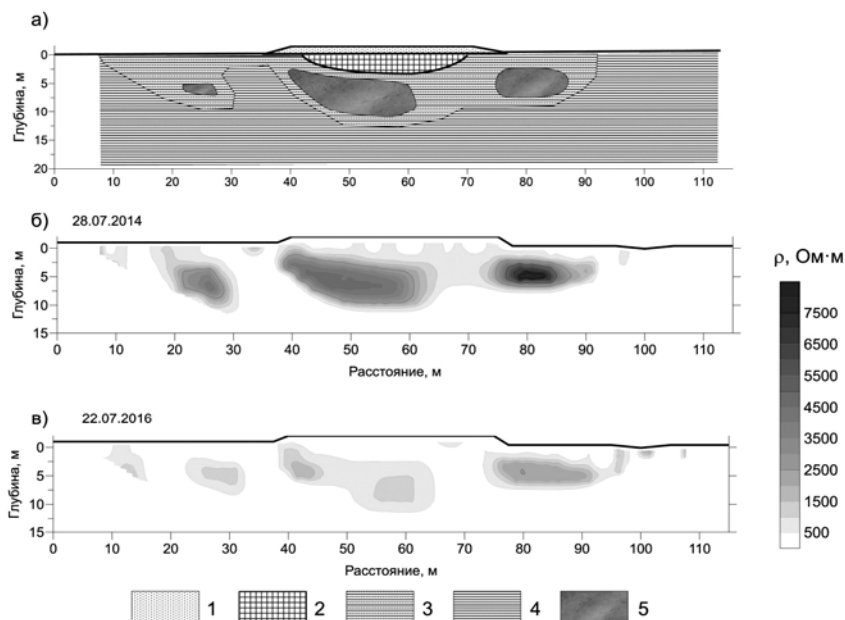


Рис. 8.72. Геокриологический разрез (а) и геоэлектрические разрезы по данным ЭТ через рекультивированный участок овражной эрозии на Бованенковском ГКМ в 2014 (б) и 2016 (в) гг.: 1 — теплоизоляция; 2 — песок; 3 — супесь; 4 — глина; 5 — лед

Сравнение геоэлектрических разрезов, полученных в 2014 и 2016 гг., показало, что за два года интенсивность аномалий от пластовых льдов уменьшилась с 5000–10000 Ом·м до 1000–3000 Ом·м, что связано с повышением их температуры. Электрометрический мониторинг показал, что, несмотря на инженерные мероприятия, деградация мерзлой толщи продолжается.

Результаты мониторинга состояния мерзлых грунтов в основании крупного инженерного сооружения (на примере Вилюйской ГЭС) с использованием метода электротомографии приведен на рис. 8.73 (см. с. XLV цв. вклейки). На этом участке начиная с 1996 г. развивается техногенный водонасыщенный талик, коллектором которого служат растепленные карбонатные ксенолиты. Тепловое состояние пород примыкания плотины непрерывно отслеживается на скважинном термометрическом полигоне, включая пробуренные в 2000-х гг. вдоль правобережного примыкания дополнительные геофизические скважины. На рисунке слева видна «геоэлектрическая» деградация высокоомной (мерзлой) приповерхностной линзы (красное) в районе скв. ГФС-1 и, аналогично, видно развитие низкоомной линзы (русло обходной фильтрации подземных вод) в районе скв. 78.

Температурный разрез скв. 78 (рис. 8.73, справа, см. с. XLV цв. вклейки) показывает развитие талика с 2010 по 2015 г. в диапазоне глубин 230–250 м. Мощности талика и низкоомной линзы совпадают, т.е. данные геоэлектрического мониторинга подтверждаются результатами температурных наблюдений. Результаты мониторинга склоновых процессов в криолитозоне приведен на рис. 8.74 (см. с. XLVI цв. вклейки). Приведен пример использования сейсмических методов для мониторинга склоновых процессов на морском берегу в устье р. Печора на геокриологическом стационаре Болванский. Кровля ММП залегает на глубине 1–1,5 м.

По характеру распределения значений коэффициента анизотропии продольных волн и коэффициента Пуассона в 2002 г. установлено пространственное положение ослабленной зоны, характеризующейся аномально низкими значениями этих характеристик, и выполнен прогноз области возможного нарушения сплошности грунтового массива в 5–7 м от кромки берегового уступа. В 2003 г. на этом месте действительно образовалась крупная трещина отседания. Анализ распределения сейсмических характеристик по площади, полученного в 2003 г., показал, что в течение года на исследуемой площадке произошло изменение напряженно-деформированного состояния. Сформировалась новая ослабленная зона на удалении 20–30 м от кромки берегового уступа. Появление трещин в этой зоне было зарегистрировано 2 года спустя.

8.6.9. Методы проведения наблюдений и техническое обеспечение геофизических исследований

Ведущими геофизическими методами для изучения криолитозоны являются сейсморазведочные и электроразведочные, в том числе георадиолокация. У каждой из этих групп методов есть свои плюсы и минусы.

Георадиолокация — наименее трудоемкий из перечисленных геофизических методов. Он наиболее точный и самый высокоинформативный с точки зрения получения единиц информации на точке измерения, но самый малоглубинный (в среднем его глубинность ограничена 10–15 м). К тому же в силу физики электромагнитного поля георадиолокация «не работает» на проводящих разрезах: засоленных и глинистых. Среди электроразведочных методов для решения геокриологических задач наиболее часто применяется группа методов сопротивления. Глубинность этих методов до 100 м и выше. Они также достаточно мобильные и недорогие. Однако в силу принципа эквивалентности электроразведка зачастую дает неоднозначные результаты, сложные для интерпретации и требующие дополнительной информации. Нередко на электроразведочных разрезах появляются «артефакты», связанные с геометрией расстановки.

Сейсморазведка практически не имеет ограничений по глубинности исследований. А по точности и детальности исследований она сравнима с георадиолокацией. Еще одним достоинством сейсморазведки является большая однозначность интерпретации, по сравнению с электроразведочными методами. С помощью сейсморазведки возможно практически однозначное определение мерзлого состояния пород, в том числе пластичномерзлых. Недостатком сейсмических методов является относительно высокая их стоимость и трудоемкость проведения работ.

Для корректных геофизических результатов необходима высокоточная геодезическая привязка точек физических наблюдений, поэтому почти всегда геофизические исследования производятся по прямым профилям, линейно или в виде прямоугольной сетки располагающимся на участках исследования. Для точной интерпретации и заверки результатов геофизики профили необходимо располагать в непосредственной близости от точек прямых наблюдений (шурфов, скважин) или даже от скважины к скважине.

В малоглубинных сейсморазведке и электроразведке методом сопротивлений расстояние между точками физических наблюдений обычно составляет первые метры — от 1 до 5 м, в георадиолокации — первые сантиметры.

Техническое обеспечение геофизических исследований

Геофизическое оборудование делится на основное (непосредственно геофизическая аппаратура) и вспомогательное. Вспомогательным оборудованием являются катушки, кувалды, дальномеры, рулетки и прочий инструмент. В нашей стране и за рубежом богатый выбор геофизического оборудования, которое применяется для решения инженерно-геологических (в частности, геокриологических) задач. Здесь мы рассмотрим только некоторые из них, подчеркнув, что есть и аналоги, не уступающие в качестве.

Электроразведочное оборудование

Это источники поля: генератор тока, батареи, аккумуляторы, приемные электроды и регистрирующие приборы (подсоединенные к коммутационному кабелю или «косо») и электроразведочная станция для управления источниками и приемниками. Самым распространенным методом электроразведки в криолитозоне является электротомография. При работе методом электротомографии в качестве питающих и измерительных электродов используются одни и те же фиксированные на профиле заземления (рис. 8.75). Количество их может достигать нескольких десятков и сотен штук.

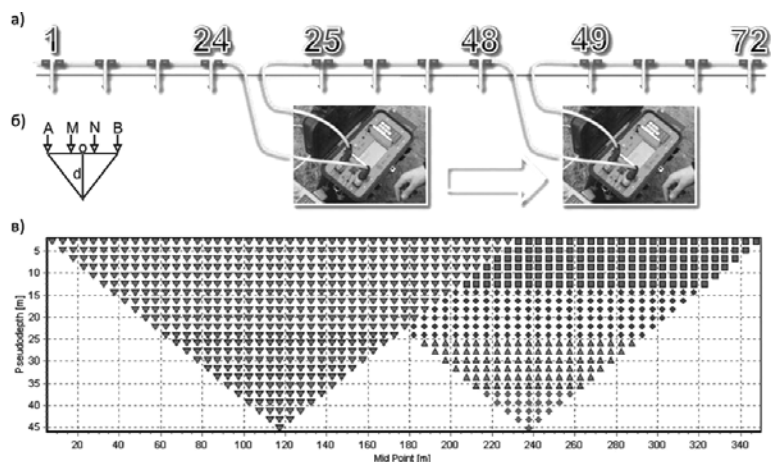


Рис. 8.75. Схема измерений при электротомографии: а — подключение электродов и кабелей к прибору; б — положение точки записи в симметричной установке; в — положение точки записи на псевдоразрезе [Балков и др., 2012]

Аппаратура метода ЭТ подразделяется на одноканальную и многоканальную. В многоканальном варианте при одном положении пары токовых электродов одновременно измеряется разность потенциалов на нескольких парах приемных электродов, что существенно повышает производительность.

На рис. 8.76 представлены фото электроразведочных станций отечественных производителей: «Скала-48», разработанная в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, и «Омега-48», созданная в НПЦ «Геотех». Число 48 в названии указывает на максимально возможное число электродов, которые можно подключить к станции.



Рис. 8.76. Электроразведочные станции отечественных производителей: А — «Скала-48», Б — «Омега-48»

Сейсморазведочное оборудование

В состав сейсморазведочной аппаратуры входят: сейсморазведочные станции, сейсмоприемники и источники упругих колебаний. Наиболее распространенный способ возбуждения упругих волн — ударный. Как правило, при производстве работ используется обыкновенная строительная кувалда, являющаяся самым портативным, дешевым и простым в применении источником. Он позволяет получать данные высокого качества в сложных условиях, в том числе при донных наблюдениях на мелководных акваториях в летний и зимний период. Один из таких источников представлен на рис. 8.77.



Рис. 8.77. Источник сейсмических колебаний. А — источник сейсмических колебаний, Б — процесс возбуждения колебаний

Для приема упругих колебаний при сейсморазведочных работах используются сейсмоприемники GS-20DX (производство «OYO-GEO Impulse International», Уфа) с горизонтальными (Y-компонента) и вертикальными (Z-компонента) осями максимальной чувствительности. Приемники соединяются с сейсмостанцией сейсмической косой, которая подключена к регистратору. Регистрирующая аппаратура — сейсмические станции («Телсс», «Эллис», «Лакколит», «Диоген» и др.) — позволяют одновременно вести запись сигнала 24 и более сейсмоприемниками. Общий вид станций «Тэлсс» и «Лакколит» изображен на рис. 8.78 и 8.79.

Для выполнения скважинных сейсмических наблюдений применяют, как правило, трехкомпонентные одноточечные сейсмические зонды прижимного типа с ортогональным расположением сейсмоприемников. Они обеспечивают регистрацию сейсмических колебаний различной поляризации в скважинах различного диаметра. Скважинный снаряд оборудован прижимным устройством. Общий вид одного из используемых зондов изображен на рис. 8.80.



А



Б

Рис. 8.78. Горизонтальный сейсмоприемник GS-20DX. Производство ООО «OYO-GEO Impulse International», г. Уфа (А) и способ их установки на профиле (Б)



А



Б

Рис. 8.79. Телеметрическая сейсмическая станция «ТЕЛЛС-3» (ООО «Геосигнал», Россия) (А) и регистратор сейсмостанции «Лакколит 24-М3» (ООО «ЛогиС», Россия) (Б)



А



Б

Рис. 8.80. Скважинный трехкомпонентный сейсмический зонд. А — зонд в открытом состоянии, Б — зонд в устье скважины

Георадарное оборудование

Георадар состоит из: устройства синхронизации, блока питания, генератора сигналов, антенны (одной или нескольких), аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и устройства записи, регистрации и визуализации принятых сигналов. Обычно к одному устройству регистрации могут быть присоединены разные антенны, одна или несколько.

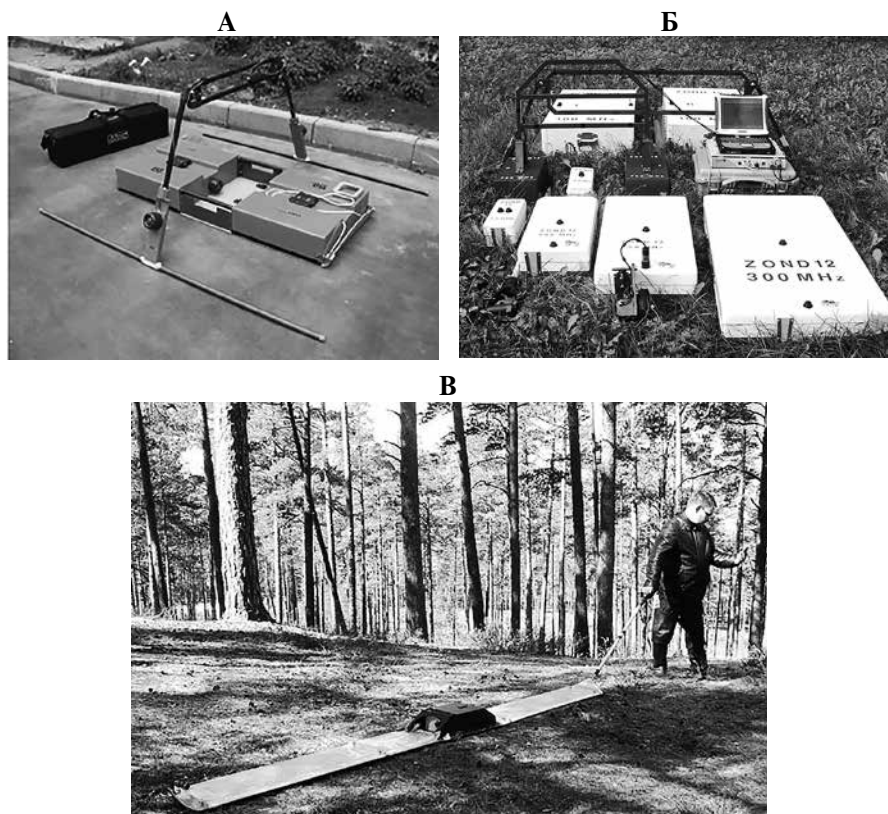


Рис. 8.81. Наборы антенн различных производителей. Антенны для георадаров. А — «ОКО» (geotech.ru); Б — «Zond-12»; В — сборная антенна георадара «Питон» и работа с ней

Для излучения и приема могут использоваться две одинаковые антенны (бистатическая антенна) либо одна и та же антенна работает сначала в качестве излучающей, а потом в качестве приемной (моностатическая антенна). В большинстве случаев используются бистатические антенны, так как управление моностатической антенной требует ультрабыстрого переключения из режима излучения в режим приема и чрезвычайно сложно технологически.

Применяемые в георадиолокации антенны излучают и принимают сигнал в диапазоне частот от 10 МГц до 5 ГГц. В зависимости от центральной частоты антенны глубинность георадиолокации меняется от нескольких десятков сантиметров (самые высокочастотные антенны) до нескольких десятков метров — самые низкочастотные антенны. Обратным образом меняется разрешающая способность.

Самые распространенные — это дипольные антенны. Такие типы антенн присутствуют во всех линейках антенн разных производителей — отечественных и зарубежных. На рис. 8.81 представлены фото наборов антенн для радаров разных производителей.

Самыми глубинными антеннами являются моностатические дипольные антенны, например антенна «Питон». Антенна сборная: присоединяя дополнительные секции можно увеличить ее длину и уменьшить центральную частоту зондирования.

9. Управление государственной системой мониторинга вечной мерзлоты

9.1. Федеральное агентство по вечной мерзлоте при Правительстве РФ

Состояние криолитозоны страны претерпевает в условиях меняющегося климата значительные изменения, грозящие значительными убытками при сохранении существующих подходов к освоению труднодоступных и недостаточно изученных районов опережающего экономического развития АЗРФ.

Существующая система геокриологического изучения, картирования, фонового и геотехнического мониторинга вечной мерзлоты на территории Арктики в системе Минприроды РФ, Минвуза и РАН отстает от темпов ее освоения. Минстрой и ЖКХ вообще не ведут мониторинговых наблюдений в арктической криолитозоне. Это формирует условия для развития опасных процессов и экологических катастроф.

Создаваемая в настоящее время «система фонового мониторинга многолетней мерзлоты» в структуре ФА Росгидромет, разобщенная с ведомственными геотехническими мониторингами, не в состоянии изменить общую неблагоприятную обстановку в Арктической зоне и на территории криолитозоны в целом. Прогнозируемые деформации оснований объектов промышленной и гражданской инфраструктуры в Арктике к середине века могут достичь 70% ранее построенных зданий и сооружений.

Наблюдения ведутся в десятках скважин в Канаде, на Аляске, в Норвегии, Швейцарии и других странах геологическими службами (США, Канада) или государственными университетами. Разветвленная сеть в сотни скважин с единым аналитическим центром создана КНР в Тибете. При этом проводится как фоновый мониторинг, так и геотехнический мониторинг (ГТМ) инженерных объектов.

Актуальность создания обновленной системы мониторинга определяется тем, что наряду с недостаточной изученностью новых регионов криолитозоны, вовлекаемых в промышленное освоение, существуют биолого-эпидемиологические угрозы и микробиологические перспективы — оттаивание вечной мерзлоты и попадание в окружающую среду биологических и микробиологических объектов (в том числе могильников), представляющих опасность для здоровья людей. Большинство данных о состоянии криолитозоны устарело и нуждается в обновлении и актуализации. Средний расчетный срок службы многих городских, муниципаль-

ных зданий и промышленных сооружений в Арктике без реконструкции и капитального ремонта значительно превышен. Еще более слабой является изученность криолитозоны шельфа. В силу сложившихся в стране новых экономических отношений отсутствует межведомственный обмен информацией под прикрытием коммерческих интересов.

Представляется, что настало время коренным образом пересмотреть государственную политику в отношении сложившихся методов освоения новых регионов и интенсификации промышленного развития существующих экономических центров без надлежащего опережающего изучения и межведомственной системы мониторинга вечной мерзлоты, являющейся главной основой экологически безопасного развития Арктической зоны.

Важно подчеркнуть, что в настоящее время в стране не существует ведомства, способного в рамках своих компетенций разрешить сложный комплекс научно-производственных проблем создания системы мониторинга вечной мерзлоты, отвечающей современным рискам.

На наш взгляд, необходимым условием успешного решения упомянутых проблем является безотлагательное создание государственной структуры (федерального агентства) изучения и прогнозирования состояния вечной мерзлоты на основе системы государственного мониторинга вечной мерзлоты в качестве пионерного проекта для территории АЗРФ, а в дальнейшем для всей криолитозоны страны.

Федеральное агентство по вечной мерзлоте (ФАМ) создается в качестве нового структурного подразделения при Правительстве Российской Федерации. ФАМ осуществляет свою деятельность в строгом соответствии с уставными документами, определяющими компетенции нового государственного органа как внутри страны, так и на международном уровне. ФАМ регулирует:

- отношения, возникающие в связи с хозяйственной и природоохранной деятельностью на территории Российской Федерации, ее континентального шельфа, связанных с природным или техногенным изменением состояния вечной мерзлоты и развитием мерзлотных процессов.
- правовые и экономические основы комплексного рационального развития в зоне вечной мерзлоты, обеспечивает защиту интересов государства и граждан Российской Федерации и охрану окружающей среды в АЗРФ в зоне вечной мерзлоты;
- разработку нормативно-правовых актов, подзаконных актов, рекомендаций и иных документов, предусматривающих передачу данных о состоянии вечной мерзлоты для реализации правовых норм (ФЗ) в региональный и федеральный центры ФАМ, полученных хозяйствующими субъектами, ведущими свою деятель-

ность на территории криолитозоны (АЗРФ), а в дальнейшем на всей территории криолитозоны страны.

В структуре и непосредственном подчинении Федерального агентства находятся федеральный и шесть региональных аналитических центров, осуществляющих ведение мониторинга в Арктической зоне.

Целевое назначение Федерального агентства

Федеральное агентство по вечной мерзлоте (ФАМ) обеспечивает координацию, проведение и финансирование работ по изучению состояния арктической криолитозоны и функционированию сети геокриологического мониторинга, оценке влияния вечной мерзлоты на социально-экономическое развитие регионов. ФАМ организует научное сопровождение проектов развития арктических регионов, обеспечивает сбалансированное использование криогенного, технологического и микробиологического потенциала вечной мерзлоты в целях наукоемких технологий и предотвращения и ликвидации техногенных и медико-биологических угроз в АЗРФ.

Основные задачи

- Координация и проведение мониторинга вечной мерзлоты на основе научно обоснованного размещения в Арктической зоне Российской Федерации специализированных наблюдательных сетей, объединяющих государственные фоновые полигоны, стационары и площадки, а также геотехнические системы наблюдения за состоянием многолетнемерзлых пород местных администраций и хозяйствующих субъектов всех форм собственности и подчиненности. Наблюдения ведутся на основе современных автоматизированных средств регистрации, накопления и передачи мониторинговой информации в центры обработки соответствующих данных; обмен данными между министерствами, ведомствами, местными администрациями и предприятиями РФ, ведущими хозяйственную деятельность в АЗРФ. Мониторинг состояния и природных изменений вечной мерзлоты (температуры, свойств, состояния, мерзлотных процессов) в АЗРФ и криолитозоне в целом. Ежегодно ФАМ готовит доклад для государственных органов и общественности о состоянии вечной мерзлоты, прогнозе ее развития, устойчивости зданий и инженерных сооружений в АЗРФ и рисках для хозяйственной деятельности и окружающей среды.
- Создание, обеспечение и координация деятельности региональных и федерального аналитических центров обработки и анализа мониторинговой информации. Последующая разработка прогнозов состояния вечной мерзлоты для устойчивой экономической деятель-

ности и экологически безопасной жизнедеятельности на объектах промышленного, гражданского и иного назначения. Обеспечение государственного геокриологического (мерзлотного) прогноза для субъектов федерации, городских и муниципальных образований АЗРФ и криолитозоны в целом на периоды краткосрочной (5–7 лет), среднесрочной (15–25 лет) и долгосрочной перспективы (40–100 лет).

- Информационно-техническое обеспечение ведения федерально-го каталога пунктов наблюдения всех собственников за состоянием вечной мерзлоты; за состоянием зданий и сооружений и защитных мероприятий в криолитозоне. Сбор, хранение и анализ данных разовых наблюдений и мониторинга состояния вечной мерзлоты, зданий и инженерных сооружений в криолитозоне. Систематизация и анализ данных мониторинга мерзлоты и инженерных объектов, подготовка решений и организация мероприятий по управлению состоянием вечной мерзлоты. Разработка современных технологий анализа, включая искусственный интеллект, для оценки и прогноза состояния вечной мерзлоты и устойчивости зданий и инженерных сооружений. Разработка, поддержание и обеспечение доступа государственным органам и заинтересованным предприятиям и организациям к геоинформационной системе (ГИС) «Вечная мерзлота».
- Разработка и организация производства приборного и программно-аппаратного обеспечения научных, прикладных и мониторинговых исследований на основе применения цифровых технологий сбора и обработки информации. Разработка и организация производства средств инженерной защиты зданий и сооружений от опасных мерзлотных процессов.
- Обоснование актуальных направлений и проведение НИР и НИОКР для изучения и использования вечной мерзлоты в рамках субподрядных работ с организациями РАН, Минобрнауки и инновационных центров.
- Разработка предложений по формированию и реализации ведомственных федеральных и межгосударственных целевых программ по деятельности в зоне вечной мерзлоты, а также программ, в которых участвует Российская Федерация.
- Организация и обеспечение кооперации с организациями Минобрнауки и РАН по использованию научного потенциала профильных предприятий и подготовке молодых специалистов в области геокриологии.
- Обоснование и разработка новых и актуализации действующих законодательных и нормативно-правовых актов, обеспечивающих

правовое регулирование взаимоотношений министерств и ведомств РФ при реализации задач государственного мониторинга вечной мерзлоты. Обоснование и разработка законодательных актов, технических и административных регламентов по экономической деятельности в зоне вечной мерзлоты (по проектированию, строительству, эксплуатации зданий и сооружений и экологической безопасности).

- Обеспечение проектных, технологических и эксплуатационных нужд Севморпути.
- Проведение экспертизы научных и научно-технологических программ; проектов инженерно-геологических (геокриологических), экологических, природоохранных, гидрогеологических исследований и изысканий; проектов строительства зданий и инженерных сооружений в АЗРФ; условий эксплуатации зданий, сооружений, объектов линейной инфраструктуры, проводимых на территории криолитозоны АЗРФ. Принципиальная схема структуры ФАМ приведена на рис. 9.1.

9.2. Федеральный и региональные аналитические центры мониторинга вечной мерзлоты

В структуре Федерального аналитического центра применительно к территории АЗРФ находится шесть региональных центров, расположенных в основных экономических районах, обладающих научно-производственным потенциалом для реализации задач мониторинга вечной мерзлоты. Принципиальная схема структуры Федерального и региональных аналитических центров приведена на рис. 9.2.

Федеральный и региональные аналитические центры по изучению, мониторингу и прогнозу состояния вечной мерзлоты осуществляют:

- сбор, накопление, хранение, обработку, анализ данных о природных и техногенных характеристиках вечной мерзлоты и объектах хозяйствования в криолитозоне;
- ведение базы данных и ГИС по вечной мерзлоте и смежным средам с агрегацией и верификацией данных и карт моделей ландшафтов и геокриологических условий;
- государственный геокриологический прогноз кратко-, средне- и долгосрочный для криолитозоны РФ;
- периодический геокриологический прогноз для субъектов РФ;
- геокриологический прогноз для населенных пунктов, земельных отводов, предприятий — по специальному заданию или на договорной основе;
- публикацию ежегодного доклада — Отчета по результатам мониторинга.

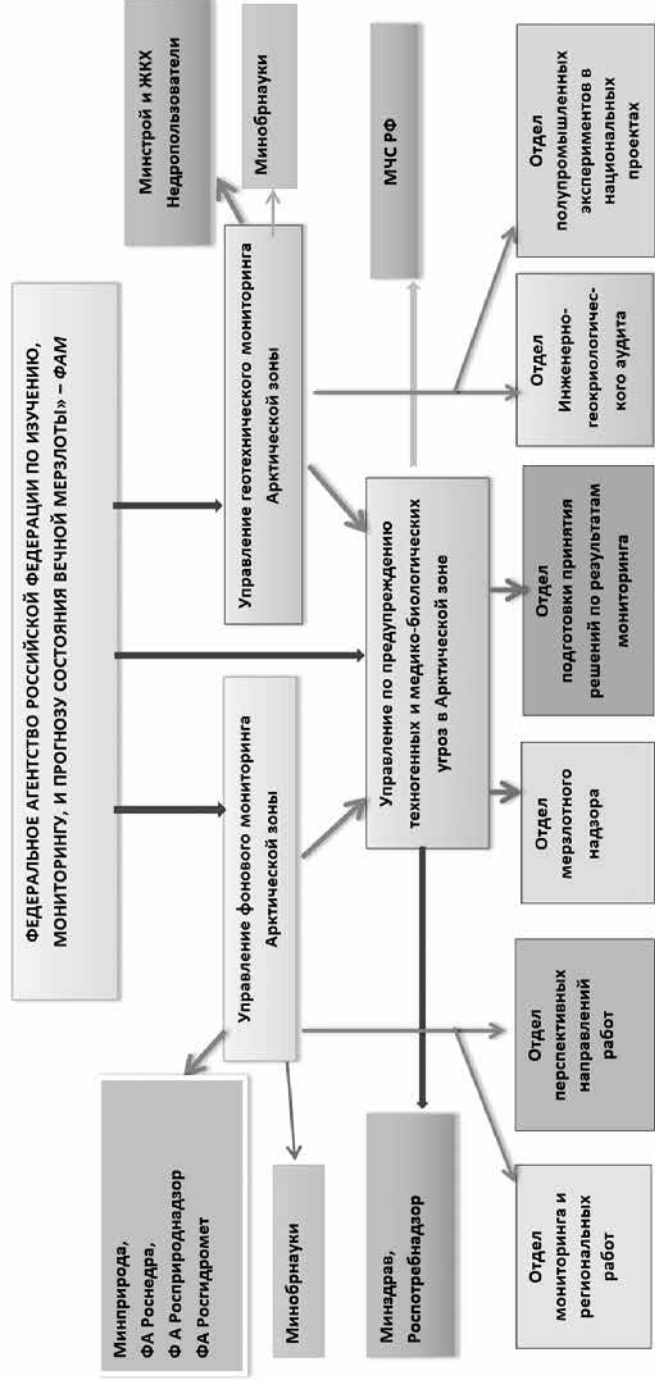


Рис. 9.1. Принципиальная схема структуры ФАМ

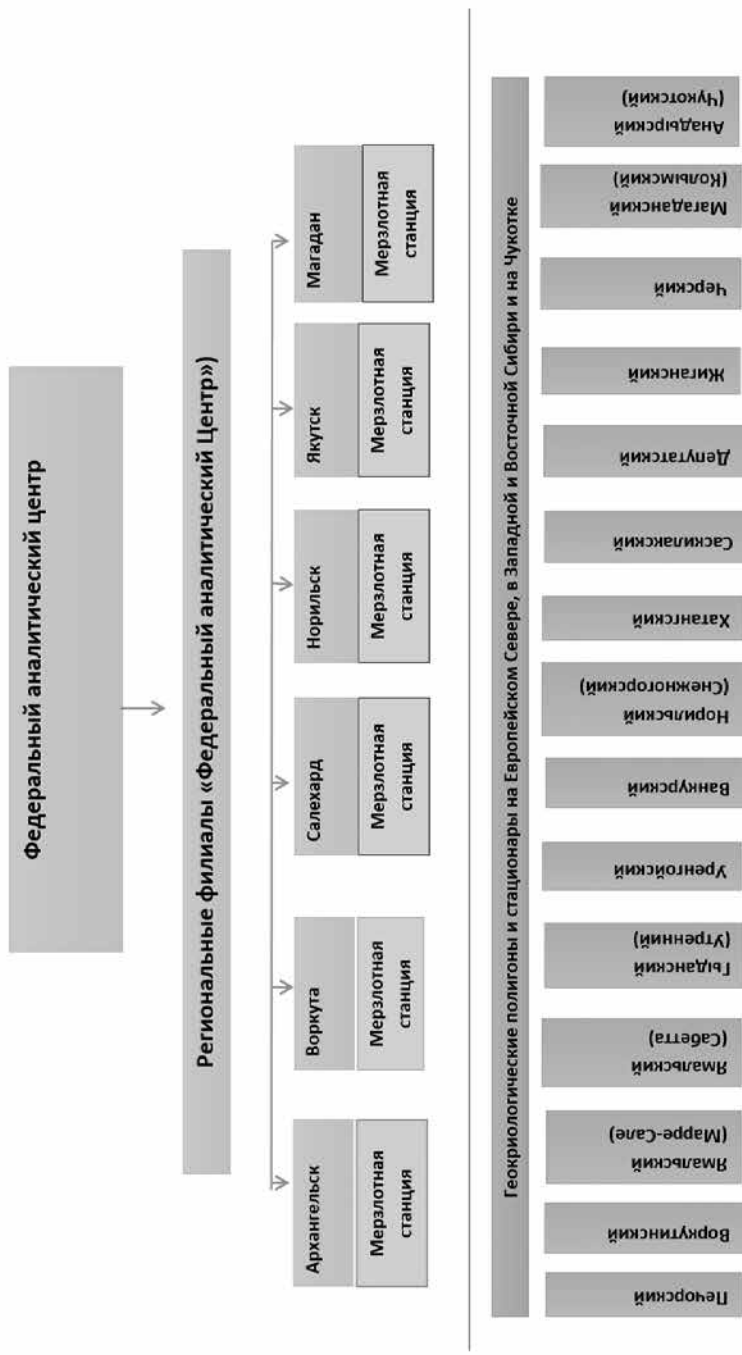


Рис. 9.2. Принципиальная схема структуры Федерального аналитического центра

Научный совет Федерального аналитического центра формируется из числа ведущих ученых и специалистов из организаций Министерства науки и высшего образования, РАН и других организаций и предприятий. Функциями Научного совета являются:

- определение научно-технической политики в сфере деятельности ФАМ, взаимодействие с иными субъектами исследований и мониторинга на территории РФ;
- формирование научных программ и тематики научных исследований, проводимых ФАМ»;
- экспертиза научных программ и тематики научных исследований учреждений РФ, крупных промышленных и гражданских проектов, относящихся к сфере деятельности ФАМ.

Кроме того, в структуре Федерального аналитического центра формируется Экспертный совет с привлечением иных научных обществ России, ведущих ученых РФ в области геокриологии и смежных дисциплин; специалистов и представителей Минприроды, Минвостокразвития, Минстроя, Минобрнауки, Минздрава, производственных организаций для проведения экспертизы крупных государственных научных и научно-технологических программ, реализуемых в АЗРФ. Экспертиза проводится в соответствии с Положением об Экспертном совете.

Региональные центры по изучению, мониторингу и прогнозу состояния вечной мерзлоты осуществляют:

- взаимодействие с объектами хозяйствования для организации мерзлотных и сопутствующих наблюдений на их объектах;
- сбор, накопление, хранение, обработку, анализ данных о природных и техногенных характеристиках вечной мерзлоты и объектах хозяйствования в криолитозоне;
- геокриологический прогноз (совместно с Федеральным центром) для населенных пунктов, земельных отводов, предприятий.

10. Геокриологический прогноз в системе мониторинга вечной мерзлоты

10.1. Основные положения геокриологического прогноза

При освоении территорий с вечной мерзлотой возникают различные воздействия на окружающую среду, здания и инженерные сооружения. Во-первых, обычно происходит масштабное воздействие на природные условия в целом, изменяющие микроклимат, растительный покров, режим поверхностных и подземных вод, влажность и состав слоя сезонного протаивания и др. Это приводит к изменению температур горных пород, глубины оттаивающего летом слоя, положения кровли и подошвы мерзлоты. Изменяются гидрологические и гидрогеологические условия, свойства горных пород, биосфера региона. Таким образом, возводить здания и инженерные сооружения приходится в иной обстановке, чем та, что была до возникновения нарушений, при проведении инженерных изысканий для строительства. Это необходимо учитывать, выполняя прогноз мерзлотных условий района освоения. Во-вторых, различные виды хозяйственного освоения территорий криолитозоны при различных видах строительства (гражданского, промышленного, линейного, гидротехнического) — для целей горнодобывающей промышленности и подземного строительства, развития сельского хозяйства — подразумевают различные виды воздействия на мерзлые породы и, соответственно, различную их реакцию, что также необходимо учитывать при прогнозе мерзлотных условий. Такой мерзлотный прогноз выполняется на основе инженерных изысканий и научно-исследовательских работ, включающих оценку существующих условий на территории, возможных техногенных воздействий, тепловые расчеты и моделирование температурного режима горных пород, разработку защитных и природоохранных мероприятий. Это нужно выполнять еще до начала капитального строительства.

По мнению выдающегося геокриолога В. А. Кудрявцева, при этом недостаточно описать существующие мерзлотные условия, «фотографию», по его выражению. Мало лишь измерить температуру в скважинах, которая регистрируется там сегодня, потому что она изменяется. Необходимо выявить закономерности формирования и развития вечной мерзлоты и сезонного оттаивания, оценить роль различных природных факторов, влияющих на температурный режим горных пород. Напри-

мер, снег имеет выраженное отепляющее влияние, и при сокращении мощности снежного покрова будет наблюдаться понижение температур грунтов, и наоборот. Растительные напочвенные покровы, наоборот, как правило, охлаждают грунты, и при их нарушении, скажем, гусеничной техникой, происходит повышение температур грунтов, оттаивание мерзлоты, термокарст и другие неблагоприятные процессы. Затем следует использовать эти закономерности при составлении мерзлотного прогноза.

Если бы не происходило нарушения температурного режима горных пород при строительстве, протаивания (или наоборот, образования) вечной мерзлоты, можно было бы использовать методы, с помощью которых возводят здания и инженерные сооружения в областях, где криолитозона отсутствует. Практика такого строительства существует со времен первых цивилизаций, а затем Европы, и приемы хорошо известны за столетия освоения этих территорий. К сожалению, приход человека на Север сопровождался явлениями, неизвестными до недавнего времени. К ним относятся, например, оттаивание мерзлоты в основаниях зданий и сооружений, образование «чаш оттаивания» с осадкой грунтов и разрушением инженерных объектов. Таким образом, чтобы сохранить мерзлоту и предотвратить разрушения, необходимо разделить тепловыделяющее сооружение и мерзлые породы. Часто, в частности, требуется создание подполья — свободно проветриваемого пространства между поверхностью земли и сооружением, а само здание или сооружение установить на сваи.

Без определения и учета изменений мерзлотных инженерно-геологических условий (т.е. без прогноза их изменений) под влиянием как естественных изменений, так и в результате техногенного воздействия надежное и экономичное строительство и эксплуатация проектируемых объектов практически невозможны, что подтверждается значительной долей деформируемых зданий и сооружений от общего их числа, сооружаемого в районах распространения вечномерзлых грунтов. Причем первоочередной задачей инженерно-геологических изысканий является получение таких материалов прогноза, которые обеспечили бы сохранность проектируемых объектов в связи с непосредственным влиянием строительства на природную обстановку при возможном учете и прочих изменений.

Мерзлотные (геокриологические) условия (или мерзлотные инженерно-геологические условия территории, площадки и т.п.):

- геоморфология и рельеф;
- растительный покров (геоботаническая характеристика);
- почвы;
- гидрологические условия;

- температурный режим воздуха, осадки;
- геологическое строение;
- тектоника;
- литологический состав грунтов, их возраст и генетическая характеристика;
- гидрогеологические условия;
- распространение вечномерзлых и талых грунтов;
- мощность и вертикальное строение вечномерзлой толщи;
- температурный режим грунтов;
- сезонное и многолетнее оттаивание и промерзание грунтов;
- криогенное строение грунтов;
- физические, теплофизические и механические характеристики грунтов;
- мерзлотные (геокриологические) процессы и явления;
- радиационно-тепловой баланс поверхности грунтов.

Мерзлотные условия определяются в их естественном состоянии при изысканиях в их статике, т.е. их качественные характеристики и количественные значения в той или иной степени справедливы лишь для момента их определения. Так как во времени и в пространстве эти условия под воздействием естественных и антропогенных факторов изменяются, то для обеспечения устойчивости зданий и инженерных сооружений необходимо знать динамику их изменений при строительстве и в течение времени эксплуатации объектов, что и составляет задачу мерзлотного прогноза. Необходимой чертой изучения этих условий и их изменений является комплексность. Это является отражением взаимосвязи, существующей между факторами природной обстановки, и выражается в том, что при изучении природных условий их составляющие рассматриваются с выявлением и учетом существующих между ними зависимостей.

Под мерзлотным (геокриологическим) прогнозом понимается научное предсказание о развитии и изменении мерзлотных условий, которые произойдут в будущем либо в связи с естественно-историческим ходом развития природы, либо в связи со строительством и хозяйственным освоением территории [Основы геокриологии, 2008]. Задача составления прогноза включает изучение параметров природной среды, определяющих мерзлотную обстановку. Поэтому прогноз изменения мерзлотных условий должен составляться на основе изучения общих и частных закономерностей формирования и развития мерзлых толщ и сопутствующих им процессов.

Под частными закономерностями формирования и развития мерзлых толщ понимаются зависимости между отдельными составляющими природной среды (включая и антропогенный фактор), такими как

радиационно-тепловой баланс и его составляющие, рельеф (крутизна и экспозиция), покровы (снежный, растительный, водный, искусственный), почвы, состав, сложение и влажность грунтов и др., и характером мерзлотных условий — распространением, залеганием и мощностью многолетнемерзлых толщ, формированием температурного режима и глубин сезонного оттаивания (промерзания), криогенных текстур и льдистости, криогенных процессов. Причем имеется в виду установление не столько качественной, сколько количественной связи. Под общими закономерностями понимается взаимосвязь составляющих природной среды, включая и производственную деятельность человека, с общим комплексом мерзлотных условий.

Общие и частные закономерности проявляются как на отдельных ландшафтах, так и на больших территориях. В зависимости от масштаба съемки следует различать локальные и региональные закономерности формирования мерзлотных условий. Поэтому и частные, и общие закономерности формирования мерзлотных условий можно рассматривать как в региональном, так и в локальном плане.

Многолетнемерзлые толщи характеризуются большой динамикой всех основных параметров. Поэтому мерзлотные исследования должны завершаться прогнозом изменения мерзлотных условий, составленным на основе изучения динамики определяющих состояние вечной мерзлоты факторов.

Закономерности формирования и развития мерзлых толщ определяются, с одной стороны, термодинамическими и теплофизическими законами, а с другой — геологическими особенностями изучаемого района. Поэтому не вполне корректно рассматривать изменения мерзлотных условий как результат одних теплофизических процессов. Так, например, отепляющее влияние снежного покрова нельзя рассчитывать как результат одного влияния теплоизолирующего слоя (снега) в виде термического сопротивления. Влияние снега в действительности в значительной мере будет определяться годовыми теплооборотами в почве. На двух участках с различными годовыми теплооборотами в почве влияние снега при одинаковой его мощности и плотности будет различным. Чем большее будет величина теплооборотов, тем значительнее будет сказываться отепляющее влияние сходного по мощности и плотности снежного покрова. Если учесть, что теплообороты в почве зависят от состава пород, характера их сложения и залегания, т.е. от геологических условий их формирования и существования мерзлоты, а также от влажностного режима почвы и характера радиационно-теплогового баланса поверхности, то станет очевидной вся сложность рассматриваемого вопроса и невозможности представления отепляющего влияния снега как теплотехнического явления.

Аналогичные примеры можно привести и в отношении влияния других геологических и географических факторов на формирование температурного режима и глубин промерзания и оттаивания пород.

Важным моментом является то, что теплообороты в почве зависят от мощности слоя сезонного промерзания и оттаивания и от среднегодовых температур пород. В силу этого влияние одних и тех же факторов (снега, растительности и др.) будет различно сказываться на формировании температурного режима пород и глубин в случае сезонного промерзания и в случае сезонного оттаивания пород. Поэтому при рассмотрении термодинамических и теплофизических закономерностей и при составлении расчетных схем совершенно необходимо учитывать геологическую и географическую стороны явлений так, чтобы сходные параметры в расчетных схемах могли быть измерены непосредственно в поле и увязаны с особенностями природной обстановки.

В основе формирования температурного режима пород, отражающего характер теплообмена в почве и атмосфере лежит радиационно-тепловой баланс поверхности почв. Мерзлотные условия в значительной мере определяются ходом изменения радиационно-теплого баланса по сезонам года. В силу этого при составлении прогноза изменений мерзлотных условий нельзя ограничиваться осредненными данными радиационно-теплого баланса поверхности за год. Только при рассмотрении последнего за полугодие или за более короткие отрезки времени может быть вскрыта связь теплооборотов в почве с остальными составляющими радиационно-теплого баланса. Такой подход дает возможность оценить роль и значение радиационно-теплого баланса поверхности в формировании мерзлотных условий в зависимости от таких факторов, как грунтовые воды, инфильтрация теплых летних осадков и т.п. Без учета этих особенностей невозможно составить правильное представление об изменении мерзлотных условий в связи со строительством и производственным освоением территории.

Методика мерзлотного прогнозирования представляется следующей. Сначала в исследуемом районе проводится мерзлотная съемка, в результате которой изучаются геолого-генетические типы мерзлых пород и особенности формирования в их пределах криогенных тектур, а также частные и общие закономерности формирования сезонно- и многолетнемерзлых пород и происходящих в них мерзлотных процессов. При этом должны быть установлены не только качественные связи мерзлотных характеристик с географическими и геологическими факторами природной среды, но и количественное их выражение по расчетным схемам, учитывающим и теплофизическую, и геологическую сторону явления в конкретной обстановке. Далее, учитывая

характер изменения геологических и географических условий в результате предполагаемого или проектируемого строительства и хозяйственного освоения территории, производится расчет изменения мерзлотных условий как для всей изучаемой территории, так и для отдельных участков и сооружений, с учетом динамики климата. Завершающим этапом мерзлотного прогноза должна быть разработка приемов управления или целенаправленного изменения мерзлотных и инженерно-геологических условий для обеспечения оптимальной работы сооружения в запроектированном режиме.

Расчетные прогнозные схемы должны включать: а) расчеты радиационно-теплового баланса поверхности с учетом влияния географических и геологических факторов; б) расчеты кондуктивного и конвективного теплообмена в почве; в) расчеты промерзания дисперсных систем: с фронтом и с зоной промерзания.

При производстве мерзлотного прогноза необходимо различать:

а) прогноз изменения мерзлотных условий, связанных с естественным ходом динамики вечной мерзлоты в соответствии с естественным ходом изменения геологической и географической среды;

б) прогноз изменения мерзлотных условий в связи с конкретной производственной деятельностью человека в пределах отдельных участков и со строительством конкретных сооружений;

в) прогноз изменения мерзлотных условий на больших территориях в связи с суммарным воздействием комплекса сооружений и производственного освоения больших территорий.

При этом необходимо учитывать особенности мерзлотного прогнозирования на различных стадиях исследования. При мелкомасштабной съемке (1:500 000...1:200 000, стадия технико-экономического обоснования) дается прогноз изменения мерзлотных условий в самом общем виде. Здесь прежде всего следует иметь в виду изменение мерзлотных условий в связи с изменением влияния различных факторов природной среды, которое может либо быть связано с естественным изменением их во времени, либо быть заданным условно для предполагаемых перспективных участков территории. Сюда относятся влияние снежного и растительного покровов, состава и влажности пород, крутизны и экспозиции склонов, инфильтрации летних атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод, заболоченности и т.п. Влияние этих факторов должно рассматриваться с позиций формирования радиационно-теплового баланса поверхности и среднегодовых температур пород в слое их годовых колебаний.

При среднемасштабной и крупномасштабной съемках (1:100 000 и крупнее, стадия технического проекта и рабочих чертежей) составляется конкретный прогноз изменения мерзлотных условий для отдельных

участков и строительных площадок в зависимости от особенностей проектируемых сооружений и намеченного производственного освоения территории. Основой этого прогноза является общий прогноз, рассмотренный выше, данные которого уточняются для конкретных условий. Кроме того, учитываются искусственные преобразования природной обстановки, такие как: планировка местности, срезка и подсыпка грунта, устройство земляных сооружений, дренирование и обводнение грунтов, лесопосадки и вырубка леса, посадка газонов, устройство искусственных покрытий и пр. Влияние всех этих преобразований при прогнозе учитывается через изменение радиационно-теплового баланса поверхности и формирование среднегодовых температур пород. При составлении прогноза большое внимание должно уделяться процессам оттаивания многолетнемерзлых толщ и образованию их вновь в результате строительства. В связи с этим прогнозируются как изменения глубин слоя, так и изменения состава и строения оттаивающих, мерзлых и промерзающих грунтов и их свойств в соответствии с общим прогнозом изменения мерзлотных условий. Кроме того, мерзлотный прогноз включает также прогноз изменения свойств мерзлых пород в связи с изменением их температурного режима. Также существенно прогнозирование развития криогенных процессов и явлений. На основе всего вышесказанного составляется окончательный мерзлотный прогноз для района исследований. Завершающим моментом в его составлении при средне- и крупномасштабной съемках является разработка приемов управления мерзлотным процессом в целях достижения оптимальных условий работы сооружений. Эта разработка связывается с определением конкретных рекомендаций по производственному освоению территории и по выбору принципа строительства и конструктивных особенностей оснований и фундаментов различных сооружений. Таким образом, определяется существенное различие мерзлотного прогноза при различных стадиях исследования, изысканий и проектирования, а также последовательность и преемственность в схеме — общий прогноз при мелкомасштабной съемке — конкретный прогноз при средне- и крупномасштабной съемках.

Необходимым условием мерзлотного прогнозирования является применение простых и в то же время достаточно надежных и точных расчетных схем. Наиболее целесообразными в этом отношении являются такие расчетные схемы, в основу которых положены точные математические решения задач кондуктивного и конвективного теплопереноса. По ним составляются алгоритмы решения задач теплопереноса с помощью ЭВМ. Определяются частные и общие зависимости характеристик теплообмена от различных факторов и для дальнейшего удобства расчетов составляются номограммы.

Конечной целью мерзлотных исследований и мерзлотного прогноза является инженерно-геокриологическая оценка исследуемого района. В области распространения многолетнемерзлых пород эта оценка, несмотря на применение всего комплекса инженерно-геологических исследований, может быть дана только на мерзлотной основе. Таким образом, следует считать, что в области многолетнемерзлых пород следует вести комплексную мерзотно-инженерно-геологическую съемку (комплексную инженерно-геокриологическую съемку), в которую должен входить комплекс исследований как мерзлотных, так и инженерно-геологических [Методическое руководство... 1978, Методические рекомендации... 1977].

10.2. Методы геокриологического прогноза

Различают два вида прогноза: эволюционный (часто его называют естественно-историческим) и техногенный. Первый включает прогнозную оценку изменения характеристик многолетнемерзлых пород и протекающих в них процессов под влиянием естественной динамики климата, неотектоники, уровня Мирового океана, процессов денудации и осадконакопления, ледяных покровов, гидрогеологических, гидрологических и геоботанических условий. Сюда же можно отнести прогнозную оценку обратного влияния изменений геокриологических характеристик на компоненты геосистемы.

Техногенный прогноз включает в себя оценку изменения геокриологических условий под влиянием разнообразных техногенных нарушений природного комплекса (начиная от локальных изменений ландшафтных и геокриологических условий и кончая глобальными преобразованиями природы — созданием искусственных водохранилищ, загрязнением промышленными отходами атмосферы, поверхностных и подземных вод, изменениями их температурного режима и др.). Одним из важнейших разделов техногенного прогноза является инженерно-геокриологический прогноз, который составляется для решения таких практических задач, как выбор строительных площадок и трасс линейных сооружений, оценка вариантов размещения строительных объектов и выбор принципов их строительства, выбор способов прокладки транспортных магистралей и способов разработки месторождений полезных ископаемых, и целый ряд других вопросов, необходимых для проектирования, строительства и эксплуатации различных хозяйственных объектов. На основе инженерно-геокриологического прогноза рекомендуются мероприятия, исключающие или ограничивающие последствия нарушения природного равновесия геосистем, опасные для сооружений и природной среды; разрабатываются способы управления мерзлотным процессом. При этом в соответствии с характером техногенных воздействий прогнозируются: изменения

температурного режима пород; динамика, масштабы проявления процессов многолетнего промерзания и протаивания горных пород; изменение их состава, строения и свойств; развитие криогенных геологических процессов, возможность их активизации и возникновения новых, время их стабилизации, условия, вызывающие прогрессирующее развитие. Во всех случаях инженерно-геокриологический прогноз должен составляться с учетом результатов эволюционного прогноза. Характер и постановка задач определяются в зависимости от региональных особенностей территории, детальности исследований (масштаба геокриологической съемки и изысканий) и их целенаправленности.

При прогнозе в мелком и среднем масштабах одним из основных результатов прогнозирования должна быть оценка чувствительности и устойчивости территории с многолетнемерзлыми породами к техногенным воздействиям. При этом под «чувствительностью» следует понимать реакцию геосистемы на воздействия, степень ее изменения, а под «устойчивостью» — способность геосистемы противостоять воздействиям без изменения ее состояния и структуры, т.е. без таких изменений компонентов природного комплекса и взаимосвязей между ними, которые могли бы привести к недопустимым деформациям сооружений или к необратимому ухудшению экологической обстановки. По существу, и чувствительность, и устойчивость — понятия близкие и определяются «величиной» изменений геокриологических характеристик, но в последнем случае предполагается ограничение предела допустимости изменений, исходя из решаемой практической задачи.

Очевидно, что устойчивость геосистем можно оценивать в разных аспектах применительно к различным видам сооружений, так как они по-разному реагируют на изменения состояния и свойств пород и протекающие в них процессы. Одни и те же изменения геокриологических условий могут быть и опасными, и неопасными в зависимости от вида сооружения. И если устойчивость геосистем охарактеризовать допустимыми техногенными воздействиями, не вызывающими опасных изменений инженерно-геокриологических условий, то и они могут быть также существенно различными в зависимости от вида сооружения (например, допустимые воздействия при строительстве аэродромов отличаются от допустимых воздействий при строительстве автодорог и тем более при строительстве промышленных зданий).

В то же время для одного и того же вида сооружений допустимые воздействия зависят от исходной естественно сложившейся обстановки. Таким образом, понятие «устойчивость» в достаточной мере условно и в каждом конкретном случае следует оговаривать аспект его приложения.

Этапы, задачи и методы прогноза

Этапы инженерно-геологических исследований	Цель мерзлотного прогнозирования	Основные задачи мерзлотного прогноза	Методы прогнозирования
I этап — инженерно-геологическое обоснование генеральных схем развития народного хозяйства на базе инженерно-геологических исследований природных регионов и зон в обзорных масштабах 1:2 500 000—1:100 000	Оценка влияния геокриологической обстановки на природные ресурсы	1. Прогноз естественной динамики геокриологических условий 2. Оценка чувствительности геокриологической обстановки к техногенным воздействиям 3. Оценка возможности управления мерзлотным процессом для эффективного использования природных ресурсов	1. Метод аналогий на основе изучения опыта освоения 2. Логическое и математическое моделирование 3. Экспертные оценки
II этап — инженерно-геологическое обоснование многоотраслевого освоения отдельных регионов на базе государственной инженерно-геологической съемки в масштабах 1:500 000—1:100 000	Обеспечение рационального использования территорий (оптимизация, размещение и приемы строительства сооружений, входящих в ПТК)	1. Оценка устойчивости геокриологической обстановки и допустимых техногенных воздействий 2. Оценка обратного воздействия изменений геокриологической обстановки на развитие ландшафтов 3. Прогноз эффективности мероприятий, обеспечивающих надежность сооружений и охрану природной среды	1. Метод аналогий на основе изучения опыта строительства 2. Математическое и физическое моделирование (в том числе режимные наблюдения) 3. Экстраполяция 4. Классификация ММП и мерзлотных процессов
III этап — инженерно-геологическое обеспечение проектирования промышленных и других объектов на базе инженерно-геологических изысканий в масштабах 1:50 000—1:2000	Инженерно-геокриологическая оценка отдельных площадок	1. Прогноз влияния инженерной подготовки территории на геокриологическую обстановку 2. Прогноз теплового и механического взаимодействия сооружений с грунтами основания 3. Прогноз геокриологической обстановки в связи с применением приемов мелиорации грунтов и рекультивации ландшафтов	1. Математическое и физическое моделирование 2. Метод аналогий на основе изучения опыта строительства

Чувствительность геосистемы (природного комплекса) не зависит от техногенных воздействий, она является ее свойством, способностью реагировать на воздействия. Это понятие более определенно, оно всегда характеризуется степенью (величиной) изменения отдельных (или ряда) геокриологических характеристик под влиянием отдельных (или суммы) воздействий.

Техногенный *геокриологический прогноз* по особенностям воздействия строительства на природную среду подразделяется на: 1) общий прогноз, предусматривающий оценку изменения составляющих природного комплекса без учета теплового и механического воздействия самого сооружения; 2) инженерный прогноз, включающий оценку результатов непосредственного воздействия сооружений на геокриологическую обстановку.

При составлении *общего геокриологического прогноза* характеризуются возможные изменения мерзлотных условий на предполагаемой территории строительства в результате проведения таких мероприятий, как нарушение растительного покрова, условий снегонакопления, выторфовывание и замена грунтов оснований, планировка поверхности, изменение условий поверхностного и грунтового стока, устройство искусственных покрытий, газонов, насаждение деревьев, кустарников и др. Необходимость составления общего геокриологического прогноза при решении инженерных задач, связанных с хозяйственным освоением криолитозоны, обусловлена тем, что тепловыделяющие или теплопоглощающие сооружения при любых видах строительства занимают лишь часть площади нарушенных территорий. Так, плотность зданий в северных городах России составляет 13–40%, остальная часть городов занята дорогами, улицами, площадями, скверами и т.д. По данным ВСЕГИНГЕО, лишь на 9% площади газовых месторождений Западной Сибири расположены тепловыделяющие сооружения, на остальной территории происходит изменение природных условий при строительных работах. Кроме того, в практике хозяйственного освоения нередко случаи, когда происходит разрыв во времени между началом строительства и вводом сооружений в эксплуатацию. В этом случае результаты общего прогноза служат исходными данными для составления инженерного геокриологического прогноза.

При *инженерно-геокриологическом прогнозировании* оцениваются особенности теплового и механического воздействия сооружений с многолетнемерзлыми породами.

Для оценки влияния техногенных воздействий на геокриологическую обстановку применяются различные методы, из которых наибольшее развитие получили методы математического моделирования. Однако практический опыт показывает, что эффективность и достоверность

прогнозов (имея в виду весь круг задач) возрастают при применении комплекса методов: физического и математического моделирования, метода аналогий, анализа опыта строительства, экстраполяции, классифицирования.

При составлении инженерного геокриологического прогноза с использованием одного метода или их комплекса должен соблюдаться единый методический подход, сущность которого сводится к последовательному изучению закономерностей формирования геокриологических условий с оценкой роли и влияния каждого фактора природной среды, к составлению конкретной типизации техногенных воздействий на основе заданий на проектирование инженерных сооружений и изучения опыта строительства. Прогноз составляется в результате решения серии задач, позволяющих оценивать возможные изменения инженерно-геологических характеристик и эффективность мелиоративных мероприятий, направленных на обеспечение надежности сооружений и на борьбу с опасными инженерно-геологическими процессами.

В зависимости от продолжительности отрезка времени, для которого прогнозируются изменения геокриологических условий, прогноз подразделяется на кратко-, долго- и сверхдолгосрочный. **Краткосрочный прогноз** составляется на период до 10 лет и характеризует изменения геокриологических условий под влиянием короткопериодных колебаний климата, подготовительных и строительных работ и эксплуатации сооружений в первые годы, когда изменения состояния и характеристик грунта происходят наиболее интенсивно, особенно в верхней части разреза (в слое сезонного оттаивания и в слое годовых теплооборотов), и могут представлять большую опасность для сооружений. **Долгосрочный прогноз** составляется на период от 10 до 100 лет и ориентирует на изменение геокриологических и связанных с ними гидрогеологических и инженерно-геологических характеристик, соответствующих новому установившемуся температурному и влажностному режиму пород на освоенных территориях. **Сверхдолгосрочный прогноз** составляется для особо ответственных сооружений на период, превышающий 100 лет, в основном для оценки изменений геокриологических условий под влиянием естественной динамики природной среды или региональных и глобальных ее преобразований, приводящих к изменению теплового состояния пород на больших территориях (например, при теоретически возможном глобальном потеплении климата за счет увеличения содержания в атмосфере парниковых газов), а также для оценки длительного воздействия сооружений на геологическую обстановку. Примером необходимости составления такого прогноза является проблема подземного захоронения радиоактивных отходов в толще многолетнемерзлых породах. Срок экологической опасности высокорadioактивных отходов состав-

ляет 1–3 тыс. лет. Следовательно, необходимо предвидеть, как изменится геокриологическая обстановка за этот период.

Различные виды хозяйственного освоения оказывают различное воздействие на природную среду. В силу этого и круг задач по прогнозу температурного режима грунтов для каждого вида хозяйственного освоения будет обладать определенной спецификой.

При **городском строительстве** температурный режим грунтов формируется под влиянием многих факторов, условно разделенных Г. В. Порхачевым и В. К. Щелоковым на три группы: общие, локальные и специфические. К общим факторам относятся составляющие внешнего тепло- и массообмена на застроенной территории: радиационный баланс, турбулентный теплообмен, затраты тепла на испарение и конденсацию влаги на дневной поверхности. К локальным факторам, обуславливающим значительное изменение температурного режима грунтов в пределах сравнительно небольшой площади, относится тепловое воздействие на грунты оснований зданий, сооружений, коммуникаций. К специфическим относятся факторы, характерные только для определенных территорий. Для одних районов это гидрогеологические особенности, для других — условия атмосферной циркуляции и т.д. Прогноз изменения геокриологических условий в черте застройки должен производиться с учетом изменчивости перечисленных факторов: общие и специфические факторы учитываются при общем прогнозе, локальные — при инженерном.

Разнообразие источников и стоков тепла на застроенной территории приводит к сложной картине теплового воздействия застройки на температурный режим грунта. Так, наряду с образованием зон оттаивания под тепловыделяющими зданиями и сооружениями на отдельных участках (улицах, дорогах, площадях и др.) могут происходить понижение среднегодовой температуры грунтов, образование мерзлых толщ там, где до застройки были талики.

При **линейном строительстве** в задачи техногенного геокриологического прогноза входит оценка изменения температурного режима грунтов в полосе трассы вне области влияния линейного сооружения (общий прогноз) и в области теплового и механического влияния сооружения (инженерный прогноз). В последнем случае для железных и автомобильных дорог обосновываются необходимые параметры насыпей, выемок, искусственных сооружений (высота, материал насыпи, необходимость использования теплоизоляционных слоев, глубина выемок и т.п.) для обоснования выбора принципа использования грунтов как оснований земляного полотна. Для трубопроводов производится оценка мощности и динамики ореолов протаивания или промерзания грунтов при выбранном способе прокладки, технологическом режиме эксплуатации и конструктивных особенностях.

Основными задачами прогноза при гидротехническом строительстве являются: обоснование выбора способа проектирования тела плотины (в мерзлом или талом состоянии); расчет охлаждающих систем, необходимых для сохранения ядра плотины в мерзлом состоянии; расчет динамики многолетнего оттаивания грунтов под водохранилищем; оценка интенсивности переработки берегов и др. Большое значение при гидротехническом строительстве имеет оценка изменения природных, в том числе и геокриологических, условий на территории, примыкающей к водохранилищу, поскольку огромные массы воды приводят к существенному изменению микроклиматических условий, их влияние может сказываться на значительном удалении от водохранилища.

При *подземном строительстве* наиболее важной задачей является прогнозная оценка температурного режима грунта для выбора наиболее безопасного и экономичного метода отработки полезного ископаемого, проходки шахтных стволов, тоннелей, горных выработок.

Техногенный геокриологический прогноз для агробиологического освоения территории включает задачу обеспечения оптимального почвенного климата, расчет температурного режима грунтов и глубин слоя сезонного промерзания и протаивания, а также времени существования положительных и отрицательных температур на поверхности почвы и различной глубине.

Прогнозирование изменений свойств мерзлых пород, так же как и других геокриологических характеристик, основывается на знании закономерностей их формирования, рассмотренных выше.

Формулировка задач прогноза изменения показателей свойств зависит прежде всего от результатов прогноза изменения температурного режима пород. При этом рассматриваются два случая: 1) когда среднегодовая температура пород изменяется (повышается или понижается) в пределах отрицательных значений и происходит изменение соотношения незамерзшей воды и льда в породах; 2) когда изменяется знак среднегодовой температуры и происходит изменение агрегатного состояния, состава и строения породы. Прогнозная оценка изменения свойств грунтов в первом случае может быть получена по результатам полевых или лабораторных испытаний, проводящихся в диапазоне отрицательных температур при различных плотности, влажности, строении грунтов, учитывающих возможные изменения условий при строительстве и эксплуатации сооружений.

Во втором случае, когда смена знака среднегодовой температуры на поверхности почвы приводит к многолетнему оттаиванию, необходимо оценить изменение теплофизических свойств, определить тепловую осадку, сопротивление сдвигу и другие свойства оттаивающих грунтов. Если происходит новообразование многолетнемерзлых пород, то возник-

кает задача определения изменения теплофизических и механических свойств промерзающих пород в соответствии с новым установившимся режимом, исходя из возможных изменений плотности, суммарной влажности мерзлого грунта, оцениваемых в зависимости от его состава и начальных (существующих к моменту промерзания) плотности и влажности.

Прогноз *криогенных геологических процессов* базируется на установлении зависимостей характера развития каждого процесса от факторов, обуславливающих этот процесс.

Методы количественного прогноза криогенных процессов в целом разработаны менее детально, чем методы прогноза температурного режима и свойств грунтов. Это связано со сложностью физических моделей процессов, необходимостью учета при прогнозе большого числа параметров, определяющих их развитие, сложностью математического моделирования криогенных процессов.

Наибольшее количество работ посвящено методам оценки пучиноопасности грунтов. Количественные характеристики величины пучения грунтов и неравномерности пучения по площади могут быть получены с помощью методов расчета, предложенных Н. А. Пузаковым, И. А. Золотаревым, В. О. Орловым, Г. М. Фельдманом, Э. Д. Ершовым и др. Вопросы количественного прогноза естественного и техногенного термокарста с различной степенью детальности рассмотрены в работах Г. М. Фельдмана, Ю. Л. Шура, В. В. Ловчука, М. С. Красса и др. Прогноз вероятности развития солифлюкции может быть осуществлен с помощью приближенных формул Л. А. Жигарева, В. С. Савельева. Методы прогноза термоэрозии рассмотрены в работах Д. В. Малиновского, В. К. Данько, В. Л. Познанина и др. [Ершов, 2002].

10.3. Данные для геокриологического прогноза

Геокриологический прогноз основывается на данных о закономерности формирования основных геокриологических условий. Данные геокриологических условий получают при проведении комплекса полевых работ на ключевых участках с учетом геологических и геокриологических условий территории. Первоочередным является выявлении частных и общих закономерностей формирования и развития сезонно- и многолетнемерзлых пород и их характеристик в зависимости от комплекса природных условий и от каждого элемента геолого-географической среды. Эта задача успешно решается в процессе проведения геокриологического мониторинга. Режимные наблюдения (мониторинг) включают отбор образцов грунта из скважин для определения влажности и плотности, термометрические измерения в скважинах, измерение температуры

приповерхностного воздуха, измерение мощности и плотности снежного покрова, определение положения уровня грунтовых вод и глубины промерзания грунтов и других дополнительных данных с различной регулярностью.

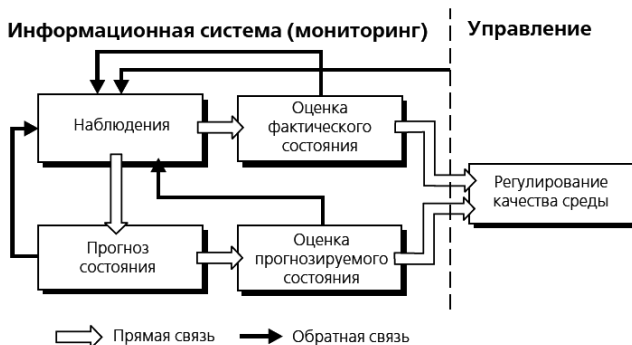


Рис. 10.1. Блок-схема системы мониторинга [Веницианов, 2003]

Геокриологический мониторинг — организация слежения за природными изменениями, состоянием природно-технических геосистем, прогнозирования их изменения и на этой основе принятия решений по целенаправленному управлению состоянием этих систем.

Инженерно-геокриологический мониторинг является составной частью мониторинга окружающей среды, в задачи которого входит комплексная оценка изменений в атмосфере, гидросфере, биосфере, геологической среде. По целям и задачам исследований можно выделить системы геокриологического мониторинга разного уровня: глобального (межгосударственного), национального (государственного), регионального и локального. Глобальная система мониторинга окружающей среды призвана решать общечеловеческие экологические проблемы в рамках всей Земли. В качестве примера можно привести проект «Мониторинг криолитозоны», который разрабатывается с начала 90-х гг. В рамках этой программы ведутся работы по созданию единой циркумполярной наблюдательной сети геокриологического мониторинга с участием России, США, Канады и других северных стран, а также единой автоматизированной системы баз и банка данных. Приоритетными направлениями по этому проекту являются: получение постоянной информации о термовлажностном режиме грунтов, криогенных физико-геологических процессах и определяющих их факторах; разработка, опробование и совершенствование методов стационарного инженерно-геологического изучения при разведочных, изыскательских и строительных работах; изучение влияния техногенного воздействия на природные компоненты; оценка скорости их восстановления естественным путем и при осуществлении рекультивационных мероприя-

тий. Особенностью программы является изучение влияния глобальных климатических потеплений на криолитозону и, в частности, на возможность деградации многолетнемерзлых толщ.

В России единая национальная система мониторинга геологической среды отсутствует. У нас созданы (и то не по всем регионам) лишь отдельные региональные системы, опирающиеся на разрозненные локальные системы мониторинга геологической среды. Поэтому остановимся более подробно на организации и задачах локального инженерно-геокриологического мониторинга, в задачи которого входят: 1) своевременное установление в процессе строительства и эксплуатации сооружений отклонений от принятых в проекте параметров температурного режима, состояния грунтов оснований и деформаций фундаментов; 2) оперативный контроль температурного и гидрогеологического режима, состояния грунтов и развития опасных криогенных процессов в зоне взаимодействия с инженерными объектами; 3) краткосрочное и долгосрочное прогнозирование развития геокриологических процессов и возможных деформаций сооружений; 4) разработка мероприятий, направленных на поддержание эксплуатационной пригодности сооружений и управление геокриологической ситуацией. При создании и ведении инженерно-геокриологического мониторинга должны учитываться основные технические решения конкретных сооружений, принятые в проекте: принцип использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований; особенности теплового и механического взаимодействия с грунтами оснований; допустимые значения несущей способности оснований и деформации сооружений; природоохранные требования и др.

Инженерно-геокриологический мониторинг начинается в достроительный период, когда формируется наблюдательная сеть для фоновой оценки геокриологической обстановки. Результаты мониторинга в этот период служат исходными данными для оценки изменений, которые будут происходить при строительстве и эксплуатации природно-технической геосистемы. В строительный период проводится организация наблюдательной сети и выполняются наблюдения на строящихся объектах.

Эксплуатационный период по особенностям освоения территорий и различной степени воздействия во времени техногенной нагрузки может быть подразделен на два этапа: начальный — продолжительностью 3–5 лет — и основной — с 3–5 лет до конца эксплуатации сооружений.

Данные мониторинга в эксплуатационный период представляются эксплуатирующей организации. На основе этих данных принимается решение о внесении изменений в режим эксплуатации объектов или о необходимости дополнительных мероприятий для обеспечения безопасного функционирования сооружений и сохранения природной среды.

Накопление и хранение данных, получаемых в процессе температурных и гидрогеологических инструментальных наблюдений, а также прогнозирование изменений инженерно-геокриологических условий и устойчивости сооружений осуществляется по этим данным с использованием программного обеспечения мониторинга.

В структуре геокриологического мониторинга большое значение имеет использование материалов аэрофото- и космических съемок. По материалам разновременных съемок можно оценить изменение размеров очагов загрязнения территории, тенденции развития и затухания опасных геокриологических процессов, деформации различных сооружений — магистральных трубопроводов, земляного полотна железных и автомобильных дорог, переработки берегов водохранилищ и др. При этом на современном уровне обработки космо- и аэрофотоматериалов можно получить данные не только на уровне контурного дешифрирования, но и в количественном виде.

На основе данных оперативного контроля и прогноза эксплуатирующей организацией принимается решение о внесении изменений в режим эксплуатации объектов либо о необходимости разработки дополнительных технических мероприятий, направленных на поддержание работоспособности сооружений и экологической устойчивости. Апробация разработанных технических решений и природозащитных мероприятий должна базироваться на прогнозных оценках их эффективности с использованием методов компьютерного моделирования.

Основные приемы управления, реализующие эти решения, включают мероприятия по регулированию температурного режима оснований (резервные системы, сезонно-действующие охлаждающие устройства, дополнительная теплоизоляция и т.д.), конструктивные мероприятия по усилению фундаментов и несущих конструкций сооружений, методы инженерной защиты территории.

10.4. Пример прогноза температур горных пород Западной Сибири в связи с глобальным потеплением

10.4.1. Динамическая карта температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в период 1960—2100 гг.

С использованием предложенного коэффициента чувствительности криолитозоны к климатическим изменениям, с учетом его изменения во времени и особенностей его изменения в различных ландшафтных условиях составлена серия динамических картографических моде-

лей среднегодовой температуры ММП на различные расчетные периоды. Серия карт среднегодовой температуры ММП дает представление об изменении термического состояния вечной мерзлоты в Западной Сибири за период в 140 лет. Особенно актуальной является оценка отклика термического состояния ММП на потепление климата, которое наиболее выражено с середины 1960-х гг. в Субарктике. Модель создана с использованием программы ArcGis. Пространственное разрешение картографической модели соответствует масштабу 1:2 500 000.

Методика моделирования прогнозных карт. Для прогноза температуры ММП использован «средний» сценарий изменения климата (RCP 4.5) по данным карт прогнозируемого изменения среднегодовой температуры воздуха, опубликованных на сайте Главной геофизической обсерватории им. Воейкова (www.voeikovmgo.ru). Данная интерактивная карта прогноза приземной температуры воздуха создана на базе ансамбля глобальных климатических моделей, принявших участие в 5-м оценочном докладе МГЭИК. Но следует сделать важное замечание. Сюжетные линии сценариев изменения климата основаны на различных гипотезах, которым не всегда суждено сбыться, поэтому и прогноз термического состояния криолитозоны является в определенной мере также гипотетическим.

Переход от изменений температуры воздуха к изменению температуры ММП произведен через безразмерный коэффициент (в д.е.), отражающий чувствительность мерзлоты к потеплению климата. Коэффициент чувствительности мерзлоты предложен А. В. Павловым, а его пространственные изменения отображены на карте, разработанной Г. В. Малковой на основе данных метеостанций и геокриологических стационаров. Коэффициент представляет собой отношение величины тренда повышения среднегодовой температуры ММП к тренду увеличения среднегодовой температуры воздуха для периода климатической нормы. Пространственная изменчивость коэффициента определяется региональными и локальными отличиями в параметрах снежного и растительного покровов, теплофизическими характеристиками, температурой пород и др. По мнению авторов, результаты их исследования могут быть использованы «при ретроспективных оценках эволюции состояния криолитозоны и прогнозе ее изменений в XXI веке» [Павлов, Малкова, 2009].

В предложенной модели переход от прогнозируемых значений повышения температуры воздуха к изменению температуры ММП сделан на основе натурных измерений двух данных параметров в «тестовый» период, а не в результате традиционных расчетов температуры грунта через поправки за счет напочвенных покровов. Полученный *коэффициент чувствительности* экстраполируется на временной интервал до 2100 г.

Это позволяет произвести переход от прогнозных значений потепления климата к изменению термического состояния вечной мерзлоты в XXI в. Допущением данной модели является положение о неизменности локальных и региональных факторов (различных характеристик и трендов высоты снежного покрова и др.) в XXI в. по сравнению с «тестовым» периодом нормы 1961–1990 гг. Ранее было отмечено, что «наибольшая чувствительность мерзлых пород к изменению климата обычно характерна для зоны тундры, где снежный покров формируется плотным и поэтому не обладает достаточно высокими теплозащитными свойствами» [Павлов, Малкова, 2009]. Очевидно, что данный фактор, влияющий на чувствительность мерзлоты к изменениям климата, носит для тундровой зоны постоянный характер и будет неизменным на весь период XXI в.

Модель, предложенная в настоящем исследовании, также учитывает влияние зональности криолитозоны на замедление тренда повышения температуры ММП по мере ее приближения к нулевым значениям. Данное замедление характеризуется так называемым *дополнительным коэффициентом*. Вдоль южной границы вечной мерзлоты господствуют близкие к 0 °С температуры ММП и происходит замедление тренда повышения температуры мерзлых грунтов за счет затрат тепла на фазовые переходы. При значениях среднегодовой температуры ММП ниже –5 °С дополнительный коэффициент принят равным 1 и не влияет на прогнозную температуру мерзлоты. При более высоких и околонулевых температурах коэффициент становится меньше единицы.

Значения дополнительного коэффициента непосредственно определяются среднегодовой температурой ММП на начальный момент времени периода, для которого производится расчет изменения температуры грунтов. Например, для расчета прогнозной среднегодовой температуры ММП на 2050 г. дополнительный коэффициент принимался в зависимости от среднегодовой температуры ММП в 2000 г. А для расчета прогнозной среднегодовой температуры мерзлоты на 2100 г. данный коэффициент принимался в зависимости от прогнозной среднегодовой температуры ММП в 2050 г. Соответственно, дополнительный коэффициент, будучи непосредственно определяемым температурой ММП, в значительной степени обусловлен пространственными изменениями в термическом состоянии грунтов на уровне различий между природными зонами и ландшафтами.

В основу определения значения коэффициента положены эмпирические кривые повышения температуры ММП за последние десятилетия, полученные на геокриологических стационарах ИКЗ ТюмНЦ СО РАН, а также экспериментально установленная закономерность повышения содержания незамерзшей воды по мере приближения температуры мерзлого грунта к 0 °С. Так, по данным А. А. Васильева, «скорость повы-

шения среднегодовой температуры ММП в зоне типичной тундры составила $0,056\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, в зоне южной тундры — $0,04\ldots 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, в зоне лесотундры — $0,045\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ и в зоне северной тайги — менее $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. В зоне северной тайги в некоторых ландшафтах среднегодовая температура пород стала положительной, здесь наблюдается опускание кровли мерзлоты на 4–6 м по сравнению с началом наблюдений». Таким образом, при деградации мерзлоты затраты тепла на фазовые переходы максимальны в южных районах криолитозоны, где наблюдаются значения температуры ММП наиболее близкие к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Здесь же характерна наибольшая инерционность в реакции мерзлоты на потепление климата и, соответственно, выбраны наименьшие значения дополнительного коэффициента.

Кривые многолетней динамики температуры, полученные на полевых стационарах ИКЗ ТюмНЦ СО РАН для каждой подзоны, также демонстрируют замедление тренда по мере приближения значений к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. По данным А. Д. Маслова, свободная вода полностью замерзает только при достижении температуры $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а основная часть связанной воды замерзает в интервале температур от -2 до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, модельная прогнозная температура мерзлоты в южных районах криолитозоны в значительной мере определяется величиной дополнительного коэффициента, значения которого близки к 0. Созданная динамическая картографическая модель (рис. 10.2, см. с. XLVII цв. вклейки) включает в себя базовую карту среднегодовой температуры ММП (2000 г.), прогнозные карты среднегодовой температуры ММП (на временные срезы 2050 г., 2100 г.), а также карту-реконструкцию среднегодовой температуры ММП (по состоянию на 1960 г.).

В основе базовой для прогноза карты температуры ММП на 2000 г. лежит цифровая версия Геокриологической карты СССР [Геокриологическая карта СССР, 1991]. Среднегодовая температура ММП на прогнозной карте для 2050 г. рассчитана по формуле:

$$T_{\text{ММП}}(2050) = T_{\text{ММП}}(2000) + \Delta T_{\text{в}}(2000 \div 2050) \times K_{\alpha} \times K_{\text{д}}, \quad (10.1)$$

где $T_{\text{ММП}}(2050)$ — прогнозная среднегодовая температура ММП на 2050 г., $T_{\text{ММП}}(2000)$ — среднегодовая температура ММП в 2000 г., $\Delta T_{\text{в}}(2000 \div 2050)$ — изменение среднегодовой температуры воздуха за период 2000–2050 гг., K_{α} — коэффициент чувствительности вечной мерзлоты к изменению климата, $K_{\text{д}}$ — дополнительный коэффициент.

Аналогично для 2100 г.:

$$T_{\text{ММП}}(2100) = T_{\text{ММП}}(2050) + \Delta T_{\text{в}}(2050 \div 2100) \times K_{\alpha} \times K_{\text{д}}, \quad (10.2)$$

где $T_{\text{ММП}}(2100)$ — прогнозная среднегодовая температура ММП на 2100 г., $T_{\text{ММП}}(2050)$ — прогнозная среднегодовая температура ММП на 2050 г., $\Delta T_{\text{в}}(2050 \div 2100)$ — изменение среднегодовой температуры воздуха за период 2050–2100 гг., K_{α} — коэффициент чувствительности вечной мерзлоты к изменению климата, $K_{\text{д}}$ — дополнительный коэффициент.

Среднегодовая температура ММП на 1960 г. рассчитана по формуле:

$$T_{\text{ММП}}(1960) = T_{\text{ММП}}(2000) - \Delta T_{\text{в}}(1960 \div 2000) \times K\alpha \times K\delta, \quad (10.3)$$

где $T_{\text{ММП}}(1960)$ — реконструированная среднегодовая температура ММП на 1960 г., $T_{\text{ММП}}(2000)$ — среднегодовая температура ММП в 2000 г., $\Delta T_{\text{в}}(1960 \div 2000)$ — изменение среднегодовой температуры воздуха за период 1960–2000 гг., $K\alpha$ — коэффициент чувствительности вечной мерзлоты к изменению климата, $K\delta$ — дополнительный коэффициент.

Изменение климата за период 1960–2000 гг. определено в соответствии с картой трендов среднегодовой температуры воздуха в криолитозоне России. Данная карта составлена Г. В. Малковой и Ю. В. Коростелевым для периода 1960–2000 гг. на основе обобщения климатических данных по метеостанциям [Malkova, et al., 2022].

Созданная динамическая картографическая модель температуры ММП не показывает отступление к северу географической южной границы вечной мерзлоты, поскольку построенные карты характеризуют температуру ММП на глубине 10–15 м. В южных районах области распространения ММП протаивание верхней 10-метровой толщи может длиться десятилетиями и температура мерзлых пород на этих глубинах на долгие годы принимает околонулевые значения. Т. е. разработанная модель не характеризует физическое состояние пород в самых верхних частях разреза. Верхние горизонты пород могут быть как мерзлыми, так и талыми.

10.4.2. Температуры ММП в Пуровском и Надымском районах ЯНАО

Предварительная оценка трендов выполнена для периода 1960–2045 гг. на основе составленной в 2022 г. динамической карты среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород (ММП) с временными срезами для 1960, 1986, 2010, 2023 и 2045 гг.

Карта на временной срез 1960 г. представляет собой карту-реконструкцию среднегодовой температуры ММП. Карта по состоянию на 1986 г. является цифровой версией Геокриологической карты СССР [Геокриологическая карта СССР, 1991]. Для дальнейших временных срезов карты выполнены на основе прогнозной методики, реализованной с учетом верификации в ходе полевых работ.

Пуровский и Надымский районы относятся преимущественно к южной криолитозоне с высокими температурами ММП. Поэтому на фоне восходящей ветви климатических изменений значительное повышение температуры мерзлоты в указанных районах происходило в основном в период 1960–2010 гг. (рис. 10.3, см. с. XLVIII цв. вклейки). В южной криолитозоне по мере приближения значений температуры ММП к нулевым значениям тренд на отопление мерзлоты снижается.

Это хорошо видно на динамической карте для периода 2010–2045 гг. Это объясняется тем, что по мере приближения температуры ММП к околонулевым значениям ($0...-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0...-2\text{ }^{\circ}\text{C}$) увеличиваются затраты тепла на фазовые переходы, поэтому тепловое поле становится более стабильным. Дальнейший тренд температуры ММП в период 2023–2045 гг. в южной части Пуровского и Надымского районов предположительно будет характеризоваться тем, что температурное поле мерзлоты будет относительно стабильно с температурами $0...-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, реже $-1...-2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В северной части исследуемой территории со среднегодовыми температурами ММП ниже $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в районе пос. Уренгой) повышение температуры мерзлоты может носить более выраженный характер (рис. 10.3, см. с. XLVIII цв. вклейки).

При сохранении существующих климатических тенденций и на фоне околонулевых температур грунтов в Пуровском и Надымском районах будет происходить постепенное многолетнее протаивание ММП в слое годовых колебаний температуры. Этот процесс может носить длительный характер и происходить в течение нескольких десятилетий.

10.4.3. Выводы

1. Установлено, что для периода с 1960 по 2100 г. характерна существенная перестройка термического состояния вечной мерзлоты на территории Западной Сибири. Показано, что высокие отрицательные изотермы ММП ($-2...-3\text{ }^{\circ}\text{C}$) в Западной Сибири за 140 лет отступают на север на расстояние до 400–500 км.

2. Выявлена зональность отклика криолитозоны Западной Сибири на потепление климата. Построенная динамическая карта показывает, что за исследуемый период в северной криолитозоне среднегодовая температура ММП на глубине 10–15 м увеличится на $4-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в южной криолитозоне преимущественно сохранятся околонулевые значения, в целом обусловленные нулевой завесой.

3. Установлено, что в период 1960–2000 гг. подавляющая часть территории полуостровов Ямал и Гыдан имела среднегодовые температуры ММП в диапазоне $-5...-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. В то время как, согласно выполненному прогнозу, в период 2050–2100 гг. на территории полуостровов будут преобладать ММП с температурами в диапазоне $-2...-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. При сохранении существующих климатических тенденций и на фоне околонулевых температур грунтов в районах прерывистой и островной криолитозоны будет происходить постепенное многолетнее (в течение нескольких десятилетий) протаивание ММП в слое годовых колебаний температуры.

11. Кадры и поддержка образовательных учреждений, выпускающих геокриологов

11.1. Актуальность расширения геокриологического образования

В настоящее время являемся свидетелями спроса на высшее образование и его широкой диверсификации наряду со все большим осознанием его решающего значения для социально-культурного и экономического развития общества. В равной степени это относится к подготовке геокриологов.

С другой стороны, сегодня высшее образование сталкивается с серьезными трудностями в таких областях, как финансирование, создание справедливых условий доступа к учебным курсам, в частности, детей коренных северных народов и детей, живущих далеко от крупных промышленных центров. Необходима поддержка повышения профессиональной квалификации, подготовки к приобретению конкретных навыков, повышение и сохранение качества преподавания, научных исследований и услуг, обеспечение наполнения программ актуальным содержанием, возможности трудоустройства выпускников, сотрудничества в международной сфере. В то же время появляются новые возможности, связанные с технологиями дистанционного и кооперативного обучения, которые способствуют лучшему образованию, управлению знаниями, их распространению, доступу к ним и контролю за ними.

По данным Росстата, в Российской Федерации насчитывается около 900 вузов, в которых обучается почти 5 млн студентов. Однако в последние годы заметно снижение их числа. При этом в большинстве отраслей экономики, в том числе в строительстве, изысканиях и инженерной геологии, в геокриологии, по-прежнему требуются специалисты с высшим образованием.

Рыночные реформы в России в конце прошлого века многие экономисты характеризуют как деструктивный период. Поиск более адекватных форм взаимодействия рынка, государства и образования до сих пор происходит. Сегодня укреплены политические институты власти, увеличены государственные инвестиции, накоплены серьезные финансовые резервы, что, несмотря на пандемию, позволяет смотреть в будущее с оптимизмом.

Однако встают новые, более сложные проблемы. В стратегических планах и программах ставятся задачи инновационного развития, способного сохранить экономический потенциал и конкурентоспособность России как великой державы. Предстоит активизировать государственную научно-техническую политику, увеличить инвестиции государства, инвестиционных институтов и частных предпринимателей в инновационные проекты

и программы. Ускоряются процессы модернизации институтов государства и государственного сектора экономики, включая бюджетные учреждения высшего профессионального образования. Теоретико-методическое обоснование эффективного распределения и использования бюджетных инвестиций в инновационное обновление бюджетных учреждений становится актуальной проблемой в теоретическом и практическом плане. Рынок образовательных услуг в России развивается очень бурно. В него вовлечены как государственные, так и негосударственные учебные заведения.

От уровня образования напрямую зависит качество трудовых ресурсов, а следовательно, и состояние экономики, промышленности, производства. Образование выступает фактором воспроизводства социально-профессиональной структуры общества. Система образования формирует гражданина, тем самым оказывает воздействие на политическую сферу общественной жизни. Образование оказывает влияние на духовную жизнь общества через культурно-воспитательную функцию государства. Формирование общей культуры — условие любой профессиональной подготовки. Оно создает условия и предпосылки для социальной мобильности человека или социальной группы, сохраняет и передает культурное достояние общества из поколения в поколение.

Проблема организации и развития образования, включая высшее, во все времена и во всех государствах была одной из приоритетных вне зависимости от их политического, экономического и религиозного устройства. Наибольших успехов в этом направлении достигла Европа, где создана и на протяжении более 800 лет успешно функционирует система университетского высшего образования. Однако концепция университетского образования при этом практически не претерпела никаких революционных изменений.

Сегодня в стране продолжают глубокие изменения в образовании, что связано с подписанием РФ Болонской декларации. При двухступенчатой системе образования студент обучается по упрощенной программе и получает диплом бакалавра. Затем желающие могут пройти дополнительный курс обучения (один-два года) и получить диплом магистра. Ранее, как известно, была принята система пятилетнего обучения, в котором последний год был посвящен научному исследованию или инженерно-технической разработке, после чего следовала защита диплома. Таков был профиль вузовской подготовки. Система переучивания бакалавра в магистра исключительно дорога, и это приводит к дополнительным затратам, иначе снижается уровень подготовленных специалистов.

Одной из важнейших проблем в России является проблема обучения в отдаленных районах Сибири и Арктики. У нас пока нет экономических условий для свободной миграции студентов и преподавателей.

Существующий низкий уровень языковой подготовки подавляющего большинства студентов и преподавателей показывает, что взаимо-

действие с университетами других стран для повышения качества образования крайне ограничено. Единое европейское и тем более мировое образовательное пространство — проблема крайне сложная, но актуальная. Это предполагает обязательную конкуренцию между университетами, что нашим вузам в большинстве случаев не под силу.

Одной из мировых тенденций в развитии современного образования является внедрение и распространение информационных технологий. Высшие учебные учреждения чаще других организаций используют в своей деятельности Интернет для связи, в том числе и со студентами, что позволяет сделать ученый процесс более динамичным. Особенно востребованными эти технологии стали в период пандемии в 2020 г. Большинство электронных средств обучения не только нацелены на формирование у обучающихся требуемых знаний, умений и навыков, но и предоставляют возможность контроля и измерения результативности обучения с использованием электронных средств обучения. Процесс создания электронных учебных пособий начался недавно, и пока он проходит неорганизованно, несмотря на крайнюю востребованность в период пандемии. Однако эта деятельность в целом также требует дополнительных ресурсов.

Современное высшее образование в стране в значительной степени обеспечивается усилиями одних вузов. Вузам приходится сегодня решать множество проблем, которые до этого за них решало государство. Большинство этих проблем требовало крупных денежных вливаний, которые и привели к высокой степени коммерциализации российского образования, что негативно сказывается на его качестве. Если финансовые поступления от государства уменьшались, то деньги надо у брать у потребителей — абитуриентов и студентов. А чтобы их привлечь, надо было сделать высшее образование более доступным. Что и произошло. Или искать и заключать хозяйственные договора, на выполнение которых отвлекаются лучшие силы и время преподавателей.

Одна из ключевых причин, тормозящих развитие образования в России — проблема квалифицированности преподавательского состава, а также его старение. В современной России наметилась негативная тенденция к снижению качества подготовки выпускников вузов. Процесс «воспроизводства» преподавателей идет медленнее темпов увеличения численности студентов.

К сожалению, заработная плата в сфере образования оставляет желать лучшего. Пожалуй, именно низкий уровень оплаты труда — это самая большая проблема современной системы образования. Пока уровень оплаты труда в этой сфере не будет доведен до приемлемого уровня, ни о каком возрождении качественного образования в России не может быть речи. Преподаватели, к сожалению, уходят в другие сферы деятельности, где заработки больше. В вузах, даже центральных, в большинстве

остались либо энтузиасты, либо люди, которым некуда податься, и это, к сожалению, реальность.

Качество образования, в том числе геокриологического, в целом снижается, что обусловлено недофинансированием вузов, недостаточным участием вузов в перспективных научных исследованиях, слабой интеграцией вузов с научными институтами и производственными предприятиями, старением и отвлечением преподавателей от основной деятельности, слабой школьной подготовкой, уменьшением мотивации студентов учиться, их невостребованностью из-за плохой организации трудоустройства и отсутствия программ работы с выпускниками.

Для геокриологов проблема усугубляется отсутствием интереса (а значит, и конкурса при поступлении) к этой области науки у студентов из центральных и южных районов страны, которые преобладают в крупных вузах, где есть такая подготовка. Так, в МГУ им. М. В. Ломоносова геологический и географический факультеты, где есть такая подготовка, имеют едва ли не самые низкие конкурсы абитуриентов среди других факультетов. При этом соответствующие кафедры также имеют наиболее низкие конкурсы уже среди поступивших на эти факультеты студентов. Молодежи из отдаленных районов Сибири и Арктики, которой геокриология могла бы быть интересна, требуется поддержка, чтобы приехать в Москву или даже Тюмень.

Таким образом, необходима поддержка как оснащения вузов оборудованием и технологиями, так и помощь студентам из северных районов, а также повышение зарплаты преподавателей, что крайне трудно обеспечить в масштабах всей страны. Студентам-геокриологам в процессе обучения требуются полевые занятия в крайне отдаленных районах и полноценная практика. В результате на подготовку геокриологов требуются дополнительные ресурсы.

Понятно, что дальнейшее развитие сферы образования в целом, в том числе и геокриологического образования, во многом зависит от позиции государства, его социальной политики, реального признания приоритетности этой сферы. Но многое может делаться и в конкретных образовательных организациях, при определенной поддержке актуальных направлений. Таким образом, без поддержки подготовки геокриологов они не будут иметь необходимой подготовки в решении сложных задач, которые ставит потепление климата и деградация вечной мерзлоты.

11.2. Опыт, цель и задачи образовательных учреждений, выпускающих геокриологов

Необходимость наличия «северной» специализации образовательных программ и дисциплин очевидна уже давно. За последние 100 лет Россия в третий раз начинает масштабное индустриальное продвижение

в Арктику, связанное в первую очередь с масштабным освоением минерально-сырьевых ресурсов Заполярья, переориентацией части мировых транспортных потоков с «южного» направления на «северное» и возрастанием роли Арктики в обеспечении жителей Северного полушария чистой питьевой водой. Российская Арктика — это не только кладовая полезных ископаемых, но и старопромышленные районы, которым требуются модернизация и инновации.



Рис. 11.1. Карта потребности в кадрах в Арктической зоне РФ (источник — Министерство образования и науки. Кадровое обеспечение для развития Арктической зоны России. <http://arctic.labourmarket.ru/prognosis>)

А самое главное нужны специалисты, которые бы умели «читать» мерзлоту, предвидели бы опасные ситуации при эксплуатации зданий, линейных сооружений, владели всеми новейшими методами геологических, геокриологических и инженерно-геокриологических исследований, включая физическое и математическое моделирование, имели навыки системного мониторинга и применения математических методов и ЭВМ при изучении мерзлых толщ.

По словам главы Минприроды А. А. Козлова, «нужно воссоздавать с нуля полноценную систему мониторинга изменений многолетней мерзлоты...», а для этого нужны высококвалифицированные специалисты.

Специалистов-геокриологов в России менее тысячи, хотя потребность в них колоссальная.

Министерством образования и науки России (2018 г.) в рамках реализации комплекса мер, направленных на обеспечение субъектов АЗРФ трудовыми ресурсами в соответствии с потребностью экономики до 2020 г., сформирован прогноз потребности экономики в кадрах (рис. 11.1).

11.3. Образовательные учреждения в РФ, выпускающие геокриологов, и опыт их работы

Сегодня подготовка специалистов-геокриологов в РФ сокращается. Фактически до 2020 г. она проводилась на следующих кафедрах:

а) кафедра геокриологии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова (существует с 1953 г.), включает 32 сотрудника, среди них — 8 докторов наук и 20 кандидатов наук. Выпускает 10–12 магистров в год (всего студентов на кафедре около 60 человек). В год осуществляется подготовка 1–2 кандидатов наук. Близкая ей кафедра — на географическом факультете МГУ — кафедра криолитологии и гляциологии. Профиль выпускаемых специалистов последней — географы-криолитоги и гляциологи, геоэкологи криосферы. Общий состав коллектива кафедры — 21 человек. Докторов наук 4, кандидатов наук 10;

б) кафедра криосферы Земли в Российском государственном геологоразведочном университете им. Серго Орджоникидзе (МГРИ) — сегодня закрыта в связи с реорганизацией и малочисленностью (преподавание мерзлотоведения ведется на кафедре инженерной геологии) [Лаухин и др., 2012; Об организации... 2013];

в) кафедра криологии Земли в Тюменском индустриальном университете, ППС — 16 человек (из них 2 ассистента), студенты: бакалавры — 20 человек (всего — 97), магистратура — 7 человек;

г) кафедра мерзлотоведения в Северо-Восточном федеральном университете — сегодня закрыта. Однако специалисты в области геокриологии сейчас продолжают готовиться на кафедре «Прикладная геология» Геологоразведочного факультета Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова (СВФУ). Квалификация выпускников — «Горный инженер-геолог». По окончании выпускники получают статус специалистов. В среднем выпускают 9 выпускников в год. Бакалавров и магистрантов не готовят.

11.4. Задачи образовательных учреждений, выпускающих геокриологов

Основными задачами подготовки являются:

а) обеспечивать подготовку высококвалифицированных выпускников и ответственных граждан, способных удовлетворять потребности в области геокриологии путем предоставления возможности получения

соответствующей квалификации, включая профессиональную подготовку, сочетающую знания и навыки высокого уровня, на основе использования курсов и учебных программ, адаптируемых к современным и будущим потребностям освоения Сибири и Арктики;

б) обеспечивать возможности для получения высшего образования, предоставляя учащимся оптимальный диапазон, наряду с возможностью для индивидуального развития и социальной мобильности, с целью воспитания в духе гражданственности и подготовки к активному участию в жизни общества;

в) продвигать, создавать и распространять знания путем исследовательской деятельности и в качестве одной из услуг, предоставляемых обществу, обеспечивать его необходимыми знаниями с целью оказания помощи в области культурного, социального и экономического развития, поощряя и развивая естественнонаучные и технологические исследования, в частности в области геокриологии;

г) помогать понимать, интерпретировать, сохранять, расширять, развивать и распространять национальные и региональные культуры народов РФ;

д) содействовать защите и укреплению общественных ценностей, обеспечивая воспитание молодежи в духе ценностей, составляющих основу гражданственности;

е) содействовать развитию и совершенствованию образования на всех уровнях, в том числе путем подготовки преподавателей.

11.5. Первоочередные практические шаги

При современных темпах развития промышленности и планах освоения северных территорий России возрастает роль эффективного использования профессиональных, высококлассных специалистов, менеджеров, управленцев и высококвалифицированных рабочих. Наметившиеся проблемы инженерного образования в России требуют безотлагательного решения.

1. Внедрение «дуальной системы образования» своевременно и необходимо. Именно этот путь образовательной системы в современных условиях нужен нашим детям и государству, так как позволяет воспитывать у подрастающего поколения инициативность, любознательность, способность к принятию самостоятельных решений, вырабатывать практические навыки. Совместная работа ученых, преподавателей, студентов и школьников направлена на повышение образовательного уровня молодежи, выработку у них навыков исследовательской и аналитической работы. В дальнейшем заинтересованные, подготовленные ребята могут продолжать свой профессиональный рост и исследовательскую работу в вузах, научно-исследовательских организациях, пополняя потенциал высококвалифицированных специалистов России.

Привлечение студентов и школьников к научной деятельности, работам и созданию геокриологических баз данных, организации и ведению системы мониторинга на настоящем этапе развития науки и образования может быть реальной перспективой развития геокриологических исследований.

2. Реализация практико-модульного обучения (ПМО) в вузах: прохождение практических занятий (обучение) осуществляется на базе производственных площадок — промышленных предприятий-партнеров. Цель ПМО — подготовка высококвалифицированного выпускника к проектно-конструкторской деятельности и их к работе на реальном предприятии. Задача — создание необходимой обучающей среды с использованием прикладных методов на площадках предприятий. Для реализации образовательной программы практико-модульного обучения привлекаются ресурсы организаций-партнеров, ведущих экономическую и производственную деятельность в Арктике.

В процессе реализации практико-модульного обучения сможем повысить востребованность выпускников, актуализируются программы подготовки под требования промышленного предприятия-партнера. Также сокращается адаптационный период при трудоустройстве выпускников на конкретные предприятия, повышается их конкурентоспособность.

3. Подготовка кадров для работы на арктических территориях выбирается из общих принципов образования, поскольку требует особого подхода, работающие в Арктике специалисты должны обладать рядом универсальных — надпрофессиональных — навыков. В учебные планы направлений и специальностей, которые предусматривают деятельность в том числе в Арктической зоне, необходимо внедрять профессиональные и специальные компетенции, дополнительные ключевые компетенции, вводить криологические аспекты в образовательные программы.

4. Необходимо разработать единый профессиональный стандарт для арктических работников.

5. Образовательные программы для арктических специалистов должны носить междисциплинарный характер.

Решение проблемы несогласованности спроса и предложения на рынке труда для предприятий арктического сектора видим в том, что образовательные программы среднего и высшего образования должны стать более гибкими и вариативными, а также максимально приближенными к реальному производству.

Вузовское образование, направленное на подготовку специалистов для арктических территорий в условиях цифровой экономики, требует ориентации на практические дисциплины, вузам следует внедрять для этого отдельные образовательные стандарты и укреплять сотрудничество с компаниями, работающими в северных широтах.

11.6. Принципы организации геокриологического образования и привлечение коренного и местного населения АЗРФ

Можно выделить следующие принципы обучения в области геокриологии, которые в значительной степени относятся и к другим специальностям.

Принцип научности. Данный принцип является традиционным, его суть состоит в том, чтобы содержание обучения в высшей школе соответствовало последним достижениям в области геокриологии, а также в области тех знаний, которые получает студент в процессе обучения.

Принцип систематичности и последовательности. Так же является традиционным принципом обучения, требует представления процесса обучения в строго установленной системе, осуществляемой последовательно, согласно разработанным учебным программам, планам, расписаниям и т.д. Изучение определенной дисциплины, согласно данному принципу, подчиняется логике конкретной науки и умственных возможностей студентов.

Принцип сознания обучения. Данный принцип основан на том, что знания невозможно передать без осознанного желания их получить. Каждый студент должен осознанно подходить к процессу обучения в высшей школе, понимать, для чего он получает образование, быть мотивированным на учебу.

Принцип активности и самостоятельности. Данный принцип обучения в высшей школе предусматривает, что каждый студент должен получать знания в результате самостоятельного умственного труда, т.е. быть активным участником учебного процесса. В рамках обучения принцип активности и самостоятельности особо актуален, так как учебная работа студентов, в отличие от школьников, во многом ориентирована на самостоятельную работу с учебными и методическими материалами.

Принцип наглядности так же является традиционным, в рамках обучения в высшей школе он приобретает несколько иной смысл. Наглядность — это не только макеты, плакаты, иллюстрации и т.д., это в первую очередь практическая работа в рамках геокриологии, осуществляемая студентами во время прохождения практики. Практическая работа организована для того, чтобы студенты могли на реальном примере посмотреть и опробовать свои знания, понять механизм работы, ее суть и тонкости. Необходимы тесные связи между вузом и предприятиями и организациями, где выпускникам предстоит работать после окончания вуза и где они могут пройти производственные практики.

Принцип связи обучения с практической деятельностью, реалиями жизни. Данный принцип связан с принципом наглядности. Во время

практической деятельности студенты понимают и осознают значимость выбранной специальности (профессии), понимают, для чего им необходимы те или иные теоретические знания, как они связаны с последующей практической деятельностью.

Принцип основательности. Данный принцип вытекает из сущности обучения в высшей школе и задач, которые ставит перед собой получение образования. Согласно принципу основательности студент должен усвоить необходимый минимум знаний, который позволит ему получить по итогу документ о пройденном обучении и присвоении квалификации (получении специальности, профессии).

Принцип единства образовательных, развивающих и воспитательных функций обучения. Суть данного принципа заключается в том, что процесс обучения в высшей школе предполагает не просто подготовку специалиста в области геокриологии, а подготовку разносторонне развитой личности.

К сожалению, вузы в регионах не в состоянии конкурировать со столичными. Не в состоянии конкурировать по качеству подготовки студентов, по квалификации преподавателей и тем более по уровню оснащения, хотя в последнее время положение несколько улучшилось благодаря активности в Тюмени акад. В. П. Мельникова — ведущего геокриолога в нашей стране. Поэтому понятен выбор многих выпускников школ в регионах. Они уезжают в столицы, где и образование лучше, и жизнь интереснее. Но им необходима поддержка, чтобы приехать, в частности лучшим из них.

Есть также проблема, что молодые люди не возвращаются туда, где родились, выросли. Регионы теряют самое ценное при этом — таланты, кадры, молодежь. Происходит это по многим причинам, одну из которых возможно устранить, наладив связь с предприятиями и организациями, где им предстоит работать после окончания вуза.

11.7. Взаимодействие с производственными организациями

Необходим механизм государственной поддержки развития кооперации высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по освоению Арктики. Его целью является устойчивое развитие кооперации высших учебных заведений, государственных научных учреждений и производственных предприятий в интересах повышения качества и востребованности результатов научно-инновационной деятельности высших учебных заведений, усиления их прикладной направленности, вовлечения преподавателей, исследователей и студентов в реальные технологические проекты с одной стороны и специалистов-практиков — в подготов-

ку выпускников с востребованными профессиональными и исследовательскими компетенциями — с другой. Это осуществляется в рамках государственно-частного партнерства и направлено на выявление имеющихся технологических задач и заделов по их решению, установление партнерств для выполнения заявленных проектов и стимулирование использования производственными предприятиями потенциала.

Для этого необходимо:

- совершенствование системы государственной поддержки развития кооперации высших учебных заведений, государственных научных учреждений, реализующих комплексные проекты по освоению Арктики, в том числе формирование постоянно действующего механизма финансовой поддержки кооперации научных и образовательных учреждений с бизнесом;
- привлечение предприятий с государственным участием, работающих по проектам по освоению Арктики, к развитию эффективно-го и устойчивого сотрудничества с вузами;
- идентификация и реализация комплексных перспективных проектов по освоению Арктики, выполняемых с использованием вузовского потенциала, а также формирование перспективного проектного заказа;
- повышение эффективности использования имеющейся инфраструктурной и научной базы, а также кадрового потенциала вузов для решения реальных задач развития Арктики;
- обеспечение подготовки инновационно-ориентированных кадров для проектов по освоению Арктики, обладающих актуальными знаниями и востребованными компетенциями;
- актуализация образовательной и научной деятельности в вузах по направлениям реализации комплексных перспективных проектов по освоению Арктики в соответствии с приоритетными направлениями развития техники и технологий.

11.8. Взаимодействие с научными учреждениями

Вузовская наука — важная часть инновационного развития России. Вовлечение научных исследований в учебный процесс является необходимым условием для поддержания необходимого профессионального уровня преподавателей, повышения квалификации будущих специалистов и формирования профессиональных компетенций. К сожалению, следует констатировать, что сегодня научные исследования в вузах сокращаются. Кроме того, ухудшилось качество научного продукта в вузах. Это может привести к утрате передовых позиций России в науке. Среди объективных причин такого положения важно отметить низкий уровень финансирования науки и возможность получения неплохих до-

ходов от образовательной деятельности. В условиях рыночных отношений развивать науку в вузах просто невыгодно, а следовательно, нет мотивации. Невысокая мотивация и со стороны студентов, крайне сложно их привлечь для разработки научных проектов и проведения научных исследований. Это требует значительных усилий с их стороны. Тем не менее должны быть созданы все необходимые условия для развития вузовской науки и особое внимание следует обратить на подготовку студентов к научной деятельности. Необходимо эффективно использовать преимущества болонского процесса, к которым можно отнести расширение форм контроля знаний студентов (в том числе полученных при самостоятельной подготовке) и проведения учебных занятий, оценку знаний студентов, высокий уровень информационной доступности за счет внедрения информационных технологий в образовании. Важно отметить, что при рассмотрении вопросов перехода на трехуровневую систему обучения речь идет преимущественно об организации учебного процесса, обеспечении качества образования и практически не уделяется внимания вузовской науке в этой системе.

Вузовская наука, с одной стороны, способствует формированию необходимых компетенций выпускника, с другой — соответствует требованиям рынка по обеспечению инновационного развития.

Известно, что в условиях перехода на болонский процесс академический статус студента определяется не общим временем освоения образовательной программы, а количеством зачетных единиц и средним баллом, полученным на данном этапе обучения. Использование зачетных единиц в качестве меры обученности каждого студента и установления его академического статуса позволяет индивидуализировать обучение, отойти от обязательной привязки занятий в рамках учебной группы, развивать научное мышление, учитывать вклад студента в развитие вузовской науки.

Должны быть созданы условия для максимального приближения программ текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся к условиям их будущей профессиональной деятельности и создания мотивации в исследовательской деятельности. Для чего, кроме преподавателей конкретной дисциплины, в качестве внешних экспертов должны активно привлекаться работодатели. В соответствии с требованиями госстандарта третьего поколения их удельный вес должен составлять не менее 5% от профессорско-преподавательского состава (ППС). До 10% от общего числа преподавателей, имеющих ученую степень и/или ученое звание, может быть заменено преподавателями, имеющими стаж практической работы по данному направлению на должностях руководителей или ведущих специалистов более 10 последних лет. В рамках учебных курсов должны быть предусмотрены встречи

с представителями российских и зарубежных компаний, государственных и общественных организаций, мастер-классы экспертов и специалистов. Это создаст благоприятные условия для активного сотрудничества вузовской науки с бизнесом, позволит полнее использовать возможности частно-государственного партнерства (так называемые технологические платформы), предлагать и реализовывать свои разработки в рамках программ инновационного развития компаний с государственным участием, увеличит число заключаемых договоров на хозяйственные работы, выполнение научных разработок, адекватных современным условиям реальной экономики.

Безусловно, нельзя развивать вузовскую науку без финансирования и повышения статуса ученого и преподавателя, а значит, необходимы дополнительные ресурсы и для этой сферы подготовки специалистов-геокриологов.

11.9. Курсы повышения квалификации

Курсы повышения квалификации для геокриологов обеспечивают важное преимущество. Во-первых, такие курсы являются залогом повышения конкурентоспособности на рынке труда, что в условиях рыночной экономики приобретает определяющее значение. Во-вторых, курсы повышения квалификации обеспечат теми необходимыми знаниями, которые помогут утвердиться в профессии в качестве профессионала. В-третьих, приобретенные знания и навыки позволят значительно расширить сферу контактов и выгодного межличностного общения. Для негеокриологов курсы повышения квалификации обеспечат необходимый круг знаний об условиях окружающей северной природной среды и ее взаимодействии с человеческой деятельностью, который позволит избежать многих ошибок в работе по основной профессии.

Исходя из того, что курсы повышения квалификации для геокриологов должны принести максимальную пользу и выгоду, имеет смысл разделить всех потенциальных слушателей на несколько категорий. Итак, во-первых, курсы ценны и интересны людям, начинающим свою карьеру и желающим добиться в ней хороших результатов. Ведь программа курсов предусматривает обращение к базовым знаниям и умениям как в области теории предмета, так и в области практического применения. Во-вторых, курсы повышения квалификации для геокриологов неоспоримо полезны уже состоявшимся специалистам, желающим повысить свою квалификацию посредством получения новых знаний и переоценки прежних. Также курсы повышения квалификации для геокриологов — прекрасный способ поддерживать свой уровень квалификации.

При успешном окончании курсов слушатель получает сертификат, подтверждающий его профессиональную состоятельность, что открыва-

ет для обладателя сертификата дополнительные возможности, способствующие карьерному росту: повышение заработной платы, а также такие преимущества, как конкурентоспособность, расширение сферы деятельности и т.д. Еще одной важной особенностью является то, что курсы повышения квалификации для геокриологов дают возможность корпоративного обучения сотрудников, на что, в первую очередь, должны обратить внимание работодатели. Это уникальный шанс получить гарантию того, что квалификация подчиненных будет полностью соответствовать нормам российского законодательства и изменяться к лучшему в той же динамике. Это обеспечит компании весьма ощутимые преимущества: начиная от улучшения качества услуг, заканчивая доверием клиентов и конкурентоспособностью организации.

Такие курсы вполне могут быть организованы на базе МГУ, Тюменского индустриального университета (с участием Института криосферы Земли СО РАН) и Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова в Якутске. В этом случае будет обеспечиваться:

- высокая эффективность курсов;
- широкий охват материала в сравнительно короткие сроки;
- изучение новейших компьютерных программ;
- работа с массивом нормативно-правовых актов как внутригосударственного, так и международного характера;
- высококвалифицированные преподаватели;
- современные методики обучения.

Подтверждением является качественная подготовка специалистов и научные исследования в области геокриологии, осуществляемые этими учреждениями в течение многих лет. Эти курсы могут быть организованы таким образом, что каждый специалист может выбрать для себя самый подходящий вариант обучения.

11.10. Экономические показатели поддержки геокриологического образования

Поддержка геокриологического образования в стране должна быть основана изначально на оценке эффективности деятельности вуза, которую можно разделить на несколько основных направлений.

1. Аккредитационная и лицензионная экспертиза. Предполагает получение разрешения на право ведения образовательной деятельности, установление статуса вуза (типа, вида, категории), подтверждение уровня реализуемых образовательных программ и их направленности, оценка соответствия образовательных программ и выпускников требованиям государственных стандартов. Суть методологии состоит в документальной экспертизе в сочетании с экспертной оценкой.

2. Оценка качества образовательного процесса и выпускников. Предполагает оценку возможностей и результатов деятельности (подготовки специалиста с высшим образованием) с точки зрения соответствия ожиданиям потребителя. Суть методологии состоит в проведении исследования и измерении мощности управленческого потенциала вуза, оценки эффективности системы управления, в том числе проведение «самооценки». Примерами методик могут выступать, например, модель премии конкурса Министерства образования РФ «Внутривузовские системы обеспечения качества подготовки специалистов».

3. Оценка эффективности бюджетных расходов на образование. Предполагает оценку степени «целевого» расходования средств бюджета и полноты исполнения сметы расходов. Суть методологии состоит в анализе степени достижения стратегических целей, решения задач в рамках уровня бюджетных расходов, анализе степени соответствия фактических расходов запланированному уровню, анализе отклонений показателей результатов деятельности от плановых показателей за год. Примером методик может выступать финансовая отчетность вуза.

4. Оценка эффективности хозяйственной, предпринимательской, управленческой деятельности вузов.

5. Рейтингование высших учебных заведений. Целью оценки является оценка конкурентоспособности вуза.

При положительной в целом оценке экономической эффективности возможна поддержка вуза (подразделения), ведущего подготовку геокриологов. В качестве минимальных экономических показателей могут выступать следующие: 1) доведение заработной платы преподавателей до 1,5 средней в данном регионе, что, например, для одного образовательного подразделения (кафедры) составит около 25 млн руб. в год; 2) обеспечение практик студентов, главным образом проезда и проживания, в Арктике, что для одного образовательного подразделения (кафедры) составит 5 млн руб. в год; 3) ежегодные расходы на научное оборудование, для одного образовательного подразделения (кафедры) — 3 млн руб. в год; 4) дополнительные стипендии студентам в расчете на 15 тыс. руб. в месяц, или 10 млн руб. в год, для одного образовательного подразделения (кафедры); 5) помощь в оплате проезда к месту постоянного проживания студентам, одна поездка в год, около 40 тыс. руб. для одного студента, или 2 млн руб. в год. Общие расходы, при условии доведения в стране числа кафедр до четырех, составят 180 млн руб. в год, или 45 млн руб. в год для одного образовательного подразделения (кафедры).

Заключение

Постепенное потепление, которое наблюдается практически во всех арктических регионах земного шара, за период с середины-конца 80-х гг. прошлого столетия привело к заметным изменениям теплового состояния толщи многолетнемерзлых пород (ММП): повышению среднегодовой температуры в зонах сплошного распространения ММП и частичному их оттаиванию с поверхности в регионах прерывистого и островного распространения. На европейской территории России потепление обусловило переход ММП в неустойчивое тепловое состояние с формированием среднегодовой температуры на глубине годовых теплооборотов в диапазоне $-0,2...-1$ °С. В арктических регионах, южной тундре и лесотундре Западной и Восточной Сибири температура повысилась на $1,5-2$ °С. Изменение температурного режима ММП сопровождается активизацией мерзлотных процессов, таких как термокараст, термоэрозия, термоабразия и солифлюкция.

Данные исследований свидетельствуют о том, что в ближайшее десятилетие следует ожидать сохранения современных региональных темпов повышения температуры мерзлых толщ в диапазоне от $0,05$ °С/год до $0,08$ °С/год, что уже приводит к кардинальным изменениям в подходах хозяйствующих субъектов в криолитозоне к вопросам мониторинга и стабилизации мерзлоты.

Совместное влияние потепления климата и крупномасштабных техногенных воздействий на мерзлоту обуславливает эффект, последствия которого уже в настоящее время приводят к потере устойчивости мерзлых оснований, крупным авариям природно-технических систем, экологическим катастрофам и в целом к возрастанию риска природопользования в осваиваемых районах криолитозоны. За последние 30–35 лет температура верхней части разреза ММП в регионах интенсивного освоения месторождений углеводородов на севере Западной Сибири повысились на $2-4$ °С.

Промышленные предприятия, жилые здания и социальная инфраструктура в Арктике испытывают на себе влияние изменяющегося состояния мерзлоты, что требует не только учета текущих условий, но и прогноза изменения состояния ММП в границах средне- и долгосрочной перспективы, однако выполнить такие работы в настоящее время в силу отсутствия необходимой информации не представляется возможным.

В результате потепления несущая способность мерзлых грунтов основания сооружений, в частности, в Западной Сибири снизилась в отдельных случаях на 30%, причем пояс максимального снижения несущей спо-

способности проходит примерно по линии Салехард—Надым—Новый Уренгой—Норильск. Все эксплуатируемые промышленные и гражданские объекты, планируемые к реализации и реализуемые инвестиционные проекты в данном районе находятся в условиях высокого риска из-за значительного снижения запаса несущей способности фундаментов построенных объектов по грунту и недостаточного учета современных тенденций в изменении мерзлоты при проектировании.

В Восточной Сибири также ведется активное промышленное освоение Арктической зоны. Предприятия ПАО «НК «Роснефть»» осуществляют строительство новых магистральных нефтепроводов и портовой инфраструктуры в рамках проекта «Восток Ойл» на полуострове Таймыр. ООО «Северная Звезда» приступило к реализации крупнейшего проекта по добыче коксующихся углей на Сырадасайском месторождении в Таймырском угольном бассейне. Новые территории в районе Норильска осваивает ПАО «ГМК «Норильский никель»», развиваются и другие проекты. Основными участниками процессов промышленного освоения Арктики в зоне наиболее неустойчивых многолетнемерзлых грунтов в разрезе климатических изменений являются компании ПАО «Газпром», ПАО «НК «Роснефть»», ГК «Росатом», ПАО «Транснефть», ПАО «ГМК «Норильский никель», ПАО «Газпром нефть», ПАО «Лукойл» и другие предприятия топливно-энергетического комплекса страны.

На ряде промышленных и транспортных объектов, расположенных в криолитозоне, созданы и функционируют системы геотехнического мониторинга (ГТМ), в состав которых входят наблюдения за температурой пород, уровнем грунтовых вод и деформациями на объектах техногенеза («Газпром» — более 12 000 температурных скважин, «Транснефть» — около 7000). Режимная сеть охватывает, к сожалению, главным образом лишь зоны непосредственного воздействия инженерных объектов на ММП. Системы ГТМ компаний позволяют в определенной мере решать оперативные задачи обеспечения устойчивости промышленных зданий и сооружений и снизить уровень аварийности промышленных объектов и транспортных коммуникаций, но не позволяют достичь показателей безаварийной работы, сравнимых с эксплуатацией объектов в средней полосе и на юге страны, где нет вечной мерзлоты.

Главным общим недостатком существующей системы ГТМ на всех объектах нефтегазовой отрасли является отсутствие в составе режимной сети ГТМ фоновых площадок для контроля температурного режима ММП, динамики развития экзогенных процессов, гидрологического и гидрогеологического режимов территории, влияния напочвенных покровов и других важных показателей состояния геосистем криолитозоны в природных, ненарушенных условиях, необходимых для выполнения прогноза состояния вечной мерзлоты. Выполнение таких работ

в составе ведомственных систем ГТМ не предусмотрено. Отсутствие рядов наблюдений за геокриологическими характеристиками до начала строительства также ограничивает возможности анализа получаемой мониторинговой информации и оценки вклада техногенеза в общую временную изменчивость условий.

Фоновый мониторинг в природных условиях в Российской Федерации проводится отдельными учреждениями на ограниченном количестве наблюдательных площадок. Длина рядов наблюдений достигает 40–50 лет, но общий объем наблюдений для составления прогноза недостаточен для конкретных промышленных площадок и муниципальных образований. Имеющаяся в стране разреженная сеть фонового мониторинга характеризует региональные тренды, но не способна обеспечить необходимую детальность текущей, а тем более прогнозной геокриологической информации для промышленных и транспортных предприятий.

Ограниченное число наблюдательных пунктов существующего мониторинга, неудовлетворительное финансирование мониторинговых работ в Арктике, как и во всей криолитозоне России, отсутствие единых требований к методике работ (включая глубинность наблюдений), технологиям, техническим средствам, отсутствие обмена данными между компаниями и профильными научно-исследовательскими институтами, а также ведомственный подход к решению научных и практических задач значительно ослабляют эффективную значимость современных мониторинговых исследований.

Авторами данной работы впервые количественно оценен экономический ущерб от потери несущей способности грунтов оснований уже существующих зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения муниципалитетов, который к середине века может составить около 10 трлн руб. только для Арктической зоны Российской Федерации. При сохранении существующих технологий для нового строительства экономический ущерб в рамках планируемых инвестиций может возрасти кратно.

Концепция мониторинга мерзлоты, разработанная Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) Минприроды России, не позволяет в полном объеме решить задачи, сформулированные в п. 1в Перечня поручений по итогам пленарного заседания ВЭФ № Пр-1971, утвержденного Президентом Российской Федерации 3 сентября 2021 г. Научные и практические недостатки текущего подхода заключаются по крайней мере в следующем: а) площадки метеостанций и их ближайшие окрестности в большинстве не являются репрезентативными для постановки геокриологических исследований, недостаточно изучены в геологическом отношении и не

имеют привязки к районам текущей хозяйственной деятельности; б) мозаичность мерзлотных условий на прилегающих территориях требует обустройства нескольких наблюдательных скважин; в) для определения подошвы мерзлой толщи и ее динамики необходимы дополнительные глубокие скважины; г) состав наблюдаемых параметров не является исчерпывающим для геокриологического прогноза. Кроме того, программа Минприроды России не предусматривает изучение и мониторинг опасных мерзлотных процессов, разработку геокриологических прогнозов и составление карт геокриологического содержания. Ключевой момент заключается в том, что программой Росгидромета не предусмотрена связь с геотехническим мониторингом, наиболее развитой составляющей мониторинга мерзлоты в России в настоящий момент.

Представляется, что кардинально изменить сложившуюся неблагоприятную ситуацию в криолитозоне, обусловленную современной деградацией многолетнемерзлых пород, возможно путем реализации специальной федеральной программы экстренного регионального доизучения состояния вечной мерзлоты и создания новой системы ее мониторинга.

Снижение рисков капитального строительства в криолитозоне в условиях глобального изменения климата может быть достигнуто исключительно на основе систематического изучения динамики геокриологических условий ненарушенных территорий и участков застройки, и адекватного отражения результатов этих исследований в нормативно-методических документах федерального, регионального и корпоративного уровней, регламентирующих проектирование, строительство и эксплуатацию оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах.

Концепция государственного межведомственного фонового и геотехнического мониторинга вечной мерзлоты АЗРФ

В работе впервые в полном объеме представлено обоснование Концепции государственного межведомственного фонового и геотехнического мониторинга вечной мерзлоты АЗРФ (Концепция) в качестве пилонерного проекта, с последующей разработкой Программы «Вечная мерзлота России» для всей территории криолитозоны страны.

Определены структура и формирование пространственно-распределенной наблюдательной сети мониторинга на основе создания системы геокриологических полигонов, стационаров, мерзлотных станций, охватывающих естественные условия распространения ММП и площади крупных городских и муниципальных образований, на территории опорных зон опережающего экономического развития арктических регионов, а также с учетом климатического и геокриологического районирования криолитозоны Арктики. Фоновые наблюдения, во взаимосвязи

с результатами геотехнического мониторинга, позволят на единой методической основе получать исходную информацию для разработки региональных геокриологических прогнозов как для естественной, так и для измененной техногенезом мерзлотной обстановки.

Синергия единого методического подхода (включая технические средства наблюдений, создание объединенных баз и банков данных) в изучении и мониторинге состояния вечной мерзлоты в естественных условиях и на застроенной территории радикальным образом повысит эффективность исследований, выполняемых в настоящее время отдельно научно-исследовательскими организациями и хозяйствующими субъектами.

Согласно представленной Концепции, мониторинговая информация от всех источников изначально концентрируется в региональных аналитических центрах, а после ее обработки частично передается в **Федеральный центр**. Учитывая исключительную сложность неблагоприятной ситуации в криолитозоне, общее методическое руководство, финансирование и координацию работ государственной системы межведомственного мониторинга вечной мерзлоты РФ должно осуществлять новое **федеральное агентство при Правительстве РФ**, без создания которого все планы перспективного экономического развития арктических регионов, на наш взгляд, окажутся невыполнимыми.

В кратчайшие сроки необходимо разработать научно обоснованные стандарты мониторинга, прежде всего геотехнического, разработать и принять закон о геотехническом мониторинге и приступить к поэтапному внедрению мониторинга в регионах с наличием мерзлотных грунтов. Дорожная карта создания государственной межведомственной системы мониторинга вечной мерзлоты на первоначальном этапе может включать в себя пилотные проекты в тех регионах, где развит геотехнический мониторинг и имеется опыт проведения фонового мониторинга.

Для создания системы межведомственного мониторинга вечной мерзлоты предполагается поэтапная организация 15 геокриологических полигонов, стационаров и мерзлотных станций территории АЗРФ. Региональные аналитические центры мониторинга предположительно следует разместить в Архангельске (Сыктывкаре), Воркуте, Салехарде, Норильске, Якутске, Магадане (Анадыре). Федеральный аналитический центр мониторинга, очевидно, должен создаваться в Москве. По подсчетам, на развертывание этой системы мониторинга в масштабах АЗРФ требуется не менее 15 млрд руб., а на ежегодное обеспечение ее функционирования — около 6 млрд руб.

Система государственного мониторинга вечной мерзлоты при надлежащем ее исполнении может существенно снизить, а в ряде случаев

полностью исключить риски освоения криолитозоны Арктики в границах средне- и долгосрочной перспективы.

Для поступательного развития экономики России, 65% территории которой находится в криолитозоне, в том числе для обеспечения непрерывной хозяйственной деятельности основных промышленных предприятий России, необходимо разработать отдельный федеральный закон, обеспечивающий научно обоснованный подход к новому этапу промышленного освоения Арктики и криолитозоны в целом в рамках долгосрочной перспективы.

В поддержку этого вывода можно рассматривать решение профильных комитетов ГД о подготовке в 2024 г. проекта федерального закона «О регулировании хозяйственной и иной деятельности в области вечной мерзлоты», в котором «предполагается определить полномочия органов государственной власти в области мониторинга, в том числе геотехнического, и охраны мерзлоты, формы взаимодействия с организациями, выполняющими задачи мониторинга, надзора (лицензирование мониторинговой деятельности, определение ответственных научных организаций, структур исполнительной власти и т.п.)».

Список использованных источников

- Arcone S. A., Lawson D. E., Delaney A. J., Strasser J. C., Strasser J. D.* Ground-penetrating radar reflection profiling of groundwater and bedrock in an area of discontinuous permafrost // *Geophysics*. Vol. 63. № 5 (September–October 1998). P. 1573–1584.
- Burke M., Hsiang S. M., Miguel E.* Global non-linear effect of temperature on economic production // *Nature*. 2015. 527:235.
- De Pascale G. P., Pollard W. H., Williams K. K.* Geophysical mapping of ground ice using a combination of capacitive coupled resistivity and ground-penetrating radar, Northwest Territories, Canada // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003–2012). Vol. 113, Is. F2. June 2008. P. 1–15.
- Euskirchen E., Goodstein E., Huntington H.* An estimated cost of lost climate regulation services caused by thawing of the Arctic cryosphere // *Ecological Applications*. 2013. 23. P. 1869–1880.
- Feng Wenjie, Wen Zhi, Sun Zhizhong, Wu Junjie.* Application and Effect Analysis of Awning Measure on Cold Regions // *Proceeding of the Eighth International Symposium on Permafrost Engineering*. 15–17 October, 2009. Xi'an, China, 2009. P. 148–160.
- Lantuit H., Overduin P., Streletskaia I., et al.* The ACD coastal database. A new classification scheme and statistics on arctic permafrost coastlines // *Estuaries and Coasts*. 2012. 35. P. 383–400. DOI: 10.1007/s12237-010-9362-6.
- Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., et al.* Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // *Nature communications*. 2018. Vol. 9(1). P. 5147. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4>.
- Hope C., Schaefer K.* Economic impacts of carbon dioxide and methane released from thawing permafrost // *Nature Climate Change*. 2016. Vol. 6. № 1. P. 56–59. DOI: 10.1038/nclimate2807.
- IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team / Ed. by H. Lee, J. Romero]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- IPCC. *Climate change 2014: Synthesis report. Fifth Assessment Report*. Geneva, 2014.
- Khomutov A., et al.* Microrelief associated with gas emission craters: Remote-sensing and field-based study // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. Is. 5. DOI: 10.3390/rs10050677.
- Leibman M. O., Kizyakov A. I., Plekhanov A. V., Streletskaia I. D.* New permafrost feature — deep crater in Central Yamal, West Siberia, Russia, as a response to local climate fluctuations // *Geography, environment, sustainability*. 2014. Vol. 7(4). P. 68–80.
- Makino K.-I., Miura H.* Location of Mammoth Remains in Perma-Frost of Northern Siberia Using GPR and Multifrequency Em // *18th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. Extended abstract. 2005.

- Malakhova V. V., Eliseev A. V.* Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments // *Global and Planetary Change*. 2020. 192. 103249. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103249.
- Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Y., Nikitin K., Orekhov P., Ponomareva O., Romanovsky V., Sadurtdinov M., Shein A., Skvortsov A., Sudakova M., Tsarev A.* Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic // *Energies*. 2022. Vol. 15. № 7. Art. 2311. DOI: 10.3390/en15072311.
- Melnikov V., Gennadinik V., Kulmala M., et al.* Cryosphere: a Kingdom of Anomalies and Diversity // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 18. Is. 9. P. 6535–6542. DOI: 10.5194/acp-18-6535-2018.
- Melnikov V., Gennadinik V.* Cryodiversity: the World of Cold on the Earth and in the Solar System // *Cryodiversity: the World of Cold on the Earth and in the Solar System. Philosophy and Cosmology*. 2018. Vol. 20. P. 43–54. DOI: 10.29202/phil-cosm/20/4.
- Melnikov V., Osipov V., Brouchkov A., Zhdaneev O., Frolov K.* Past and Future of Permafrost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure // *Energies*. 2022. 15(9). 3190. <https://doi.org/10.3390/en15093190>.
- Melnikov V. P., Skvortsov A. G., Malkova G. V., Drozdov D. S., Ponomareva O. E., Sadurtdinov M. R., Tsarev A. M., Dubrovin V. A.* Seismic studies of frozen ground in Arctic areas // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. № 51. P. 136–142.
- Melvin A. M., Larsen P., Boehlert B., Neumann J. E., Chinowsky P., et al.* Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation // *Proc. of the National Academy of Sciences*. 2017. 114. E122–E131.
- Overduin P. P., Schneider von Deimling T., Miesner F., Grigoriev M. N., Ruppel C., Vasiliev A., Lantuit H., Juhls B., Westermann S.* Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP) // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. 124. 6. P. 3490–3507. DOI: 10.1029/2018JC014675.
- Portnov A., Smith A. J., Mienert J., Cherkashov G., Rekant P., Semenov P., Serov P., Vanshtein B.* Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20m at the South Kara Sea shelf // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40. P. 1–6. DOI: 10.1002/grl.50735.
- Solomon S. M., Taylor A. E., Stevens Ch. W.* Nearshore ground temperatures, seasonal ice bonding, and permafrost formation within the bottom-fast ice zone, Mackenzie Delta, NWT // *Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Permafrost (Fairbanks, June 29 – July 3, 2008)*. Fairbanks, Instit. Northern Eng., Univ. Alaska. 2008. Vol. 2. P. 1675–1680.
- Streletskiy D. A., Shiklomanov N. I., Nelson F. E.* Permafrost, infrastructure and climate change: a GISbased landscape approach to geotechnical modeling // *Arctic, Antarctic, Alpine Res.* 2012. Vol. 44. P. 368–380.
- Streletskiy D. A., Suter L., Shiklomanov N. I., Porfiriev B. N., Eliseev D. O.* Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // *Environ. Res. Lett.* 2019. Vol. 14. № 025003. P. 1–15.

- Sudakova M., Sadurtdinov M., Skvortsov A., Tsarev A., Malkova G., Molokitina N., Romanovsky V.* Using Ground Penetrating Radar for Permafrost Monitoring from 2015–2017 at CALM Sites in the Pechora River Delta // *Remote Sens.* 2021, 13, 3271. <https://doi.org/10.3390/rs13163271>.
- The link between precipitation and recent outbreak of anthrax in North-West Siberia / E. Ezhova, D. Orlov, E. Suhonen, D. Kaverin, A. Mahura, V. Genadinik, I. Kukkonen, D. Drozdov, H. Lappalainen, V. Melnikov, T. Petäjä, V.-M. Kerminen, S. Zilitinkevich, S. Malkhazova, T. Christensen, M. Kulmala // Международная конференция (Конгресс): European Geosciences Union General Assembly 2020. Вена, 3–8 мая 2020 г.
- Yumashev D., Hope C., Schaefer K., et al.* Climate policy implications of nonlinear decline of Arctic land permafrost and other cryosphere elements // *Nat Commun.* 10, 1900 (2019).
- Zarling J. P., Breley A. W.* Thaw stabilization of roadway embankments constructed over permafrost. Report NO FHWA-AK-RD-81-20, 1986.
- Адаптация методики геокриологической съемки для государственного комплексного гидрогеологического и инженерно-геологического картирования масштаба 1:1 000 000 / Д. С. Дроздов, Г. В. Малкова, Ю. В. Коростелев, Д. В. Сироткин, Е. И. Пижанкова, А. А. Попова, Е. В. Устинова // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата: Труды Всерос. конф., Якутск, Россия, 22–24 марта 2023 г. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2023. С. 19–22.
- Алексеев А. Г.* Геотехнический мониторинг морозного пучения грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 4. С. 43–47.
- Алексеев А. Г.* Геотехнический мониторинг на многолетнемерзлых грунтах. М.: Изд-во АСВ, 2019. 111 с.
- Алексеев А. Г., Зорин Д. В.* Прогнозирование температурного состояния мерзлых грунтов в связи с изменением климата // Вестник НИЦ Строительство. 2019. № 4 (23). С. 44–49.
- Арз Ф. Э.* Термообразия морских берегов. М.: Наука, 1980. 159 с.
- Балков Е. В., Панин Г. Л., Маништейн Ю. А., Маништейн А. К., Белобородов В. А.* Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. 2012. № 6. С. 54–63.
- Бердников Н. М., Малкова Г. В., Дроздов Д. С., Коростелев Ю. В., Гравис А. Г., Пономарева О. Е.* Динамическая карта температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в период 1960–2100 годов // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне», МГУ им. М. В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г.: сборник статей [электронное издание сетевого распространения] / Под редакцией Р. Г. Мотенко. — М.: «КДУ», «Добросвет», 2022, с. 515–519. URL: <https://bookonlime.ru/node/44945> Бобачев А. А., Яковлев А. Г. Аппаратно-методические комплексы для геофизических исследований по методике электротомографии // Нефть. Газ. Новации. 2012. № 2.
- Бердников Н. М.* Картографическая визуализация ожидаемого изменения южной границы области распространения многолетнемерзлых пород в Западной Сибири // Криосфера Земли, 2024 (в печати).

- Болховский В. Ф., Кюнцель В. В. Развитие оползней в многолетнемерзлых породах тундры Западной Сибири // Инженерная геология. 1990. № 1. С. 65–70.
- Бондарик Г. К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981. 256 с.
- Васильев А. А., Облогов Г. Е., Стрелецкая И. Д., Федин В. А., Широков Р. С., Задорожная Н. А. Температурный режим верхнего горизонта многолетнемерзлых пород в переходной области от суши к морю на примере Западного Ямала // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 4. С. 34–42.
- Васильев А. А., Стрелецкая И. Д., Широков Р. С., Облогов Г. Е. Динамика морских берегов Западного Ямала // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 4. С. 69–72.
- Васильев В. И., Сидняев Н. И., Федотов А. А., Ильина Ю. С., Васильева М. В., Степанов С. П. Моделирование распределения нестационарных температурных полей в криолитозоне при проектировании геотехнических сооружений. М.: КУРС, 2017. 624 с.
- Васильев И. С., Федоров А. Н., Константинов П. Я. Опыт использования ландшафтного метода при оценке мощности сезонно-талого слоя (на примере Виллюйского плато) // География и природные ресурсы. 1989. № 1. С. 162–166.
- Великин С. А. Особенности геофизического мониторинга ГТС в криолитозоне // Наука и образование. 2012. № 4. С. 29–34.
- Великин С. А., Бажин К. И., Марченко Ю. Л. Оценка инженерно-геокриологического состояния вмещающих горных пород карьеров горнодобывающих предприятий в криолитозоне геофизическими методами // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции. Тюмень: Эпоха, 2015. С. 46–49.
- Великин С. А., Демура Г. В. Основные принципы автоматизированного геофизического мониторинга // Геофизика. 2010. № 3. С. 8–25.
- Веницианов Е. Экологический мониторинг: шаг за шагом / Под ред. Е. Заика. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2003.
- Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ, 2004.
- Вопросы технической политики отраслей ТЭК Российской Федерации / Под ред. О. В. Жданеева. М.: Наука, 2020. 304 с. DOI: 10.7868/9785020408241.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Г. В. Алексеев и др. М.: Росгидромет, 2014. 1007 с. ISBN 978-5-9631-0322-7.
- Гарагуля Л. С., Гордеева Г. И., Полтев Н. Ф., Смирнов В. В. Развитие инженерно-геокриологических процессов при строительстве газопроводов в области распространения многолетнемерзлых пород // Мерзлотные исследования. М.: Изд-во МГУ, 1970. Вып. X. С. 19–26.
- Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000 / Мингео СССР, Гидроспецгеология, МГУ; Под ред. Э. Д. Ершова. М.: ГУГК, 1991. На 16 листах.
- Геокриологические условия Харасовэйского и Крузенштерновского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал) / В. В. Баулин, Г. И. Дубиков, В. И. Аксенов и др. М.: ГЕОС, 2003. 180 с.

- Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э. Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 515 с.
- Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Э. Д. Ершова. М.: Недра, 1988. Т. 1. 358 с.
- Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э. Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 456 с.
- Геофизика: Учеб. пособие, электронное издание сетевого распространения / Под ред. В. К. Хмелевского. М.: КДУ, Добросвет, 2018.
- Гордеев П. П., Самсонов А. А. НТО Инженерно-геокриологические условия прокладки проектируемого газопровода от Ботуобинских месторождений до г. Мирного для ТЭО (по работам 1980 г.). Якутск: Фонды ИМЗ СО РАН, 1980. 48 с.
- Горяинов Н. Н., Боголюбов А. Н., Варламов Н. М., Матвеев В. С., Никитин В. Н., Скворцов А. Г. Изучение оползней геофизическими методами. М.: Недра, 1987.
- ГОСТ 24846-2012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений.
- ГОСТ 25358-2012. Грунты. Метод полевого определения температуры (Переиздание).
- Гречищев С. Е., Чистотинов Л. В., Шур Ю. Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980. 383 с.
- Григорьев М. Н. Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Якутск, 2008. 41 с.
- Григорьев М. Н., Максимов Г. Т. Оценка темпов разрушения арктических берегов, объемов терригенного материала и органического углерода, поступающего в арктический бассейн // Тезисы докладов всероссийской научной конференции «Взаимодействие элементов природной среды в высокоширотных условиях», г. Сочи, 25–28 сентября 2019 года. М.: Изд-во ИГ РАН, 2019.
- Григорьев М. Н., Разумов С. О., Куницкий В. В., Спектор В. Б. Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 4. С. 74–94.
- Дроздов Д. С. Иерархия природных и техногенных геологических тел и геосистем // XIV Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле». Москва, МГРИ, 2–5 апреля 2019 г. Т. III. Развитие новых идей и тенденций в науках о Земле — гидрогеология и инженерная геология, геоэкология. М.: МГРИ, 2019. С. 107–110.
- Дроздов Д. С. Информационно-картографическое моделирование природно-техногенных сред в геокриологии: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Тюмень, 2004. 49 с.
- Дроздов Д. С. Программы математического обеспечения для работы с базой данных, инженерно-геологические условия // Геокриологический прогноз в осваиваемых районах Крайнего Севера. М.: ВСЕГИНГЕО, 1982. С. 67–68.
- Дроздов Д. С., Васильев А. А., Малкова Г. В., Москаленко Н. Г., Орехов П. Т., Украинцева Н. Г. Изменение температуры многолетнемерзлых пород за-

- падного сектора Российской Арктики в связи с изменениями климата // Полярная криосфера и воды суши / Под ред. В. М. Котлякова. М.; СПб.: Paulsen Editions, 2011. С. 153–170.
- Дроздов Д. С., Коростелев Ю. В., Ананьева (Малкова) Г. В.* Эколого-геокриологическое районирование территории Бованенковского месторождения по особенностям природных условий // Материалы Второй конференции геокриологов России. Т. 4. Инженерная геокриология. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 84–91.
- Дроздов Д. С., Коростелев Ю. В., Ананьева Г. В.* Комплект цифровых карт как часть системы мониторинга Бованенковского месторождения (п-в Ямал) // Мониторинг криосферы. Пушино, 1999. С. 200–202.
- Дроздов Д. С., Коростелев Ю. В., Малкова Г. В., Крестин Б. М., Сироткин Д. В., Пижанкова Е. И., Попова А. А.* Создание карты геокриологических условий в составе ГИС-пакета инженерно-геологических карт листов Q-41, Q-42, R-42, R-43 масштаба 1:1 000 000 // Материалы VI Всероссийской конференции «Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности ITES-2022». Владивосток, 3–8 октября 2022 г. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2022. С. 33–35.
- Дроздов Д. С., Малкова Г. В., Украинцева Н. Г., Коростелев Ю. В.* Мониторинг геокриологических условий южнотундровых ландшафтов Европейского Севера и Западной Сибири // 10-я Международная конференция по мерзлотоведению, ТИСОР: Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Салехард, 2012. Т. 3. С. 159–164.
- Дубиков Г. И., Аксенов В. И., Корейша М. М., Мурзаева В. Э., Познанин В. Л., Ривкин Ф. М.* Геокриологический словарь. М.: ГЕОС, 2003. 103 с.
- Дубровин В. А., Брушков А. В., Дроздов Д. С., Железняк М. Н.* Изученность, современное состояние, перспективы и проблемы освоения криолитозоны Арктики // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2019. № 3. С. 55–64.
- Дубровин В. А.* Система геоэкологического обеспечения недропользования осваиваемых арктических регионов криолитозоны // Разведка и охрана недр. 2003. № 7. С. 15–20.
- Дубровин В. А., Крицук Л. Н., Полякова Е. И.* Температура, состав и возраст отложений шельфа Карского моря в районе геокриологического стационара Марре-Сале // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 4. С. 3–16.
- Ельцов И. Н., Оленченко В. В., Фаге А. Н.* Электротомография в Российской Арктике по данным полевых исследований и трехмерного численного моделирования // Neftegaz.RU. 2017. № 2. С. 54–64.
- Ершов Э. Д.* Общая геокриология. М.: Изд-во МГУ, 2002. 682 с.
- Ефимов А. И., Граве Н. А.* Погребенные льды района оз. Абалах // Социалистическое строительство. Якутск, 1940. № 10–11. С. 65–78.
- Железняк М. Н.* Геокриологическая база данных Сибирской платформы // Материалы Всероссийской конференции «Рельеф и экзогенные процессы гор». Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2011. С. 100–103.
- Зыков Ю. Д.* Геофизические методы исследования криолитозоны. М.: МГУ, 2007.

- Иванов Н. Ф. «Амур» собирает Россию. М.: Информавтодор, 2003. 200 с.
- Изменчивость инженерно-геологических свойств четвертичных отложений севера Западной Сибири. М.: Недра, 1987. 206 с.
- Изучение инженерно-геологических и гидрогеологических условий верхних горизонтов пород в нефтегазоносных районах криолитозоны (Методическое руководство) / Под ред. Е. С. Мельникова, С. Е. Гречищева, А. В. Павлова. М.: Недра, 1992. 288 с.
- Инженерно-геодезические изыскания для строительства. М., 2005.
- Каверин Д. А., Пастухов А. В., Новаковский А. Б. Динамика глубины сезонного протаивания тундровых мерзлотных почв (на примере площадки циркумпольного мониторинга деятельного слоя в Европейской России) // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 6. С. 35–44.
- Каплина Т. Н. Криогенные склоновые процессы. М.: Наука, 1965. 296 с.
- Кизяков А. И., Сонюшкин А. В., Лейбман М. О., Зимин М. В., Хомутов А. В. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. Т. IX. № 2. С. 15–25.
- Климовский И. В., Готовцев С. П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 168 с.
- Климовский И. В., Константинов П. Я., Васильев И. С., Готовцев С. П. НТО Геокриологические условия на трассе газопровода пос. Чернышевский—пос. Удачный. Якутск, 1988. Фонды ИМЗ СО РАН. 54 с.
- Комплексный мониторинг северо-таежных геосистем Западной Сибири / Под ред. Е. С. Мельникова. Новосибирск: Наука, 2012.
- Кондратьев В. Г. Геокриологические исследования на переходах газопроводов через долины рек. Новосибирск: Наука, 1988. 192 с.
- Кондратьев В. Г. Линейные сооружения Забайкалья и прилегающих территорий: анализ проблем // Дорожная держава. 2007. № 8. С. 36–39.
- Кондратьев В. Г. Не повторить ошибок БАМа // Дороги России XXI века. 2003. № 5. С. 17–19.
- Кондратьев В. Г. О геокриологическом обосновании изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации автодороги Чита—Хабаровск // Материалы научно-практической конференции «Проблемы проектирования и строительства автомобильной дороги Чита—Хабаровск». Иркутск: Иркутскгипродорнии, 2003. С. 57–163.
- Кондратьев В. Г. Стабилизация земляного полотна на вечномёрзлых грунтах. Чита: Забтранс, 2011.
- Кондратьев В. Г., Валиев Н. А. Воздействие криогенных процессов и явлений на земляное полотно БАМ на участке Наледный—Хани и возможные пути его защиты // Труды Седьмой научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна железных дорог» (г. Москва, 17 ноября 2010 г.). Чтения, посвященные памяти профессора Г. М. Шахунянца. М.: МИИТ, 2011. С. 114–117.
- Кондратьев В. Г., Соболева С. В. Концепция системы инженерно-геокриологического мониторинга автомобильной дороги «Амур» Чита—Хабаровск. Чита: Забтранс, 2010. С. 176.

- Кондратьев В. Г., Соболева С. В., Палкин Д. Д. Инженерно-геокриологические аспекты обеспечения безопасности федеральной автодороги «Амур» Чита–Хабаровск // Мир дорог. 2010. Октябрь. № 51. С. 2–4.
- Кондратьев В. Г. Дороги на вечной мерзлоте — «вечные проблемы» // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции. Тюмень: Эпоха, 2015. С. 402–406.
- Константинов П. Я., Васильев И. С., Климовский И. В., Константинов И. П. НТО Геокриологические условия газопровода пос. Чернышевский–пос. Айхал–г. Удачный. Якутск, 1989. Фонды ИМЗ СО РАН. 46 с.
- Ландшафты криолитозоны Западной-Сибирской газоносной провинции / Под ред. Е. С. Мельникова. Новосибирск: Наука, 1983. 165 с.
- Лаухин С. А., Дроздов Д. С., Пендин В. В. О кафедре криосферы Земли в Российском государственном геологоразведочном университете // Десятая Международная конференция по мерзотоведению (ТICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Т. 5. Расширенные тезисы на русском языке. Тюмень: Печатник, 2012. С. 173–174.
- Лейбман М. О. Криогенные склоновые процессы и их геозкологические последствия в условиях распространения пластовых льдов: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Тюмень, 2005.
- Лейбман М. О., Кизяков А. И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: Типография Россельхозакадемии, 2007. 206 с.
- Лейбман М. О., Кизяков А. И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: Институт криосферы Земли СО РАН, 2007. 206 с.
- Малкова Г. В. Мониторинг среднегодовой температуры пород на стационаре Болванский // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 3. С. 22–35.
- Малкова Г. В., Коростелев Ю. В., Садуртдинов М. Р., Скворцов А. Г., Царев А. М. Современные климатические изменения и температурный режим многолетнемерзлых пород Европейского Севера // Сборник докладов расширенного заседания Научного совета по криологии Земли РАН «Актуальные проблемы геокриологии», МГУ, 15–16 мая 2018 г. Т. 1. М.: Университетская книга, 2018. С. 98–104.
- Малкова Г. В., Садуртдинов М. Р., Скворцов А. Г., Царев А. Г. Геокриологический мониторинг болотных экосистем Европейского Севера // Материалы Международного полевого симпозиума «Болотные экосистемы Северо-Востока Европы и проблемы экологической реставрации в зоне многолетней мерзлоты». Инта–Сыктывкар–Нарьян-Мар, 22 июля — 4 августа 2017 г. Сыктывкар, 2017. С. 93–99.
- Малкова Г. В., Садуртдинов М. Р., Скворцов А. Г., Царев А. М. Мониторинг криогенных геосистем в Ненецком автономном округе, их современное состояние и тенденции изменения // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции. Тюмень: Эпоха, 2015. С. 217–221.
- Математическая морфология ландшафтов криолитозоны / А. С. Викторов, Т. В. Орлов, В. Н. Капралова, О. Н. Трапезникова, В. М. Архаипова, С. А. Садков, А. В. Зверев, Е. Г. Панченко, П. В. Березин. М.: РУДН, 2016. 232 с.

- Мельников В. П., Спесивцев В. И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука, 1995. 198 с.
- Мельников В. П. К созданию цельного образа криосферы // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 4. С. 3–12.
- Мельников В. П., Брушков А. В., Хименков А. Н. О развитии теоретических основ геокриологии // Криосфера Земли. 2015. № 2. С. 6–14.
- Мельников В. П., Осипов В. И., Брушков А. В., Сатурдинов М. Р., Жданев О. В., Фролов К. Н. и др. Развитие геокриологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга топливно-энергетического комплекса // Криосфера Земли. 2022. Т. XXVI. № 4. С. 3–18; <https://doi.org/10.15372/KZ20220401>.
- Мельников В. П., Осипов В. И., Брушков А. В., Сатурдинов М. Р., Жданев О. В., Фролов К. Н. и др. Снижение устойчивости инфраструктуры ТЭК России в Арктике как следствие повышения среднегодовой температуры приповерхностного слоя криолитозоны // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 4. С. 303–314; <https://doi.org/10.31857/S0869587322040053>.
- Меньшиков С. Н., Морозов И. В., Мельников И. В., Осокин А. Б., Васильева А. О. Инженерная защита объектов Бованенковского НГКМ от воздействия опасных экзогенных процессов // Наука и техника в газовой промышленности. 2014. № 2. С. 14–23.
- Методические рекомендации по инженерно-геокриологической съемке (север Западной Сибири) / Под ред. Е. С. Мельникова. М.: ВСЕГИНГЕО, 1977. 104 с.
- Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1:200 000 (1:100 000–1:500 000) / Под ред. Е. С. Мельникова. М.: Недра, 1978. 391 с.
- Методы изучения криогенных физико-геологических процессов: Сб. науч. тр. М.: ВСЕГИНГЕО, 1992. 82 с.
- Методы региональных инженерно-геокриологических исследований для равнинных территорий / Под ред. Е. С. Мельникова, Г. И. Дубикова. М.: Недра, 1986. 207 с.
- Мониторинг криолитозоны России и создание единой национальной информационной базы / Д. С. Дроздов, Г. В. Малкова, А. А. Абрамов, П. Я. Константинов, Д. О. Сергеев, В. Е. Романовский, А. Л. Холодов // Abstracts of Int. Conf. «Earth Cryology: XXI Century», Пушино, 29.09–03.10.2013. Пушино, 2013. URL: http://cryosol.ru/load/conferences/abstracts_earth_cryology_xxi_century/2-1-0-52.
- Москаленко Н. Г. Ландшафтная индикация инженерно-геокриологических условий для прогноза их изменения под влиянием хозяйственной деятельности // Мерзлотные исследования в осваиваемых районах СССР. Новосибирск: Наука, 1980. С. 8–18.
- Неизвестнов В. Я., Соловьев В. А. Прогнозная карта криолитозоны шельфа морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. Отчет 368467, Росгеолфонд, 1990.ф.

- Общее мерзлотоведение (геокриология) / Под ред. В. А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1978. 464 с.
- Общий геокриологический мониторинг при создании подземных хранилищ / Д. С. Дроздов, Г. В. Малкова, А. А. Васильев, А. Г. Скворцов, М. Р. Садуртдинов, Т. А. Коробова // Недропользование XXI век. 2019. № 6. С. 84–89.
- Огильви А. А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 501 с.
- Основы геокриологии / Под ред. Э. Д. Ершова. Ч. 6. Геокриологический прогноз и экологические проблемы в криолитозоне. М.: Изд-во МГУ, 2008.
- Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / В. А. Кудрявцев и др. М.: Изд-во МГУ, 1974. 431 с.
- Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / Кол. авт. В. А. Кудрявцев, В. Г. Меламед, Л. С. Гарагуля и др.; Под ред. А. В. Брушкова, Л. С. Гарагули. М.: МГУ, 2016.
- Осокин А. Б., Меньшиков С. Н., Морозов И. С. Обеспечение надежности оснований и фундаментов объектов добычи и транспорта газа на севере Западной Сибири в условиях потепления климата и деградации многолетнемерзлых грунтов // Труды X Международной конференции по мерзлотоведению. Салехард, ЯНАО, Россия, 25–29 июня 2012 г. Т. 4. Салехард, 2012. С. 376–378.
- Павлов А. В. Мерзлотно-климатические изменения на севере России: наблюдения, прогноз // Известия РАН. Сер. Географическая. 2003. № 6. С. 39–50.
- Павлов А. В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли. 1997. Т. I. № 1. С. 47–58.
- Павлов А. В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Изд-во «ГЕО», 2008. 229 с.
- Павлов А. В. Основные положения концепции геокриологической информационной системы // Материалы Второй конференции геокриологов России. М.: МГУ, 2001. Т. 3. С. 198–204.
- Павлов А. В. Современное состояние мониторинга криолитозоны России и проблемы его развития // Материалы Первой конференции геокриологов России. Кн. 3. М.: МГУ, 1996. С. 327–336.
- Павлов А. В., Малкова Г. В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 32–39.
- Пендин В. В. Мерзлотоведение: Учеб. пособие. М.: МГРИ-РГГРУ, 2008. 75 с.
- Пендин В. В., Подборская В. О., Дубина Т. П. Мерзлотоведение: Учеб. пособие. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2017. 172 с.
- Полтев Н. Ф., Кондратьев В. Г., Замолодчикова С. А., Зонтов Л. Н., Чушкина Н. И. Мерзлотно-геологические исследования в связи со строительством и эксплуатацией подземного газопровода в зоне вечной мерзлоты // Инженерное мерзлотоведение (Материалы к III Международной конференции по мерзлотоведению). Новосибирск: Наука, 1979. С. 213–222.
- Пономарева О. Е., Дроздов Д. С., Гравис А. Г., Бердников Н. М., Бочкарев Ю. Н., Устинова Е. В., Лешневская Е. Ф. Особенности деградации мерзлоты у южной границы криолитозоны (по результатам монито-

- ринга в Западной Сибири) // Актуальные проблемы геоэкологии. МГУ, 15–16 мая 2018 г. Т. 1. М.: Университетская книга, 2018. С. 189–195.
- Порфирьев Б. Н., Елисеев Д. О., Стрелецкий Д. А.* Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 12. С. 1228–1239.
- Ревзон А. Л.* Картографирование состояний геотехнических систем. М.: Недра, 1992. 223 с.
- Рекант П. В., Васильев А. А.* Распространение субаквальных многолетнемерзлых пород в Карском море // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 4. С. 72–75.
- Рекант П. В., Гусев Е. А., Тумской В. Е., Швенк Т., Шпис Ф., Черкашев Г. А., Кассенс Х.* Распространение и особенности залегания субаквальной криолитозоны в районе банок Семеновская и Васильевская (море Лаптевых) по данным сейсмоакустического профилирования // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 332–348.
- Ржевский В. В., Новик Г. Я.* Основа физики горных пород. М.: Недра, 1978.
- Рокос С. И., Костин Д. А., Длугач А. Г.* Свободный газ и многолетняя мерзлота в осадках верхней части разреза мелководных районов шельфа Печорского и Карского морей // Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях океанического перегляциала. Кн. 1. Апатиты: КНЦ РАН, 2001. С. 40–51.
- Рокос С. И., Костин Д. А., Куликов С. Н.* Субаквальные многолетнемерзлые породы Обской и Тазовской губ Карского моря // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 5. С. 17–26.
- Рокос С. И., Тарасов Г. А.* Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2007. № 67. С. 66–75.
- Садуртдинов М. Р., Малкова Г. В., Скворцов А. Г., Судакова М. С., Царев А. М.* Современное состояние островной мерзлоты в пойме реки Печора (Ненецкий автономный округ) по результатам комплексных геоэкологических и геофизических исследований // Материалы Пятой конференции геоэкологов России «Геотехника в криолитозоне». 14–17 июня 2016 г., МГУ, Москва. М., 2016.
- Садуртдинов М. Р., Скворцов А. Г., Царев А. М., Судакова М. С., Малкова Г. В.* Опыт применения волновых методов геофизики в криолитозоне // Труды Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии»: сб. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2018. С. 675–679.
- Садуртдинов М. Р.* Методика донных сейсмических исследований на предельном мелководье Арктики: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 109 с.
- Сидорчук А. Ю., Баранов А. В.* Эрозионные процессы Центрального Ямала. СПб., 1999. 350 с.

- Скворцов А. Г., Садуртдинов М. Р., Царев А. М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 2. С. 83–90.
- Судакова М. С., Брушков А. В., Великин С. А., Владов М. Л., Зыков Ю. Д., Неклюдов В. В., Оленченко В. В., Пушкарев П. Ю., Садуртдинов М. Р., Скворцов А. Г., Царев А. М. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2022. № 6. С. 141–151; <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-6-141-151>.
- СП 11-102-97. Инженерно-экологические изыскания для строительства.
- СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства (ч. I–VI).
- СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095519>.
- СП 305.1325800.2017. Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве. М., 2017.
- Сумгин Н. И., Качурин С. П., Толстихин Н. И., Тумель В. Ф. Общее мерзлотоведение. М.: Изд-во АН СССР, 1940.
- Термоэрозия дисперсных пород / Под ред. Э. Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1982. 194 с.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.; <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2022/od3.pdf>.
- Устинова Е. В. Мониторинг техногенных изменений ландшафтов с помощью повторного крупномасштабного картирования (северная тайга, Западная Сибирь) // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции. Тюмень: Эпоха, 2015. С. 383–386.
- Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании».
- Федеральный закон от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации».
- Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (с изм. от 2013 и 2017 гг.) // Официальный интернет-портал правовой информации: <http://www.pravo.gov.ru>.
- Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515 с.
- Хомутов А. В., Бабкин Е. М., Тихонравова Я. В., Хайруллин Р. Р., Дворников Ю. А., Бабкина Е. А., Каверин Д. А., Губарьков А. А., Слагода Е. А., Садуртдинов М. Р., Судакова М. С., Королева Е. С., Кузнецова А. О., Факашук Н. Ю., Сощенко Д. Д. Комплексные исследования криолитозоны северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья // Научный вестник Ямало-Ненецкого АО. 2019. № 1(102). С. 53–64.

- Хомутов А. В., Лейбман М. О., Андреева М. В. Методика картографирования пластовых льдов Центрального Ямала // Вестник Тюменского государственного университета. 2012. № 7. С. 76–84.
- Цибизов Л. В., Есин Е. И., Григорьевская А. В., Сосновцев К. А. Магнитометрия и георадиолокация в применении к картированию полигонально-жилых льдов едомного комплекса // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 4. С. 427–438.
- Цифровые карты криолитозоны и оценка современных изменений в криолитозоне / Д. С. Дроздов, Г. В. Малкова, В. Е. Романовский, А. А. Васильев, А. В. Брушков, М. О. Лейбман, М. Р. Садуртдинов, О. Е. Пономарева, В. В. Пендин, Д. Н. Горобцов, Е. В. Устинова, Ю. В. Коростелев, Д. А. Стрелецкий, Е. А. Слагода, А. Г. Скворцов, А. Г. Гравис, Н. М. Бердников, П. Т. Орехов, С. А. Лаухин, А. М. Царев, А. А. Фалалаева, М. Н. Железняк // Актуальные проблемы геокриологии, МГУ, 15–16 мая 2018 г. Т. 1. М.: Университетская книга, 2018. С. 295–301.
- Чимитдоржиев Т. Н., Быков М. Е., Лейбман М. О., Дагуров П. Н., Кирбижекова И. И., Дворников Ю. А., Бердников Н. М. Исследование микродеформаций и оползневых процессов северных территорий Западной Сибири на основе интерферометрических данных // Вестник СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 65–68.
- Шестернев Д. М. Основные принципы организации геокриологического мониторинга линейных сооружений (На примере железной дороги Беркакит–Томмот–Якутск) // Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX Международного симпозиума. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2011. С. 253–260.
- Шумаков Ю. С. НТО Исследование взаимодействия наземного газопровода Мессояха–Норильск с грунтами на опорных участках. Игарка, 1974. Фонды ИМЗ СО РАН. 101 с.
- Шур Ю. Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск: Наука, 1988. 213 с.
- Яковлев Д. В., Яковлев А. Г., Валясина О. А. Изучение криолитозоны северного обрамления Сибирской платформы по данным региональных электро-разведочных работ // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 5. С. 77–95.

Об авторах

Брушков А. В., д.г.-м.н., заведующий кафедрой геокриологии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Алексеев А. Г., к.т.н., доцент, руководитель центра геокриологических и геотехнических исследований НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», почетный строитель России, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, лауреат премии губернатора Московской области в области науки и техники.

Дроздов Д. С., д.г.-м.н., заместитель директора Института криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН; профессор Российского государственного геологического университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ).

Дубровин В. А., к.г.-м.н., гл. специалист отдела мониторинга ЭГП Управления ГМСН ФГБУ «Гидроспецгеология», почетный разведчик недр.

Железняк М. Н., д.г.-м.н., чл.-корр. РАН, директор Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН.

Осокин А. Б., к.г.-м.н., заместитель директора Инженерно-технического центра ООО «Газпром добыча Надым».

Садуртдинов М. Р., к.т.н., ведущий научный сотрудник, заведующий отделом мониторинга и информационно-геосистемного моделирования криолитозоны Института криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН; член Объединенного ученого совета наук о Земле СО РАН.

Сергеев Д. О., к.г.-м.н., заведующий лабораторией геокриологии им. Г. З. Перльштейна Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН.

Бадина С. В., к.г.н., научный сотрудник НИЛ геоэкологии Севера, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова; РЭУ им. Г. В. Плеханова.

Великин С. А., д.т.н., начальник Вилуйской научно-исследовательской мерзлотной станции Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН.

Жданев О. В., д.т.н., руководитель центра компетенций технологического развития ТЭК при Минэнерго России, ведущий научный сотрудник ФГБУН им. А. В. Топчиева ИНХС РАН, профессор Дипломатической академии Министерства иностранных дел Российской Федерации и Югорского государственного университета.

Кузнецов М. Е., к.э.н., директор ФАНУ «Востокгосплан» Министерства Российской Федерации по развитию Дальнего Востока и Арктики.

Малкова Г. В., к.г.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН.

Остарков Н. А., к.ф.н., ведущий эксперт — аналитик ФАНУ «Востокгосплан» Министерства Российской Федерации по развитию Дальнего Востока и Арктики.

Федоров Р. Ю., д.и.н., главный научный сотрудник Лаборатории палеогеографии и исторической геоэкологии Института криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН.

Фролов К. Н., руководитель проектов Центра компетенций технологического развития ТЭК при Министерстве энергетики Российской Федерации.

Сведения о финансировании

Основная часть исследования выполнена в соответствии с «Планом научных работ научных организаций и образовательных организаций высшего образования, осуществляющих научные исследования за счет средств федерального бюджета на 2020 год» федерального автономного научного учреждения «Восточный центр государственного планирования» (тема № 10). Код научной темы, присвоенной учредителем: ГЗ-350-00001-20/4. Номер в ЕГИСУ НИОКТР: АААА-А20-120073090025-3.

Тема исследования:

«Анализ состояния вечной мерзлоты, тенденций ее изменения и социально-экономических последствий для регионов Арктики. Теоретическое обоснование основных параметров архитектуры и разработка принципов построения системы государственного мониторинга вечной мерзлоты в целях охраны и рационального использования криогенных ресурсов Арктики и устойчивого социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации. Разработка принципов построения институциональной среды и нормативно-правовой системы, направленных на реализацию концепции государственного мониторинга вечной мерзлоты».

Часть исследования выполнена в рамках госзаданий ИКЗ ТюмНЦ СО РАН № FWRZ-2021-0012 и № FWRZ-2021-0005, госзадания Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН № 122022400105-9 и госзадания МГУ им. М.В. Ломоносова № 121051100167-1.

Научное издание

Мониторинг вечной мерзлоты

Выпускающий редактор: А. А. Карташева
Компьютерная верстка: С. М. Коробов
Дизайн обложки: К. А. Ларина
Обработка иллюстраций: С. М. Коробов
Корректоры: О. Ю. Петрова, М. В. Уляшева

Подписано в печать 30.03.2024.
Формат 60 × 90/16. Гарнитура Newton.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 32,25. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство «Академический проект»,
адрес: 111399, г. Москва, ул. Мартеновская, 3;
сертификат соответствия
№ РОСС RU. АЕ51. Н 16070 от 13.03.2012;
орган по сертификации РОСС RU.0001.11АЕ51
ООО «Профи-сертификат».

Отпечатано в типографии «Чеховский печатный двор»
(филиал ОАО «Первая образцовая типография»),
адрес: 142300, Московская обл., г. Чехов, ул. Полиграфистов, 1,
телефон: +7 495 988 6341, www/chpd.ru, e-mail: sales@chpk.ru

**По вопросам приобретения книги
просим обращаться в издательство:**

телефоны: +7 495 305 3702, +7 495 305 6092,
e-mail: info@aproject.ru,
интернет-магазин: www.academ-pro.ru

По вопросам издания книг

обращаться в редакционный отдел:
e-mail: redactor@aproject.ru

Иллюстрации

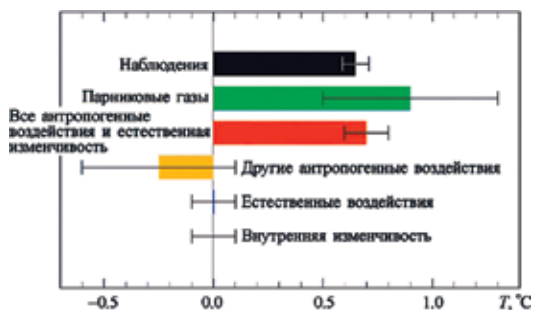


Рис. 1.1. Вклад различных факторов в линейный тренд глобального потепления климата за период 1951–2010 гг. Цветные прямоугольники — средние значения, горизонтальные интервалы — вероятностные границы установленного вклада разных факторов. Черным цветом показана величина тренда по данным архива HadCRUT4 вместе с учитывающим неопределенности в этом архиве доверительным интервалом 5–95%

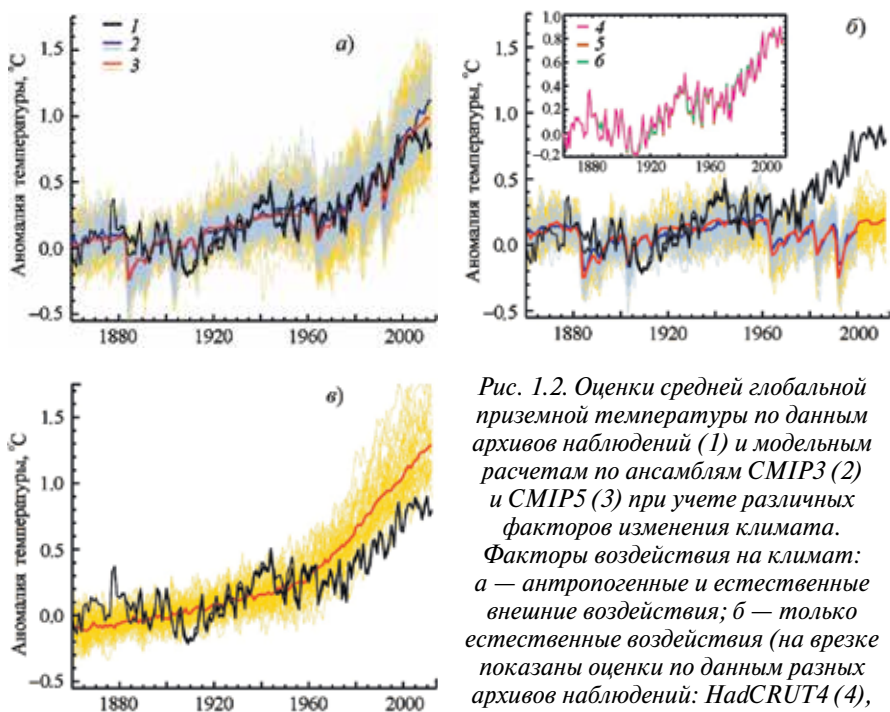


Рис. 1.2. Оценки средней глобальной приземной температуры по данным архивов наблюдений (1) и модельным расчетам по ансамблям CMIP3 (2) и CMIP5 (3) при учете различных факторов изменения климата. Факторы воздействия на климат: а — антропогенные и естественные внешние воздействия; б — только естественные воздействия (на врезке показаны оценки по данным разных архивов наблюдений: HadCRUT4 (4), GISTEMP (5); MLOST (6)); в — только увеличение концентрации парниковых газов

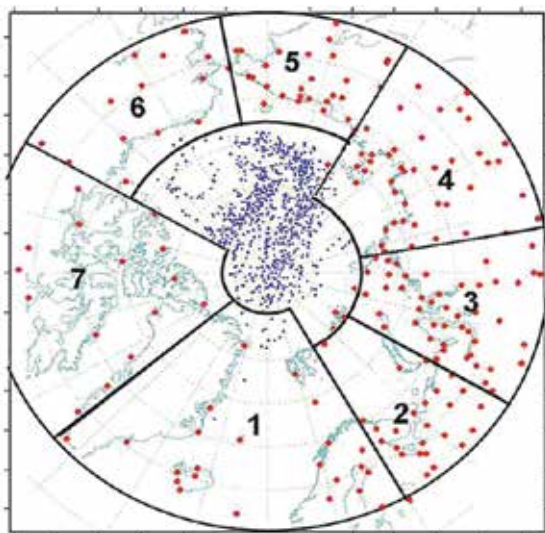


Рис. 1.3. Границы районов и положение стационарных метеорологических станций (красные точки) и дрейфующих станций (синие точки) в Северной полярной области.

Границы районов: 1 — Атлантический; 2 — Североевропейский; 3 — Западносибирский; 4 — Восточносибирский; 5 — Чукотский; 6 — Аляскинский; 7 — Канадский



Рис. 1.11. Среднегодовая температура воздуха по трем метеостанциям криолитозоны России

Тренды среднегодовой температуры воздуха, °C/год



Рис. 1.12. Пространственно-временное изменение тренда среднегодовой температуры воздуха в криолитозоне России

Амплитуда температуры воздуха, °C

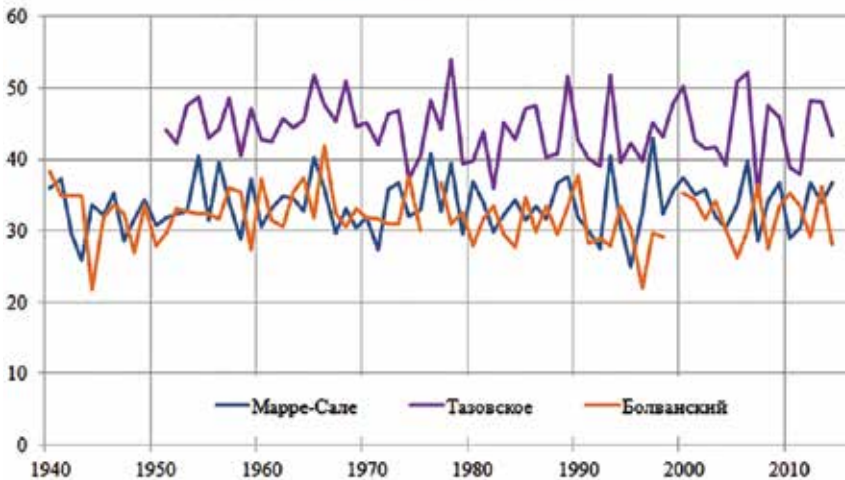


Рис. 1.13. Изменение амплитуды температуры воздуха по трем метеостанциям криолитозоны России



Рис. 1.15. Изменение максимальной мощности снега на объектах мониторинга в XXI в.



Рис. 1.16. Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000 / Под ред. В.А. Кудрявцева и Э. Д. Еришова. М., 1991 (цветно показаны температурные диапазоны, условно можно считать, что распространение мерзлоты: сплошное — синие и фиолетовые тона, прерывистое и островное — зеленые, редкоостровное — бледно-желтые тона, области сезонной мерзлоты — остальные цвета)

Воздух

ММП

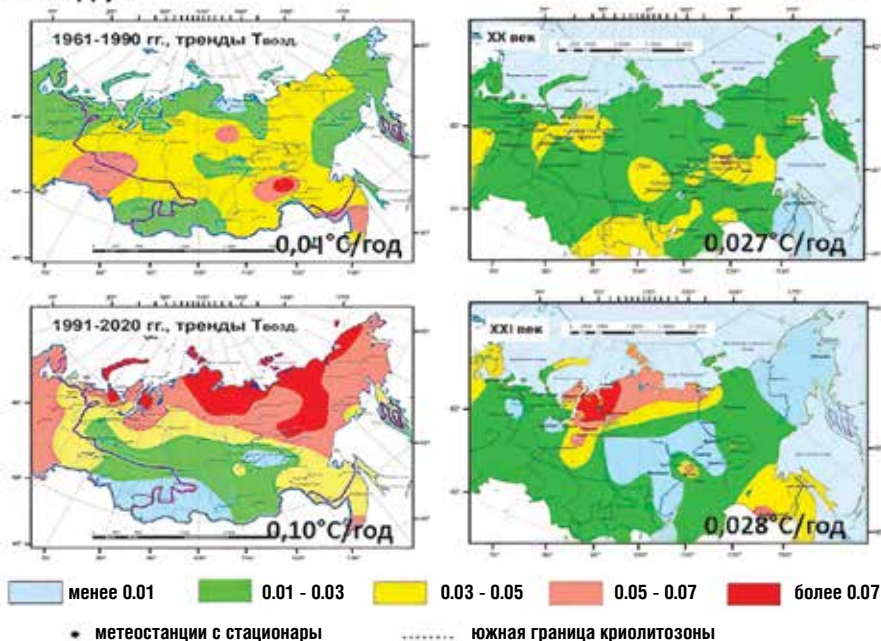


Рис. 1.17. Пространственно-временные закономерности изменения трендов среднегодовой температуры, $^{\circ}\text{C}/\text{год}$, воздуха и горных пород по данным метеостанций и геокриологических площадок в России, конец XX в. — 1961–1990 гг. (А) и начало XXI в. — 1991–2020 гг. (Б) [Malkova, et al., 2022]

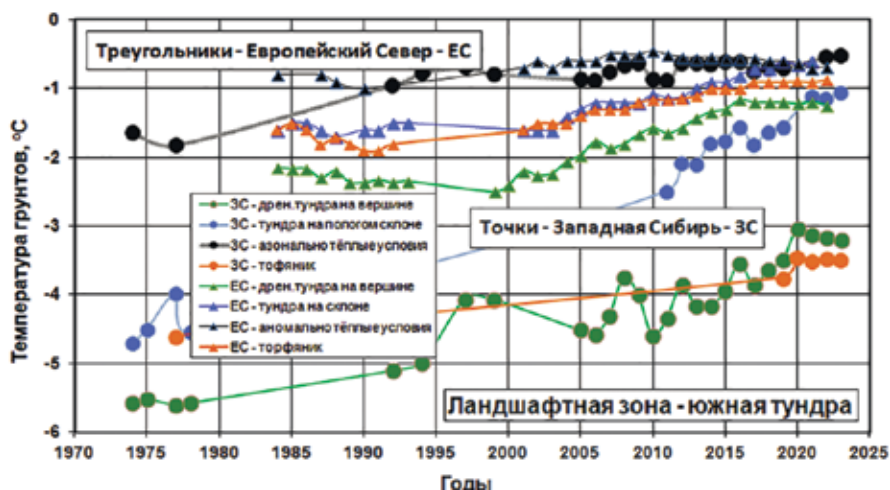


Рис. 1.18. Повышение температуры ММП в разных ландшафтных условиях южной тундры на Европейском Севере и в Западной Сибири

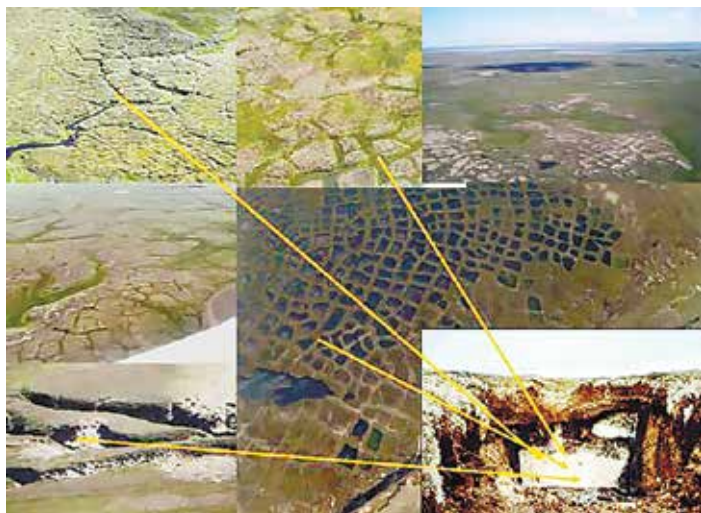


Рис. 1.20. Сингенетически мерзлые породы.

Повторно-жильные льды: верхняя часть клина льда шириной ~3 м и высотой ~8–10 м (врезка в правом нижнем углу); многочисленные формы полигонального рельефа по повторно-жильным льдам, в том числе освоенные эрозией и термоэрозией. Повторно-жильные льды нередко слагают так называемый «ледовый комплекс» с объемной льдистостью 50–80%

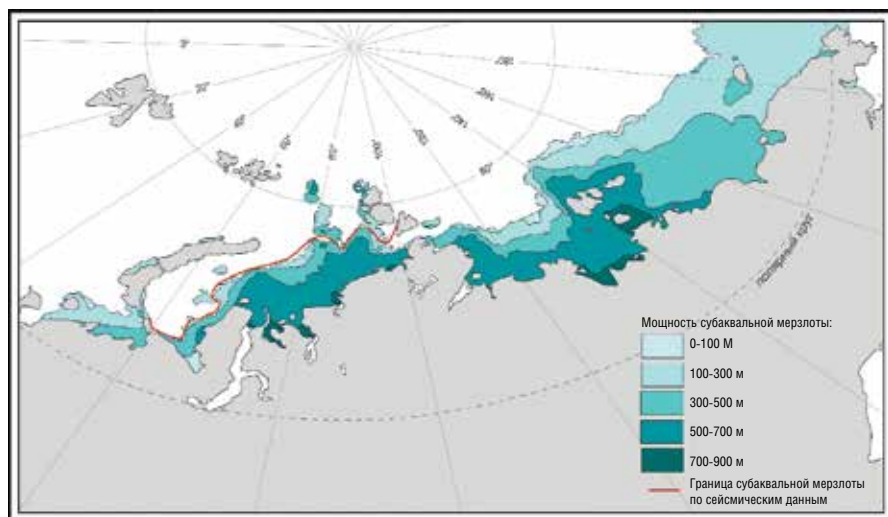


Рис. 1.23. Образ карты ГРА распространения и мощности СММП. Фрагмент для Российской Арктики

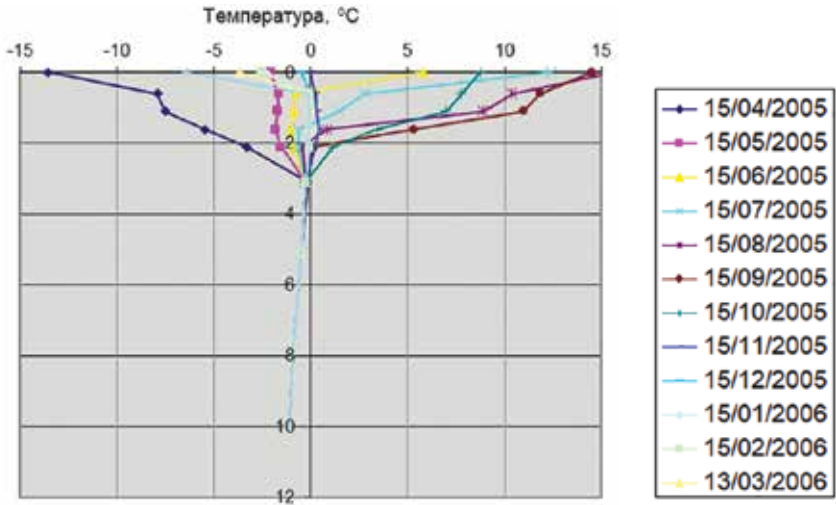


Рис. 1.24. Результаты мониторинговых наблюдений за термическим режимом СММП в мелководной области, дельта Маккензи, Канада

Изменение температуры пород в скважине № 15-14 в 17-18 гг.

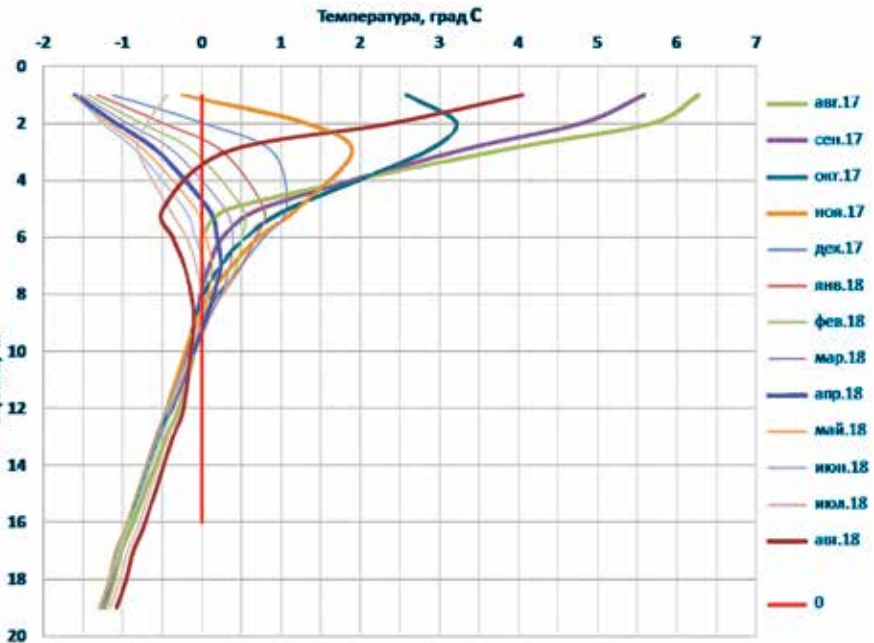


Рис. 1.25. Изменения температуры в течение календарного года (август 2017 г. — август 2018 г.) в скважине № 15-14 (акватория Карского моря, мелководный шельф в 960 м от берега)

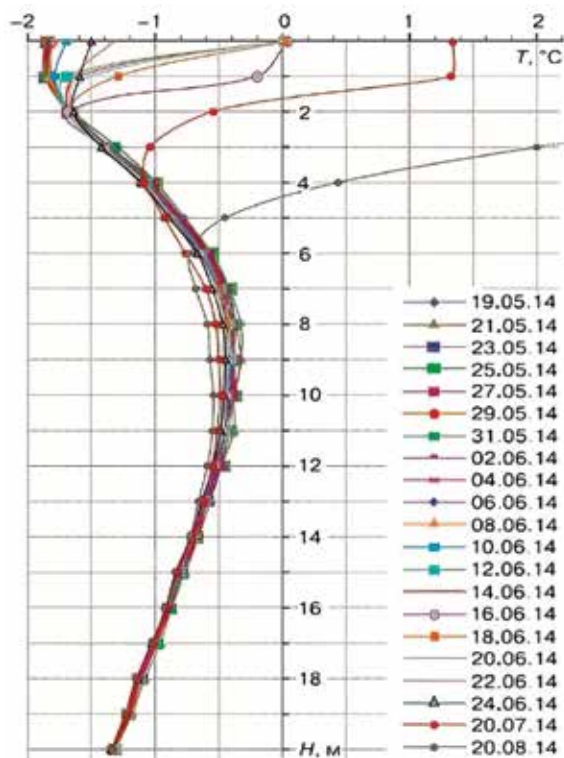


Рис. 1.26. Результаты мониторинга температурного режима пород в районе Марре-Сале (Западный Ямал) [по: Дубровин и др., 2015]



Рис. 2.1. Карта метеорологического риска территории криолитозоны РФ



Рис. 2.2. Карта инерционности ММП криолитозоны России

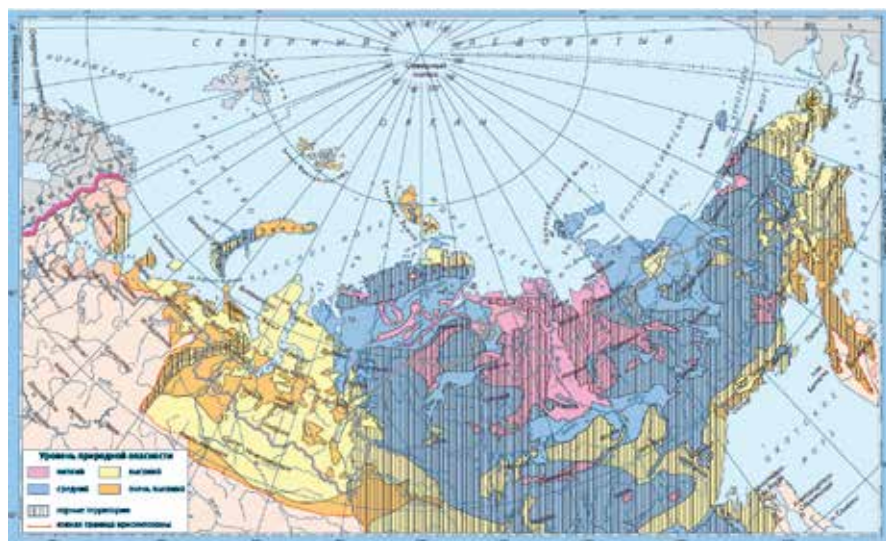


Рис. 2.3. Карта районирования криолитозоны России по условиям хозяйствования

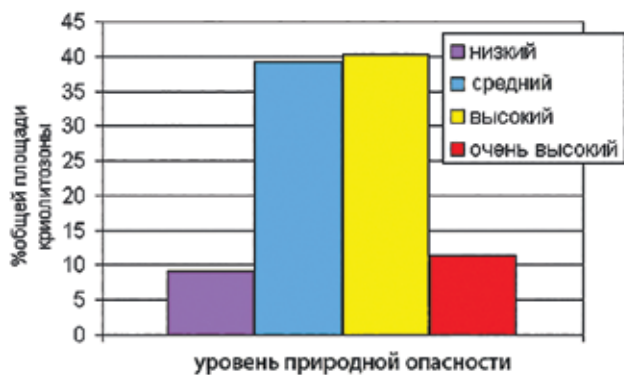


Рис. 2.4. Диаграмма распределения площадей криолитозоны с различным уровнем природной опасности как источника ущерба



Рис. 2.5. Карта прогноза аномалий температуры воздуха на середину XXI в.

© Климатический центр Росгидромет

(<https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke>)

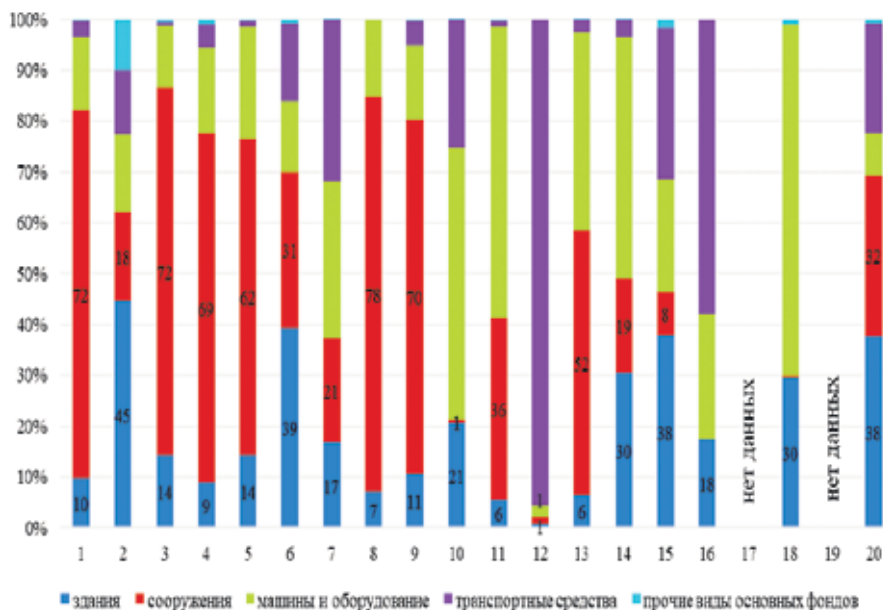


Рис. 2.7. Видовая структура основных фондов коммерческих организаций по отраслям экономики, ЯНАО, 2021.

Цифрами на рисунке обозначены: 1 — всего; 2 — сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство; 3 — добыча полезных ископаемых; 4 — обрабатывающие производства; 5 — обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха; 6 — водоснабжение; водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений; 7 — строительство; 8 — торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов; 9 — транспортировка и хранение; 10 — деятельность гостиниц и предприятий общественного питания; 11 — деятельность в области информации и связи; 12 — деятельность финансовая и страховая; 13 — деятельность по операциям с недвижимым имуществом; 14 — деятельность профессиональная, научная и техническая; 15 — деятельность административная и сопутствующие дополнительные услуги; 16 — государственное управление и обеспечение военной безопасности; социальное обеспечение; 17 — образование; 18 — деятельность в области здравоохранения и социальных услуг; 19 — деятельность в области культуры, спорта, организации досуга и развлечений; 20 — предоставление прочих видов услуг.

Источник: составлено авторами по данным Тюменьстата

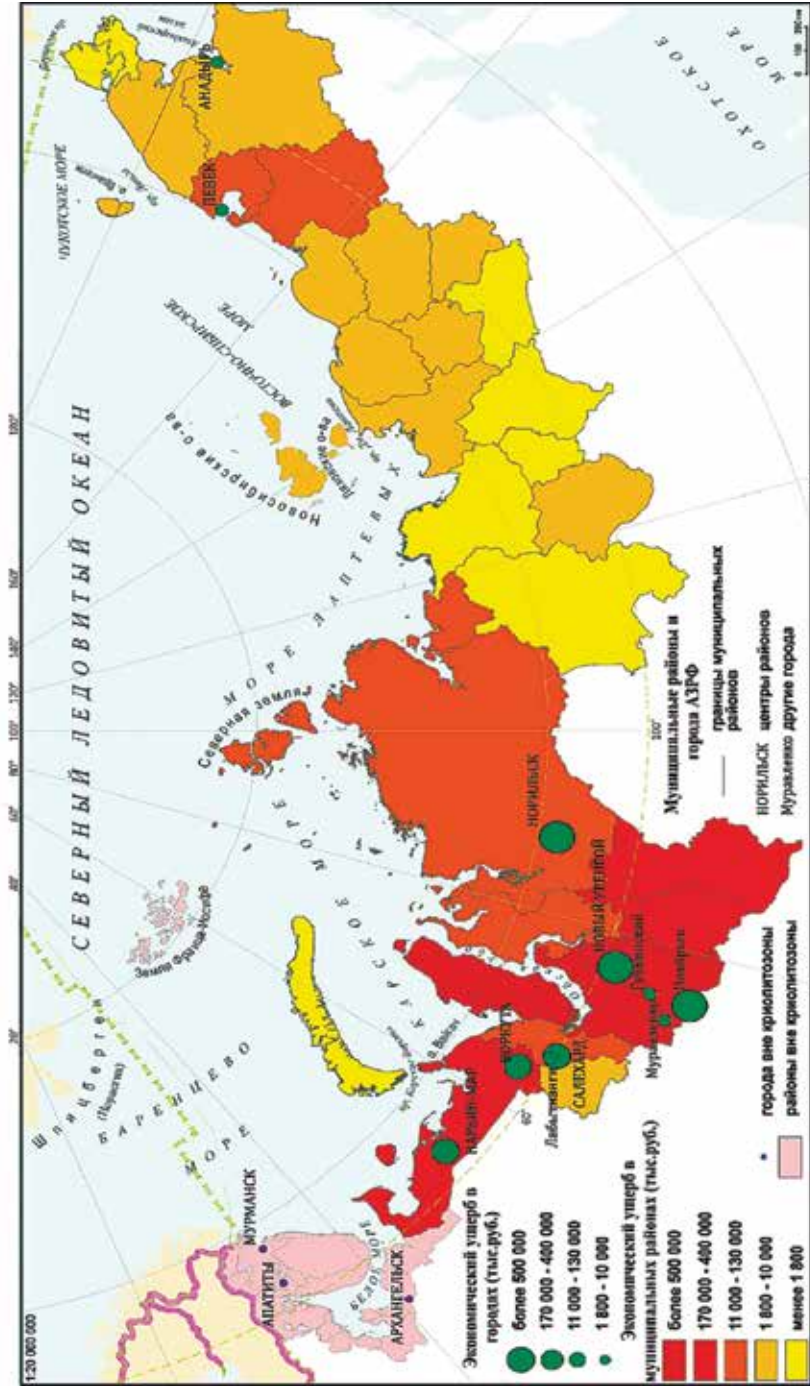


Рис. 2.8. Экономический ущерб в муниципальных районах и городах АЗРФ (за основу оценки основных фондов здесь взяты цифры 2020 г.) к середине XXI в.

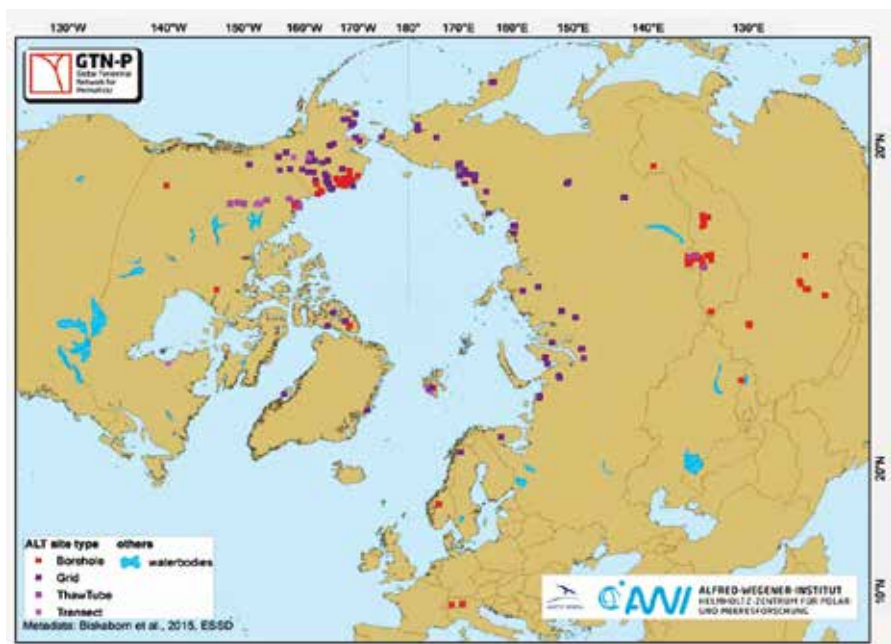


Рис. 3.1. Схема размещения опорных пунктов режимной Сети глобального мониторинга криолитозоны (GTN-P) в Северном полушарии

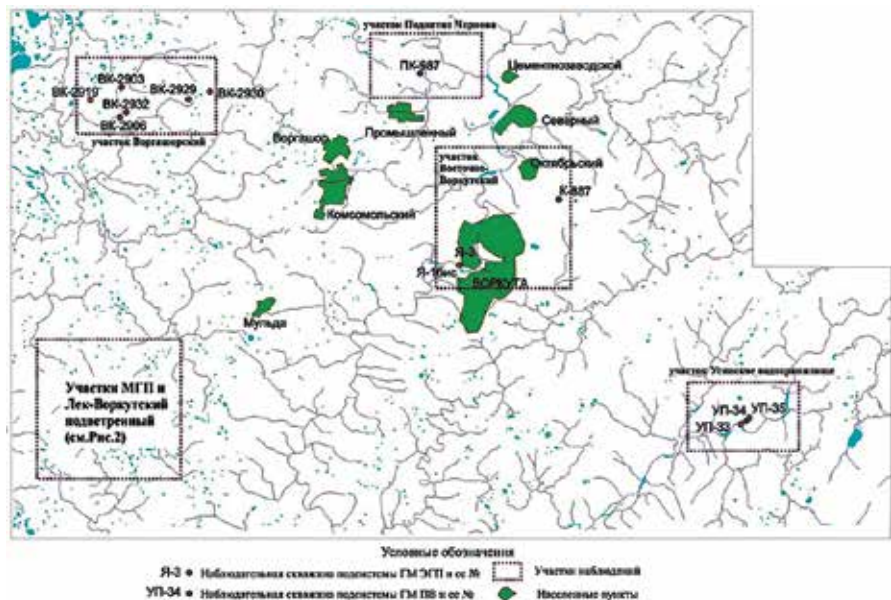


Рис. 3.3. Схема наблюдательной сети ГМСН на Воркутинском полигоне

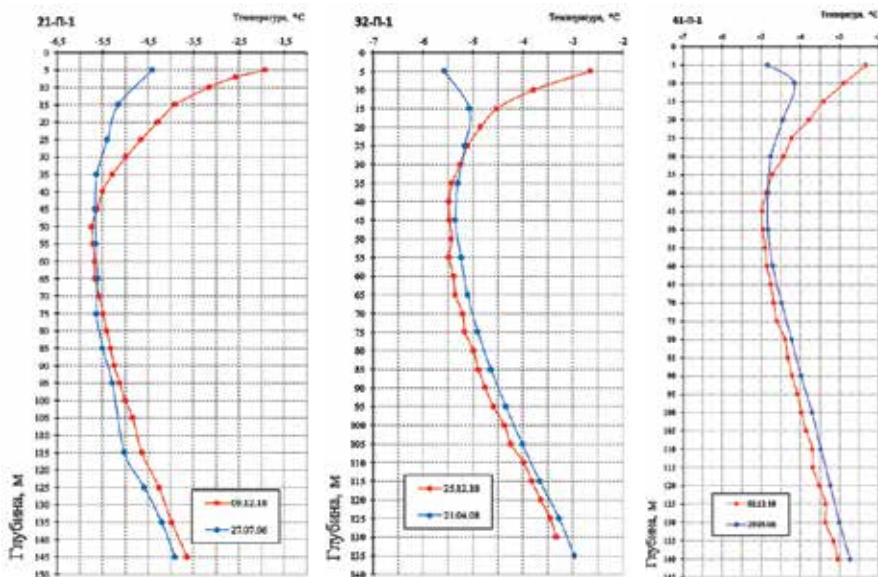


Рис. 4.8. Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение. Графики распределения температуры ММП по глубине в параметрических скважинах вне зоны техногенного воздействия по данным термокаротажа, выполненного в разные годы

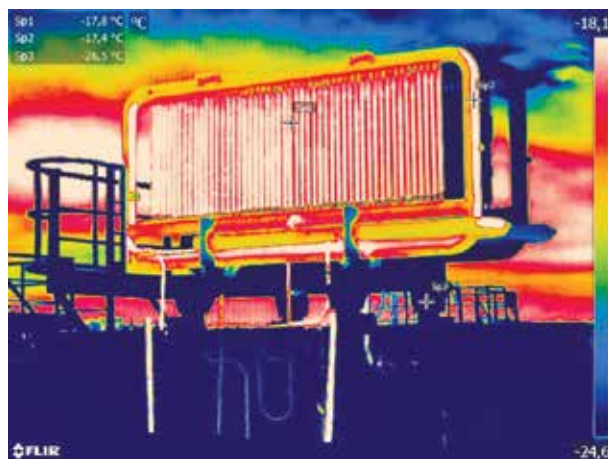


Рис. 4.12. Термограммы, полученные по результатам тепловизионного обследования конденсаторных блоков (блоков теплообменников) систем температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов ВЕТСТС

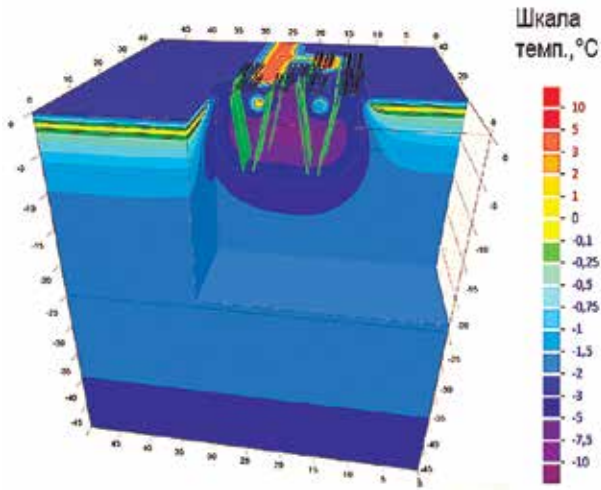


Рис. 4.13. Результаты теплотехнического моделирования взаимодействия подземного газопровода с положительной температурой газа на вмещающие многолетнемерзлые грунты при работе системы термостабилизаторов



А

Рис. 4.14. Деформации трубопроводов устьевой обвязки скважины (А) и результаты моделирования напряженно-деформированного состояния трубопроводов (Б). Красным цветом выделены сверхнормативно нагруженные участки



Б

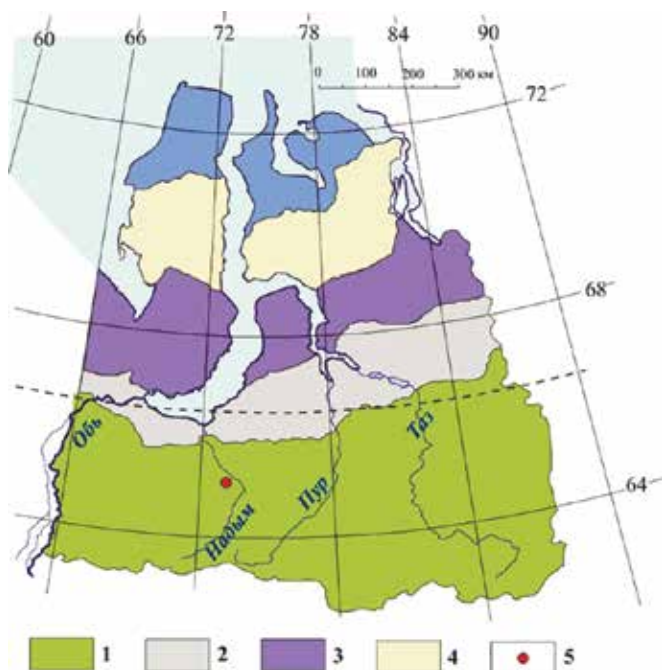


Рис. 4.16. Расположение Надымского стационара на схеме природных зон.
1 — северная тайга, 2 — лесотундра, 3 — южная тундра,
4 — типичная тундра, 5 — стационар

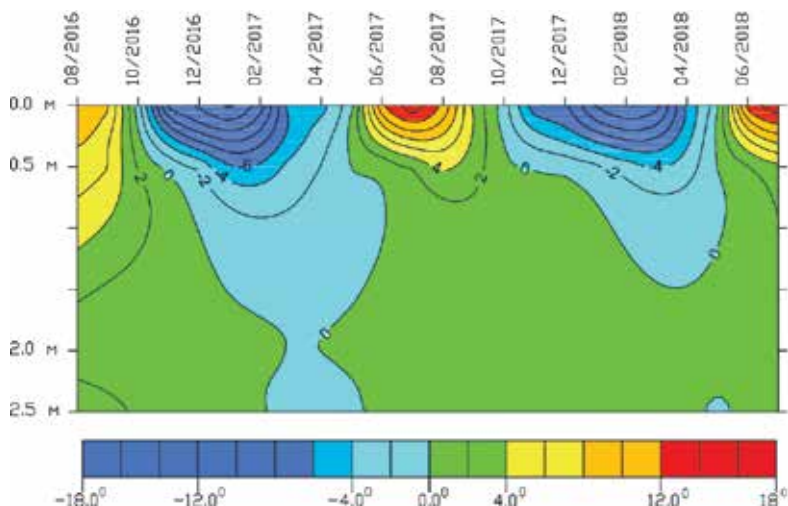
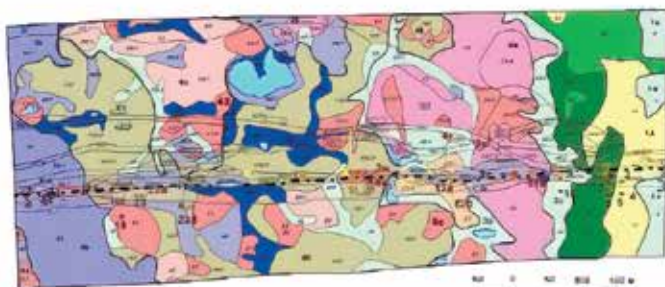


Рис. 4.19. Термоизоэплеты (август 2016 г. — июль 2018 г.) для плоского торфяника: зимой 2016—2017 гг. деятельный слой промерз полностью; зимой 2017—2018 гг. между сезонной и вечной мерзлотой существовал талый слой толщиной ~0,75 м

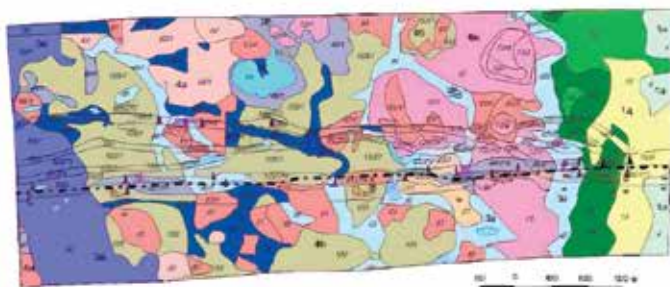
1970



1979



1988



2005



Рис. 4.22. Ландшафтные карты территории Надымского стационара по данным повторных съемок по Устиновой [2015]

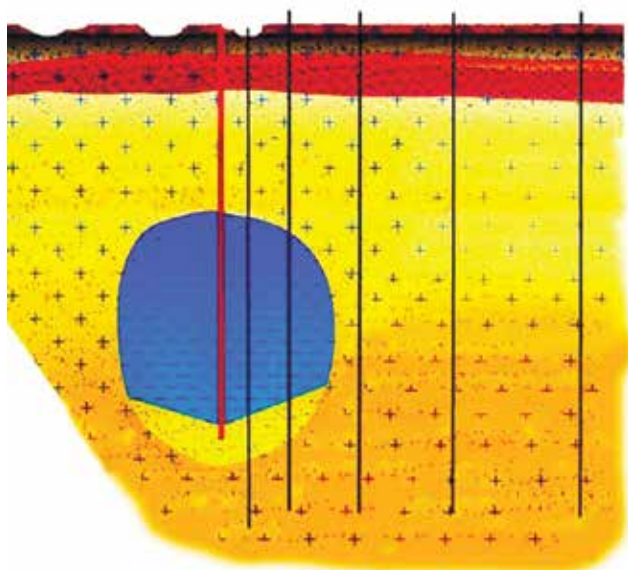


Рис. 4.23. Скважины термокартажного и сейсмического мониторинга в зоне воздействия подземного резервуара

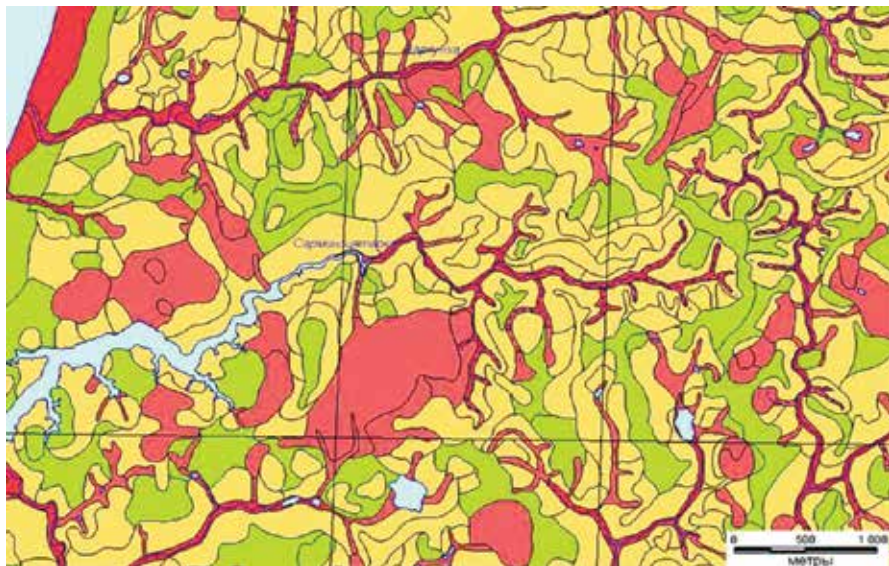


Рис. 4.24. Районирование участка на Западном Ямале по степени благоприятности для подземного строительства (Харасавэйское НГКМ)

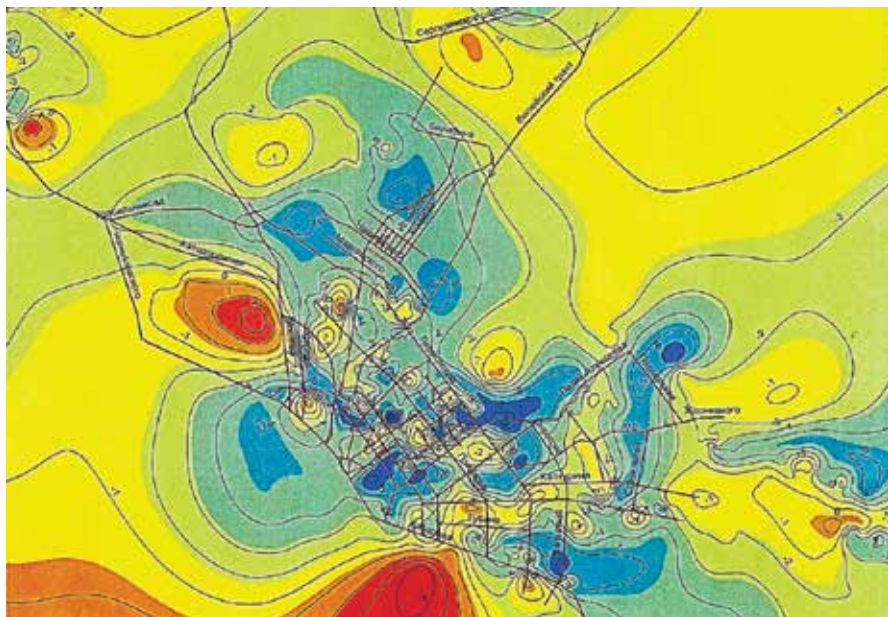


Рис. 4.25. Температуры многолетнемерзлых грунтов в Якутске и его окрестностях в 2015 г. Здесь применялся метод строительства на свайных фундаментах. Синий цвет отдан более низким температурам.

На территории застройки города температуры в целом ниже, чем на окружающих территориях. Талые районы (талики) — это территории, где встречаются реки или озера.

© П. Семенов, предоставлено Министерством строительства Республики Саха (Якутия)

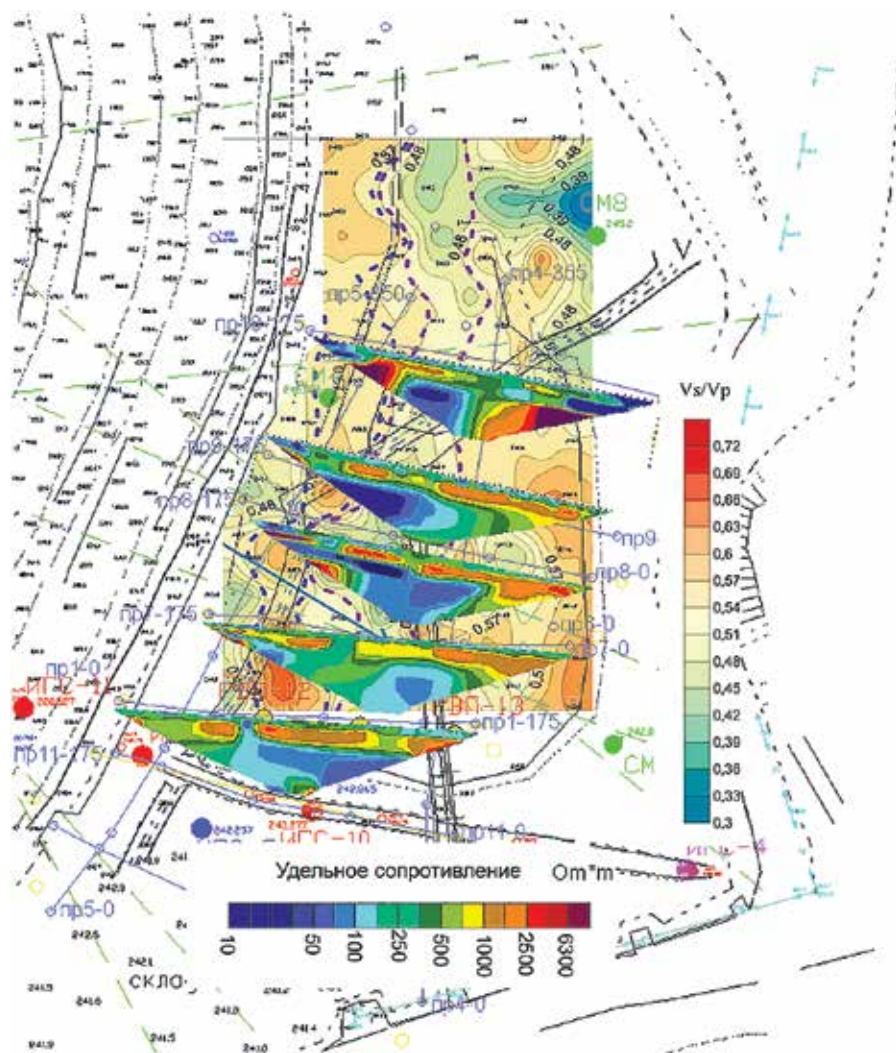


Рис. 4.36. Карта-срез параметра V_s/V_p на глубине 12 м в изоляциях, совмещенная с геоэлектрическим разрезом

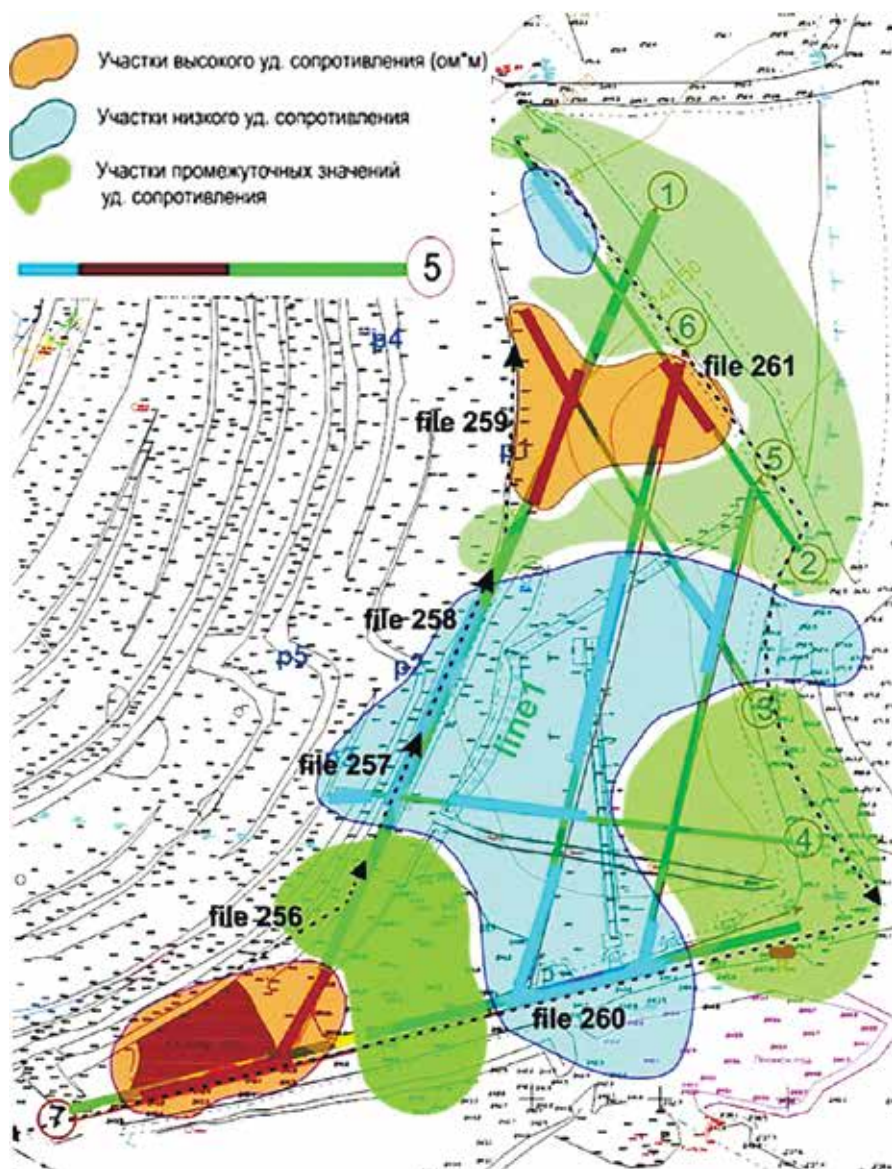


Рис. 4.37. Картирование ослабленных участков по данным электротомографии
вблизи борта карьера Нюрбинский

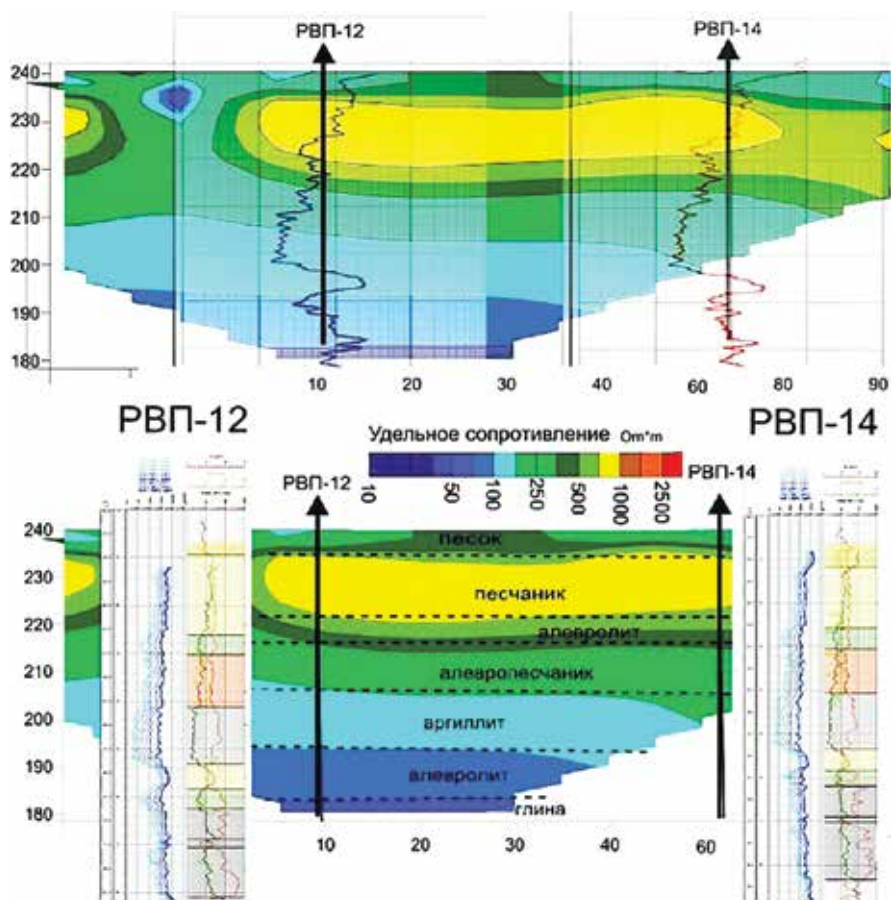
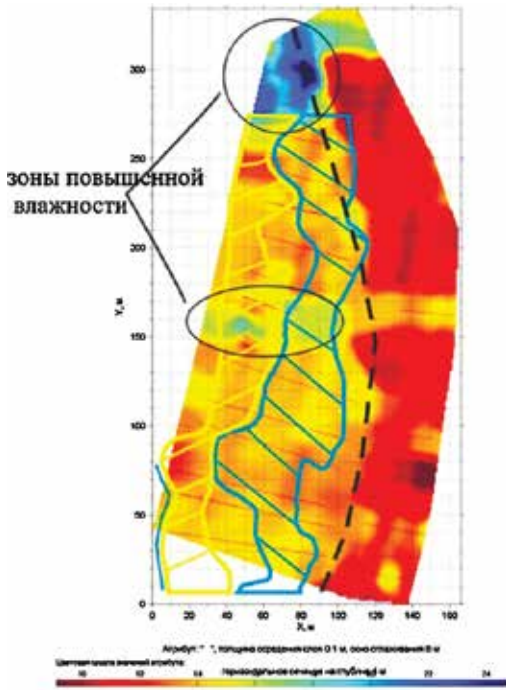


Рис. 4.38. Сравнение геоэлектротомографии с результатами многочастотного каротажа ОРВП и гамма-каротажа



Меридионально направленные зоны
плотных и разрушенных пород по данным
малоглубинной сейсморазведки.

Рис. 4.39. Результаты георадиолокации. Карта-срез на глубине 4 м в изолиниях диэлектрической проницаемости по данным георадиолокации

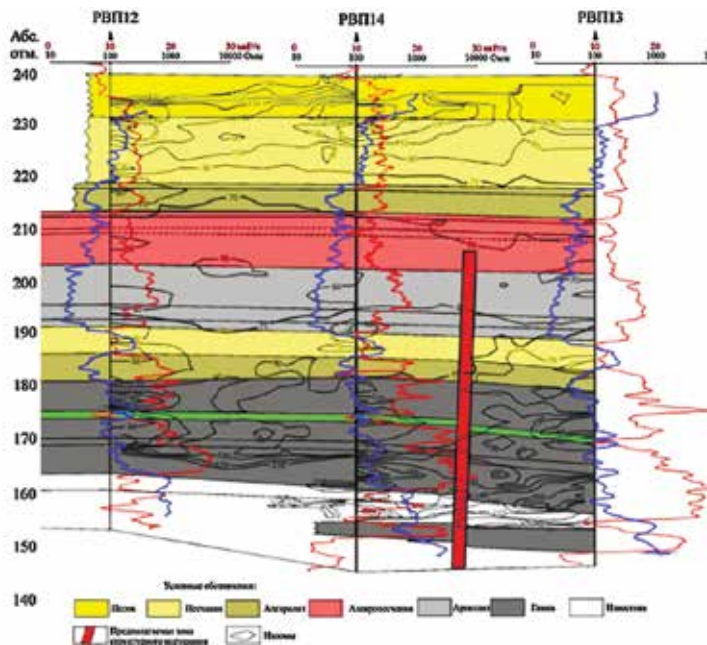


Рис. 4.40. Обобщенный разрез по результатам скважинных наблюдений

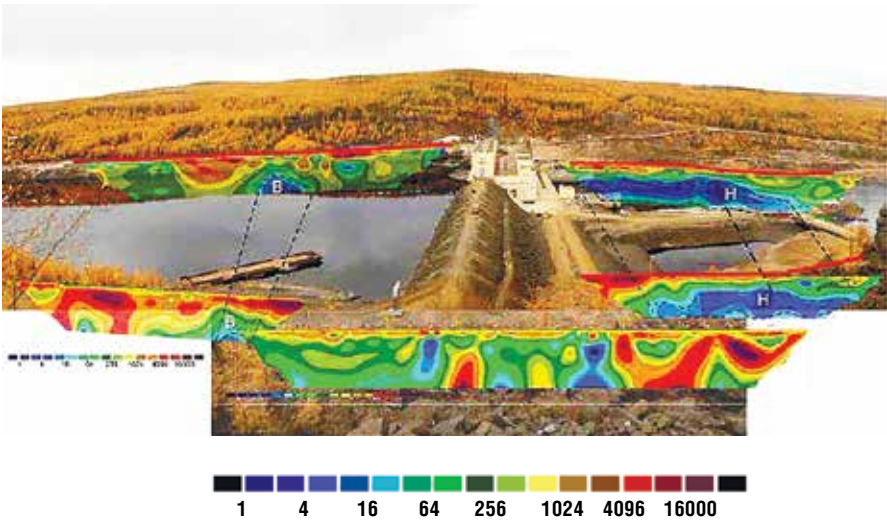


Рис. 4.42. Светлинская ГЭС. Результаты электротомографии

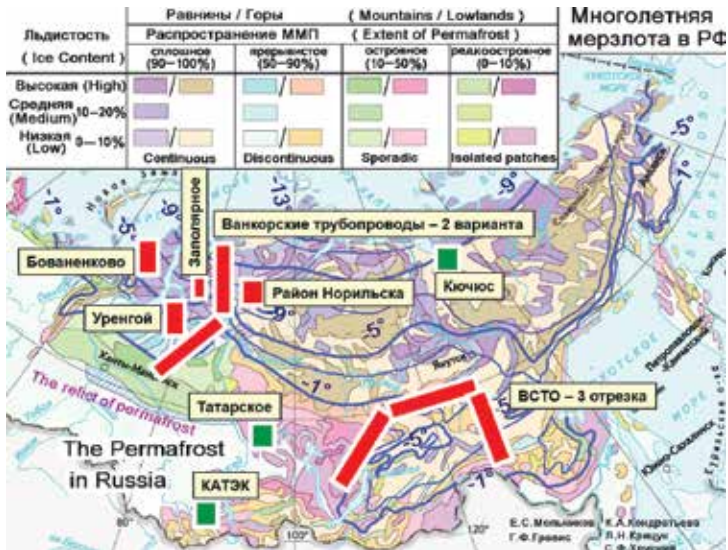


Рис. 7.4. Цифровые ландшафтные и геокриологические карты локального (выделены красным) и элементарного (выделены зеленым) уровня генерализации (графический масштаб 1:100 000–1:200 000) (подложка — обзорная карта вечной мерзлоты РФ)

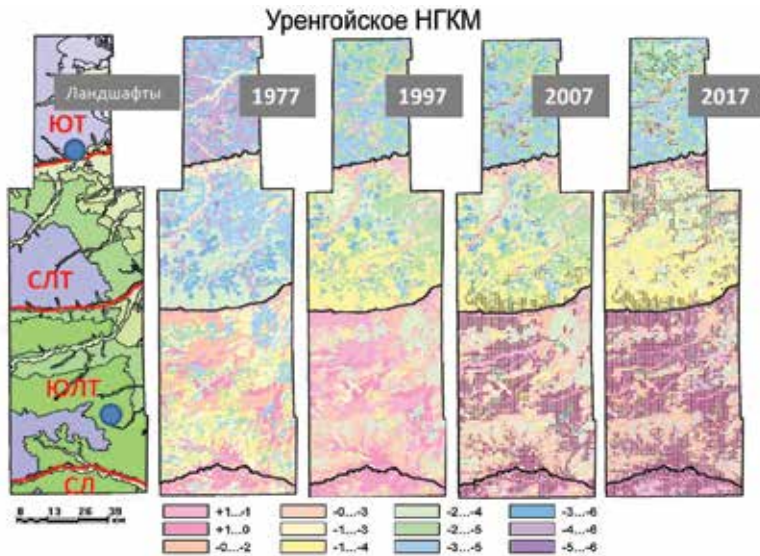


Рис. 7.7. Образ комплекта температурных ГИС-карт территории Уренгойского месторождения: левая колонка — ландшафтные подпровинции и ландшафты; остальные колонки — температура пород (дата — средний год за десятилетие); черный грид — площади текущего опускания кровли ММП; синие точки — геокриологические площадки 1974–2023 гг.

А

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА И ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ДИЗАЙНА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НЕЧЕРНОМЕТАЛЛУРГИИ

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА масштаб 1 : 1 000 000

КАРТА ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

№ 42 (Самара)



Составитель: И.И. Савинков
Проверил: И.И. Савинков
Инженерно-геологическая карта
Самара, 1998 г.

Масштаб 1 : 1 000 000

Составитель: И.И. Савинков
Проверил: И.И. Савинков

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ

Параметр	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение
Параметр 1	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05
Параметр 2	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05

Параметр	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение
Параметр 1	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05
Параметр 2	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05

Параметр	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение
Параметр 1	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05
Параметр 2	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05

Г



Д



Е



В



Б

Параметр	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение
Параметр 1	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05
Параметр 2	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05

Параметр	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение
Параметр 1	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05
Параметр 2	0,10	0,15	0,05	0,10	0,15	0,05

Схемы к карте геокриологических условий



Ж



И



К

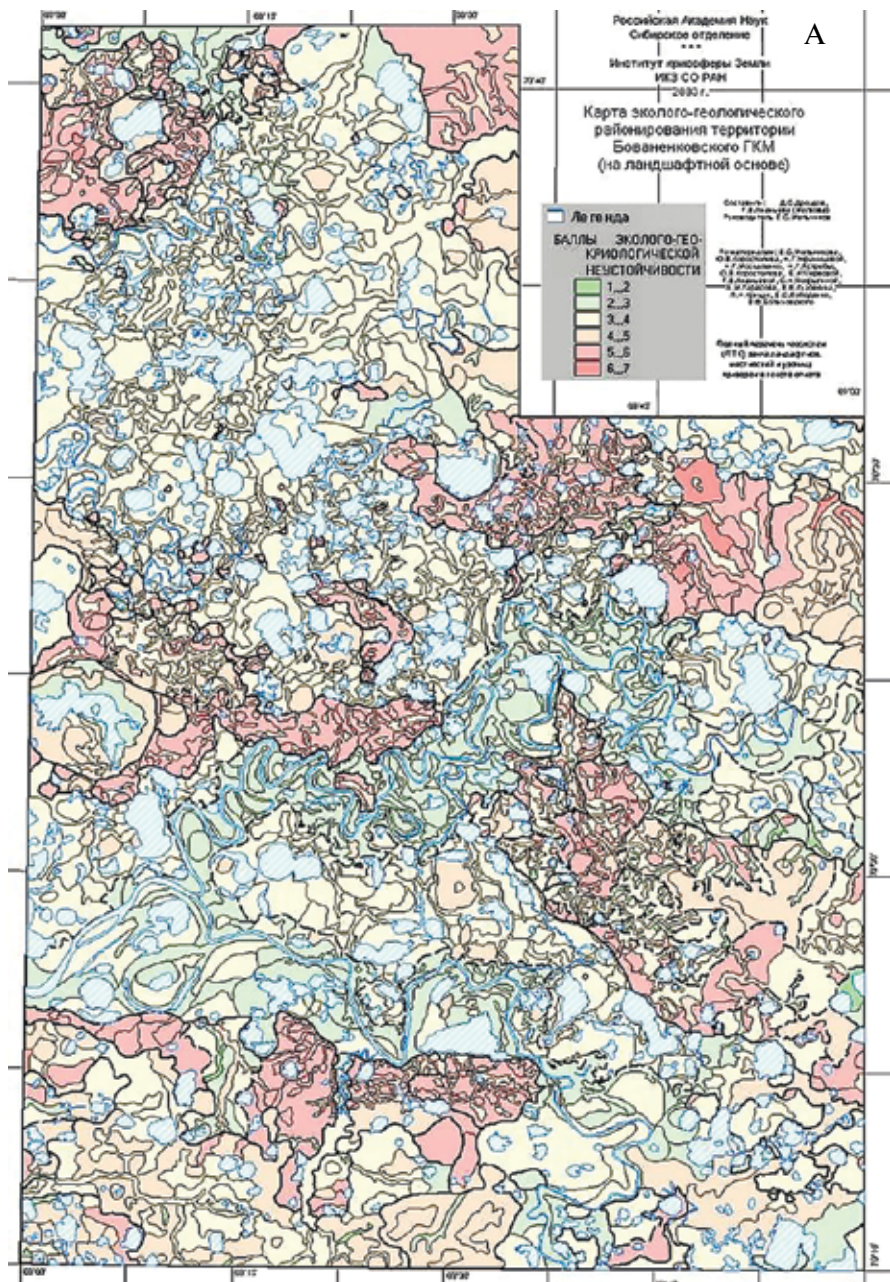


Л

М

Рис. 7.8. Образ Карты геокриологических условий к инженерно-геологической карте масштаба 1:1 000 000 листа Q-42 (Салехард):

А — карта геокриологических условий; Б — легенда; В — схема расположения листов Западно-Сибирской серии; Г — схема использованных материалов; Д — схема административного деления; Е — прогнозная карта среднегодовой температуры пород на 2050 г.; Ж — схема мощности мерзлых пород; И — схема льдистости мерзлых пород; К — схема мощности и глубины залегания реликтовых мерзлых пород; Л — схема распространения и мощности пород с крионэгами; М — место штамп листа



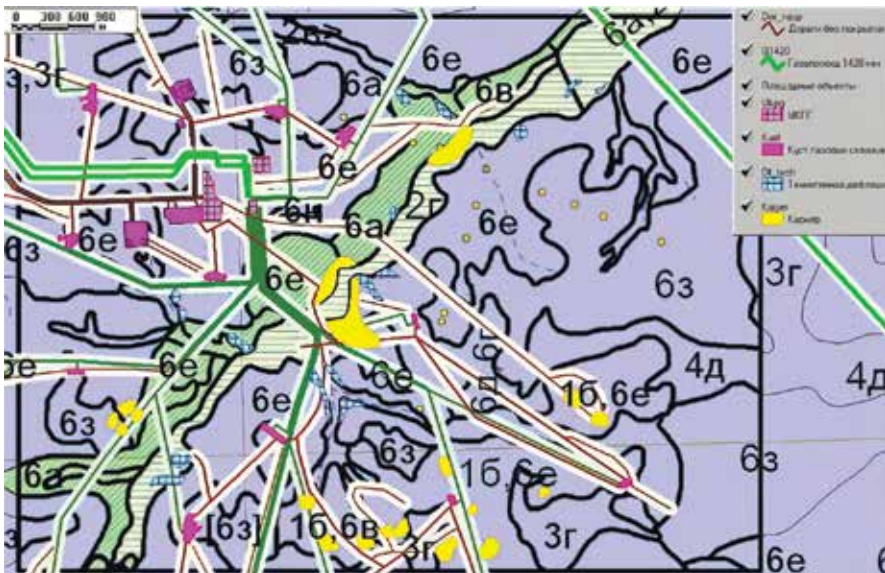


Рис. 7.10. Карта ландшафтов, техногенной нагрузки и зон техногенного влияния района ГП-12 Уренгойского НГКМ

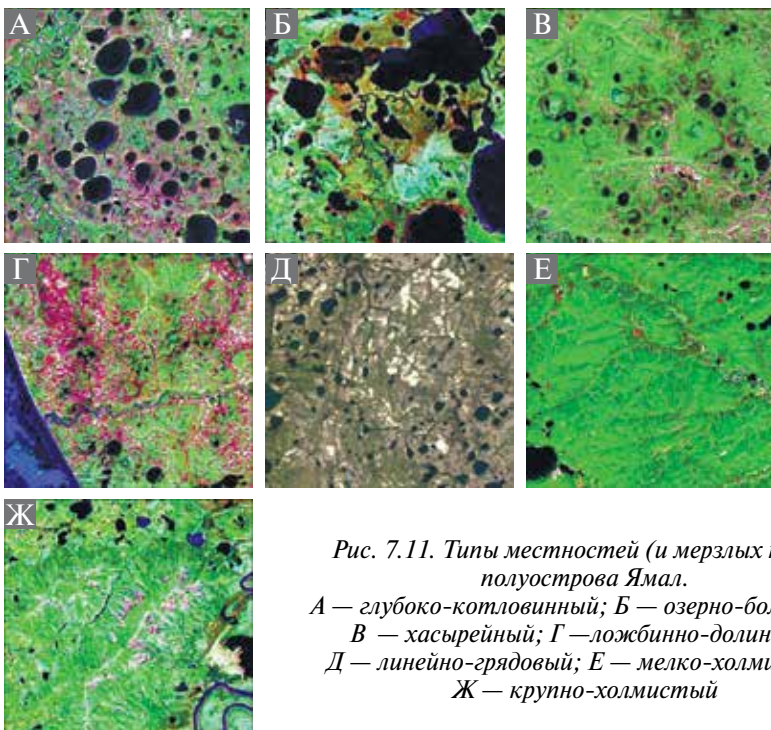


Рис. 7.11. Типы местностей (и мерзлых толщ) полуострова Ямал.
 А — глубоко-котловинный; Б — озерно-болотный;
 В — хасырейный; Г — ложбинно-долинный;
 Д — линейно-грядовый; Е — мелко-холмистый;
 Ж — крупно-холмистый

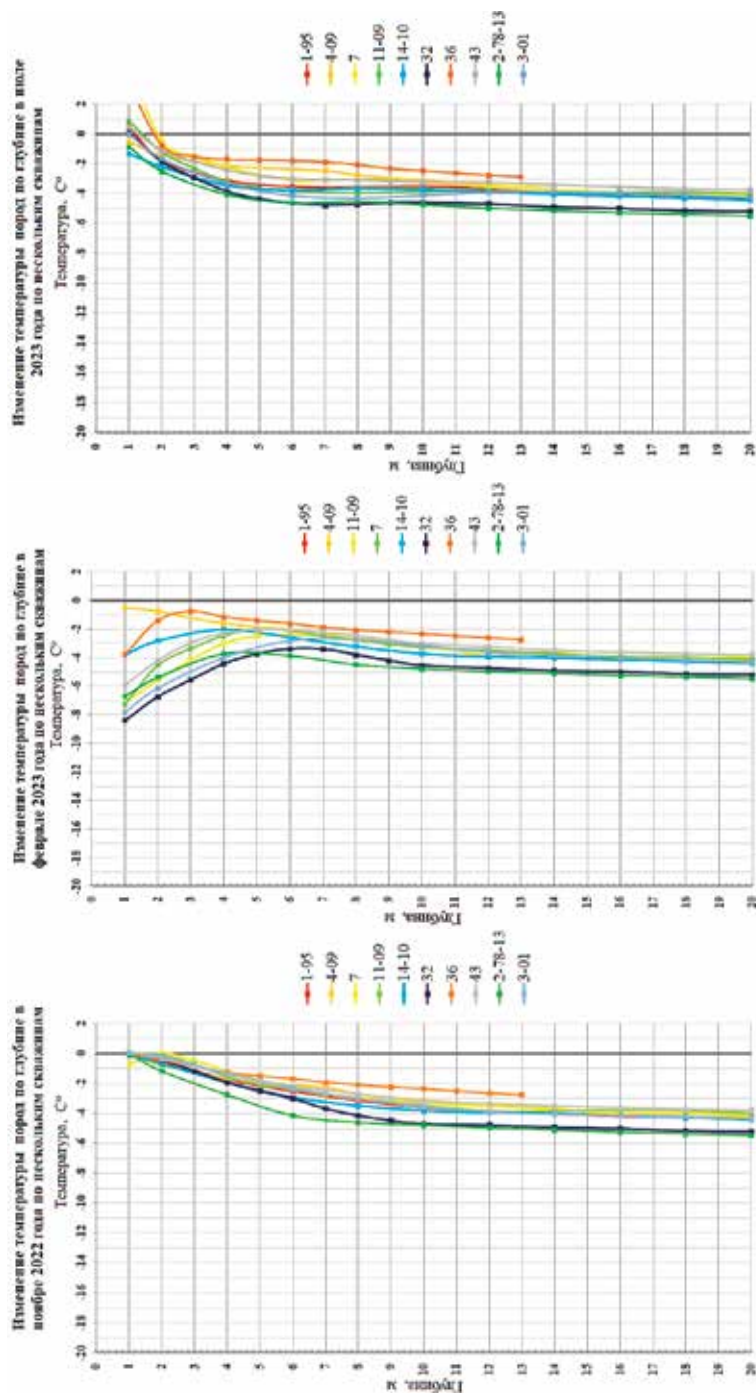


Рис. 8.2. Изменение среднемесячных температур мерзлых толщ в различных скважинах в отдельные сезоны года

Карта геокриологического районирования криолитозоны России для

Условные обозначения
I. Элементы геокриологического районирования

ЗОНЫ	ОБЛАСТИ	РАЙОНЫ*)	ПОДРАЙОНЫ
Характер распространения мерзлых пород и подземных вод	Регионы I порядка (Крупные геологические структуры)	Регионы II порядка (Крупные морфоструктуры)	Регионы III порядка (Тип расчленения рельефа)

Перечень регионов I порядка (Надпорядковые геолого-тектонические структуры):

I. Баренцевская платформа; II. Восточно-Европейская платформа; III. Урало-Новоземельская горно-складчатая система; IV. Западно-Сибирская плита V. Таймыро-Североземельская горно-складчатая система; VI. Сибирская платформа. VII. Верхояно-Чукотская горно-складчатая система. VIII. Горно-складчатая система Тихоокеанского подвижного пояса. IX. Горно-складчатая система Дальнего Востока. X. Горно-складчатая система Забайкалья. XI. Горно-складчатая система Алтая и Саян.

Перечень регионов II порядка (Крупные морфоструктуры I порядка в пределах регионов I порядка)

I. Баренцевская платформа;

1. Баренцево-морской, 2. Земля Франца Иосифа.

II. Восточно-Европейская платформа

1. Беломорско-Печорский, 2. Кольский, 3. Канинско-Тиманский, 4. Печорский, 5. Восточно-Европейский,

III. Урало-Новоземельская горно-складчатая система

1. Новоземельский; 2. Пай-Хойский, 3. Полярно-Уральский, 4. Северо-Уральский

IV. Западно-Сибирская плита

1. Ямало-Гыданский шельфовый, 2. Ямало-Ненецкий, 3. Северо-Уральский, 4. Сибирские увалы, 5. Северо-Енисейский, 6. Средне-Сибирский, 7. Южно-Енисейский

V. Таймыро-Североземельская складчатая система

1. Таймырский шельфовый, 2. Североземельский, 3. Таймырский.

VI. Сибирская платформа

1. Лено-Анабарский шельфовый, 2. Енисейско-Хатангский, 3. Лено-Анабарский, 4. Енисейско-Путангский, 5. Анабарский, 6. Прианабарский, 7. Тунгусско-Вилуйский, 8. Тунгусский, 9. Приверхоанский, 10. Центральное-Якутский, 11. Приалданский, 12. Ангаро-Ленский.

VII. Верхояно-Чукотская горно-складчатая система

1. Яно-Чукотский шельфовый, 2. Верхоянский, 3. Яно-Оймяконский, 4. Черско-Момский, 5. Яно-Колымский, 6. Северо-Чукотский, 7. Юкагири-Ануйский, 8. Колымский.

VIII. Геосинклинальная горно-складчатая система Тихоокеанского подвижного пояса.

1. Яно-Чукотский, 2. Анадыро-Пенжинский, 3. Корьянский, 4. Камчатский, 5. Приохотский, 6. Сахалинский.

IX. Горно-складчатые системы Дальнего Востока



II. Геокриологические и гидрогеологические условия.

Геокриологические (гидрогеологические) зоны

	сплошного распространения ММП (температура < -5)		сплошного и прерывистого распространения ММП
	сплошного распространения ММП (температура -1 -5)		распространения ММП в горных районах зона глубоко залегающих ММП
	прерывистого и массивно-островного распространения ММП		мерзлая зона на шельфе морей
	островного распространения ММП		зона немерзлых пород

Регионы III порядка (группы типов мерзлых толщ в пределах криолитозоны России)

	поймы крупных рек		плато, плоскогорья низковысотные
	низкие террасы		плато, плоскогорья средневвысотные
	низменные равнины		плато, плоскогорья возвышенные
	возвышенные равнины		плато высокие
	предгорные, межгорные равнины		низкогорья
	межгорные котловины		среднегорья и высокогорья
	наклонные равнины с вулканами		

выбора объектов мониторинга и обоснования наблюдательных сетей.

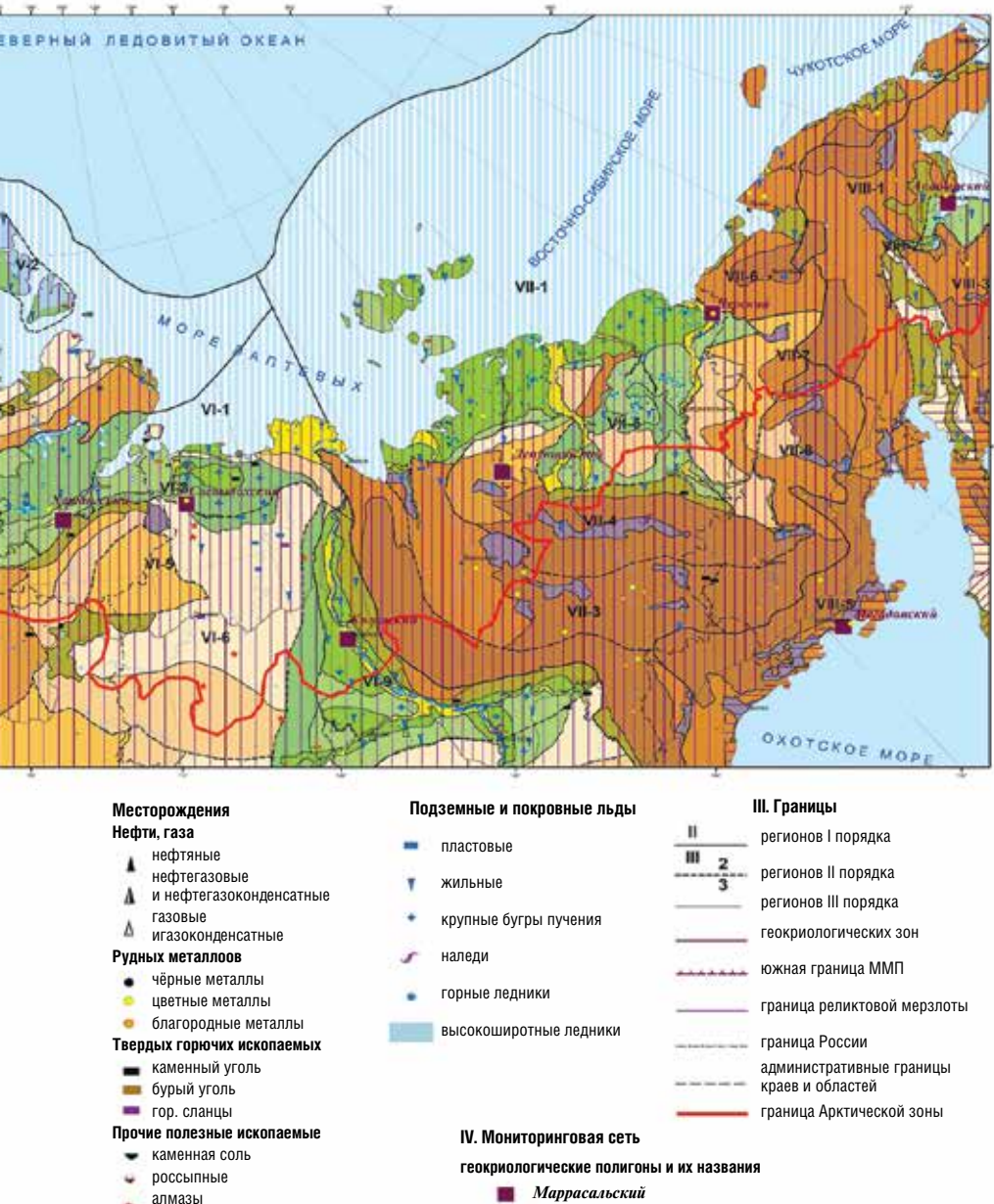
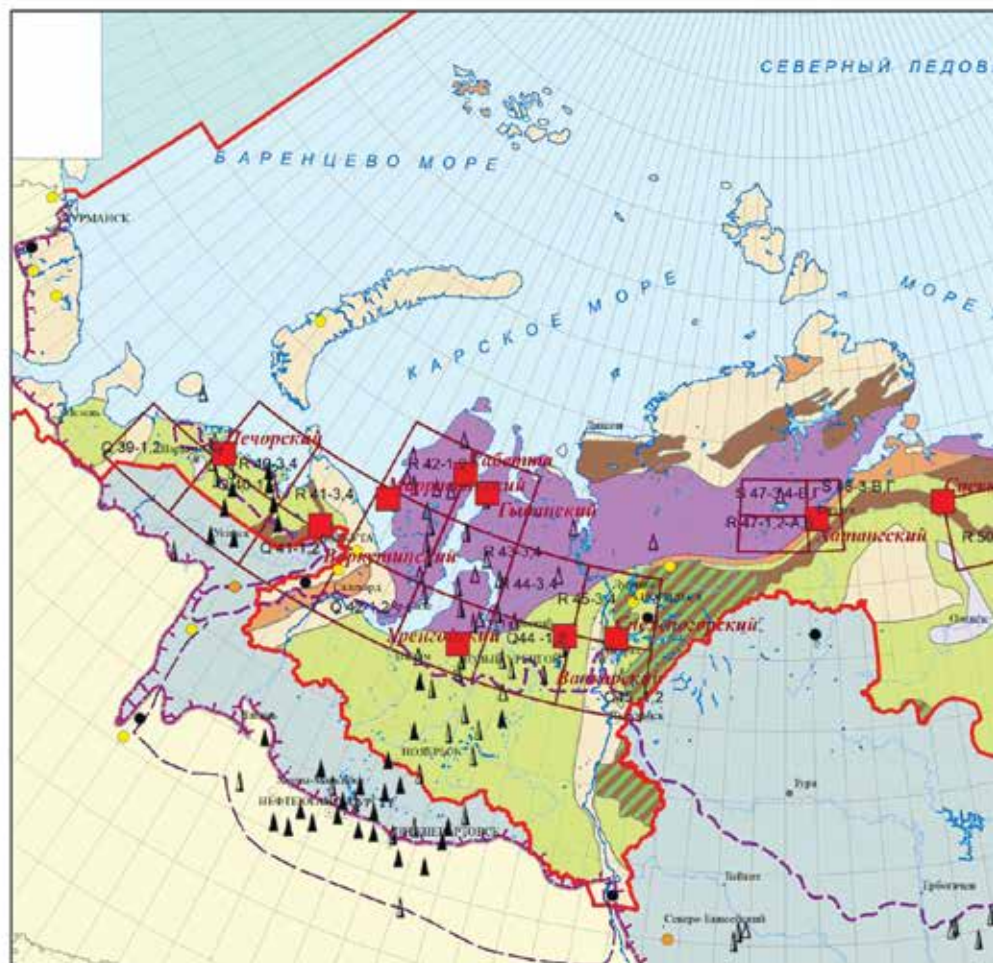


Рис. 7.13. Размещение полигонов государственного мониторинга вечной мерзлоты на карте геокриологического районирования криолитозоны России

Карта полезных ископаемых Арктической зоны РФ с геокриологическими



Области распространения углеводородного сырья

- нефтегазоносные территории на шельфе
- нефтеносные и нефтегазоносные территории
- газоносные и газонефтеносные территории
- газоносные территории с бурым углём
- нефтегазоносные и каменноугольные

Области распространения твердых горючих ископаемых

- каменный уголь
- горючие сланцы
- бурый уголь

Месторождения

Нефти, газа

- нефтяные
- нефтегазовые
- и нефтегазоконденсатные
- газовые
- и газоконденсатные

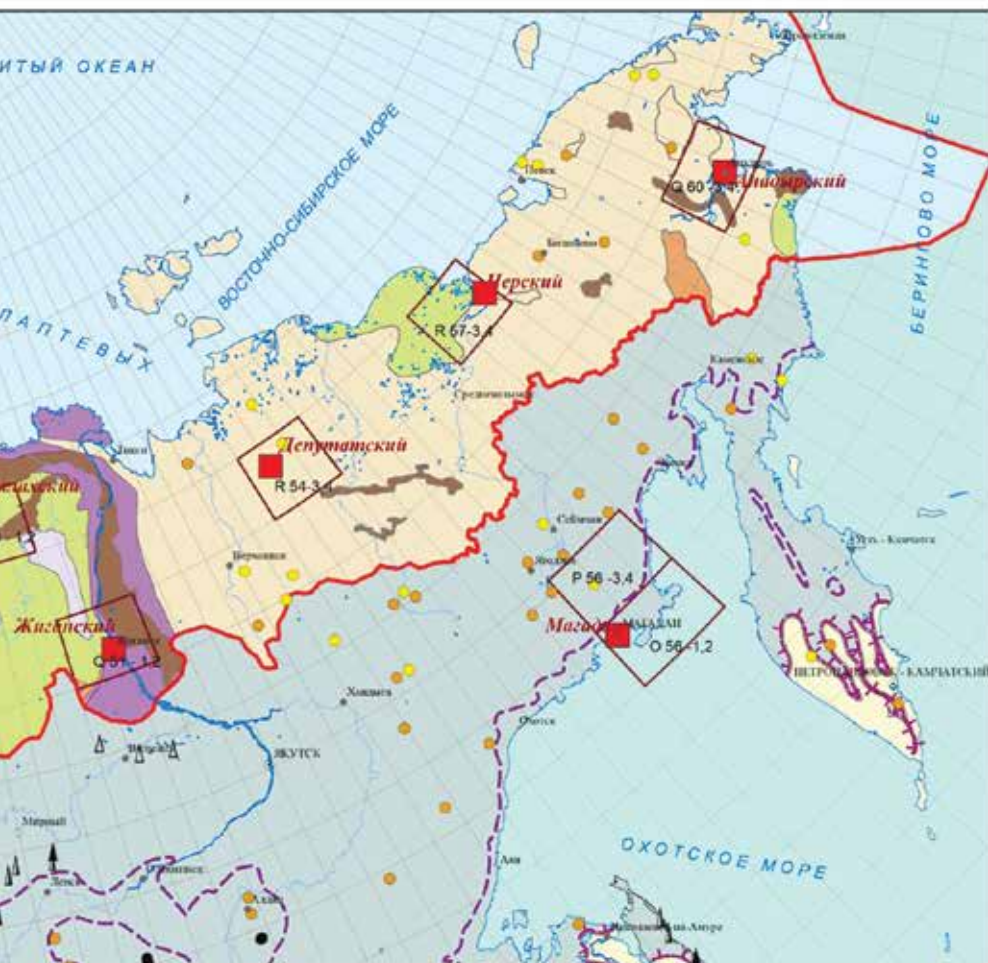
Рудные металлы

- чёрные металлы
- цветные металлы
- благородные металлы

полигонами государственного мониторинга вечной мерзлоты

Масштабная линейка

0 25 50 100 Км



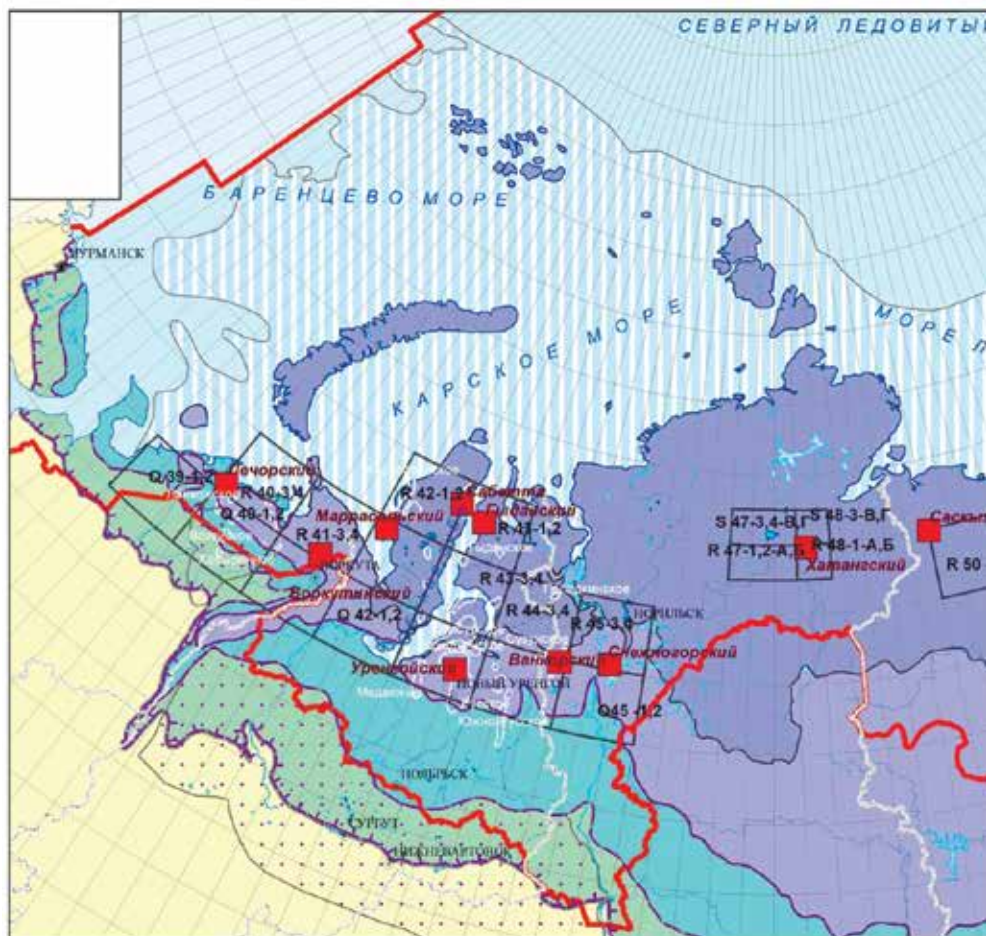
Мониторинговая сеть

Прочее

	геокриологические полигоны и их названия		граница Арктической юны РФ
	границы листов 500 000 карт, выбранные для обоснования объектов мониторинга		граница распространения сплошной мерзлоты
			граница распространения мерзлоты
			граница распространения реликтовой мерзлоты
			криолитозона РФ

Рис. 7.14. Размещение полигонов государственного мониторинга вечной мерзлоты на карте полезных ископаемых АЗРФ

Макет размещения геоэкологических полигонов государственного



Геоэкологические зоны

 сплошного распространения ММП (температура < -5)	 островного распространения ММП
 сплошного распространения ММП (температура -1 - 5)	 мерзлая зона на шельфе морей
 прерывистого и массивно-островного распространения ММП	 зона немерзлых пород

мониторинга вечной мерзлоты на геокриологической карте РФ

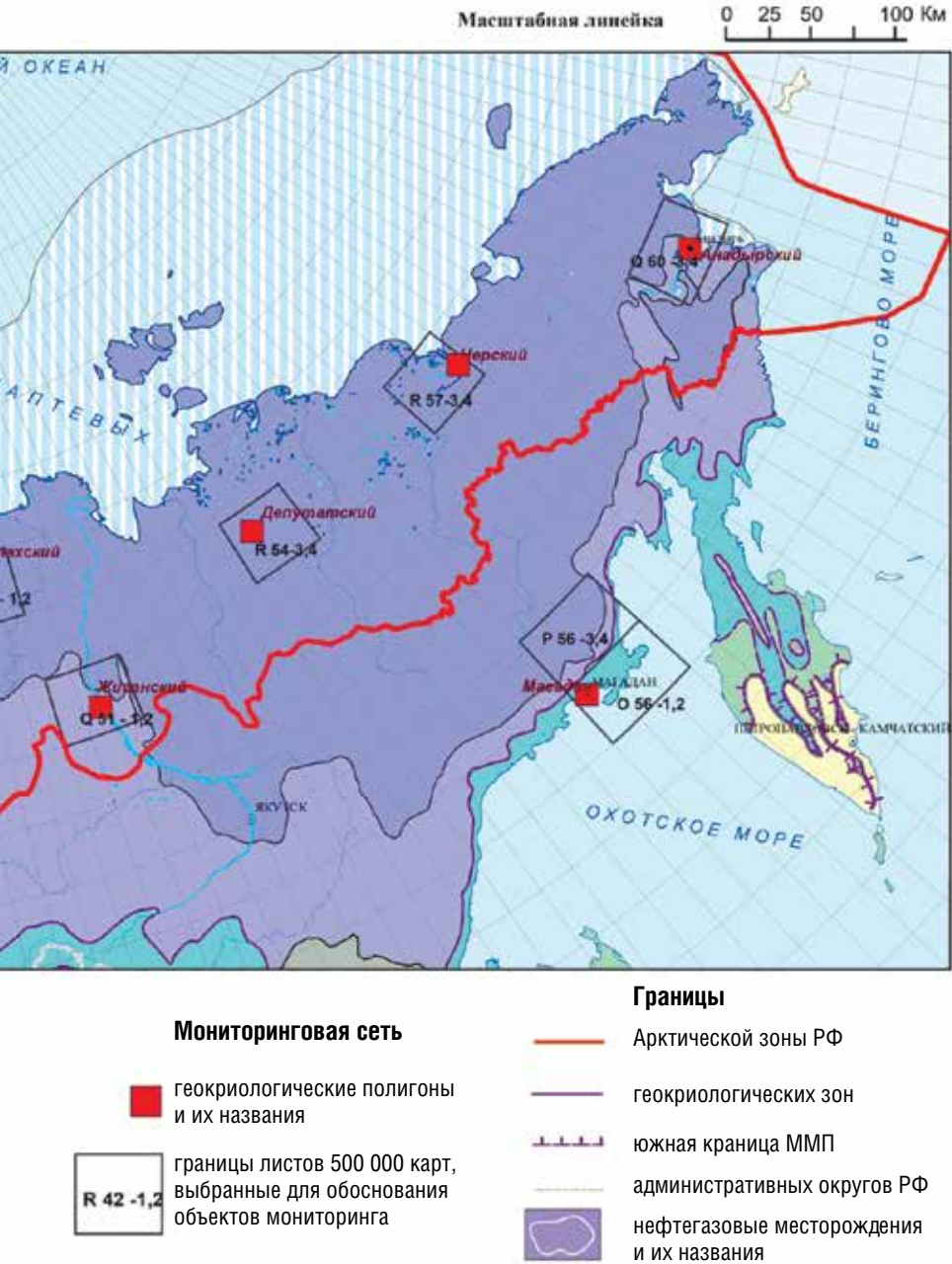


Рис. 7.15. Размещение полигонов государственного мониторинга вечной мерзлоты на геокриологической карте РФ

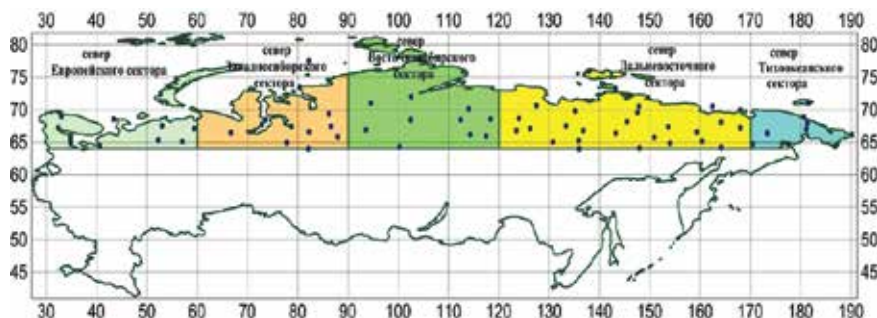


Рис. 7.16. Схема климатического районирования территории АЗРФ

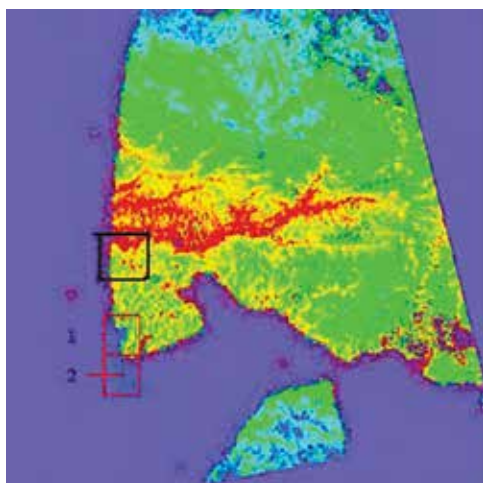


Рис. 8.21. Распределение величины сезонного пучения на участке Западного Ямала по данным дифференциальной интерферометрии. Наибольшее пучение (6 см) присуще долинам местных рек, наименьшее (0 см) — дренированным поверхностям

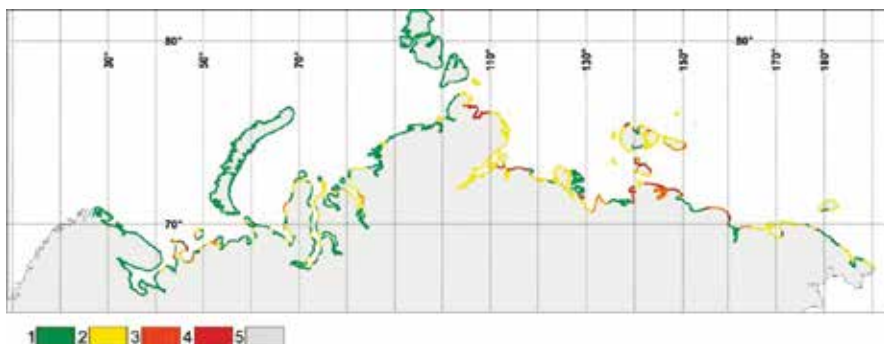


Рис. 8.40. Скорость отступления морских берегов Российской Арктики. Зеленый — стабильные берега; отступление: желтый — 0–1 м/год, оранжевый — 1–2 м/год, красный — 2–10 м/год

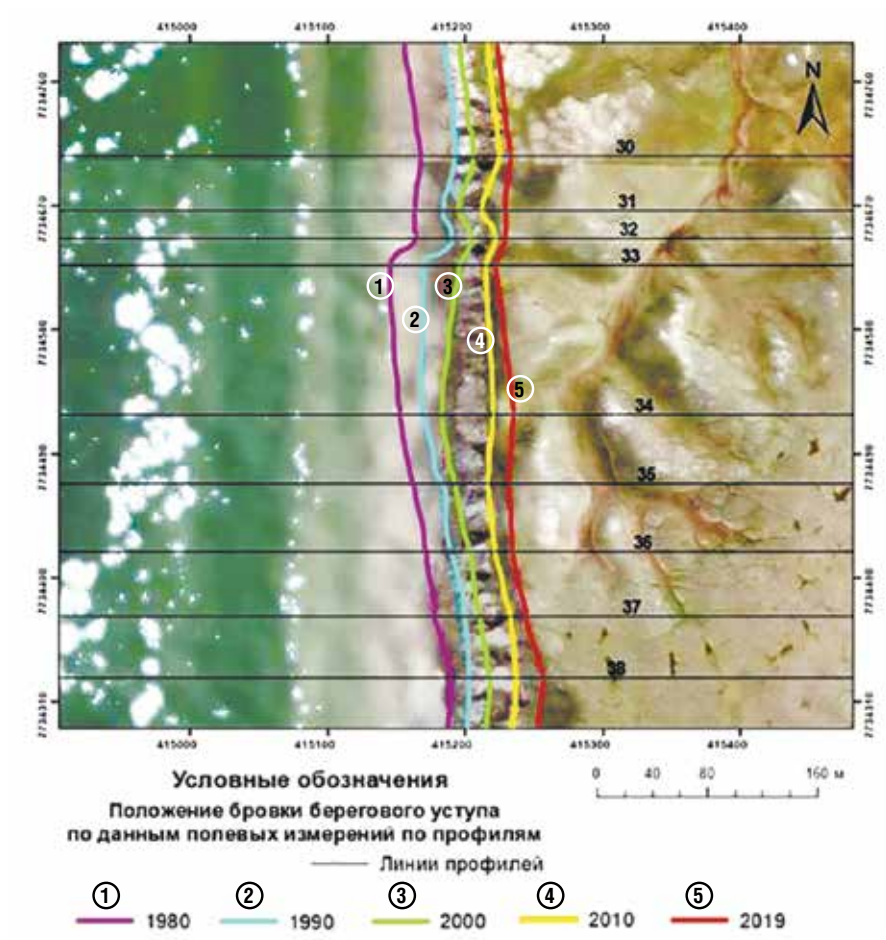


Рис. 8.45. Положение береговой линии по данным наблюдений на спутниковом снимке сверхвысокого разрешения (0,5 м) GeoEye от 22 июля 2009 г. Западный Ямал

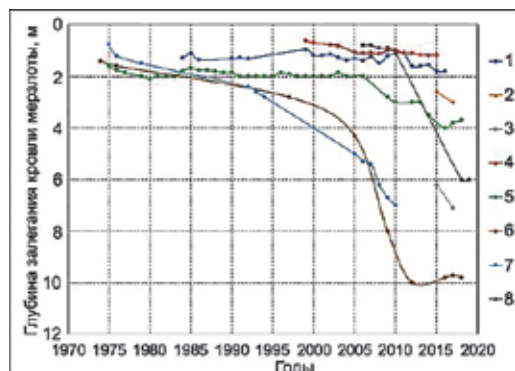


Рис. 8.55. Понижение кровли мерзлоты во времени в различных районах Российской Арктики. 1 — мыс Болванский, скв. 59, 2 — Кумжа, скв. 3 Ки, центральная часть площадки, 3 — Кумжа, краевая часть площадки, 4 — Воркута, 5 — Надым, скв. 23-75, 6 — Южный Уренгой, скв. 5-01, 7 — Южный Уренгой, скв. 5-08, 8 — Тарко-Сале, скв. 2 Т-С

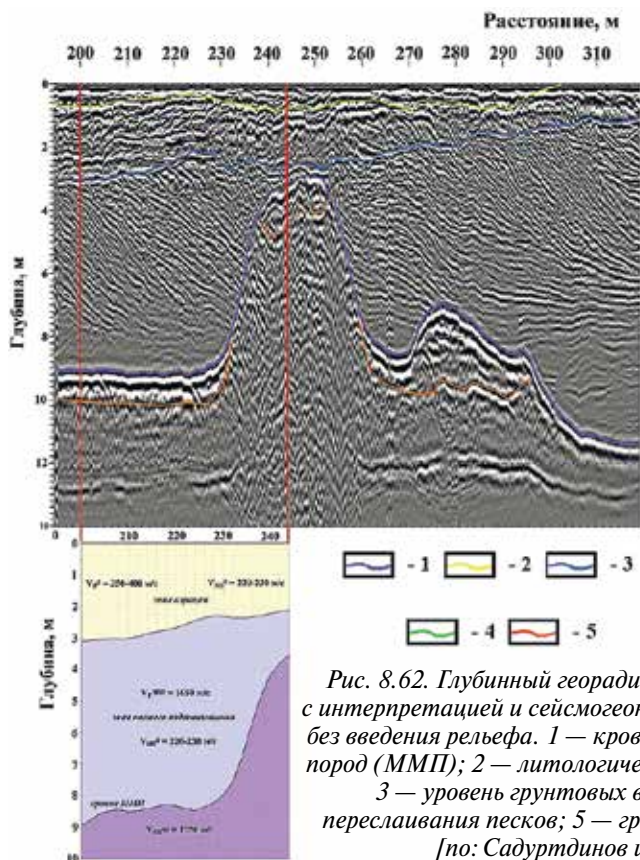


Рис. 8.62. Глубинный георадиолокационный разрез с интерпретацией и сейсмогеокриологические разрезы без введения рельефа. 1 — кровля многолетнемерзлых пород (ММП); 2 — литологическая граница в песках; 3 — уровень грунтовых вод; 4 — границы переслаивания песков; 5 — граница в толще ММП [по: Садуртдинов и др., 2016]

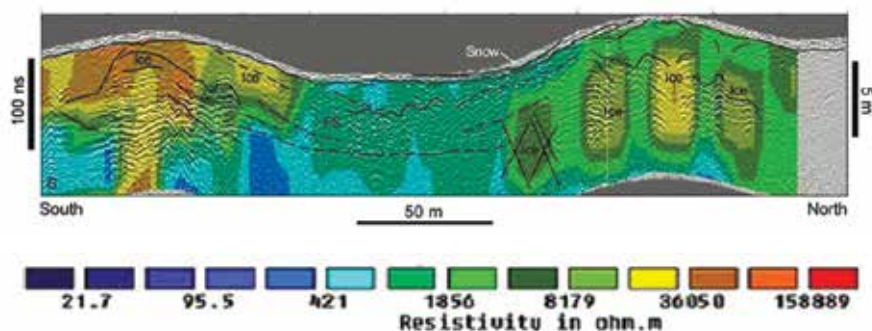


Рис. 8.63. Результат совместной интерпретации георадарных и электроразведочных данных по [De Pascale, et al., 2008]. (FS — frozen sediment, мерзлый грунт, ice — лед). Данные получены с антенной 200 МГц

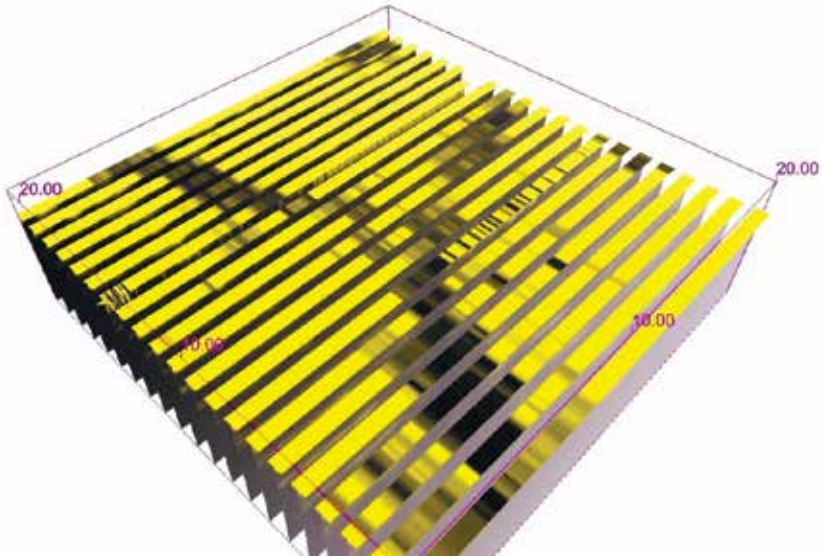


Рис. 8.64. Трехмерное представление георадарных данных.

Верхняя кромка находится на глубине около 150 см.

Черным отображаются «клинья» льда, желтым — грунт [Судакова и др., 2023].

Пример успешного применения магниторазведки для картирования скрытых подземно-жильных льдов едомного типа приведен в работе [Цибизов и др., 2018]

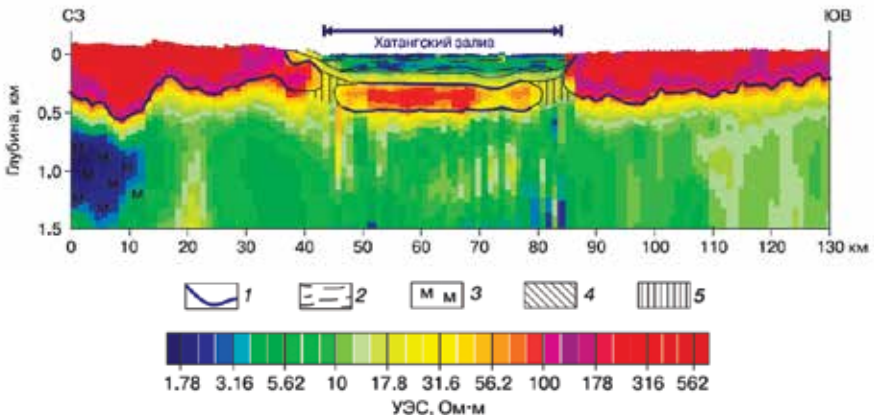


Рис. 8.65. Геоэлектрический разрез верхних 1,5 км по профилю в районе Хатангского залива. На акватории магнито-теллурические зондирования проводились со льда; шаг по профилю — 500 м. 1 — граница ММП; 2 — талый слой под акваториями; 3 — зоны пониженного сопротивления под толщей ММП; 4 — зоны частичного протаивания; 5 — зоны сплошного протаивания

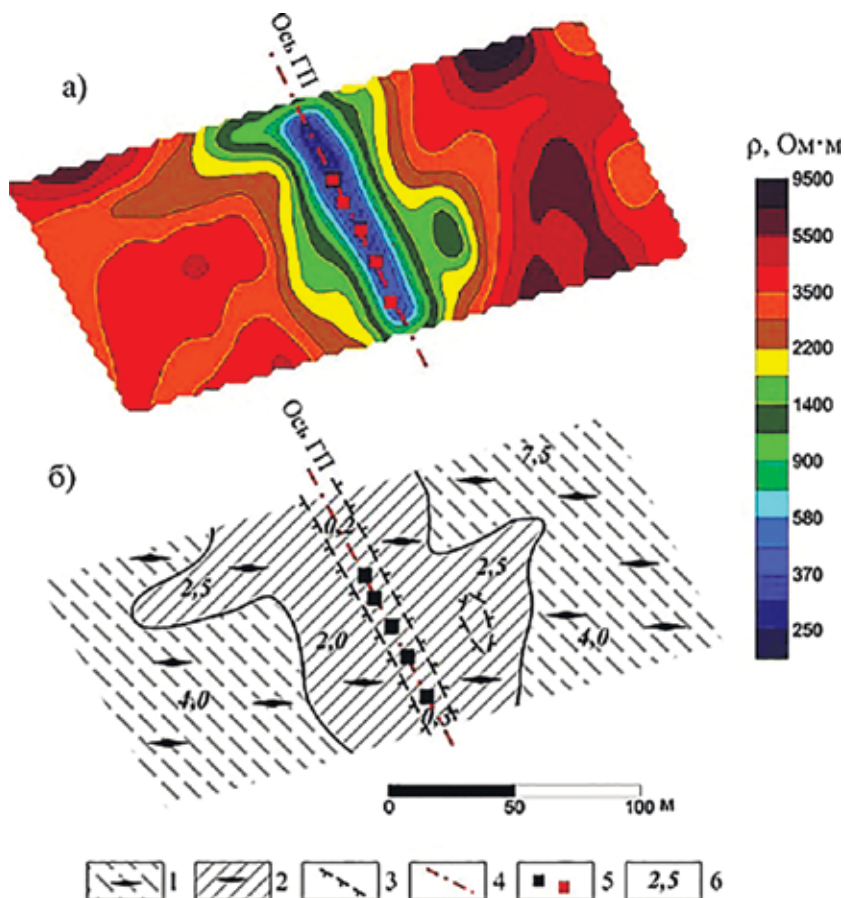
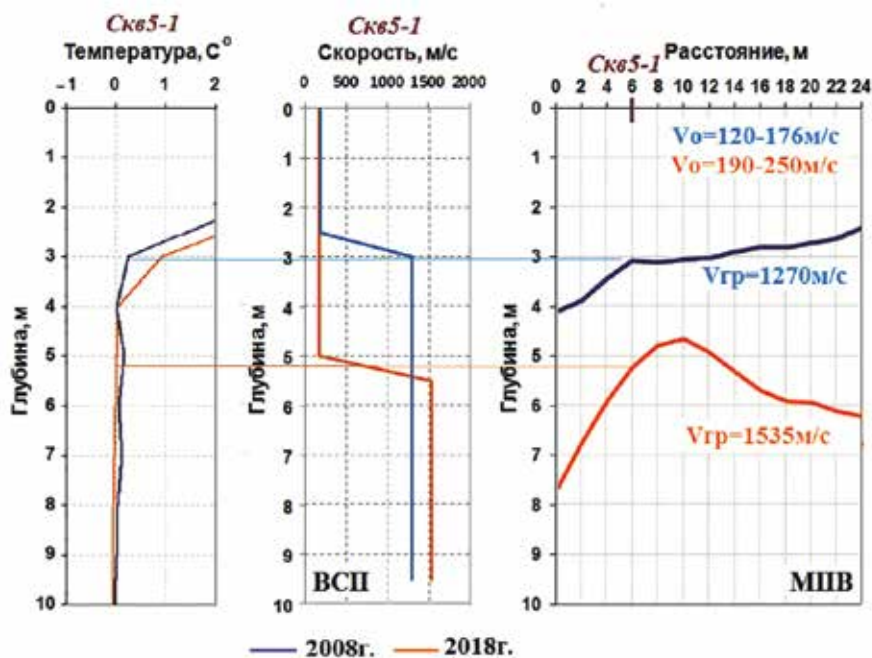


Рис. 8.67. Карта УЭС на глубине 4 м (а) и инженерно-геологическая схема интерпретации данных ЭТ (б). 1 — супесь сильнольдистая; 2 — суглинки иловатые, сильнольдистые, сильно пучинистые; 3 — граница распространения ММП; 4 — ось газопровода; 5 — деформационные марки; 6 — УЭС грунтов в кОм·м

А



Б

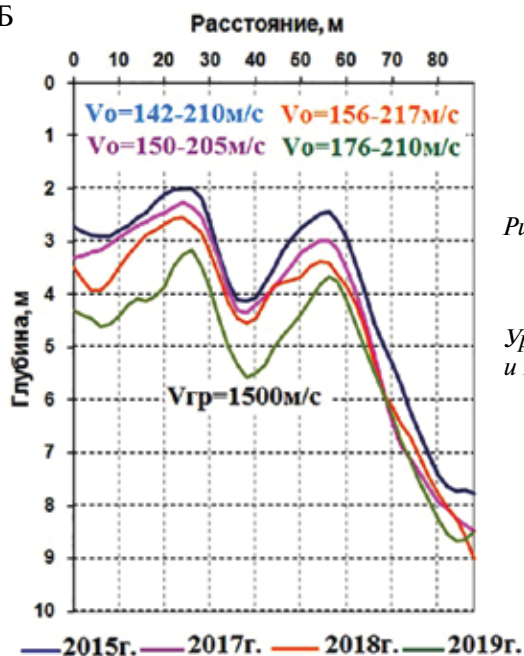


Рис. 8.68. Результаты режимных сейсмических наблюдений за положением кровли ММП на стационарах в районе Уренгойского месторождения (А) и Кумжа (Ненецкий автономный округ, пойма р. Печора) (Б)

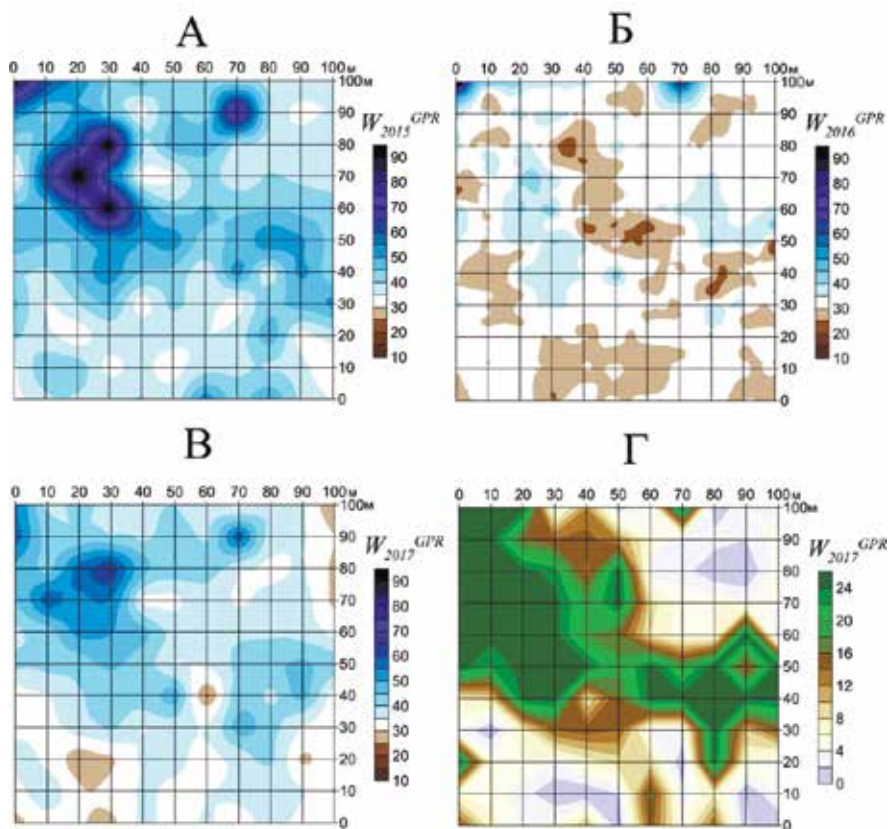


Рис. 8.70. Рассчитанная по данным георадиолокации объемная влажность СТС, % ($W_{об}$) на стационаре Кашин (CALM R24A–I) в 2015 (А), 2016 (Б) и 2017 гг. (В), Г — мощность торфа, см

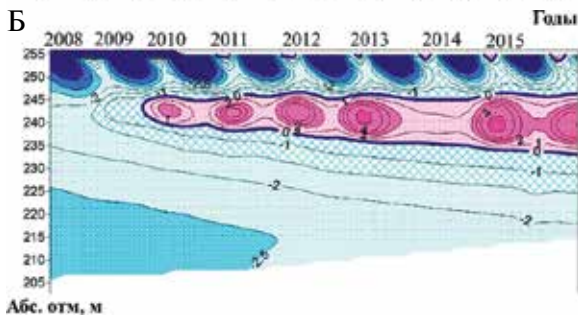
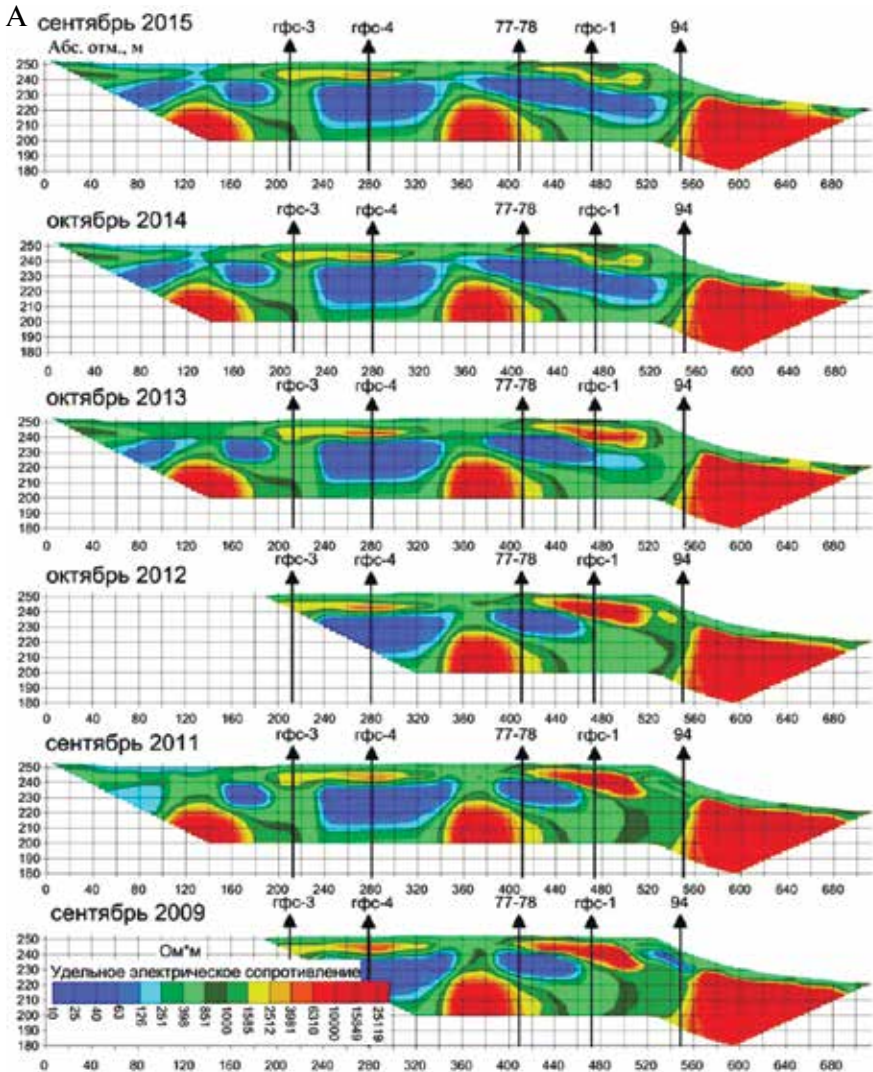


Рис. 8.73.
Геоэлектрические
разрезы (А) и фрагмент
температурного
разреза (Б) (скважина
78) за 2008–2014 гг. при
мониторинге состояния
береговых примыканий
плотины Вилюйской ГЭС

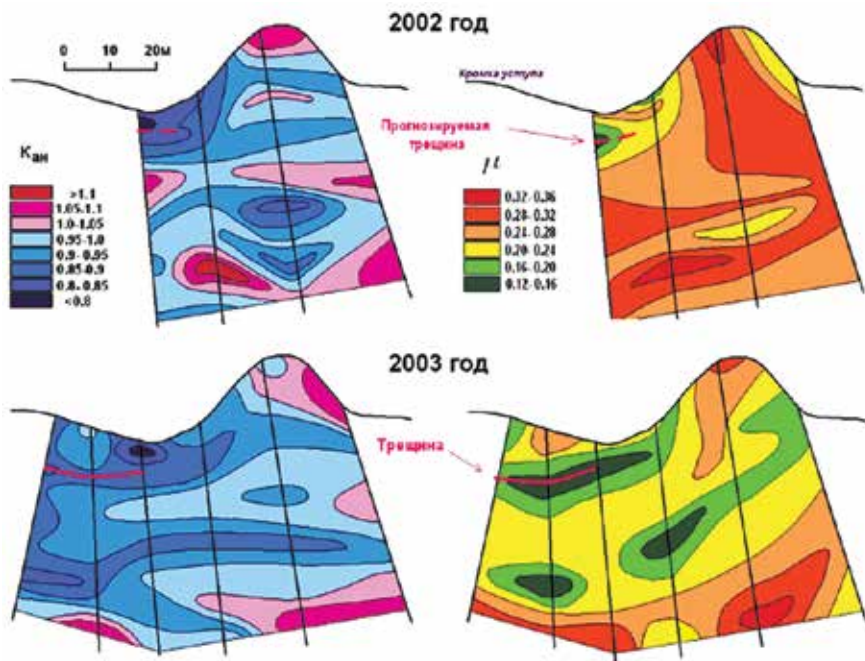


Рис. 8.74. Распределение значений коэффициента анизотропии продольных волн ($K_{ан}$) и коэффициента Пуассона (μ) грунтового массива в морском береговом уступе (Геокриологический стационар Болванский, Ненецкий автономный округ, устье р. Печора)

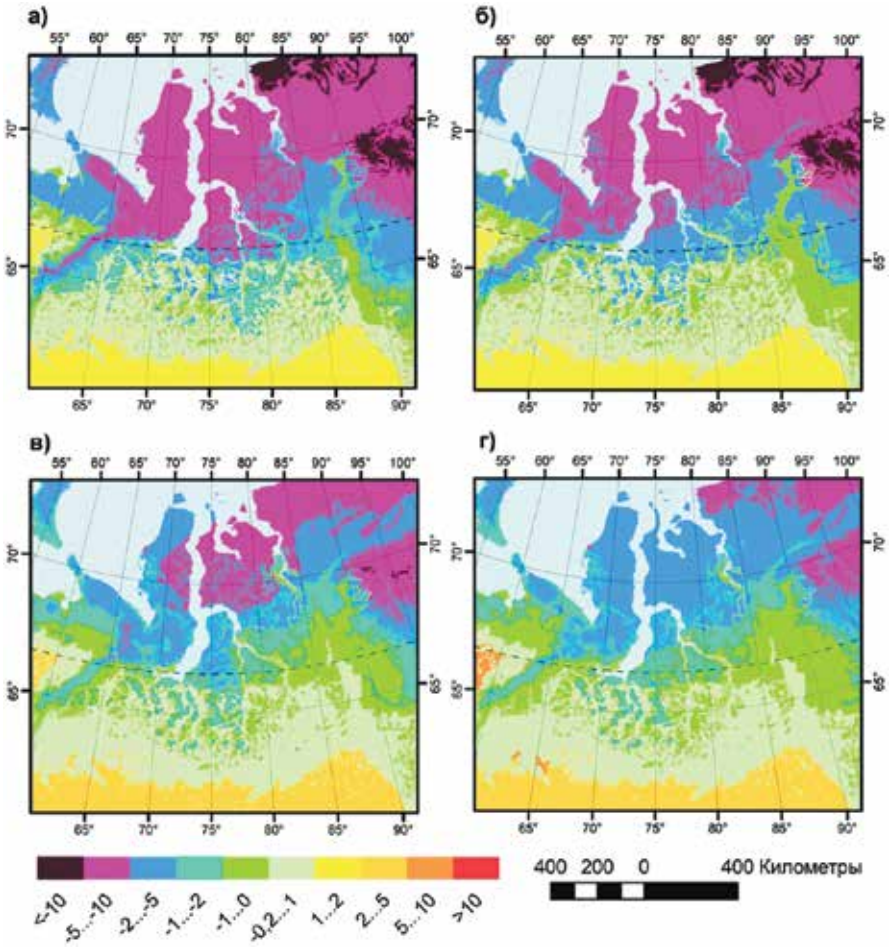


Рис. 10.2. Динамическая картографическая модель среднегодовой температуры ММП Западной Сибири [Бердников и др., 2022]:
 а — карта-реконструкция температуры ММП на 1960 г.;
 б — карта температуры ММП на 2000 г.;
 в — прогнозная карта температуры ММП на 2050 г.;
 г — прогнозная карта температуры ММП на 2100 г.

Динамическая картографическая модель
среднегодовой температуры ММП Западной Сибири

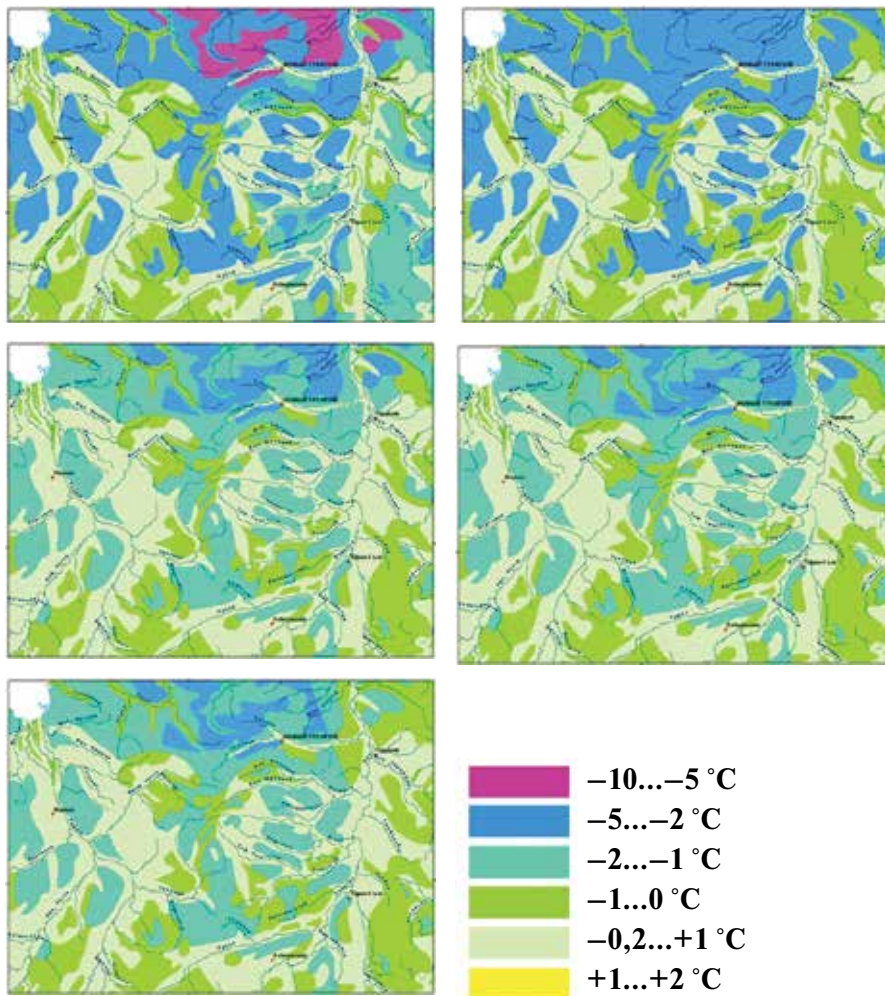


Рис. 10.3. Динамическая карта среднегодовой температуры ММП для территории Пуровского и Надымского районов в период 1960–2045 гг. [Бердников, 2024].