

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева
Российской академии наук
(ИГЭ РАН)

На правах рукописи

Сергеев Дмитрий Олегович

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ
ОПАСНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА И
ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ**

1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Диссертация на соискание учёной степени
доктора геолого-минералогических наук

г. Москва, 2025

Оглавление

Введение	4
Глава 1 Понятие геокриологической опасности	10
1.1 Существующие подходы к определению содержания и структуры понятия геокриологической опасности.....	10
1.2 Источники и виды геокриологических опасностей	20
1.3 География геокриологических опасностей	43
1.4 Процедура анализа геокриологических опасностей	48
Глава 2 Характеристика геокриологических опасностей	58
2.1 Показатели наличия геокриологической опасности	58
2.2 Показатели степени геокриологической опасности.....	66
2.3 Динамика геокриологических опасностей и её связь с изменениями состояния вечной мерзлоты и активностью криогенных процессов	84
Глава 3 Методические приёмы анализа геокриологических опасностей	93
3.1 Учёт детерминированности и стохастичности характеристик геокриологических условий	93
3.2 Учёт активности и направленности геокриологических процессов.....	96
3.3 Учёт пространственного масштаба исследования.....	111
3.4 Учёт временного масштаба исследования при разновременных внешних воздействиях	119
3.5 Учёт геокриологической истории развития территории	134
Глава 4 Опыт анализа геокриологических опасностей	137
4.1 Оценка геокриологических опасностей по разрезу толщи многолетнемёрзлых пород.....	137
4.2 Региональная оценка геокриологических опасностей	147
4.2.1 Условно ненарушенные территории и меняющиеся природные условия	148
4.2.2 Антропогенно нарушенные территории при меняющемся климате	164
Глава 5 Адаптация хозяйственной деятельности на основе анализа геокриологических опасностей	185
5.1 Процедуры оценки геокриологических опасностей как адаптационного мероприятия.....	188
5.2 Адаптация к геокриологическим опасностям на предпроектных стадиях освоения территории.....	192

5.3 Адаптация к геокриологическим опасностям на стадиях проектирования и строительства объектов.....	197
5.4 Адаптация к геокриологическим опасностям на стадии эксплуатации объектов и при общехозяйственном использовании территории	210
5.5 Адаптация к геокриологическим опасностям на этапе послеэксплуатационной рекультивации и учёт геокриологических опасностей при оценке накопленного ущерба.....	217
5.6 Территориальные и отраслевые программы адаптации к геокриологическим опасностям как инструмент оптимизации управления.....	226
Заключение	232
Список использованных источников	236
Список публикаций по теме диссертации	250

Введение

На территории криолитозоны лица, принимающие решения, и инженеры сталкиваются со спецификой развития природно-техногенных процессов, воздействующих на объекты инфраструктуры. Долгосрочный прогноз активности таких процессов необходим при территориальном комплексном планировании и оценках качества и количества природных ресурсов или характеристики состояния экосистем. Средне- и краткосрочные прогнозы подготавливаются для оценки уязвимости локальных реципиентов воздействия (здания, дороги, трубопроводы и т.п.) и устойчивости хозяйственной деятельности. Среднесрочный прогноз необходим также для подготовки рекомендаций по оптимизации инженерной защиты территории.

Однако идентификация геокриологических процессов, требующих прогноза, опирается на понимание существующей или потенциальной опасности, связанной с ними. Таким образом, характеристика опасности является первым необходимым шагом прикладных исследований инженерно-геологической направленности на территории криолитозоны. Изложенные обстоятельства обуславливают актуальность настоящей работы.

Разработанность частных аспектов темы исследований относительно высока. Геокриологические процессы рассматриваются с точки зрения их опасности для хозяйственной деятельности во многих работах в России и за рубежом с начала XX века (Основы геокриологии, 2008; Péwé, 1993; Зотова, Тумель, 1999; Геокриологические опасности, 2000; Nelson, Anisimov & Shiklomanov, 2002; Kääb, 2008; Hayley & Horne, 2008). Однако на практике сохраняется проблема оптимизации хозяйственной деятельности на территории криолитозоны, обусловленная несогласованностью методов и сроков проведения изысканий и других видов натурных исследований с темпами освоения территории.

Целью настоящего исследования является выработка методологических основ анализа геокриологических опасностей для подготовки адаптационных решений в условиях меняющегося климата и техногенной нагрузки.

Задачами исследования являются:

- 1) определение содержания понятия геокриологической опасности;

- 2) характеристика источников, видов и географии геокриологических опасностей;
- 3) анализ связи геокриологических опасностей с состоянием и динамикой геокриологических условий и другими природными и техногенными факторами;
- 4) совершенствование подходов и требований к геокриологическому прогнозу, районированию и мониторингу как инструментам оценки опасности;
- 5) обобщение и анализ практики анализа геокриологических опасностей по разрезу толщи многолетнемёрзлых пород и по площади территорий с природными и нарушенными техногенезом ландшафтами;
- 6) разработка процедуры оценки геокриологических опасностей;
- 7) разработка методологических основ научного сопровождения адаптации хозяйственной деятельности к изменениям климата и геокриологических условий на основе процедуры анализа геокриологических опасностей.

В диссертации изложены результаты исследования, основанного на обобщении и осмыслении результатов, полученных на протяжении 35 лет работ, проводившихся при непосредственном участии автора в периоды 1986-1992 г.г. в МГУ им. М.В.Ломоносова (геологический факультет, кафедра геокриологии), с 1992 по 2000 г.г. – в ФЦГС «Экология» Госкомэкологии России, с 2001 по 2003 г.г. – в университете Аляски (Фербенкс) и с 2003 по 2020 г.г. – в ИГЭ РАН по государственным заданиям и научно-исследовательским программам ОНЗ и Президиума РАН (в качестве ответственного исполнителя) – “Температурный режим и криогенные процессы в области развития многолетнемёрзлых толщ в условиях глобального потепления климата”, “Разработка прогноза состояния криолитозоны России в связи с изменениями климата”, “Научные основы использования природного холода и нетрадиционных источников тепла на территории криолитозоны в условиях изменяющегося климата”, “Математическое моделирование динамики криолитозоны Арктики на основе сочетания детерминированных и вероятностных методов”, “Катастрофические процессы в криолитозоне в условиях глобального потепления климата”, “Теоретические основы геоэкологического мониторинга в криолитозоне”, “Изменения

криолитозоны России, вызванные глобальным потеплением: природные опасности и геоэкологические проблемы”, “Геоэкологические риски функционирования ведущих природно-технических комплексов на территории криолитозоны России”, “Оценка роли неоднородностей ландшафта в отклике многолетнемерзлых пород на внешние воздействия”, “Углеводородные газы и криолитозона шельфа Арктики”, “Обзор существующего мирового опыта по выработке адаптационных мер по снижению негативного воздействия экзогенных геологических процессов на территории криолитозоны”, “Разработка методических рекомендаций по определению признаков и причин активности геокриологических процессов (на примере участка Большеземельской тундры)”, “Оценка масштабов и последствий реакции криолитозоны на изменение климата”, “Научно-методические основы инженерно-геокриологического прогноза с учётом изменений климата и техногенных нагрузок (на примере линейных объектов)”, “Разработка научно-методических основ использования геосистемного подхода для анализа динамики криолитозоны и геокриологических процессов при изменении климата, ландшафтов и техногенных воздействий”, “Разработка методики по оценке термокарстовой опасности и риска на региональном уровне” в составе ФЦП «Снижение рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 г.», а также по гранту РФФИ № 06-05-64959а «Влияние динамики климата и геокриологических условий на режим регионального стока и наледообразования горных водосборов бассейна реки Лена».

Для решения поставленных задач применялись подходы и методы исторической, динамической и региональной геокриологии, которые были использованы комплексно для обоснования признаков районирования территорий, а также для типизации наборов входных параметров и допущений количественного геокриологического прогноза геотехнической направленности. Использование новых полевых методов мерзлотной съёмки позволило обеспечить пространственную характеристику геокриологических опасностей. Использование методов комплексного геокриологического мониторинга позволило получить информацию о сезонной и многолетней изменчивости состояния вечной мерзлоты. Использование методов расчёта температурной динамики горных пород

обеспечило возможность количественной оценки и прогноза геокриологических опасностей.

Степень достоверности результатов работы определяется соответствием использованных методик геокриологического прогноза, геокриологического картирования и режимных геокриологических наблюдений классическим решениям геокриологической школы Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова (1953 г. - н.в.). Достоверность также подтверждается принятием и использованием результатов исследований и их методической основы в нормативных документах компаний Транснефть (2016 г. – Комплексная система мониторинга технического состояния магистральных нефтепроводов ПАО «Транснефть», расположенных в Арктической зоне и зоне распространения многолетнемерзлых грунтов), «Газпром» (2019 г. – Разработка проекта корпоративной программы адаптации производственной деятельности ПАО «Газпром» к меняющимся климатическим и геокриологическим условиям), Росавтодор (2022 г. – Исследование состояния автомобильных дорог, проходящих на территории распространения многолетних мёрзлых грунтов в пределах криолитозоны). Достоверность результатов косвенно подтверждается цитируемостью публикаций автора, зафиксированной РИНЦ за период с 1991 года: число цитирований из зарубежных журналов – 519, число цитирований из российских журналов – 308.

Научная новизна исследования и **теоретическая значимость** работы связаны с уточнением объёма и содержания понятия «опасность», отличающихся, с одной стороны, разделением актуальных и прогнозируемых опасностей, и, с другой стороны, с детализацией пространственных (в плане и в разрезе) и временных аспектов оценки геокриологических опасностей.

Впервые анализ геокриологических опасностей представлен в виде процедуры, опирающейся на современные методические достижения геокриологического мониторинга, геокриологического прогноза и геокриологического районирования. Районирование осуществляется с учётом зон воздействия нарушений условий теплообмена через поверхность с отдельной характеристикой условий и факторов формирования геокриологических условий. При выделении зон воздействия используются данные геокриологического,

геотехнического и экологического мониторинга. Геокриологический прогноз опирается на математическое моделирование тепловых полей, причём параметризация моделей основывается на районировании и осуществляется по данным мониторинга, по которым же осуществляется и их верификация. Геокриологический мониторинг проектируется на основе специального районирования и содержит в себе модуль геокриологического прогноза как инструмент выработки адаптационных решений.

Впервые выявлены и описаны неопределённости, возникающие при характеристике геокриологических опасностей, учёт которых необходим при постановке задач геокриологического прогноза.

Предложена новая система оценки состояния и динамики вечной мерзлоты, основанная на временных событийных показателях коренной перестройки режима теплообмена в грунтах.

Новизной отличается также подход, предполагающий необходимость органичного привлечения достижений и методов фундаментальных направлений геокриологии (исторического, динамического регионального, гидрогеологического и др.) в формулировке задач инженерной геокриологии при оценке мерзлотных опасностей.

Практическая значимость работы заключается в возможностях использования процедуры оценки геокриологических опасностей для разработки программ адаптации к изменению климатических и геокриологических условий, включая меры инженерной защиты территорий и объектов, рекомендации для проектировщиков и эксплуатационных служб действующих объектов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Процедура анализа геокриологических опасностей включает в себя выявление опасности, определение её степени и характеристику её динамики. Данная процедура пригодна для обоснования адаптационных мероприятий в условиях меняющегося климата и техногенной нагрузки.
2. Выявление геокриологической опасности производится с использованием двух независимых групп пространственных и временных характеристик состояния и динамики геокриологических условий, отражающих, соответственно, исторические

предпосылки и вероятность будущего изменения состояния вечной мерзлоты и развития криогенных процессов.

3. Степень геокриологической опасности определяется четырьмя группами показателей (раздельно для условно ненарушенных и антропогенно преобразованных территорий):

- 1) динамика температур пород и их льдо- и влагосодержания,
- 2) динамика теплообмена через земную поверхность и между массивами пород,
- 3) движение границ мёрзлых и талых массивов пород,
- 4) активность криогенных процессов, выражаемая через показатели их интенсивности и экстенсивности, а также близости очага опасности к инженерному сооружению.

4. Степень геокриологической опасности переопределяется заново при существенной перестройке состояния многолетней мерзлоты грунтов, характеризующейся: а) изменением геометрии мёрзлых массивов, б) изменением ареалов проявления или активности криогенных процессов, в) сменой механизма теплообмена между инженерно-геологическими элементами или через земную поверхность.

5. Динамика геокриологической опасности характеризуется совокупностью постепенных многолетних региональных и резких (сезонных и межгодовых) локальных преобразований геокриологических условий. Постепенные изменения связаны с колебаниями климата, а резкие преобразования связаны как с естественными (экстремальные погодные события, пожары, наводнения и т.п.), так и с техногенными (нарушения условий теплообмена) событиями.

Апробация результатов исследований, на основе которых сформулированы защищаемые положения проводилась в рамках фундаментальных исследований РАН (государственное задание), грантов РФФИ №13-05-00462, №06-05-64959а, а также в рамках хозяйственных договоров ИГЭ РАН с дочерними подразделениями компаний Газпром, Транснефть и АЛРОСА в 2006-2019 г.г., в которых автор принимал активное участие.

Глава 1 Понятие геокриологической опасности

1.1 Существующие подходы к определению содержания и структуры понятия геокриологической опасности

На сегодняшний день широко обсуждаются опасности, обусловленные изменениями климата. При высокой льдистости верхних горизонтов многолетнемёрзлых пород (ММП) даже небольшое увеличение глубины сезонного протаивания ведёт к активизации геокриологических процессов. Хозяйство и промышленность восточных и северных районов потребует дополнительных затрат для обеспечения сохранности мёрзлого основания зданий и инженерных сооружений.

Ведение хозяйственной деятельности на территории многолетнего и сезонного промерзания грунтов требует специальных подходов в оценке риска, связанного с развитием экзогенных геологических процессов (ЭГП) и специфических (геокриологических) процессов. Например, такие процессы, как пучение, осадка при оттаивании грунта, наледеобразование, термоэрозия приводят к прямому механическому воздействию на элементы конструкции инженерных сооружений, а также формируют геокриологические явления (бугры пучения, термокарстовые озера, овраги, наледи), само существование которых удорожает или мешает эксплуатации инфраструктуры. Кроме этого, даже при отсутствии активно развивающихся геокриологических процессов, постепенное изменение геокриологических условий (например, среднегодовой температуры грунта, которая определяет его несущую способность, льдистости мёрзлого грунта, режима сезонного промерзания и оттаивания и т.п.) могут оказаться не соответствующими проектным и привести к внезапному разрушению сооружения, а значит к возможной гибели людей и экономическому ущербу.

Характеристика источников природных опасностей должна давать информацию, где и когда может возникнуть воздействие на людей, их хозяйственные объекты или элементы экосистем. Категории этих характеристик позволяют выстроить более или менее универсальную систематизацию природных опасностей, которая может использоваться для выработки алгоритмов их оценки и,

в последующем, при оценке рисков хозяйственной деятельности. Пример существования потребности в такой систематизации приведён на рисунке 1.1.

Следует заметить, что приведённая систематизация имеет общетеоретическое значение. В практическом смысле требуется составление частных систематизаций, соответствующих скорости, региональным особенностям рассматриваемых процессов, а также потребностям управленческой деятельности. В качестве примера приведена типизация опасных геологических процессов, использованная в процедуре риск-анализа эксплуатации магистрального нефтепровода в криолитозоне (Таблица 1.1).

Интересные методические подходы к оценке опасности геокриологических процессов были предложены Л.Н. Хрусталевым (Геокриологические опасности..., 2000). Вероятность того, что тепловое и механическое взаимодействие геологической среды с сооружением и атмосферой пересекает границы области допустимых состояний, и при этом утрачивается качество и происходит, так называемый, отказ системы называется риском. Основным методом получения количественного значения риска остаётся численный анализ или метод статистических испытаний, который называется методом Монте-Карло. Разработана программа NAST, которая реализует вышеупомянутый метод для геотехнических систем. Знание вероятности отказа (риска) недостаточно для экономической оценки территории, для этого нужна цена риска, которую можно получить, используя математическое ожидание величины ущерба.

На кафедре геокриологии геологического ф-та МГУ была составлена карта районирования территории России по существующей и потенциально возможной поражённости процессами разной степени опасности для строительных объектов (Геокриологические опасности..., 2000). Для составления этой карты была выполнена качественная оценка степени опасности процессов при освоении территории. Эта оценка позволила степень опасности от проявления в рельефе геокриологических процессов подразделить на три категории: мало опасные, умеренно опасные и опасные. Рассматриваются наиболее значимые виды процессов: тепловая осадка оттаивающих пород и термокарст, морозное пучение пород, наледеобразование, солифлюкция и криогенные сплывы, термоэрозия и термоабразия.

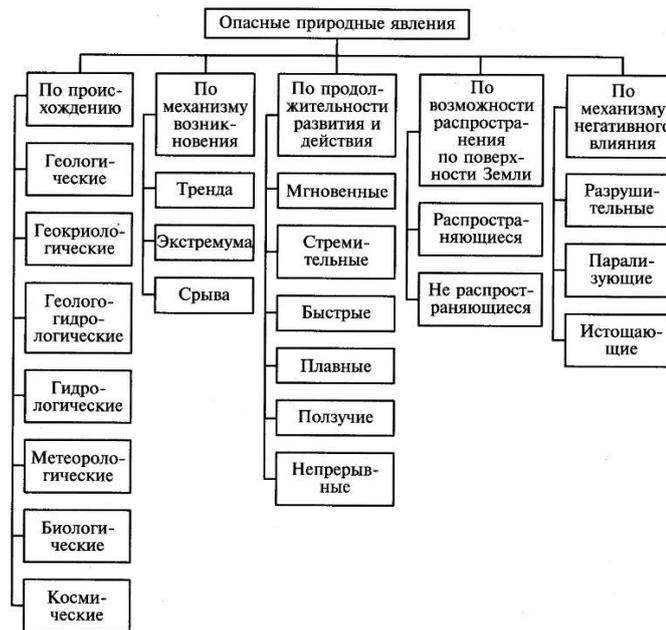


Рисунок 1.1 Пример одной из обобщённых систематизаций природных опасностей (Вишняков, Радаев, 2008).

На кафедре криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова разработали методический приём получения итоговых оценок "кризисности" экологической ситуации в области распространения ММП (Зотова и др., 1993). Оценка основана на совокупном учёте двух факторов: а) типе и интенсивности антропогенной нагрузки механического характера; б) потенциале устойчивости ландшафтов к нарушениям, который оценивается степенью проявления деструктивных криогенных процессов. На основе сопряжённого анализа серии карт масштаба 1:6000000 (ландшафтной, устойчивости ландшафтов, антропогенной нагрузки) была составлена карта экологических ситуаций Тюменской области.

На территории США Федеральным агентством по управлению страной в чрезвычайных ситуациях (FEMA - The Federal Emergency Management Agency) был разработан план снижения всех существующих опасностей и рисков. Снижение опасностей – это основа управления при чрезвычайных ситуациях, это постоянные действия по снижению влияния катастроф на жизнь людей и места проживания, путём строительства устойчивых зданий и сооружений к природным опасностям,

предупреждений об авариях и надёжной системы страхования. Цель такого плана по снижению опасностей для штата Аляска – определить опасности, оценить риски и провести анализ уязвимости объектов, а также определить и согласовать работу по снижению опасностей со штатными, федеральными и местными организациями. Данные для изучения опасных геокриологических процессов на Аляске предоставляет сеть из геотермических наблюдений за состоянием ММП. Такой мониторинг необходим для своевременного обнаружения изменений в стабильности мерзлоты и для прогноза негативных последствий от таяния мёрзлых пород на территории штата.

Геофизический институт Университета Аляски в г. Фэрбенкс поддерживает сеть из более сотни мониторинговых площадок с геотермическими скважинами, некоторые из которых дополнены площадками, оборудованными автоматическими датчиками, измеряющими температуру воздуха и грунта, влажность почвы и высоту снежного покрова (Osterkamp, 2003; Smith et al., 2010; Romanovsky et al., 2016). Для отдельных городов Аляски созданы проекты по снижению природных опасностей таких, как эрозия, наводнения, землетрясения, пожары, суровая погода и мерзлота. В 2008 г. разработка таких проектов началась для городов Головин и Ситка, которые расположены в зоне прерывистой и островной мерзлоты.

Целью международного проекта «Геологические опасности, связанные с изменением климата» (Geologic Hazards Associated with Climate Change) является своевременное получение геологической и геофизической информации, чтобы обеспечить мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций в ходе непрерывного экономического роста. Основной продукцией этого проекта станут карты льдонасыщенных ММП; карты потенциально нестабильных склонов; берегов, подверженных эрозии; территорий с повышенным риском наводнений.

Неблагоприятные изменения состояния ММП развиваются постепенно и могут быть предсказаны. В связи с изменением климата угрозы для инфраструктур криолитозоны можно оценить, используя численный индекс геокриологической опасности, с помощью которого можно классифицировать ММП по потенциальному развитию термокарста (Анисимов, Белолуцкая, 2002; Анисимов, Лавров, 2004; Nelson et al., 2002).

Таблица 1.1 Генетическая систематизация экзогенных геологических процессов как источника природных опасностей (Геокриологические опасности..., 2000) с дополнениями.

Класс	Группа	Тип	Механизм процессов	Причины развития (в естественных условия)	Причины развития (в антропогенных условия)
1. Гравитационный		Солифлюкция	Пластично-вязкое и вязкое течение, сплывание оттаивающих пород на склонах	Разрушение структурных связей в дисперсных породах и уменьшение их прочности при оттаивании	Нарушение почвенно-растительного покрова, повышенное увлажнение СТС
		Оползни	Скольжение массивов (талых) пород по подстилающей поверхности (мерзлых отложений) на склоне	Обводнение и уменьшение прочности (оттаивающих) пород на склоне	Подрезка склонов, обводнение
		Обвалы, осыпи	Обрушение массивов пород, перемещение обломков пород на склоне	Криогенное выветривание, образование криогенных трещин отпора, криогенная десерпция	Подрезка склонов, обводнение
		Курумообразование	Скопление и перемещение грубообломочного материала по склону крутизной меньше угла естественного откоса обломков	Криогенное и термогенное выпучивание обломков, криогенная десерпция	Изменение температурно-влажностного режима пород
2. Водный	Поверхностных вод	Эрозия	Разрушение и вынос (оттаивающих и мерзлых) дисперсных пород водными потоками	Механическое (и тепловое) воздействие водного потока на (мерзлые) породы в его ложе	Водотоки, сформировавшиеся вдоль трассы магистрального трубопровода (или внутри полосы отчуждения)
		Термоэрозия*			
		Заболачивание	Заращение озер, переувлажнение поверхности	Неотектоническое опускание поверхности, увлажнение, термокарстовые просадки, сезонное и многолетнее промерзание отложений,	Изменение условий поверхностного стока

Класс	Группа	Тип	Механизм процессов	Причины развития (в естественных условия)	Причины развития (в антропогенных условия)
				вертикальный и горизонтальный рост торфяных залежей	
	Поверхностны х и подземных вод	Карст	Растворение, выщелачивание горных пород и обрушение кровли карстовых полостей	Растворимость и водопроницаемость горных пород, движение и агрессивность, т.е. растворяющая способность подземных и поверхностных (инфильтрующихся) вод	Изменение условий поверхностного и подземного стока, увеличение агрессивности подземных вод за счет инфильтрации сточных вод
3. Криоген- ный	Промерзание	Морозное пучение дисперсных пород	Увеличение объема пород при льдовыделении в них	Сезонное и многолетнее промерзание влажных и водонасыщенных дисперсных пород	Нарушение почвенно- растительного покрова
		Наледообразо- вание	Сезонное замерзание поверхностных и подземных вод	Перемерзание водотоков, путей транзита и очагов разгрузки подземных вод	Нарушение гидрологического и гидрогеологического режима поверхностных и подземных вод
	Оттаивание	Термокарст	Тепловая осадка земной поверхности	Сезонное и многолетнее оттаивание сильнольдистых пород и подземных залежей льда	Изменение температурно- влажностного режима грунтов

* Термоэрозия связана, помимо действия водных процессов, с оттаиванием мерзлых пород

Таким образом, была подготовлена серия прогнозных карт районирования северных территорий, на которых мерзлота была разделена на зоны высокой, средней и низкой потенциальной опасности. Под потенциально опасную категорию попадают территории арктического побережья, в том числе несколько населённых пунктов - Салехард, Игарка, Дудинка, Тикси в России и Барроу, Инувик в Северной Америке. Под угрозой разрушений и деформаций находятся трубопроводы и промышленные комплексы, например, Надым-Пур-Тазовский газовый комплекс. Зона средней потенциальной опасности покрывает города Якутск, Норильск, Воркута и большую часть Транссибирской и Байкало-Амурской ж/д.

Оценить геокриологические опасности в горах возможно с помощью дистанционного зондирования (Kääb, 2008). Ввиду быстро изменяющегося климата оценки опасностей следует производить регулярно и по стандартной методике. Дистанционное зондирование подходит для оперативных и часто повторяемых наблюдений.

Отметим, что многие исследователи и представители управленческих структур соглашаются с тем, что изучение геокриологических опасностей актуальной задачей, которая должна решаться на разных этапах жизненного цикла зданий и сооружений. Что касается работ именно по оценке риска геокриологических опасностей, то общедоступных методик по его количественному расчёту не наблюдается. Проблема заключается в неопределённостях, возникающих при определении показателей связи активности процессов и измеряемых характеристик геокриологических условий при меняющемся климате.

Дополнительно был рассмотрен опыт оценки риска опасных геологических процессов (оползни, карст, сели, лавины и т.д.) вне криолитозоны. Рекомендации, устанавливающие общие положения и требования к содержанию и методике количественной оценки геологического риска экономических и социальных потерь на территории г. Москвы, связанного преимущественно с развитием карстовых, карстово-суффозионных и суффозионных процессов, оползнеобразованием, овражной и речной эрозией, подтоплением территорий, разрабатываются коллективом лаборатории геологического риска Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН. Концепция комплексного решения проблем негативного

воздействия опасных геологических процессов, основанная на анализе природных рисков и их допустимых значений предложена А.Л.Рагозиным (Рагозин, 1999). Этот подход продолжает активно развиваться (Оценка..., 2003).

Из зарубежных подходов следует отметить фундаментальные работы, посвящённые оценке риска оползней, поскольку именно этот геологический процесс удалось исследовать наиболее детально и дать точную количественную оценку опасности и риска. Ученые из разных стран (Австралия, Италия, Китай, Норвегия, Швейцария, Франция) исследуют концепции оценки оползневого риска и его управления (Cascini, 2005; Cascini et al., 2005; Castellanos, Westen, 2008; Fell et al., 2005). В работах вышеупомянутых авторов рассмотрены процесс анализа опасности, включая характеристики оползней; анализ частоты проявления; районирование; расчет оценки риска; оценка риска с критериями терпимости и значимости суждений, чтобы определить, является ли риск достаточно терпимым для общества, и учесть политические, юридические, геоэкологические, социальные факторы; преимущества и недостатки количественного и качественно управления риском на упрощенных примерах и т.д.

Основы и опыт по оценке, прогнозу и снижению оползневых рисков преподаются в международной школе для аспирантов LARAM <www.laram.unisa.it> на базе Университета г.Салерно (Италия). В Италии и Швейцарии особое внимание уделяют риску опасных процессов в горных областях. Существует международный проект по оценке риска в горах (Mountain Risk).

В настоящее время сформировалось понимание, что геокриологические условия являются одним из важнейших факторов, определяющих подготовленность склонового материала к смещению (Haeblerli, 1992b). В криолитозоне приходится учитывать специфику протекания склоновых процессов, связанную, в ряду прочих причин, с высокой динамичностью условий смещения. Например, рыхлый слой формируется в ходе четвертичного периода развития отложений, но смещается только часть его, подверженная сезонному оттаиванию, динамика которого год от года отличается иногда на значительные величины.

Процессы промерзания-оттаивания увеличивают трещиноватость скальных пород, повышая эффективность расклинивающего действия влаги, поступающей в скальные массивы при атмосферных осадках в тёплый период года (Haeblerli et. al.,

1997). Аномально большое оттаивание в некоторые года или разовые события (лесные пожары), приводящие к повышению среднегодовых температур на подошве деятельного слоя, могут вызывать развитие склоновых смещений (Haeberli, 1992a; Haeberli and Beniston, 1998; Harris, 2005; Sattler et al., 2007; Harris et al., 2009; Hutchinson et al., 2007; Luetschg et al., 2008). Немногие исследователи изучали активность склоновых процессов на юге Восточной Сибири, но существует материал по характеристикам и динамике геокриологических условий (Некрасов, Климовский, 1978; Перов, 1989; Железняк, 1998; Геокриологические опасности, 2000; Stanilovskaya et al., 2008).

На территории криолитозоны в целом изучались как медленные склоновые смещения (Lewkowicz and Harris 2005; Couture and Riopel 2006), так и быстрые движения типа оползней (Hutchinson et al. 2007). В Западной Сибири описаны оползни течения, связанные с наличием многолетней мерзлоты (Лейбман, Кизяков, 2007). Многолетние и детальные исследования были проведены на выбранных участках Швейцарских и Итальянских Альп, в ходе которых измерялись и моделировались температуры многолетнемерзлых пород, и связанные с температурной динамикой камнепады, снежно-каменные лавины, оползни-осовы и др. явления (Kneisel et al. 2007; Noetzli et al. 2003, 2006, 2007; Salzmann et al. 2007).

Процессы склонового смещения грунтов несут в себе как прямую, так и косвенную опасность (угрозу). Прямая опасность относится к людям, находящимся на местности или в помещениях (транспортных средствах) на пути движения грунтовых масс. Косвенная опасность может быть обусловлена, например, формированием подпрудных озёр, последующий прорыв которых может привести к гораздо большему ущербу, чем сам оползень. Риск склоновых смещений для различных типов объектов и социальные аспекты инженерно-геологических опасностей рассматривались в ряде работ западноевропейских учёных (Schuster and Fleming 1986; Guzzetti 2000; Schwab et al. 2005; Glade et al., 2005). Для управления риском были разработаны специальные технические методы (Kienholz et al. 2004; Fell et al. 2005, 2008; Hungr et al., 2005a; Leroi et al. 2005; Fuchs 2009).

Обычно риск рассчитывается для отдельных техногенных объектов или их небольших групп. Этот подход требует сбора детальной инженерно-геологической

и микроклиматической информации. Для обширных территорий особые требования выдвигаются к районированию, которое должно позволить, с одной стороны, обобщить характеристики, назначаемые различным таксонам, с другой стороны, оценить опасность для не построенных объектов (например, для транспортных коридоров). В этом случае применяются как качественные, так и количественные подходы к оценке риска.

Довольно много работ по оценке риска оползневых процессов было выполнено в последние годы в Европе и, особенно, в Италии (Anbalagan, Singh, 1996; Guzzetti, 1999, 2000; Tagliavini et al., 2007; Malet, Maquaire, 2007; Fuchs et al., 2007). При районировании территории по величине риска эффективно применять ГИС-методы (Van Westen et al., 2006).

Довольно много внимания уделяется такой характеристике территории, как подверженность её оползневому процессу (Corominas et al. 2003; Van Westen et al. 2003). Она показывает возможность схода оползней в будущем на данном участке склона. Она увязывается с характеристиками экстенсивности и интенсивности процесса, используемыми в нашей стране не для частотной характеристики событий, но для описания поражённости явлениями заданного таксона ландшафтного районирования.

Существующие методики оценки опасности и риска геологических процессов в криолитозоне и вне её дополняют друг друга и образуют концептуальную базу, которую возможно использовать для разработки новых методов комплексной оценки рисков активизации инженерно-геологических и геокриологических процессов, в связи с негативными влияниями изменений окружающей среды и антропогенной деятельностью.

1.2 Источники и виды геокриологических опасностей

Под геокриологической опасностью в данной работе понимается возможность локального изменения геокриологических условий, способного повлиять на устойчивость инженерных сооружений, режим хозяйственной деятельности, характеристики природных ресурсов или экосистем и привести к материальным или финансовым потерям.

Авторское обновление содержания понятия «геокриологическая опасность» основывается на объединении основ инженерно-геологических и инженерно-геокриологических знаний с фундаментальными направлениями геокриологии (исторической, динамической, региональной) а также с криогидрогеологией и с ландшафтоведением.

Геокриологическая опасность является частным случаем инженерно-геологических опасностей. Различают геокриологические опасности от геокриологических и от общераспространённых эндогенных и экзогенных геологических процессов, активность которых зависит от геокриологических условий. Практически любое изменение геокриологических условий приводит к активизации тех или иных геокриологических процессов. Например, относительное потепление благоприятно для термокарста, а похолодание – для активизации пучения. Геокриологические процессы выступают источником непосредственной («динамической») опасности для инженерных сооружений (термокарст, криогенные пучение и растрескивание, наледеобразование, термоэрозия). Однако геокриологические процессы могут формировать явления, которые, в свою очередь, создают самостоятельно существующие опасности, даже когда процесс уже неактивен. Примером являются курумы. Сам по себе курумный чехол, как геологическое тело, в котором концентрируется подповерхностный сток, может способствовать наледеобразованию (Тюрин, Романовский, Полтев, 1982). Курумы, как временно подвижные образования, могут оказывать и динамическое воздействие на инженерные объекты, причём подвижность курумного чехла не связана с генезисом курумов, а является следствием других процессов, сосуществующих с курумообразованием (Сергеев, 1991).

По изложенным примерам очевидна сложность содержания понятия «геокриологическая опасность», не раскрыв которую невозможно оценивать уязвимость реципиентов риска и, в последующем, сам риск, связанный с геокриологическими процессами. В понятие "геокриологическая опасность" входят:

- 1) факт ожидания ущерба неизвестной величины (выражается геометрически в форме областей геологического пространства, в пределах которых существует принципиальная возможность развития геокриологических процессов);
- 2) ожидание развития процесса заданной магнитуды на заданный момент времени;
- 3) ожидание конечного геологического эффекта (изменение напряжённо-деформированного состояния грунта, эволюция поверхности, изменения водно-физических свойств грунта) от развития управляющего процесса на конец заданного интервала времени.

Сложностью является учёт существенно различных характерных скоростей протекания геокриологических процессов. Так, спływ-оползень талого грунта может реализоваться практически мгновенно, термокарстовая просадка может принести ущерб в течение одного сезона, а криогенное выветривание искусственного грунта проявится в течение десятилетий.

Техническая потребность ограничения пространственных и временных рамок оценки геокриологических опасностей, привела к использованию понятия природно-технической системы (ПТС), раскрываемого как совокупность ландшафтных и технических объектов, термодинамически и механически взаимодействующих в ходе влаго- и/или теплообмена и границы которых могут быть идентифицированы и географически привязаны с требуемой точностью.

Для характеристики геокриологической опасности следует установить:

- 1) источник опасности (например, наличие подземных льдов);
- 2) реальность опасности (наличие или прогнозирование появления признаков изменения геокриологических условий или активности криогенных процессов);

3) степень опасности (экстенсивность и интенсивность процесса, с которым связана опасность) для объекта воздействия и его значимость для заказчика оценки, а также пространственная и временная близость рассматриваемого процесса к реципиенту риска (т.е. возможность прямого воздействия процессов и явлений на техногенные объекты);

4) динамику геокриологической опасности, которая отражает соотношение эволюционных региональных изменений геокриологических характеристик и резких локальных преобразований геокриологических условий.

Источниками геокриологических опасностей являются криолитологические неоднородности (количество, структурное положение и фазовое состояние воды и других флюидов) в соотношении с ландшафтными условиями, обуславливающие возможность развития геокриологических процессов. Различают пространственную и временную неоднородности геокриологических условий.

Главной причиной пространственной неоднородности являются процессы, протекавшие в прошлом и оставившие свой след в виде реликтовых геокриологических явлений и отразившихся в распределении водно-физических и физико-механических свойств грунта.

Причиной временной неоднородности геокриологических условий являются внешние «управляющие» воздействия на режим теплообмена и криолитологические тела, вызванные изменениями режима техногенных воздействий, а также эволюцией климата и экосистем (Кудрявцев, 1983; Shur & Jorgenson, 2007). Эти изменения могут характеризоваться как тенденции или как события. Под тенденциями в данном случае понимается устойчивое изменение усреднённых временных характеристик в течение периода более трёх лет. Разовые события подразумевают однократные воздействия, длительность которых не превышает одного сезона, например, аномальные погодные явления, снятие растительного покрова.

Факторами геокриологических опасностей являются климатические, гидрологические, геоботанические и геологические природные или антропогенно обусловленные события, при наступлении которых меняются условия теплообмена в горных породах или на земной поверхности.

Основой для выбора ведущего фактора динамики геокриологических условий (или геокриологических процессов) служит оценка характерной скорости изменения этого фактора, которая должна быть сопоставима с глубиной геокриологического прогноза.

Следует различать, с одной стороны, внешние и внутренние, а другой – проявленные и скрытые виды опасностей.

Внешние опасности подразумевают негативное влияние геокриологического процесса, источник которого не связан с областью его влияния. Например, термоэрозионный овраг, зародившийся вне зоны влияния трубопроводной системы и развивающийся в её направлении, является внешней опасностью, прогноз возникновения которой невозможен без выхода за рамки рассмотрения ПТС и зоны влияния техногенных сооружений. Внутренние опасности, наоборот, возникают вследствие эволюции ПТС. Так, возведение насыпи под железнодорожным полотном в определённых условиях приводит к многолетнему оттаиванию мёрзлой толщи и вызывает опасность тепловых просадок. Заметим, что исходные данные и сама методика прогноза в рассмотренных двух примерах будут разными.

Сложнее обстоит дело с проявленными и скрытыми опасностями. Неблагоприятные процессы могут быть активными и тогда мы идентифицируем эти процессы по соответствующим проявлениям (термокарст – по обводнённым понижениям с характерным отседанием берегов, термоэрозию – по оврагам с мёрзлыми льдистыми грунтами в тальвеге и т.п.), однако многие явления сохраняются и после затухания процесса (например, термокарстовые озёра). Поэтому существующие нормативы, в частности, СП 115.13330.2016 «Геофизика опасных природных воздействий», следует использовать осторожно, памятуя о том, что поражённость территории явлениями не влечёт за собой автоматического суждения о поражённости процессами. Характеристика поражённости является полезной, но промежуточной ступенью при оценке опасностей на территории криолитозоны.

Скрытые опасности делятся на две группы:

- 1) активные процессы и современные явления, не идентифицируемые стандартными методами изысканий и не замеченные исследователями;

- 2) потенциальные неблагоприятные процессы, развитие которых прогнозируется в будущем при выполнении некоторых условий.

Примером первой группы служит осадка при оттаивании в условиях потепления климата и техногенных воздействий заглублённой более 10 м от земной поверхности кровли многолетнемерзлых пород в г. Надыме, не спрогнозированная при принятии решения о строительстве зданий по второму принципу.

Примером второй группы опасностей служит осадка грунтового основания трубопроводной системы при оттаивании повторно-жильных льдов в результате прямого теплового воздействия от прокачиваемой нефти.

По сути своей, типизация геокриологических опасностей увязывается с формулировкой тех неопределённостей, с которыми мы сталкиваемся при формулировании задачи геокриологического прогноза.

Важно понимание того, что опасности вечной мерзлоты связаны не с мерзлым состоянием грунта, а с процессами, сопровождающими изменение фазового состояния воды и других флюидов. Каждое место с изменяющимся содержанием льда в грунте или изменением содержания незамерзающих грунтовых вод (или обоих) несёт потенциальную опасность для техногенных объектов. Содержание и характеристики опасности зависят от геологического строения и факторов теплообмена через поверхность, как снежный покров, режим поверхностных вод и напочвенная растительность (т.н. поверхностная управляющая система). Геокриологические опасности в горах подчинены высотной ландшафтной и климатической поясности.

Термокарст – это «сложный геологический процесс, который включает в себя таяние грунтового льда и уплотнение оттаивающего грунта, что приводит к деформации поверхности и формированию специфических форм рельефа в области вечной мерзлоты» (Shur & Osterkamp, 2007). Термокарст является широко распространённым процессом, и его современные и реликтовые проявления изучались многими исследователями (рис. 1.4 и 1.5).



Рисунок 1.4 Термокарстовое озеро в Северном Забайкалье. Об активности процесса свидетельствует «пьяный» лес и отседающие береговые блоки.



Рисунок 1.5 Термокарстовое озеро на Полярном Урале. Латеральное расширение озера приводит к нарушению сплошности растительного покрова по берегам.

После начальной тепловой осадки поверхности другие процессы, сопутствующие термокарсту, способствуют развитию термокарстового озера и переработке его берегов. В ряде случаев озеро любого генезиса порождает

термокарстовые процессы, преобразующие его морфологию. Циклическое развитие в засушливые и влажные периоды приводит к последовательному углублению и расширению термокарстовых депрессий, называемых хасыреями в Западной Сибири и аласами в Якутии.

Термоэрозия – это «разрушение льдистых грунтов в результате комбинированного теплового и механического воздействия движущейся воды» (van Everdingen, 1998). Это спорадический, не очень распространённый, но очень интенсивный процесс. Некоторые овраги глубиной 10 метров могут вырасти за один или два дня (рис. 1.6, 1.7).



Рисунок 1.6 Термоэрозионный овраг, развивающийся вдоль временной дороги (Восточная Сибирь).



Рисунок 1.7 Термоэрозионная промоина вдоль трубопровода (Большеземельская тундра, Европейский Север России).

Типичная скорость вертикального роста оврага составляет от 1 до 5 метров в день, а его расширение может достигать 25 метров в год.

Термическая суффозия – это «формирование внутренних эрозионных каналов в льдистых оттаивающих песчаных и пылеватых отложениях» (van Everdingen, 1998). Процесс может оставаться незамеченным в течение некоторого времени, но может внезапно привести к образованию кратера или провала на поверхности (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 Термическая суффозия, приуроченная к участкам разгрузки подземных вод под Бестяхской террасой р.Лены (Восточная Сибирь).

В некоторых условиях суффозия развивается по полостям, формирующихся в отложениях с высоким сцеплением при деградации повторно-жильных льдов (Shur et al., 2016). Суффозионные провалы глубиной от 1 до 3 метров могут образоваться всего за один-два часа (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 Суффозионный провал в супесчаных отложениях (Фэрбенкс, Аляска).

Криогенное пучение – это «движение земной поверхности или объектов на земле или внутри неё, вызванное образованием льда в почве» (van Everdingen, 1998). Эффект пучения связан с силой, которая возникает, когда земля увеличивается в объёме, поверхность поднимается из-за миграции воды к фронту промерзания или из-за объёмного замерзания инъецированной порции воды (рис. 1.10-1.13). Особый случай морозного пучения связан со сваями, которые частично расположены в деятельном слое и не имеют достаточного сцепления с постоянно мёрзлым грунтом. Выпучивание фундаментов конструкций приводит к серьёзным проблемам эксплуатации зданий (рис. 1.14, 1.15). Скорость пучения в зимний период достигает от 0.2-0.4 метра в месяц.



Рисунок 1.10 Локальное пучение крупных камней ориентируют их вертикально (Северное Забайкалье).



Рисунок 1.11 Латеральная сортировка крупных камней приводит к образованию каменных колец (Северное Забайкалье).



Рисунок 1.12 Ледяное ядро инъекционного бугра пучения (Северное Забайкалье).



Рисунок 1.13 Поверхность инъекционного бугра пучения (Северное Забайкалье).



Рисунок 1.14 Морозное пучение выталкивает старую деревянную сваю, расположенную под асфальтовым покрытием (Лабытнанги, Западная Сибирь).



Рисунок 1.15 Морозное пучение сваи деформирует крыльцо дома (Якутск, Восточная Сибирь).

Морозное пучение и тепловая осадка связаны с сезонной и многолетней динамикой кровли мерзлоты в условиях воздействий инженерных сооружений и меняющегося климата (рис. 1.16, 1.17).



Рисунок 1.16 Неравномерная осадка основания сельского дома (Северное Забайкалье).



Рисунок 1.17 Результирующая осадка насыпи неиспользуемой железной дороги Чара-Чина, развивавшаяся в течение 13 лет (Северное Забайкалье, Восточная Сибирь).

Как правило, максимальное сезонное пучение развивается с февраля по апрель, когда активный слой полностью замерзает (смыкается). В условиях несливающейся мерзлоты пучение может достигать ещё больших значений, поскольку для формирования ледяных шпиров используется не иссякающий источник влаги. Максимальная скорость теплового оседания может быть зарегистрирована между июнем и июлем; однако максимальное суммарное оседание происходит в сентябре в пределах максимальной глубины активного слоя. Уязвимость инженерных объектов к пучению и тепловой осадке зависит от льдо- и водосодержания грунта. Кроме того, сезонные циклические процессы, связанные с промерзанием и оттаиванием, способствует накоплению усталостного износа в строительных элементах.

Криогенное трещинообразование – это «растягивающий разрыв, возникающий в результате термических напряжений в мерзлом грунте. Растягивающие напряжения, вызванные снижением температуры грунта, являются, вероятно, основной причиной растрескивания при тепловом сжатии, но обычно напряжение, вызванное высыханием, также участвует в процессе. Ледяные клинья, песчаные клинья, грунтовые клинья и ледяные жилы образуются по трещинам термического сжатия» (van Everdingen, 1998). Трещины, вызванные тепловым сжатием, вызывают серьезные разрушения аэродромных и дорожных покрытий

(рис. 1.18). Оптимальное время для этого процесса - ранняя осень, когда снежный покров минимален и температура воздуха быстро падает.



Рисунок 1.18 Морозобойные трещины на покрытии автомобильной дороги (Северное Забайкалье).

Иногда поверхностные трещины разрыва связаны с ростом бугра пучения (рис. 1.19).



Рисунок 1.19 Трещины растяжения на поверхности бугра пучения (Северное Забайкалье).

Береговая эрозия является частным случаем тепловой денудации на морских берегах и берегах рек в районах вечной мерзлоты. Этот процесс иногда является весьма интенсивным, потому что прочностные свойства оттаявшего грунта невелики и эффективность размыва растёт (рис. 1.20-1.22). Интенсивность отступления берега в среднем составляет от 3 до 5 метров в год.



Рисунок 1.20 Характер разрушения высокольдистых морских отложений на берегу Карского моря.



Рисунок 1.21 Характер разрушения береговых торфяников с повторно-жильными льдами (показаны стрелкой; р.Чара, Северное Забайкалье).



Рисунок 1.22 Боковая термоэрозия мёрзлых аллювиальных песков первой надпойменной террасы р.Чары (Северное Забайкалье).

Склоновые процессы в зоне вечной мерзлоты включают в себя оползни различных типов (блоковые оползни, солифлюкционные сплывы), крип, осыпи, обвалы, склоновые сели и снего-каменные лавины. Процессы могут проявляться в виде быстрых движений, чаще всего, когда оттаявший грунт скользит по мёрзлой кровле. Оттаявший пласт или блок могут быть массивной (в случае оползней и обрушений каменных блоков), разжиженной (солифлюкционные сплывы и водокаменные сели) или сухой и сыпучей, как в курумах и осыпях (рис. 1.23-1.26).



Рисунок 1.23 Верхняя часть оползня-сплыва, развивающегося по мёрзлomu основанию (о.Ольхон, оз.Байкал).



Рисунок 1.24 Очаги водо-каменных селей, развившиеся в условиях глубокого сезонного оттаивания, совпавшего с интенсивными осадками (оз.Леприндо, Северное Забайкалье).



Рисунок 1.25 Конус выноса снежно-каменной лавины, разрушившей плотно железной дороги (Северное Забайкалье).



Рисунок 1.26 Конус выноса снежно-каменной лавины, уничтожившей лес и разрушившей грунтовую автомобильную дорогу (Северное Забайкалье).

Каменные глетчеры, льдо-насыщенные курумы и солифлюкционные языки движутся медленно, но способны воздействовать на инженерные конструкции (рис. 1.27, 1.28).



Рисунок 1.27 Язык присклонового каменного глетчера, поверхность которого маркируется кулисообразными валами (Северное Забайкалье).



Рисунок 1.28 Оползень течения, развивающийся по механизму солифлюкции на мёрзлом основании (о.Ольхон, оз.Байкал).

Склоновые процессы развиваются в полигенетических крупнообломочных отложениях, причём скорость смещения составляет от нескольких сантиметров до нескольких метров в год. Механизмы движения включают пластические

деформации льда, ползучесть мелкозёмистых включений, гравитационное смещение и скольжение по скальному, мелкозёмистому или ледяному основанию.

Наледеобразование – это «формирование льда на поверхности земли или на льду реки или озера путем послойного замерзания потоков воды, которые разгружаются из-под земли или выходят из трещин речного или озёрного льда» (van Everdingen, 1998). Этот процесс опасен для дорог и любых других сооружений. Иногда наледь становится плотиной, блокирующей сток реки и приводящей к значительным зимне-весенним наводнениям (Shur et al., 2016) (рис. 1.29, 1.30).



Рисунок 1.29 Наледь на р.Нижнем Ингамаките (Северное Забайкалье).



Рисунок 1.30 Признаки зимнего уровня наледного льда на поверхности курума и на стволах деревьев (Южная Якутия).

Газо-эмиссионные кратеры в тундровой зоне являются недостаточно изученными явлениями и гипотетически связаны с разложением газогидратов в условиях температурно и криолитологически неоднородной многолетней мерзлоты (Kizyakov et al., 2016). Гигантские размеры этого явления (десятки метров по всем измерениям) и неизвестные источники давления составляют несомненную геокриологическую опасность. К счастью, пространственная и временная частота этих событий являются низкими.

Подводя итог сказанному, следует учитывать, что геокриологические опасности, с одной стороны, сопряжены с изменениями состояния и свойств мёрзлых пород, а с другой стороны – с активностью сезонных и многолетних криогенных процессов. В первом случае мы характеризуем опасность через оценку несущей способности грунтов и опираемся на термомеханический прогноз при

принятии проектных решений, а во втором – на диагностику ведущего процесса, нарушающего конструкции и геодинамический прогноз его активности на срок жизненного цикла сооружения.

Становится понятно, что для идентификации геокриологических опасностей необходима организация регулярных наблюдений за состоянием и динамикой многолетней мерзлоты грунтов, связанная со содержанием понятия «геокриологическая опасность» (рис. 1.31). Мониторинговые данные используются при постановке и решении задач геокриологического прогноза.



Рисунок 1.31 Содержание понятия геокриологической опасности.

1.3 География геокриологических опасностей

Анализ территориальной приуроченности хозяйственных проблем, связанных с развитием геокриологических процессов, демонстрирует зональную и секториальную повсеместность этих проблем по крайней мере за период 2000-2015 г.г. (рис. 1.30) (Sergeev, Chesnokova, Morozova, 2015).

Эта кажущаяся хаотичность территориальной приуроченности хозяйственных проблем связана с тем обстоятельством, что их существенная часть возникает как реакция геокриологических условий и криогенных процессов на техногенные воздействия, а другая часть – как результат воздействия природных процессов, активность которых имеет зональные и секториальные закономерности (Кудрявцев и др., 1979).

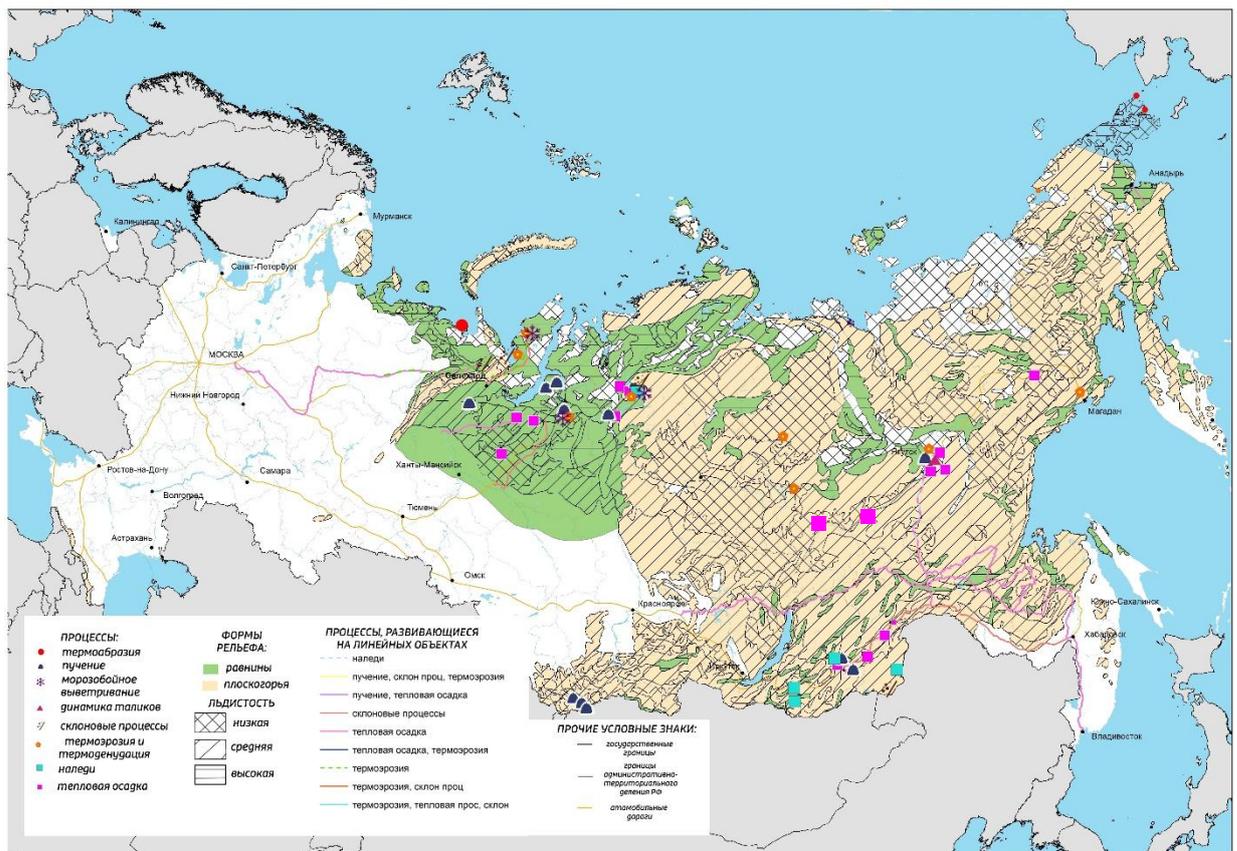


Рисунок 1.30 Карта-схема проявлений геокриологических процессов, с которыми были сопряжены экономические или хозяйственные проблемы за период 2000-2015 г.г. (Sergeev, Chesnokova, Morozova, 2015).

География геокриологических опасностей в значительной степени определяется, с одной стороны, районами массовых антропогенных нарушений ландшафтов, а с другой – районами естественного преобразования ландшафтов, в результате чего меняются геокриологические условия и развиваются криогенные процессы.

Геокриологические факторы группируются по характеру управляющего воздействия на элементы ПТС, потенциально неблагоприятные для хозяйственного освоения (грунты с высокой льдистостью, обводнением, подверженные склоновым процессам и т.п.). Управляющее воздействие может обуславливаться естественными изменениями окружающей среды (климатом, динамикой растительных покровов, изменениями регионального водного стока), или хозяйственной деятельностью человека.

Наиболее очевидными и хорошо изученными являются климатические факторы. Следует разделять факторы аномальных погодных и климатических явлений, например, аномально жаркое лето или необыкновенно снежная зима, которые оказывают воздействие на локальную активность геокриологических процессов следующего за климатическим явлением года, от многолетних изменений климата, влияющих на эволюцию геокриологических условий и геокриологических процессов на обширных территориях.

Примером оценки значимости аномальных погодных явлений для изменения геокриологических условий и развития опасных процессов служит анализ причин катастрофического селя, прошедшего на берегах озера Большое Леприндо в 2001 году (рис. 1.24). Аномально жаркое лето привело к значительному сезонному протаиванию на склонах сопок, прилегающих к озеру. Сильный снегопад, перешедший в ливень, привел к быстрой мобилизации оттаявших рыхлых склоновых отложений и их сплывам, слияние которых в тальвегах оврагов привело к селю, разрушившему полотно Байкало-Амурской магистрали.

Примером оценки значимости многолетних климатических изменений показан в совместной работе ИГЭ РАН и Института Земной коры СО РАН по анализу причин и факторов оползневых процессов на о.Ольхоне (Хименков и др., 2015а; Хименков и др., 2015б). Расположение исследованной территории вблизи

южной границы распространения ММП обусловило высокую динамичность их латеральных границ в позднем плейстоцене, в ходе двух эпох похолодания и потепления (Фотиев, 2009). Уникальные условия глубокого промерзания и оттаивания (в настоящее время до 3.65 м по фактическим данным автора) глинистых толщ в холодные эпохи, увлажнение которых невелико, благодаря развитой сети трещин по палеокриотестурам, обеспечило возможность смещения оползневых блоков по мёрзлому основанию, служащему водоупором (рис. 1.23). В тёплые же эпохи, вероятно, оползневая активность затухала.

Смена растительных сообществ также влияет на геокриологические условия. Обычным явлением служит охлаждающее воздействие кочкарной болотистой растительности на подстилающие грунты. Автор наблюдал количественный эффект такого влияния в Центральной Аляске (участок Smith Lake 3, детальнее – см. раздел 3.3), а также на участке Мост-1 в Чарской впадине. О быстроте смены растительных сообществ, приводящих к формированию кочкарного болота, может служить ландшафт, возникший на месте взлётной полосы пос. Троицкого (Бурятия). В 70-х годах XX века грунтовая полоса аэродрома успешно использовалась для эксплуатации самолётов Ан-2, однако, будучи заброшенной в настоящее время, покрылась кочкарником, что привело к понижению среднегодовой температуры грунта на 1-2°C и активизации процессов пучения.

Не менее драматичным для геокриологических условий является влияние гидрологических и гидрогеологических факторов. Отепляющее воздействие вновь возникающих водных покровов, меняющих режим теплооборотов через поверхность, и водотоков, несущих «конвективное» тепло, приводят к повышению глубины сезонного оттаивания и к термокарсту по высокольдистым грунтам. Локальная изменчивость выпадения жидких осадков приводит к неоднородностям в развитии термокарстового процесса. В частности, автор наблюдал разницу встречаемости небольших водоёмов различных участков трассы магистрального нефтепровода в Восточной Сибири. Продолжительное стояние воды в понижениях рельефа создаёт предпосылки для развития термокарста, а также меняет структуру поверхностного стока территории. Таким образом, участки, подтопление которых было инициировано аномальными осадками, а дренаж был затруднён из-за

барражного воздействия валика над трубой, были проинтерпретированы автором с коллегами как потенциально опасные для активизации термокарста. Важно учитывать, что условия затопления поверхности, которое инициирует термокарст меняются на протяжении длинных транспортных объектов (рис. 1.31). Год от года эти условия меняются, что влияет на активность тепловых просадок (рис. 1.32).

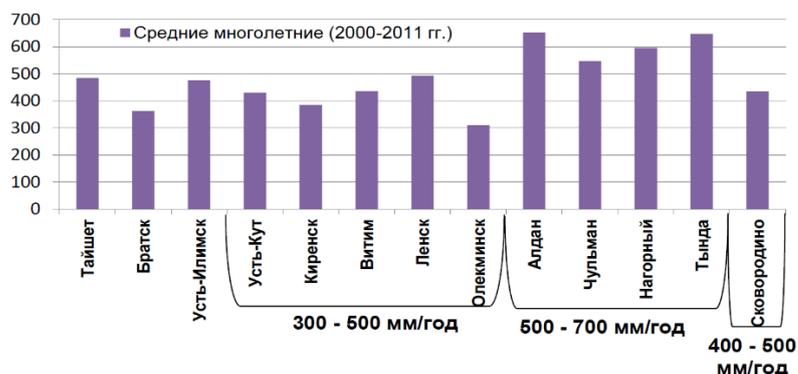


Рисунок 1.31 Средние многолетние суммы осадков вдоль трассы нефтепровода по данным опорных метеостанций (Макарычева, 2018).



Рисунок 1.32 Различная степень поверхностного обводнения одного и того же участка нефтепровода в 2010, 2011 и 2012 г.г. соответственно.

Факторы техногенных воздействий обычно локальны, но отличаются значительной силой, по сравнению с природными «аналогами». Например, укладка «тёплого» магистрального нефтепровода в грунт неизбежно приводит к формированию ореола оттаивания вокруг трубы. При прогнозе величины этого

ореола обычно задаются проектные значения температуры нефти в трубопроводе. Однако изменение режима эксплуатации, приводит к изменению проектных температур нефти как ту, так и другую сторону. Это, в свою очередь, влечёт за собой заметно различающееся результирующее значение ореола оттаивания (рис. 1.33).

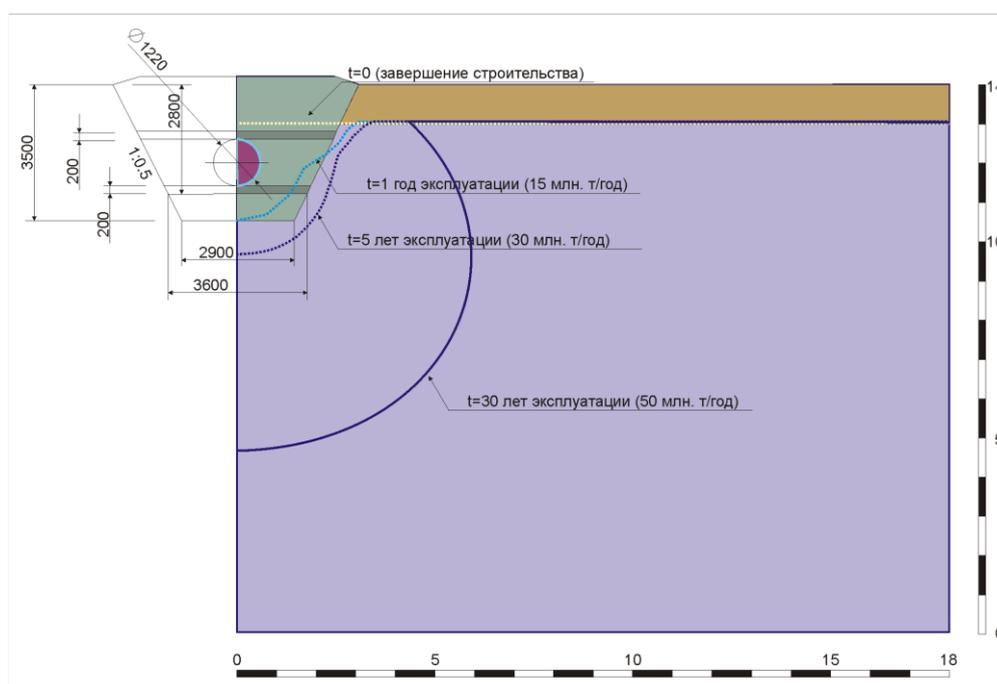


Рисунок 1.33 Сравнение размеров ореола оттаивания вокруг трубопровода при различных условиях прокачки ресурсов; масштабные линейки даны в метрах (расчёты Г.С.Типенко).

Экономический ущерб, возникающий при строительстве и эксплуатации конкретных объектов на территории распространения многолетнемёрзлых пород, может быть обусловлен географией природных опасностей, специфически проявляющимися в областях распространения ММП. К таким опасностям относятся: землетрясения, заболачивание и подтопление, опустынивание, дефляция, наводнения, сели, лавины, оползни, карст (подробнее см. раздел 3.2).

1.4 Процедура анализа геокриологических опасностей

Основами оценки геокриологических опасностей служат:

- А. Характеристика современных геокриологических условий, включающая совокупности показателей состояния и динамики геологических тел (характеристики физических полей и усреднённых свойств грунтов) и показателей состояния криолитологических объектов/инженерно-геологических элементов/криогенных явлений, у которых возможно определить границы и внутреннюю структуру).
- Б. Геокриологический прогноз, рассматривающий возможность изменения состояния многолетней мерзлоты.

Если первая составляющая оценки геокриологических опасностей (А) опирается на данные мерзлотной съёмки или даже просто стандартных изысканий, то геокриологический прогноз (составляющая Б) до сих пор не является стандартной (методически однозначной) операцией и требует разработки специальных требований для каждого из этапов освоения территории.

Первой составной частью характеристики состояния многолетней мерзлоты (геокриологических условий) является пространственное описание геокриологических показателей на выбранный момент времени, т.е. фазового состояния влаги и других флюидов в массиве пород, распределения среднегодовых температур по площади, среднемноголетних характеристик температурного режима в слое сезонных колебаний и т.п. (рис. 1.2). *Второй составной частью описания* состояния многолетней мерзлоты является описание активности геокриологических процессов и сопряжённых с ними явлений, характеризующихся возрастом, стадией развития сформировавшихся их процессов. Идентификация процессов требует специального районирования территории (рис. 1.34).

Выбор акцентов в составных частях описания геокриологических условий определяется источником угроз инженерному сооружению: при воздействии через изменение свойств основания используется первый вариант описания, при прямом динамическом воздействии – второй.

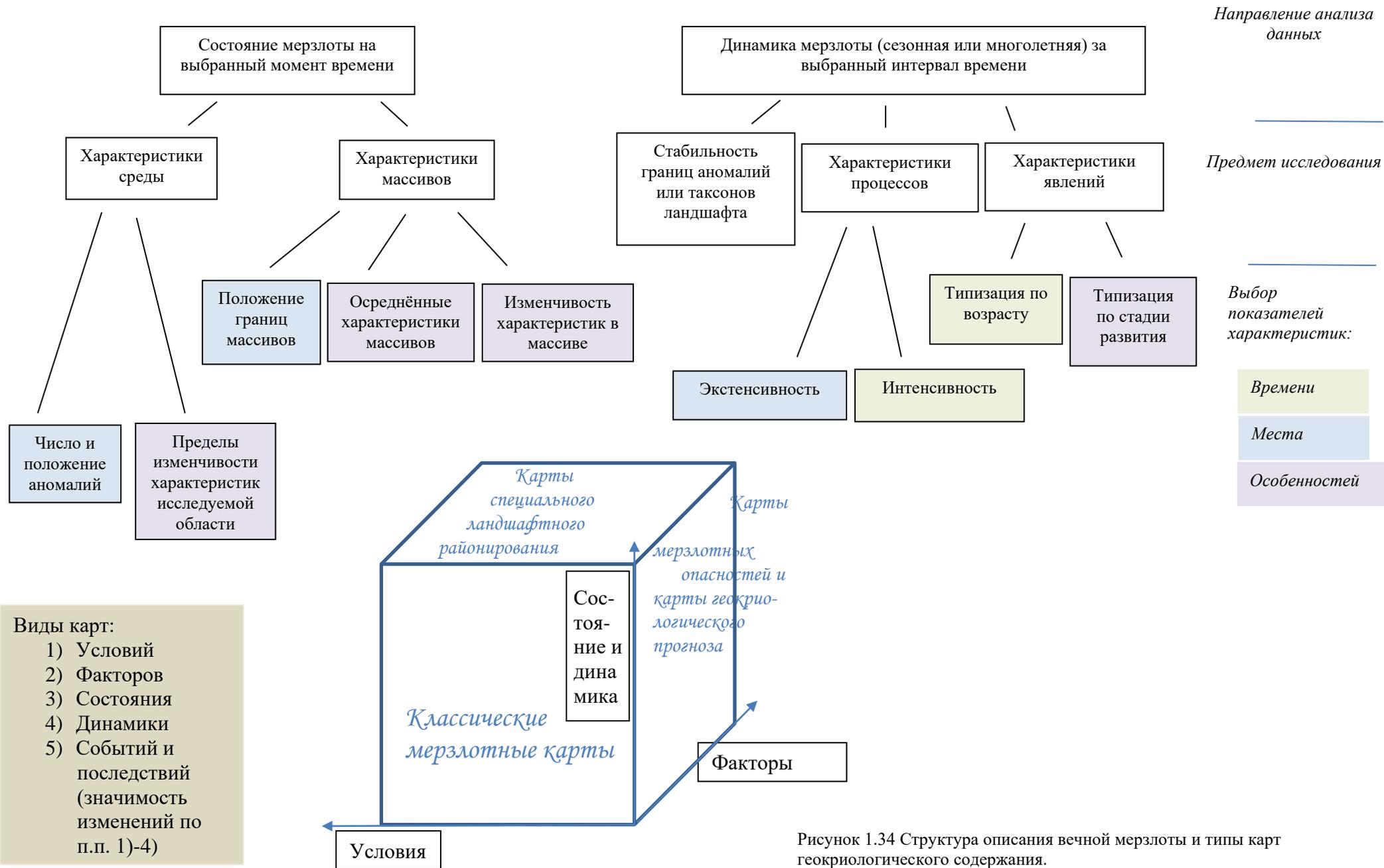


Рисунок 1.34 Структура описания вечной мерзлоты и типы карт геокриологического содержания.

Относительная опасность того или иного геокриологического явления различна для различного временного масштаба (характерного времени протекания процесса, формирующего неблагоприятное явление). Различают сезонно-случайные и долговременные опасности. Первые – связаны со случайными событиями. Например, случайный разлив реки или пожар могут привести к термокарсту, и эта ситуация может не повториться после этого много лет. Долговременные опасности связаны с многолетними тенденциями изменения окружающей среды и отличаются устойчивостью и широким территориальным проявлением (см. также раздел 2.3).

Обобщённо применение перечисленных критериев в порядке осуществления оценки представлены на рисунке 1.35.

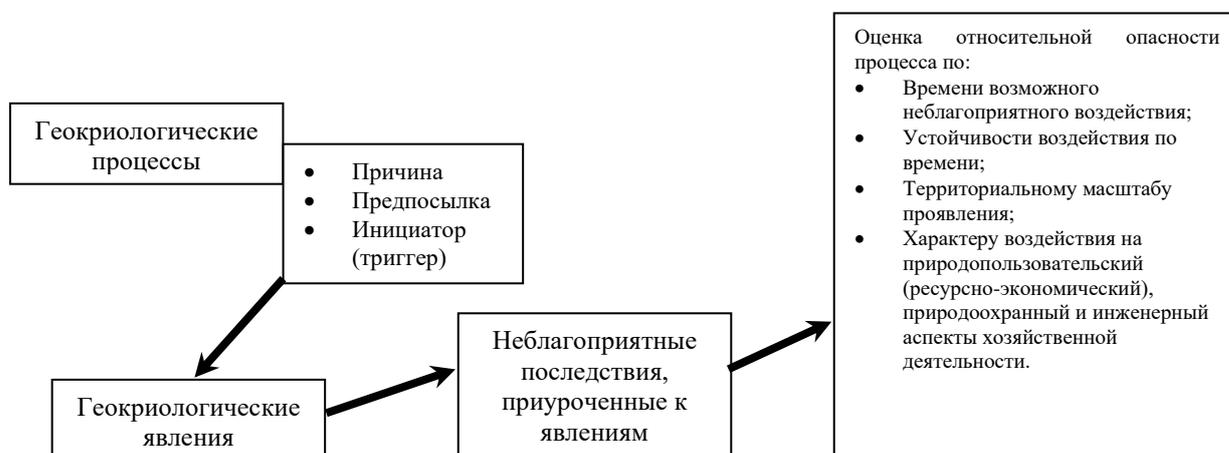


Рисунок 1.35 Пример последовательности операций при анализе опасности геокриологических процессов на территории природопользования.

В зависимости от разнообразия ландшафтных условий территории и масштаба исследований инженерно-геологические процессы могут характеризоваться с позиций наборов параметров наблюдения. В крупном масштабе (крупнее 1:1000) и на относительно однородных территориях процессы рационально рассматривать в виде областей, где за отчётный период изменились значения характеристик грунтовых толщ, служащих основанием для инженерных сооружений и хозяйственной деятельности. В остальных случаях рассматриваются области проявленных изменений ландшафтных характеристик (строение и свойства грунтовых массивов, рельеф, гидрологический и гидрогеологический режимы, растительность, геофизические и геохимические поля). Заметим, что в

первом случае мы оперируем с данными непосредственных измерений характеристик агентов или движущих сил процесса (хотя доказательство соответствия наблюдаемой динамики конкретному процессу всегда сопряжено с трудностями), а во втором – динамика оценивается по последствиям воздействия процесса на элементы ландшафта (при этом возникают трудности разделения явлений на исторические или унаследованные от геологического развития и современные, сопряжённые с рассматриваемым процессом).

При изучении (наблюдении, накоплении данных, моделировании и т.п.) ЭГП фиксируются ареал их проявления, области влияния каждого из факторов процесса, а также временные характеристики развития и параметры соседства с другими ареалами проявления процессов.

В простейшем случае рассматривается область, разделённая на взаимодействующие сегменты: инженерное сооружение (источник воздействия на грунт и реципиент воздействия со стороны рассматриваемого геокриологического процесса), актуальный ареал проявления процесса и территория влияния его факторов. Например, на трассе магистрального нефтепровода овраг, формирующийся вдоль границ валика, будет иметь ареал, ограниченный площадью склонов с предельным значением уклона (определённого для данного отрезка трассы) в пределах локального водосбора.

Поскольку на практике проведение инженерно-геологических исследований на разных стадиях жизненного цикла предприятия заказывается разными организациями с поручением ведения мониторинга, как правило, разным подрядчикам, мы предлагаем оптимизировать процесс инженерно-геологического мониторинга на нормативном уровне, определив жёсткие требования к организации информации, получаемой как в результате прямых наблюдений, так и в результате аналитических операций. В основу этих требований кладётся последовательность информационной характеристики объектов наблюдения в ряду: «ОПАСНОСТИ–ВОЗДЕЙСТВИЯ–УЩЕРБ–ВТОРИЧНЫЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ».

К геокриологическим опасностям (угрозам) относятся условия и предпосылки опасных ситуаций, связанных с нарушением проектных условий строительства и эксплуатации объектов техногенеза. Другими словами, к угрозам

относятся любые потенциальные опасности, не приведшие пока к ущербу, но по которым рекомендуется оценить возможный технический, экономический (материальный, эксплуатационный или экологический) ущерб. Например, угрозой является присутствие на территории мономинеральных залежей подземных льдов. Степень угрозы зависит от глубины их залегания, ориентировки залежей, строения перекрывающей их толщи и др. характеристики. В частности, мощные повторно-жильные льды несут значительную угрозу железнодорожному строительству, но эти же льды опасны для магистральных трубопроводов только в случае ориентировки жил вдоль линии трассы.

Угрозы должны быть изучены до начала хозяйственной деятельности, а их оценка использована при выборе вариантов расположения объектов.

Угрозы не обязательно реализуются в процессе хозяйственного освоения в виде неблагоприятных процессов, оказывающих воздействия на инженерные объекты. Возможность реализации угрозы оценивается по совокупности характеристик геокриологической опасности. Опасность характеризуется через проявившуюся или количественно спрогнозированную активность ЭГП, а также через близость этих явлений к инженерным объектам. Активность оценивается с помощью показателей экстенсивности (поражённость территории), интенсивности (размеры явления и скорости их образования и роста).

Характеристики активности процессов сопоставляются на карте и на временных графиках с данными по событиям и тенденциям из списка факторов каждого из рассматриваемых процессов.

Под событиями понимаются проявления факторов, формирование которых существенно меньше характерного времени протекания ЭГП. События подразделяются на природные и техногенные. Природные события включают в себя аномальные погодные явления, пожары и т.п. Техногенные события включают в себя нормативные и ненормативные воздействия на окружающую среду, последствия которых влияют на активность ЭГП.

Под тенденциями понимаются постепенное и направленное изменение условий протекания процессов. Тенденции разделяются на природные и техногенные. Природные тенденции включают в себя изменения климата, сукцессионные изменения растительного покрова, многолетние изменения

структуры водного баланса. Техногенные тенденции отражают эволюцию искусственных грунтовых сооружений, например, выветривание грунта в насыпи, или постепенное уплотнение фундаментных подсыпок.

Поскольку опасность является проявленной угрозой, становится возможным оценить её воздействие за рассматриваемый период на объекты техносферы и на инженерно-геологические условия, включая и факторы, влияющие через обратные связи на активность инженерно-геологических процессов. В крупном масштабе это возможно сделать с помощью моделирования, а в мелком – оценить с помощью вероятностно-статистических методов (особенно для протяжённых линейных объектов или для обширных территорий). При достаточном количестве данных подсчитывается ущерб от конкретного процесса и оконтуривается зона его влияния и формируется список геоэкологических проблем, связанных с его развитием.

Каждый из перечисленных составляющих опасности может независимо использоваться в процедурах оценки риска хозяйственной деятельности. Процедура такой оценки должна различаться для разных реципиентов риска. Индивидуальные интересы гражданина включают в себя жизнь и здоровье, а также возможность экономических потерь от потерь личного имущества. Корпоративные интересы должны учитывать экономические групповые интересы, а также возможность репутационных потерь. Общественные интересы должны учитывать муниципальные и региональные экономические интересы, а также экологические аспекты последствий развития геоэкологических процессов. К таким аспектам относятся нарушения природоохранного законодательства и ущерб природным ресурсам (водным, лесным, земельным и пр.). Заметим, что уязвимость в данном случае также перестаёт быть однозначно определяемым понятием. Так, различают уязвимость, выделенную по территориальному признаку (уязвимость, связанная с ошибками территориального размещения объекта), от уязвимости, выделенной по конструктивному признаку (уязвимость, связанная с конструктивными решениями).

Предложенная последовательность аналитических операций при организации инженерно-геологических обследований кажется очевидной и давно разработанной в нормах изысканий. Однако практика разовых обследований и мониторинга в крупном масштабе на объектах, размеры которых существенно

больше, чем площадка оценки риска (крупное месторождение, трасса линейного сооружения, территория крупного города и т.п.), показала, что оценки опасности одного и того же процесса, сделанные на разных участках объекта становятся трудно сопоставимыми из-за того, что разница условий развития процесса в разных ландшафтных условиях затрудняют применение универсальных критериев оценки опасности. В реальности получается, что оценка опасности, выработанная на этапе изысканий несопоставима с таковыми на этапах строительства и эксплуатации. На каждой стадии жизненного цикла всё начинается «с чистого листа» и теряется ценнейшая информация о динамике инженерно-геологических процессов. Эту проблему обычно списывают на недостатки организации, однако методически вопрос также не решён. Нам не известно ни одной успешной системы мониторинга процессов, реализованного от изысканий до эксплуатации сооружения – так чтобы на каждой из стадий освоения эффективно использовалась информация, полученная ранее. *Главная практическая трудность заключается в том, что объекты мониторинга должны быть постоянными на всех стадиях освоения, только тогда станет понятно, как меняются природные опасности, связанные с изменениями геокриологических условий.*

Процедуры оценки должны различаться для явных и скрытых геокриологических опасностей. Например, при развитии термокарста в ненарушенных условиях планируются мониторинговые наблюдения для описания его активности и исследуются площадные закономерности распространения термокарстовых явлений. Геокриологический прогноз осуществляется исходя из наблюдаемых характеристик, получаемых на участках современной активности процесса.

В случае, когда опасность скрыта, требуется проведение поисковых исследований для картирования участков, строение которых несёт в себе скрытую опасность, например, залегание массивов мономинерального льда или ледогрунта на глубинах, превышающих глубины сезонного промерзания и оттаивания. Такие участки зачастую никак не выражены в ландшафте и не выявляются стандартными методами изысканий.

И для явных, и для скрытых опасностей первой стадией оценки является *идентификация*, т.е. доказательство, что опасность существует и имеет

геологические границы. Второй стадией оценки является качественная и количественная характеристика геокриологических опасностей, которая выполняется на основе данных *мерзлотной съёмки и геокриологического мониторинга*. На третьей стадии оценки используется геокриологический прогноз.

Геокриологический прогноз основывается в первую очередь на достижениях термодинамики. Современная физика и вычислительные возможности позволяют удовлетворительно описать и предсказать температурный режим горных пород. Проблемой остаётся выявление взаимосвязей между температурным режимом и активностью геокриологических процессов, которые, собственно, и воздействуют на инженерные сооружения. Сами по себе процессы являются сложным объектом наблюдения, поскольку развиваются относительно медленно и практически не имеют однозначных свидетельств своей активности, формируя при совместном протекании полигенетические явления. Поэтому следует параллельно развивать и моделирование температурного режима грунтов, и натурные наблюдения за активностью процессов и распространением явлений. Обмен информацией между соответствующими группами исследователей существенно повысит качество прогнозирования.

Обобщая сказанное в Главе 1, автор предлагает процедуру анализа геокриологических опасностей, которая включает в себя выявление опасности, определение её степени и динамики (рис. 1.36).



Рисунок 1.36 Схема процедуры оценки геокриологической опасности.

Данная процедура облегчает корректный выбор системы адаптационных мероприятий в условиях меняющегося климата.

Наличие геокриологической опасности определяется с использованием двух независимых групп «пространственных» и «временных» показателей: первых – условно статичных, сформировавшихся к моменту оценки, и вторых – условно динамичных, отражающих вероятность будущего неблагоприятного развития ситуации. К «пространственным» показателям относятся, например, глубина залегания границ мёрзлых массивов, распределение температуры по заданному направлению, льдистость, унаследованные свойства пород (генезис, состав, структура). К «временным» показателям относятся, например, климатические тенденции и отклик на них составляющих водного баланса территории, площадь современных и вероятность будущих пожаров, интенсивность и экстенсивность техногенных воздействий на растительность, рельеф, водный режим и др. факторы теплообмена.

Обобщение названных двух групп показателей геокриологической опасности не рекомендуется, так как две названные группы показателей разнородны. Подробнее особенности этой стадии процедуры описаны в разделе 2.1, а примеры идентификации опасности разбираются в Главе 4.

Степень геокриологической опасности определяется на основе комплекса характеристик криогенной динамики (динамики состояния вечной мерзлоты и активности криогенных процессов) – отдельно для условно ненарушенных и антропогенно преобразованных территорий. Характеристики криогенной динамики включают четыре группы показателей: температуры пород и их льдо- и влагосодержание, динамика теплообмена через земную поверхность и между массивами пород, движение границ мёрзлых и талых массивов пород, активность криогенных процессов (экстенсивность и интенсивность). Подробнее особенности этой стадии процедуры описаны в разделе 2.2, а примеры идентификации опасности разбираются в Главе 4.

Степень геокриологической опасности необходимо переопределять заново при существенной перестройке состояния многолетней мерзлоты грунтов, которая характеризуется: а) изменением геометрии мёрзлых массивов, б) изменением ареалов проявления или активности криогенных процессов, в) сменой механизма

теплообмена между инженерно-геологическими элементами или через земную поверхность. Подробнее вопросы оценки состояния и динамики мерзлоты описаны в разделах 2.3, 3.1, 3.2 и 3.3.

Динамика геокриологической опасности отражает совокупность постепенных многолетних региональных и резких (сезонных и межгодовых) локальных преобразований геокриологических условий. Постепенные изменения связаны с колебаниями климата, а резкие преобразования связаны как с естественными (экстремальные погодные события, пожары, наводнения и т.п.), так и с техногенными (нарушения условий теплообмена) событиями. Эти вопросы разбираются в разделах 2.3, 3.4, 3.5.

Процедура анализа геокриологических опасностей позволяет систематизировать и упорядочить разнородные научно-исследовательские работы прикладного и фундаментального характера, связанные с научным сопровождением адаптации хозяйства к климатическим изменениям на территории криолитозоны. Детальнее эти вопросы рассмотрены в Главе 5.

Главным научным выводом первой главы является обоснование структуры понятия геокриологической опасности, которое упорядочивает характеристику элементов природно-технических систем по видам, степени и динамики геокриологических опасностей с учётом их масштаба и времени проявления.

Главным практическим выводом первой главы является концептуальное описание процедуры оценки геокриологической опасности, которое позволяет формализовать порядок выбора и применения методов для комплексирования районирования, мониторинга и геокриологического прогноза.

Глава 2 Характеристика геокриологических опасностей

2.1 Показатели наличия геокриологической опасности

Выбор показателей для характеристики изучаемого явления выступает ответственным и непростым делом. Показатели бывают:

- прямые и производные;
- прямые и косвенные;
- ключевые и вспомогательные;
- общие и специальные (привязанные к специальным задачам);
- временные и пространственные.

Показатели природного явления могут отражать:

- мгновенное состояние (статистика пространственного осреднения с оценкой ошибки наблюдений);
- состояние (фазу) режима (статистика пространственного осреднения сезонной изменчивости с оценкой ошибки наблюдений);
- динамику состояния (статистика временного осреднения – тренды среднего, и тренды аномальных значений);
- динамику режима (статистика временного осреднения – тренды среднего, и тренды аномальных значений);
- признак активности процессов (индикаторы);
- признак изменения состояния (индикатор);
- признак изменения режима – индикаторы.

Выбор характеристик состояния и динамики геокриологических условий в различных пространственных и временных масштабах имеет важное значение для прогнозирования геокриологических опасностей.

Под состоянием геокриологических условий понимается совокупность значений показателей конфигурации и физико-механических свойств мёрзлых массивов горных пород.

Под динамикой геокриологических условий понимается факт и кинетика изменения компонентов геологической среды исследуемой территории. К компонентам геологической среды относят: геологические тела, соотнесенные с

рельефом (пласты, штоки, жилы и т.п.), горные породы и грунты (литологические различия, не всегда соотнесенные с телами), флюиды (грунтовые воды). Характеристики этих компонентов можно разделить на:

- Условно неизменные характеристики (не изменяющиеся за оцениваемый ретроспективный или прогнозный период): состав, исходное криогенное строение грунтов (до приложения техногенной нагрузки), условия их залегания, подземные воды, рельеф
- переменные характеристики: теплофизические, физико-механические свойства
- динамические характеристики: геологические и криогенные процессы и явления.

Опыт работ лаборатории геокриологии им. Г.З.Перльштейна ИГЭ РАН позволил выделить обобщённый перечень основных показателей состояния ММП, значимость и детальность определения которых различается от особенностей геокриологических опасностей и уязвимости реципиента риска:

- пространственное положение областей с постоянно талым, частично мёрзлым и постоянно мёрзлым состоянием;
- пространственное положение областей с полными и частичными сезонными фазовыми переходами в порово-трещинном пространстве и температурный режим в этих зонах;
- пространственное положение областей с различным содержанием газов и/или солей и связанные с этим смещения температур начала замерзания;
- глубина проникновения сезонных колебаний температур и тенденция изменения этой температуры;
- пространственное положение областей с льдистостью, превышающей среднюю пористость (или трещинную пустотность) массива.

При постановке задачи геокриологического прогноза требуется учитывать неоднородности многолетнемёрзлых толщ (ММТ) по разрезу в случае:

- наличия фронтов фазовых переходов глубже проникновения сезонных колебаний температур;

- наличия флюидов, переносящих тепло в толще ММП;
- наличия неоднородностей температурного поля, связанных с историей теплообмена толщи ММП с вмещающими средами;
- наличия засоленных или газосодержащих пород в толще ММП.

Все эти соображения могут быть обобщённо выражены в виде перечня показателей состояния геокриологических условий, применимых как для каждой единицы хранения исходных данных (скважины, шурфа, площадки), так и для более крупных таксонов районирования:

- 1) Интервал глубин, в пределах которого наблюдаются сезонные колебания температур;
- 2) Среднегодовые температуры, осреднённые в пределах группы площадок, относящиеся к самым холодным и самым тёплым типам местности, а также к участкам с грунтами с повышенной льдистостью:
 - воздуха,
 - поверхности почвы,
 - подошвы деятельного слоя,
 - грунта на глубине проникновения сезонных колебаний.
 - интервал(ы) глубин с постоянно талым грунтом,
 - интервал(ы) глубин с полным промерзанием и оттаиванием грунта,
- 3) Интервал(ы) глубин с частичным промерзанием и оттаиванием (здесь потребуется установить частный критерий по количеству незамёрзшей воды),
- 4) Температура начала фазовых переходов на подошве деятельного слоя,
- 5) Знак и величина геотермического градиента ниже глубины проникновения сезонных колебаний температур.

Ландшафтная составляющая является поверхностным управляющим фактором развития криогенных систем при данных климатических условиях. Механизм этой связи определяется сильным влиянием растительности на процессы теплообмена и влагообмена почвогрунтов и атмосферы.

Для каждого региона существуют определенные зависимости фитоценотического биоморфологического состава с возможностью развития,

существования или деградации мерзлых пород, а также их температуры прочностные и деформативные свойства многочисленные криогенные процессы и явления (пучение, термокарст, термоэрозия, наледообразование). Это позволяет использовать растительный покров в качестве индикатора мерзлотных условий.

При изменении растительности на поверхности земли в первую очередь изменяется мощность деятельного слоя, а затем и температура мерзлых грунтов. К примеру, увеличение мощности мохового покрова приводит к уменьшению глубин сезонного протаивания, понижению температуры почв и пород.

Количественный прогноз возможных изменений геокриологических условий осуществляется на основе полученных результатов изучения состава, температуры и свойств мерзлых грунтов лабораторными и полевыми методами, данными прямого наблюдения за динамикой высоты снежного покрова в естественных и нарушенных условиях (и его свойств) и развитием опасных криогенных процессов с использованием аналитических (расчетных) методов и, при необходимости, методов физического моделирования.

Следует отметить, что наблюдения за характеристиками криолитозоны имеют разную продолжительность во времени (сутки-месяц-год), масштабности измерений (скважина-местность-район-регион).

Характерное время изменения ландшафта прослеживается с помощью анализа данных межгодовых наблюдений. Используются как мгновенные, так и осреднённые за различный период значения показателей.

К прямым показателям отнесены данные прямых термометрических и метеорологических наблюдений в поле и с помощью спутников (температура кровли ММП, толщина и температура СТС-СМС, температура воздуха, температура поверхности земли, толщина снежного покрова, толщина и тип растительного покрова и др.), геофизические данные (удельное электрическое сопротивление), данные прямых наблюдений в лаборатории (температура и состав грунта, льдистость и влажность пород, структура пород

К косвенным показателям отнесены усредненные показатели и расчетные коэффициенты (среднегодовая температура, теплопроводность, вегетативный индекс NDVI, температурный градиент, соотношение изотопов C/N и др.)

Сопоставление этих перечней показателей, наиболее часто используемых в практике современных геокриологических исследований, с показателями, рекомендуемыми учебной литературой, показывает, что настоящее время исследователи ориентируются в большей степени на доступные аппаратные возможности, но не на теоретические предпочтения. Это обстоятельство может привести к серьёзным методологическим перекосам и непониманию сути полученной информации.

Изложенное свидетельствует об отсутствии общепризнанных подходов к оценке состояния и динамики геокриологических условий. Такие подходы оказываются контекстными, а их результаты трудно сопоставимыми. В лаборатории геокриологии им. Г.З.Перльштейна ИГЭ РАН сложилась практика оценки динамики геокриологических условий с помощью характеристик наблюдаемых или прогнозируемых изменений геотемпературного режима, строения и водно-физических свойств горных пород, а также изменений активности геокриологических процессов. Характеристика изменений проводится по среднегодовым, среднесезонным (полупериоды охлаждения или нагревания) и среднемесячным величинам избранных показателей. К наблюдаемым характеристикам относятся:

- температура поверхности почвы (на участках с растительным покровом измеряется на контакте растительности с минеральным грунтом);
- температура вблизи подошвы сезонно-мёрзлого или сезонно-талого слоя;
- температура на глубине проникновения годовых колебаний температур;
- градиенты температур в интервалах глубин установки датчиков;
- глубина сезонного промерзания или протаивания;
- влажность, льдистость, засоленность, плотность и другие свойства горных пород, влияющие на их теплофизические характеристики;
- интенсивность и экстенсивность развития ЭГП (Голодковская, 1989).

К основным факторам, определяющим динамику мерзлотных условий, относятся:

- динамика снежного покрова;
- гидрологические явления (затопление или дренирование поверхности, ледовые воздействия и пр.);

- пожары;
- механические и тепловые воздействия на горные породы, связанные с инженерно-хозяйственной деятельностью;
- естественная динамика растительных покровов.

Данные, используемые для оценки геокриологических условий, следует получать в специализированных системах мониторинга, поскольку только они позволяют проследить их временную динамику (Королёв, 2007).

Соотношение характеристик геокриологической опасности показано на рисунке 2.1.

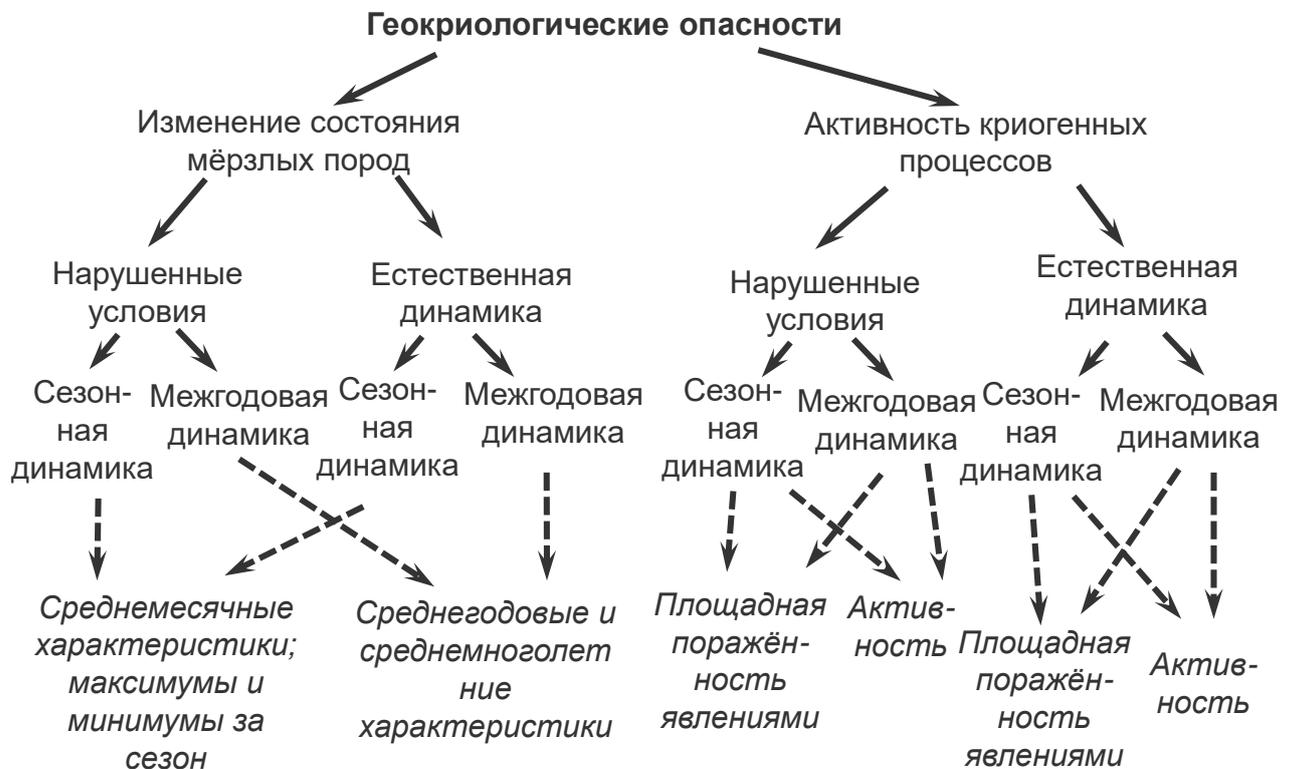


Рисунок 2.1 Соотношение характеристик геокриологической опасности.

Опыт участия в реализации задач численного моделирования температурного режима показал, что анализ получаемых результатов наиболее эффективно организовывать на основе графических представлений фрагментов матрицы, каждая строка которых содержит значения температуры горных пород на заданный момент времени по глубинам неравномерной сети (обычно от поверхности до глубины, превышающей глубину залегания подошвы мёрзлых толщ) – для соответствующей точки интенсивных исследований. Суточное

разрешение прогноза позволяет отследить как сезонную, так и многолетнюю геокриологическую динамику. Однако следует учесть, что одной температуры недостаточно для понимания ситуации и описания геокриологических опасностей. В частности, переменное во времени засоление грунтов смещает температуру начала замерзания и по одному показателю (температуре) трудно определить ход фазовых превращений. Поэтому для обоснования программ адаптации необходим расширенный графический аппарат анализа результатов геокриологического прогноза, позволяющий отобразить:

- многолетний ход среднегодовых температур на фиксированных глубинах с обязательным отображением хода температур в приповерхностной области и на глубинах 10 и 20 м;
- многолетний ход удельного содержания воды в жидкой фазе на фиксированных глубинах;
- распределение по глубине среднегодовых температур горных пород (по годам);
- распределение по глубине удельного содержания воды в жидкой фазе (по годам);
- многолетний ход глубины залегания кровли толщи многолетнемёрзлых пород в сопоставлении с ходом среднеинтегрального удельного содержания воды в жидкой фазе в верхнем десятиметровом слое грунта;
- многолетний ход даты смыкания деятельного слоя с многолетнемёрзлой толщей при промерзании (номер дня начиная с 1 сентября) в сопоставлении с изменениями глубины залегания кровли многолетнемёрзлой толщи;
- многолетний ход глубины залегания кровли многолетнемёрзлой толщи в сопоставлении со среднегодовой температурой воздуха;
- многолетний ход индексов сезонного промерзания и оттаивания в сопоставлении с датой смыкания деятельного слоя с многолетнемёрзлой толщей при промерзании (номер дня начиная с 1 сентября).

Перечисленные показатели для визуализации результатов геокриологического прогноза являются необходимыми и достаточными для характеристики состояния геокриологических условий на заданный год, а также

для характеристики динамики этих условий в любом интервале внутри выбранного периода прогнозирования. Для дополнительной калибровки модели также могут анализироваться графики зависимости термического сопротивления снега от толщины снежного покрова, а также отдельные прогнозные (сценарные) климатические показатели, если это необходимо для понимания реакции многолетней мерзлоты.

Распределение температур по глубине, отображённое по декадам, даёт представление о глубине проникновения климатического сигнала. При сопоставлении такого распределения с диаграммой состояния гидратов природных газов мы получаем информацию о глубинах возможного разложения последних, вызванного фоновым потеплением геокриологических условий.

Важной составляющей геокриологических условий является режим сезонного промерзания и оттаивания, поскольку от него существенно зависит динамика геокриологических процессов, воздействующих на инженерные объекты. Однако сама по себе глубина сезонного оттаивания является несовершенным индикатором реакции мерзлоты на климатические изменения, поскольку испытывает разнонаправленное влияние многих факторов. Нами предлагается использовать в качестве индикатора существенных изменений геокриологической обстановки дату смыкания деятельного слоя. Оттаявший за лето слой начинает промерзать осенью и, пока он не промёрзнет полностью, нижележащий грунт защищён от зимнего охлаждения. Чем позже дата смыкания, тем с более высокой температурой грунт будет встречать следующий тёплый сезон. Причина этого становится яснее при анализе сумм морозо-градусо-дней и тепло-градусо-дней на поверхности грунта, что характеризует теплообмен. Из полученных результатов можно предположить, что динамика даты смыкания деятельного слоя коррелирует с ходом индекса зимнего промерзания, а динамика глубины сезонного оттаивания – с индексом летнего протаивания.

Важным фактором реакции многолетней мерзлоты на климатические изменения является термическое сопротивление снежного покрова. При этом наибольшее отепляющее влияние снежный покров оказывает в первой половине зимы, оказывая воздействие на ход смыкания деятельного слоя. Поэтому динамика снежного покрова оценивается отдельно для первой и второй половины зимы.

Видно, что отепляющее действие снега постепенно снижается со временем для большинства рассмотренных регионов.

Показатели состояния многолетней мерзлоты отображаются на картографической основе, что помогает сформировать трёхмерную геологическую модель геокриологических условий.

2.2 Показатели степени геокриологической опасности

Опыт отображения геокриологических опасностей при учёте влияния климатических изменений привёл к технологии, когда актуальные и прогнозируемые опасности показываются на двух разных картах-схемах, что объясняется различной детальностью исходной информации, послужившей основой для анализа.

Современные геокриологические опасности отображают современную динамику преобразования геокриологических условий (среднегодовой температуры горных пород), которая определяет фоновую (региональную) активность неблагоприятных геокриологических процессов. Чем выше значение актуальной динамики температур грунтов, тем опасность выше. Хорошо известен подход школы Института криосферы Земли СО РАН, при котором наблюдаемые тренды среднегодовых температур горных пород сравниваются с трендами среднегодовых температур воздуха (Бердников, 2024). Разница в реакции температур ММТ в пределах разных ландшафтов и выполаживание трендов с приближением температур к нулю учитываются с помощью специальных коэффициентов. Данный подход успешно работает при сравнительно мелких масштабах исследований и не даёт прозрачных результатов, пригодных для оценки геокриологических опасностей.

Нам представляется рациональным привязываться не к температурному режиму горных пород и не к показателям, характеризующим значительные территории, поскольку проявления геокриологических опасностей всегда локальны. Для характеристики текущего состояния многолетней мерзлоты следует совместно рассматривать статические и динамические показатели. На самом деле,

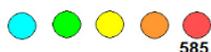
классики мерзлотоведения с самого начала понимали единство статики и динамики (Сумгин, 1934; Кудрявцев, 1983).

Для выяснения того, какой же ландшафт является «слабым звеном» в современных условиях теплообмена, необходимо вначале разделить ландшафты на группы по механизму теплообмена в грунте. Это позволит отдельно рассмотреть условия кондуктивного теплообмена и перенос тепла, связанный с воздушной или водной конвекцией. На втором этапе анализа необходимо разделить грунтовые толщи по льдистости верхних горизонтов ММТ. На третьем этапе следует рассмотреть среднегодовые и среднесезонные характеристики температурного режима и активности геокриологических процессов. Сезонные характеристики несут информацию о структуре и масштабе внутригодовой изменчивости. При этом важно помнить о внутриландшафтной изменчивости характеристик, которую не следует воспринимать как простое статистическое распределение. Например, наличие решётки повторно-жильных льдов относится к характеристикам ландшафта и требует отдельного рассмотрения условий теплообмена над жилой и вне её без уточнения геометрического положения и даже морфометрических показателей жильных тел.

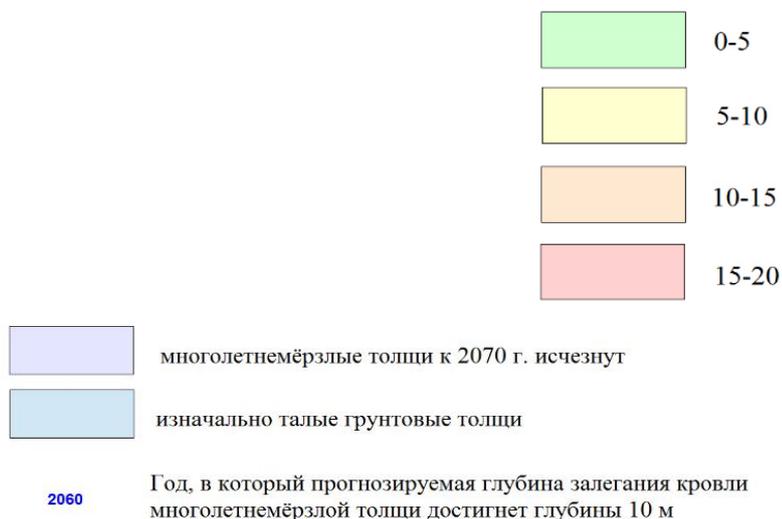
Прогнозируемые геокриологические опасности являются основной информацией, на которую рекомендуется опираться при разработке программ инженерной защиты и адаптационных программ. Неоднозначность реакции геокриологических условий на различные компоненты климатической системы приводит к необходимости использования разных показателей для описания состояния и динамики многолетней мерзлоты грунтов. Эти показатели могут использоваться вместе или комбинированно для обоснования состава, территориальной приуроченности и первоочередности разработки адаптационных программ.

Легенда карты-схемы разделяет точечные и площадные оценки опасностей (рис. 2.2).

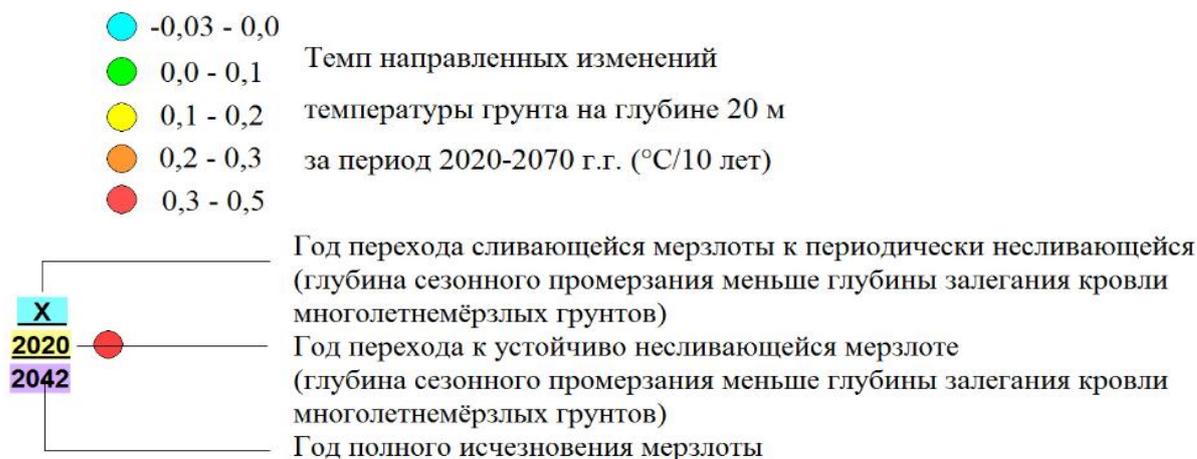
I. Точки прогнозных геокриологических расчётов и их номера



II. Опасности, связанные с направленным изменением глубины залегания кровли многолетнемёрзлой толщи, прогнозируемое положение которой составит к 2070 г.:



III. Опасности, связанные с многолетними изменениями сезонной геокриологической динамики



IV. Опасности, связанные с частичными фазовыми переходами влаги в многолетнемёрзлых грунтах:

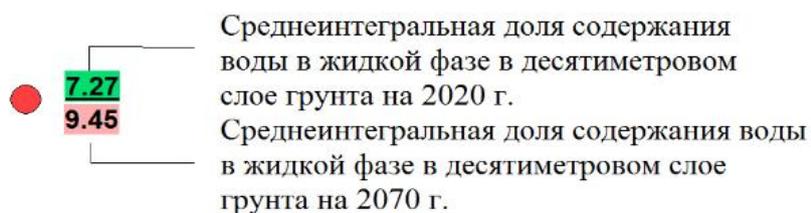


Рисунок 2.2 Макет условных обозначений карты-схемы прогнозируемых геокриологических опасностей (масштаб 1:5 000 000).

Площадные оценки получены экспертной экстраполяцией результатов геокриологического прогноза, выполненного в точках интенсивных исследований. Точки исследований обеспечены наиболее достоверной информацией, относящейся к представительному по площади ландшафту, на котором чаще всего выбираются площадки для инженерных сооружений. Цвет такой точки отдан темпу направленных изменений температуры грунта на глубине 20 м за период 2020-2070г.г. (третья группа условных знаков в легенде). Указанная динамика оценена путём линейной аппроксимации геокриологического прогноза суточного разрешения. Чем выше темпы для холодной геокриологической области, тем выше опасность, поскольку изменения температуры влияют на несущую способность грунтов и обуславливают активность геокриологических процессов.

Температурный режим характеризуется среднегодовыми характеристиками, которые используют для описание межгодовой изменчивости геокриологических условий, и характеристиками сезонной изменчивости, из которых авторы выбрали критерий соотношения деятельного слоя (слоя сезонного промерзания и протаивания) с многолетнемёрзлой толщей. При разобцённости этих двух слоёв мерзлота называется несливающейся и качественно меняется геокриологическая ситуация: существование постоянно талого прослоя между слоем сезонного промерзания и многолетнемёрзлой толщей приводит к коренной перестройке водного стока и к водному обеспечению роста многолетних бугров пучения. Год перехода к временно или постоянно несливающейся мерзлоте показан индексом около точки геокриологического прогноза.

Помимо температурного режима, каждая точка геокриологического прогноза несёт информацию о геометрии мёрзлого массива, границы которого меняются из-за климатических воздействий.

Горизонтальные (плановые) границы мёрзлых массивов не обеспечены достаточной информацией для прогнозирования, поэтому рекомендуется сосредоточить усилия на анализе динамики вертикальных границ (по разрезу), к которым относятся кровля и подошва многолетнемёрзлых толщ. Этот показатель представляется наиболее ёмким и рекомендуется экстраполировать его значения от

точек геокриологического прогноза на прилегающие ландшафтные группы (раздел II в легенде).

Раздел IV в легенде посвящён новому показателю состояния многолетнемёрзлых грунтов, который ранее не использовался в геологической практике: среднеинтегральному содержанию жидкой воды в десятиметровом слое грунта. Значение 0 этого показателя соответствует полностью замёрзшему грунту, что встречается, по-видимому, лишь в глубоком космосе, а значение 10 – соответствует постоянно талому грунту. В реальности, процессы сезонного промерзания приводят к временному промораживанию верхних горизонтов и некоторому охлаждению нижних слоёв мерзлоты, и смещению равновесия между содержанием льда и незамёрзшей воды в поровом пространстве. Смысл показателя заключается в возможности оценки несущей способности грунта исходя из фазового состояния влаги, которое зависит от температуры и засоленности. Проблема состоит в том, что и первая и вторая характеристика меняются во времени и до сих пор несущая способность рассчитывается на практике весьма упрощённо.

Подобные карты рекомендуется использовать как основу описания внешних (фоновых) актуальных и прогнозируемых геокриологических опасностей как одну из основ построения карт уязвимости инфраструктуры к воздействию геокриологических процессов. В контексте адаптационной деятельности опасность определяется как изменение состояния и/или сезонной изменчивости многолетнемёрзлых пород, с которым связано развитие процессов, оказывающих физическое воздействие на защищаемые ценности (объекты инфраструктуры, средства производства, системы обеспечения и предоставления услуг, экосистемы и природные ресурсы).

К числу наиболее распространённых опасностей, возникающих в результате изменения климата, следует отнести снижение несущей способности грунтов, пучение и осадку поверхности и заглублённых конструкций, гравитационные смещения грунта, наледообразование. Существующая или прогнозируемая опасность, сопряжённая с уязвимостью защищаемых ценностей, влечёт за собой возникновение риска, который должен выражаться уже в стоимостных показателях.

Для разработки адаптационных программ должны использоваться различные наборы характеристик, которые следует использовать как из карт, так и из графиков (здесь и далее использованы результаты расчётов, выполненных Г.С.Типенко). Графики «Температура на разных глубинах по годам» и «Распределение температуры по глубине для разных временных моментов» позволяют определить максимальную за прогнозируемый период величина среднегодовой температуры на глубине заложения проектируемых и эксплуатируемых инженерных конструкций. Величина влияет на несущую способность грунта и на назначение величины охлаждения газа в магистральных трубопроводах.

Также из графиков определяется глубина изменения температурного поля, связанного с климатическими изменениями. Величина влияет на область дополнительного расширения ореола растепления вокруг стволов газодобывающих скважин и на геокриологические процессы, связанные с миграцией газов.

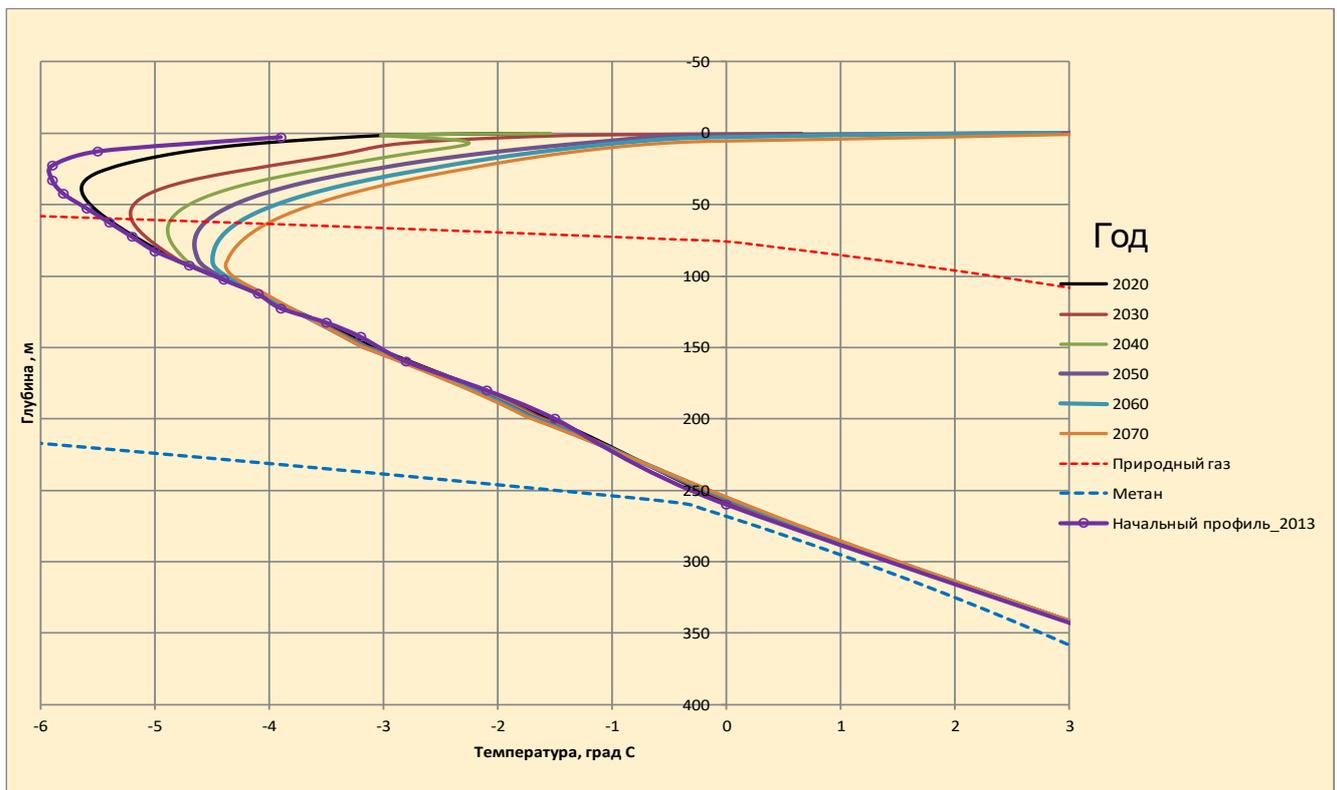


Рисунок 2.3 Прогноз распределения температуры по глубине для условий Центрального Ямала. Сценарий RCP 8.5, ненарушенные условия. Пунктирные кривые отображают кривые равновесия гидратов газов различного состава.

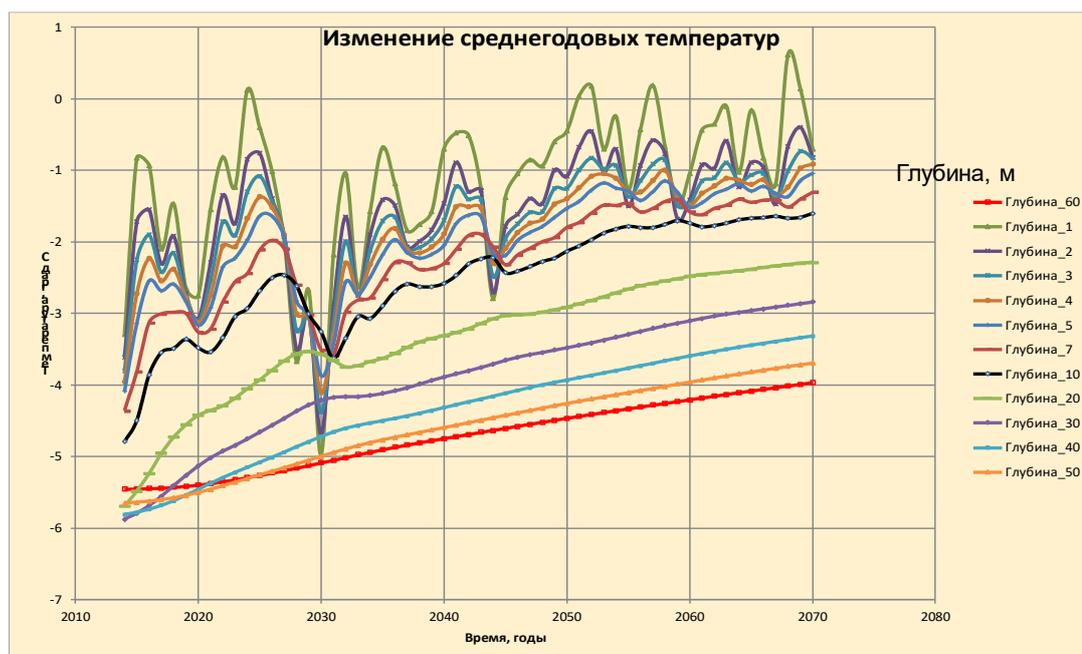


Рисунок 2.4 Прогноз хода температур на разных глубинах для условий Центрального Ямала. Сценарий RCP 8.5, ненарушенные условия.

В основе районирования лежит выделение трех основных групп территорий по состоянию ММТ:

- 1) зон с сохраненной толщиной мерзлых пород на весь реферируемый отрезок времени,
- 2) зон с прерывистой (локально оттаявшей) толщиной мерзлых пород,
- 3) зон с полностью оттаявшей толщиной пород.

В соответствии с этим разрабатывается принцип строительства и программа освоения территории с заранее планируемыми адаптационными мероприятиями: применительно к первой группе участков приоритетным является первый принцип застройки (сохранением мерзлого состояния толщи); для второй группы, в зависимости от экономических соображений, выбирается первый или второй тип застройки; для третьей группы наиболее оправданным будет принцип застройки без сохранения мерзлоты.

Учёт положения кровли многолетнемерзлых пород

Первым информационным блоком в легенде названной карты-схемы является показатель направленного изменения глубины залегания кровли многолетнемерзлой толщи, положение которого оценивается на срок заданной глубины прогноза. Физический смысл показателя заключается в определении

глубины залегания массива пород, содержащих лёд в течение всего года. Изменение этой глубины вследствие климатических изменений приводит существующие объекты к несоответствию проектных расчётов оснований фундаментов сооружений и фактического состояния последних. Этот показатель влияет также на требуемую глубину изысканий для планируемых объектов (рис. 2.5).

Таким образом, предметом адаптационной деятельности при использовании данного показателя на региональном уровне является идентификация приоритета территорий, требующих разработки адаптационных программ на локальном уровне, который определяется прогнозом исчезновения многолетнемёрзлых пород или степенью перемещения вертикальных границ мёрзлых массивов.

Предметом адаптационной деятельности при использовании данного показателя на локальном уровне является сопоставление проектных и фактических положений кровли многолетнемёрзлых толщ для всех объектов капитального строительства на территории криолитозоны в её актуальных границах. Степень этого несовпадения на локальном уровне позволит выделить объекты, приоритетные для разработки и реализации конкретных защитных или компенсирующих мероприятий.

Важным следствием использования этого показателя является понимание, что области с изменением глубины залегания кровли многолетнемёрзлых пород от 5 до 20 метров, потребуют формирования специальных адаптационных программ – для учёта специфики деградации многолетней мерзлоты в конкретных условиях проектируемых и эксплуатируемых объектов. Это приведёт к удорожанию всех видов работ и адаптационные программы нужны именно для минимизации этого удорожания. Области же, где многолетняя мерзлота через 50 лет исчезнет совершенно, напротив, станут рассматриваться в адаптационных программах как благоприятные, все предприятия по сохранению мерзлоты на них должны быть свёрнуты, а сооружение новых объектов рекомендуется проводить по второму принципу, что приведёт к удешевлению строительства.

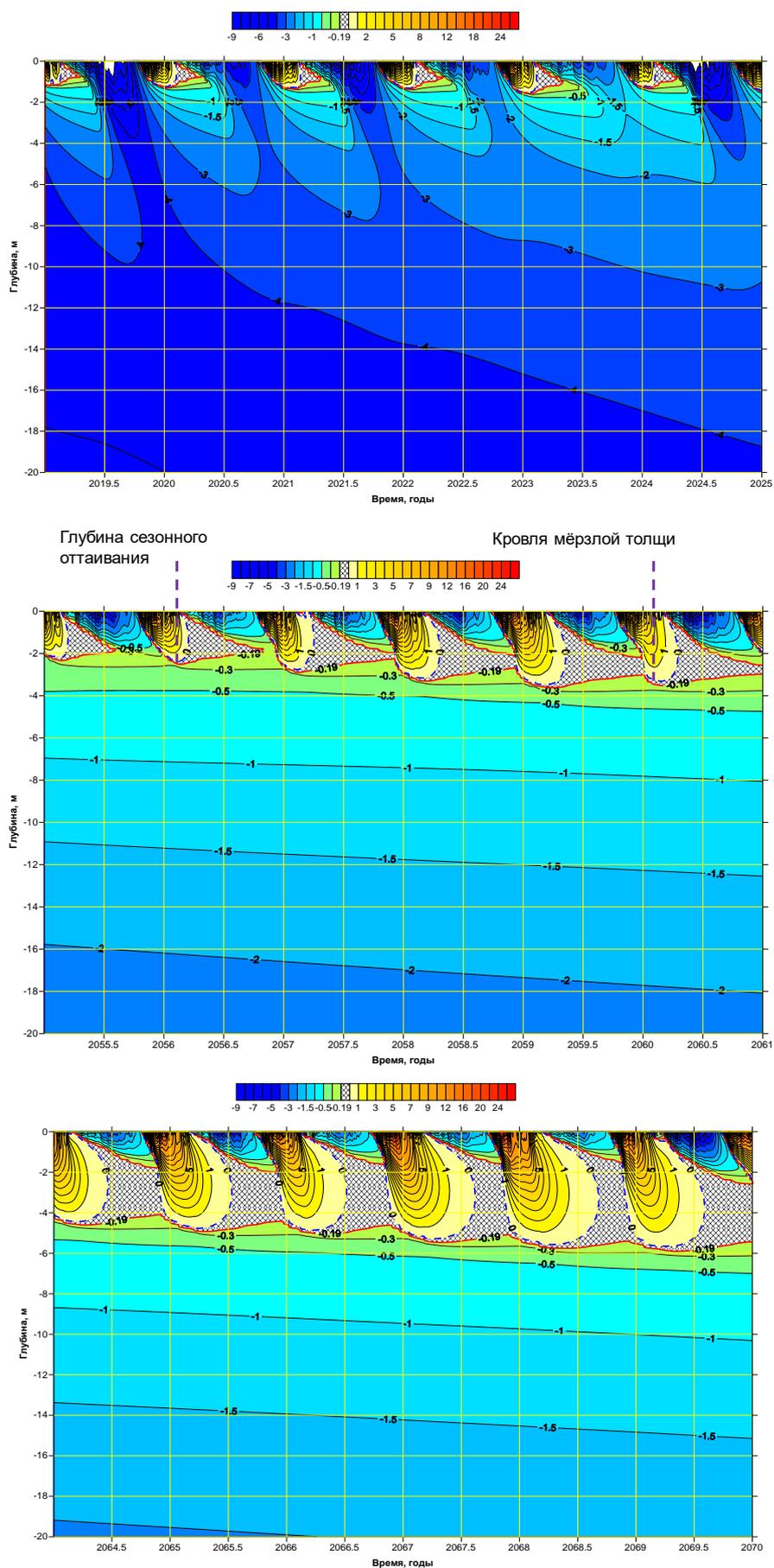


Рисунок 2.5 Прогноз хода температур на разных глубинах для условий Центрального Ямала. Сценарий RCP 8.5, ненарушенные условия.

Учёт изменения среднегодовой температуры грунта на глубине 20 м

Вторым информационным блоком в легенде Карты-схемы прогнозных геокриологических опасностей является показатель темпа направленных изменений среднегодовой температуры грунта на глубине 20 м. Этот показатель характеризует многолетние изменения сезонной геокриологической динамики. Физический смысл показателя заключается в прогнозе температурной реакции многолетней мерзлоты на принятый сценарий климатических изменений. Изменение среднегодовой температуры грунтов вследствие климатических изменений приводит существующие объекты к несоответствию проектных расчётов оснований фундаментов сооружений и фактического состояния последних. Фактическая динамика среднегодовой температуры грунтов носит осциллирующий характер, поэтому для инженерных расчётов рекомендуется использовать линейное осреднение хода прогнозных температур, который различен в разных регионах, и, кроме того, зависит от исходного температурного фона: в условиях низкотемпературной мерзлоты эти темпы высоки, но по мере приближения к интервалу температур с интенсивными фазовыми переходами эти темпы снижаются, поскольку часть климатического сигнала расходуется на эти фазовые переходы.

Предметом адаптационной деятельности при использовании данного показателя на региональном уровне является идентификация приоритета территорий, требующих разработки адаптационных программ на локальном уровне, который определяется прогнозом изменений температурного режима грунтовых толщ. Предметом адаптационной деятельности при использовании данного показателя на локальном уровне является рекомендация корректировки нормативного показателя фоновой среднегодовой температуры грунтов, используемого при проектировании объектов капитального строительства на территории криолитозоны в её актуальных границах. Такая корректировка вводится на объектном уровне по материалам регионального геокриологического прогноза.

Учёт сроков перехода сливающейся мерзлоты к периодически или устойчиво несливающейся мерзлоте

Третьим информационным блоком в легенде названной карты-схемы является показатель года (или десятилетия при обобщённом геокриологическом прогнозе) перехода сливающейся мерзлоты к периодически или устойчиво несливающейся. Этот показатель, так же, как и температура грунта, характеризует многолетние изменения сезонной геокриологической динамики. Его физический смысл заключается в определении момента коренного преобразования состояния многолетней мерзлоты, при котором меняется взаимное расположение границ сезонного промерзания и кровли многолетнемёрзлых грунтовых массивов. Если глубина сезонного промерзания больше глубины залегания кровли мерзлоты, то мы имеем классические геокриологические условия со сравнительно неглубоким сезонным оттаиванием, для которых разработаны детальные рекомендации по инженерным решениям и мерам инженерной защиты. Появление постоянно талого прослоя между деятельным слоем сезонного промерзания и оттаивания и постоянно мёрзлым грунтом, коренным образом меняет гидрогеологическую ситуацию и меняет интенсивность процессов сезонного и многолетнего пучения и всех других процессов, зависящих от миграции влаги. Ситуация усугубляется временной неравномерностью климатических изменений, которые приводят к осцилляциям геокриологических условий. Другими словами, переход к несливающейся мерзлоте может быть временным, и спустя несколько лет ситуация может вернуться к прежнему состоянию, однако прошедшие за этот период процессы изменят льдистость и физико-механические свойства грунтов и приведут инженерный объект в непроектное состояние.

Предметом адаптационной деятельности при использовании данного показателя на региональном уровне является идентификация временного приоритета территорий, требующих первоочередной разработки адаптационных программ на локальном уровне, который определяется прогнозом коренного преобразования состояния многолетней мерзлоты.

Предметом адаптационной деятельности при использовании данного показателя на локальном уровне является корректировка программ локального геотехнического и экологического мониторинга – с учётом коренной перестройки геокриологических условий, что повлияет на активность неблагоприятных

процессов (пучение, термокарст, эволюция криопегов, миграция газов, наледообразование и др.).

Учёт частичных фазовых переходов влаги в грунтах

Значительное количество изменений, происходящие в грунтах в связи с климатическими воздействиями, происходят постепенно. В частности, фазовые переходы влаги происходят в спектре температур, и несущая способность грунтов зависит от фазового состояния грунтовой системы. Физический смысл показателя заключается в определении среднеинтегральной доле содержания воды в жидкой фазе в десятиметровом слое грунта в течение года. Динамика этого показателя родственна температурному показателю по возможностям характеристики реакции многолетней мерзлоты на климатические изменения, однако физически более полно характеризует состояние грунтовой системы, что необходимо для предсказания несущей способности грунтов.

Предметом адаптационной деятельности при использовании данного показателя на региональном уровне является идентификация приоритета территорий, требующих разработки адаптационных программ на локальном уровне, который определяется более быстрыми темпами прироста доли жидкой влаги в грунтовой системе.

Предметом адаптационной деятельности при использовании данного показателя на локальном уровне является формирование технического задания на специальные исследования несущих свойств грунтов конкретных объектов, на основе данных о темпах фазовых переходов, вычисленным по данным регионального геокриологического прогноза.

В упрощённом плане, для целей локального геотехнического мониторинга рекомендуется использовать сокращённый перечень показателей состояния многолетней мерзлоты, которые приведены в таблице 2.1.

Опыт показал современную методическую и технологическую неготовность к оценке геоэкологических проблем в крупном масштабе исследования. Поэтому рационально развивать приёмы территориальной и отраслевой оценки этих проблем.

Оценка и классификация территориально-отраслевых геокриологических опасностей проводится на основе комплексной оценки обоих массивов

информации. Примером комплексного подхода к формированию территориальных приоритетов с точки зрения относительной геокриологической опасности служит комплексирование карт функционального режима землепользования (Создание..., 1997), интенсивности потепления температур воздуха (Павлов, 2003) и геокриологической карты северного полушария (Brown et al., 2003).

Таблица 2.1

Показатели состояния и динамики многолетней мерзлоты грунтов для целей локального геотехнического мониторинга

<i>Показатель (состояние/динамика)</i>	<i>Характерное время изменчивости</i>	<i>О чём информирует</i>
Среднегодовая температура на глубине проникновения годовых колебаний (состояние на текущий год и межгодовая динамика)	3-5 лет	Наличие мерзлоты и тенденция изменения фазового состояния поровой влаги (при близости к нулю начинаются частичные фазовые переходы)
Глубина кровли мерзлоты в сентябре (состояние на текущий год и межгодовая динамика)	1 год	Положение верхней границы мерзлоты и сезонная водная ёмкость талого слоя сверху (влияет на режим увлажнения приповерхностного слоя почвы в течение лета)
Соотношение глубины промерзания и глубины положения кровли мерзлоты в апреле-мае (состояние на текущий год)	1 год	Сливающаяся мерзлота или нет: определяет есть ли зимний грунтовый сток; определяет режим увлажнения приповерхностного слоя почвы в течение лета
Скорость промерзания и оттаивания деятельного слоя (динамика процесса в текущем году)	1 декада	Оценка влияния покровов (снег, растительность) на теплообороты в грунте

В результате районы с определенным типом хозяйственного освоения, попадающие в области высоких темпов потепления и неблагоприятных геокриологических условий (например, высокой льдистости пород), являются приоритетными с точки зрения планирования исследовательских, мониторинговых и инженерно-защитных мероприятий. Рассмотрим данный подход на примере совмещения карт: «Прогнозно-оценочная карта современных и ожидаемых повышений температур воздуха относительно нормы» масштаба 1:25000000 (Павлов, 2003), карты «Типы поселений и расселения» масштаб 1:15000000 (Создание ..., 1997), на которой показаны типы хозяйственного освоения территорий, «Карты распространения геокриологических явлений» масштаба

1:25000000 (Геоэкологические ..., 2000).

На первой из них отражены основные тенденции изменения климата в различных районах криолитозоны России в течение ближайших 50 лет. Карта «Типы поселений и расселения» отражает формы использования территории, связанные с производственной и иной деятельностью человека: сельскохозяйственной и лесохозяйственной, промышленной, транспортной и т.д. В зависимости от уровня исследований - федерального, регионального или локального детальность классификации существенно меняется. На федеральном уровне классификация содержит лишь основные типы земель: сельскохозяйственные (с подразделением на пахотные и природные кормовые угодья), лесохозяйственные, промышленные и транспортные, различающиеся формами воздействия на природную среду. Особую категорию составляют прочие земли: ледники, пески, солончаки, болота.

На региональном уровне классификация детализируется – включаются категории, отражающие режим эксплуатации земель. Сельскохозяйственные земли разделяются на пахотные, многолетние насаждения, сенокосы и пастбища постоянного пользования – улучшенные и неулучшенные. Все виды сельскохозяйственных земель делятся на мелиорируемые (орошаемые, обводняемые и осушаемые) и немелиорируемые. Лесные земли, если не предусматривается в базе данных специальная карта лесов, разделяются на принятые в лесном хозяйстве функциональные группы: леса I, II, III группы и резервные, а также условно-коренные и производные. Земли горнопромышленных предприятий разделяются по способам добычи: открытый, подземный. Транспортные пути - по видам транспорта и классам дорог. Земли под населенными пунктами получают масштабное (контурное) или внемасштабное (значки) изображение. Локальный уровень предусматривает дальнейшую детализацию классификации: подразделение пахотных земель может быть произведено по типам севооборотов и способам обработки пашни, что важно для определения загрязнения почв пестицидами и тяжелыми металлами; в лесных землях показываются лесопокрытые площади, редины, гари на разной стадии возобновления, вырубki, кустарники, стланики, лесные территории, используемые под выпас скота.

Леса I группы подразделяются на водоохранные, климаторегулирующие, почвозащитные, зеленые зоны городов и т.д. Для объектов промышленного и гражданского строительства указываются особенности воздействия на территорию. На картах регионального и локального уровней показываются ЛЭП, трубопроводы (подземные, наземные, на опорах). В масштабе показывается нарушенность земель горнодобывающими предприятиями – карьеры, терриконы, хвостохранилища и т.д.

На карте распространения геокриологических явлений показано районирование криолитозоны, отражающее строение мерзлых толщ, а также распространение криогенных процессов и явлений.

Комплексное рассмотрение данных информационных блоков (состояние криолитозоны, виды хозяйственной деятельности, региональные тенденции изменения климата в ближайшие десятилетия) даёт возможность выйти на принципиально новый уровень оценки и прогноза территориальных и отраслевых геокриологических опасностей и рисков для любого региона и любого потребителя (рис. 2.6).

На территориях с максимальными прогнозируемыми повышениями температур воздуха следует ожидать наибольшего повышения температур мерзлых пород. В зависимости от совокупности криогенных факторов (льдистости, криогенного строения, состава, изменения мощности сезонно-талого слоя и др.) можно провести районирование изменений в интенсивности опасных криогенных процессов и, соответственно - рисков нарушения природных систем. К ним можно отнести увеличение интенсивности склоновых процессов, нарастание термокарста, более динамичное изменение растительного покрова. Для хозяйственных объектов, расположенных в областях более интенсивного потепления, усилится риск аварийных ситуаций за счет интенсификации криогенных процессов. При этом различные типы хозяйственных объектов будут по-разному реагировать на изменение интенсивности криогенных процессов. Для линейных сооружений большую опасность будет представлять усиление склоновых и термоэрозионных процессов; для сооружений с большой нагрузкой на фундамент опасным будет уменьшение несущей способности грунтов; для оленеводства – ухудшение кормовой базы.

В настоящее время для различных территорий и отраслей народного хозяйства ещё не разработаны комплексные методики оценки хозяйственных рисков, связанных с динамикой геокриологических факторов.

В то же время необходимость таких методик в последнее время резко возросла. И связано это не только с глобальным потеплением и усилением негативных криогенных процессов, но и с изменившейся хозяйственной и общественной обстановкой в стране.

Усилилась роль экономических факторов при проработке инвестиционных проектов, большее внимание уделяется оценке различных рисков при долгосрочном планировании хозяйственной деятельности, активизировались общественные организации, защищающие природную среду.

Материалы наблюдений и накопленный инженерный опыт позволяют сделать выводы о том, что климатические изменения оказывают влияние на «фоновые» (осреднённые) зональные и секториальные характеристики геокриологических условий. Однако для прогноза геологических опасностей на конкретном участке этого недостаточно. Опасности конкретного участка зависят от динамики локальных условий в большей степени, чем от многолетних постепенных изменений осреднённых характеристик. Последние нуждаются в учёте лишь при мелкомасштабных или локальных (крупномасштабных), но долговременных прогнозах.

Долгосрочный геокриологический прогноз показал, что в южных областях криолитозоны рост температур горных пород на глубине нулевых годовых амплитуд не превысит 0.3°C . При максимальных предполагаемых темпах потепления прогнозируется значительно большее повышение среднегодовой температуры пород, которое к 2050 г. может достигать $3.0\text{--}3.6^{\circ}\text{C}$.

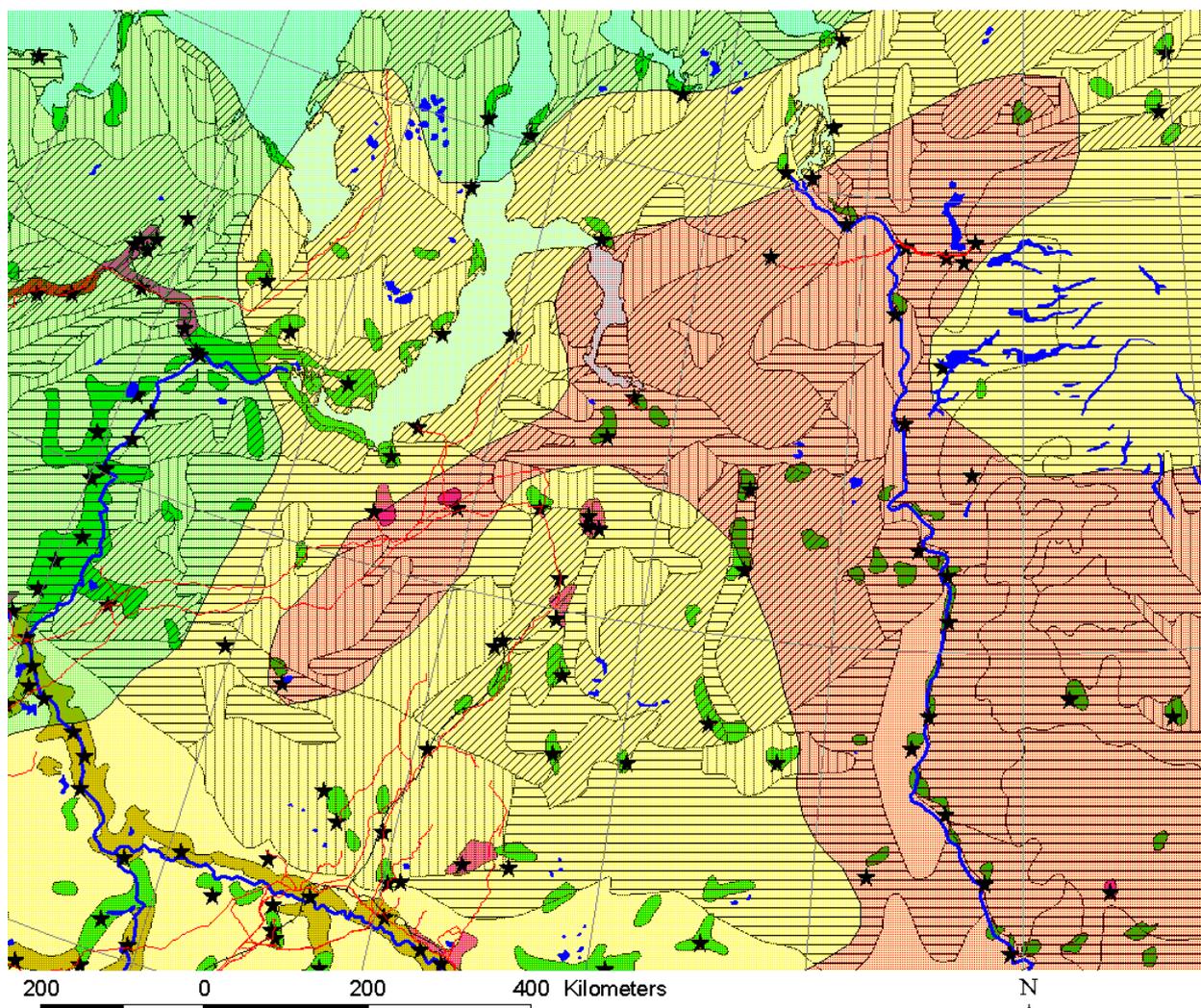
Оценка природных опасностей основывается на совместном анализе данных о состоянии геологической среды до начала хозяйственной деятельности, материалов мониторинга геологических процессов и результатов теоретического моделирования этих процессов с учётом меняющейся техногенной нагрузки. Практика разовых обследований и мониторинга в крупном масштабе на объектах, размеры которых существенно больше, чем площадка оценки риска (крупное месторождение, трасса линейного сооружения, территория крупного города и т.п.),

показала, что оценки опасности одного и того же процесса, сделанные на разных участках объекта становятся трудно сопоставимыми из-за того, что разница условий развития процесса в разных ландшафтных условиях затрудняют применение универсальных критериев оценки опасности.

Проведённый анализ позволяет сделать вывод, что оценка степени геокриологической опасности в природно-технических системах нуждается в описании фонового (естественного) состояния вечной мерзлоты грунтов, которое осуществляется по комплексу осреднённых по времени (сезонных по полупериодам охлаждения и нагревания), годовых и трёхлетних характеристик:

- полей температуры и влаго- и льдосодержания (применяются для описания пределов пространственной изменчивости свойств ММП);
- геометрии криолитологических тел и неоднородностей тепло- и воднофизических свойств слагающих их пород (применяются для построения модельной области при геокриологическом прогнозировании);
- режима теплообмена криолитологических тел и их теплообмена с атмосферой: их сезонных характеристик, межгодовых осцилляций и тенденций за различные периоды – от 5 до 30 лет (применяются для калибровки и верификации геотемпературных моделей).

Описание состояния вечной мерзлоты целесообразно вести по таксонам ландшафтного деления выбранного масштаба с обязательной характеристикой структуры и морфологии внутриландшафтных криолитологических и гидролого-гидрогеологических неоднородностей.



Условные обозначения:

- Трубопроводы
- Железные дороги
- Автомобильные дороги
- Озёра
- Города и крупные посёлки
- Крупнейшие реки
- Повышение температуры воздуха относительно нормы (1965-1994)
- 0.7 и менее
- от 0.7 до 1.0
- более 1.0
- Льдистость верхних горизонтов многолетней мерзлоты
- Высокая
- Средняя
- Низкая
- Характер использования земель
- Очаговое и линейное промышленное
- Очаговое оленеводческо-промышленное
- Очаговое сельскохозяйственно-промышленное
- Гнездовое сельскохозяйственно-лесопромышленное
- Ареальное и гнездовое лесопромышленное и лесохозяйственное
- Крупноареальное сельскохозяйственное
- Сплошное сельскохозяйственное
- Сплошное сельскохозяйственное
- Ареальное и очаговое отгонно-пастбищное животноводческое
- Долинное земледельческо-животноводческое
- Ареальное и очаговое предгорное животноводческое с выборочным орошением
- Ареальное и очаговое предгорное животноводческое с выборочным орошением
- Долино-котловинное горное животноводческое с очагами земледелия
- Ареальное урбанизированное
- Ареальное и очаговое промышленное
- Линейное и очаговое транспортное
- Мало населённые земли и зарубежные территории

Рисунок 2.6 Фрагмент вспомогательной карты для оценки геоэкологических проблем (пояснения в тексте).

2.3 Динамика геокриологических опасностей и её связь с изменениями состояния вечной мерзлоты и активностью криогенных процессов

Опасности, связанные с геокриологическими процессами, могут носить прямой или опосредованный характер. Прямая (непосредственная) угроза исходит от выраженной (резкой) активизации геокриологических процессов в отдельные годы (табл. 2.2). Это относится к таким процессам, как пучение, термокарст, термоэрозия, склоновые процессы (быстрая солифлюкция, вязкопластичные деформации ледогрунтового слоя), формирование наледей, морозобойное растрескивание. Каждый из перечисленных процессов является источником воздействия на сооружения, могущим привести либо к потере их устойчивости, либо к нарушению нормального режима эксплуатации.

Одновременно следует помнить о косвенных угрозах активизации геокриологических процессов, выражающейся в воздействии последних на характеристики окружающей среды и природные ресурсы при постепенных изменениях геокриологических условий (табл. 2.3). При этом возникают условия для развития других неблагоприятных природных процессов. Например, увеличение мощности деятельного слоя на склонах сопровождается его иссушением и приводит к гибели напочвенных растительных покровов и опустыниванию территории, сопровождаемому пыльными бурями (это зафиксировано работами кафедры инженерной геологии Геологического факультета МГУ в окрестностях города Талнах в середине 80-х годов).

Таблица 1.3 Угрозы, связанные с резкой активизацией геокриологических процессов (использованы фото, предоставленные В.Романовским, Г.Типенко, а также из монографий серии «Природные опасности России», М: Крук, 2000).

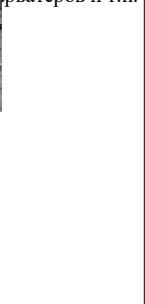
Характер угрозы	Снижение устойчивости гражданских и промышленных и гидротехнических сооружений			Нарушение нормального режима эксплуатации хозяйственных и промышленных объектов				Разрушение экосистем и привычной среды обитания человека	
	Экзогенные-геологические процессы, обуславливающие угрозу	Морозобойное растрескивание	Солифлюкция и другие виды смещений грунтов на склонах	Изменения свойств грунтов оснований в условиях климатических изменений	Наледообразование, рост активности термокарста, термоэрозии и суффозии	Изменение относительных площадей зон питания и разгрузки подземных вод в условиях климатических изменений	Термоабразия	Сгонно-нагонные и приливно-отливные процессы	Изменения речной сети и заозёрности
Примеры неблагоприятных	<p>Нарушения дорожных и аэродромных покрытий и ограждающих конструкций гидротехнических сооружений</p> 	<p>Нарушения устойчивости бортов карьеров и отвалов вскрышных пород</p> 	<p>Снижение несущей способности грунтов и коррозия арматуры ж/б свай (за счёт миграции криогенных рассолов)</p> 	<p>Увеличение эксплуатационных затрат на автодорогах в результате активизации криогенных процессов под влиянием потепления климата</p> 	<p>Изменения гидрологического режима, интенсификация половодий</p> 	<p>Потери суши, разрушение береговых сооружений</p> 	<p>Разрушение причалов, дорог, трубопроводов в прибрежной зоне, изменение ватеров и т.п.</p> 	<p>Дополнительные затраты на адаптацию инфраструктуры к изменившимся условиям</p> 	<p>Дополнительные затраты на адаптацию инфраструктуры к изменившимся условиям</p> 
Меры профилактики и	Учёт при проектировании и текущий ремонт	Прогноз; закрепление склонов	Мониторинг состояния фундаментов, надзор за эксплуатацией сооружений; укрепление оснований	Прогноз и текущий контроль	Мониторинг и специальные региональные исследования	Учёт при проектировании; укрепление берегов в районе портов и посёлков	Учёт при проектировании и мониторинг	Мониторинг и специальные региональные исследования	Мониторинг и специальные региональные исследования

Таблица 1.4 Геокриологические угрозы, связанные с постепенными изменениями в окружающей среде (использованы фото, предоставленные В.Романовским, Г.Типенко, а также из монографий серии «Природные опасности России», М: Крук, 2000).

Характер угрозы	Потеря устойчивости гражданских, промышленных и гидротехнических сооружений				Нарушение нормального режима эксплуатации хозяйственных и промышленных объектов				Разрушение экосистем и привычной среды обитания человека	
	Экзогенные-геологические процессы, обуславливающие угрозу	Пучение, тепловые просадки грунтов	Сплывы и другие быстрые смещения грунтов на склонах	Сходы лавин и подвижки ледников	Изменения свойств грунтов в результате засоления и тиксотропного разжижения	Образование термокарстовых и термоэрозионных форм рельефа	Формирование наледей	Динамическое и статическое воздействие плавучих, донных и внутриводных льдов	Разложение газогидратов	Изменение режима надмерзлотных вод и условий поверхностного стока
Примеры неблагоприятных последствий	<p>Деформации и разрушения промышленных, гражданских и гидротехнических инженерных сооружений</p>  	<p>Нарушения устойчивости бортов карьеров и отвалов вскрышных пород (Апатиты)</p> 	<p>Катастрофа в районе ледника Колка; гибель людей и разрушение сооружений в результате сходов лавин</p> 	<p>Деформации и разрушения инженерных сооружений</p>	<p>Нарушения земель</p>  	<p>Нарушение транспортных коммуникаций в результате возникновения наледей; ущерб с/х производству (Алтайский край, зима 2003-2004); изменение режима водного стока</p> 	<p>Разрыв кабелей и трубопроводов, проложенных под дну; разрушение опор мостов, конструкций буровых платформ и т.п.</p> 	<p>Образование грифонов, ледяных пробок, прихват оборудования и др. в результате снятия пластового давления при бурении</p> 	<p>Нарушения земель (заболачивание)</p> 	<p>Опустынивание (учащение пыльных бурь в окрестностях г. Талнаха, связанное с нарушением растительного покрова и иссушением деятельного слоя)</p>
Меры профилактики и защиты	Мониторинг состояния фундаментов, надзор за эксплуатацией сооружений; укрепление мёрзлых и оттаивающих оснований	Прогноз и мониторинг устойчивости склонов; закрепление склонов	Мониторинг и мероприятия по предупреждению катастрофических последствий	Мониторинг состояния фундаментов, надзор за эксплуатацией сооружений; укрепление мёрзлых и оттаивающих оснований	Внедрение процедур прогноза термокарста и термоэрозии	Мониторинг; учёт наледеобразования в гидрологических расчётах	Учёт при проектировании и мониторинг	Учёт при проектировании буровых работ	Дренаж поверхности	Восстановление напочвенного растительного покрова (биологическая рекультивация)

Примером роли постепенных изменений геокриологических условий служат результаты исследования динамики геокриологических условий по разрезу, которое было прослежено при моделировании динамики многолетнемёрзлых толщ во взаимодействии с речным стоком (на примере водосбора в верховьях р.Лены) в рамках гранта РФФИ № 06-05-64959а. Рассмотрение многолетних тенденций изменения среднемесячных значений климатических и гидрологических характеристик гидропоста Чульман в посёлке Чульман за период с 1936 по 2005 гг. показало, что режимы атмосферных осадков и речного стока имеют сонаправленный многолетний тренд для зимних и летних месяцев и разнонаправленное — в июне и сентябре-октябре, когда при постепенном росте атмосферных осадков объёмы речного стока год от года уменьшаются (рис. 2.7).

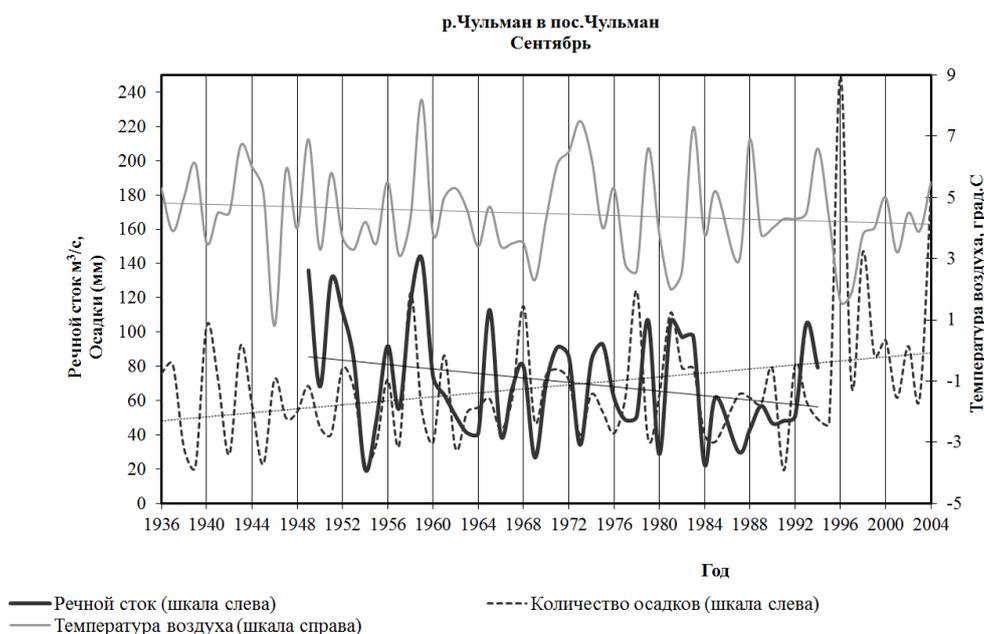


Рисунок 2.7 Многолетний ход среднемесячных значений метеорологических и гидрологических параметров (Метеостанция и гидропост Чульман, Южная Якутия).

Сам факт разнонаправленных тенденций свидетельствует о сложности структуры водного баланса территории водосбора реки Чульман, в котором подземная, а для притоков р.Чульмана и наледная компоненты стока, играют заметные роли (Всеволожский, Куринова, 1989). Этот вывод также подтверждается тем обстоятельством, что в августе становится особенно заметным несоответствие пиков

осадков и стока, что может говорить о сезонном возрастании доли грунтового и подземного стока в питании поверхностных вод.

Оригинальная модель, реализующая решение двухмерной сопряженной фильтрационно-тепловой задачи, позволила выяснить, что в условиях нисходящего движения относительно холодного инфильтрационного потока, который формируется от атмосферных осадков, выпадающих на талые водораздельные поверхности (Южная Якутия) навстречу восходящему глубинному теплотокоту из недр, происходит охлаждение пород, в отличие от грунтовых массивов, расположенных под речными долинами, в которых водовыводящий конвективный талик приобретает термодинамически устойчивую равновесную форму (рис. 2.8). Важно, что конфигурация мерзлых массивов весьма чувствительна к режиму инфильтрации атмосферных осадков, влияя, в свою очередь, на режим подземного и наледного стока территории через изменение фильтрационной ёмкости пород (Романовский и др., 2009).

Новым важным фактом, установленным в результате моделирования, является то, что глубина указанного охлаждения не ограничивается зоной аэрации, а прослеживается и в зоне постоянного водонасыщения (на 100-200 м ниже зеркала фильтрационного потока). Это является следствием значительной вертикальной составляющей фильтрации там, происходит смена направления фильтрации с вертикальной на субгоризонтальную. В результате в пределах всей зоны аэрации формируется практически безградиентное температурное поле. Дальнейшее движение подземных вод из охлажденных водораздельных массивов в направлении долин сопровождается заметным понижением температур пород в обрамлении водораздельных таликов, что сопровождается существенным увеличением мощности и изменением пространственной конфигурации многолетнемёрзлых толщ на склонах.

В результате смягчения геокриологических условий (сокращении площадей распространения и объёма массивов ММП) прогнозируется увеличение площади питания подземных вод, а также гидравлической ёмкости трещиноватых горных пород, по которым подземные воды дренируются в поверхностные водотоки. Указанные изменения сказываются на объёме и режиме регионального стока.

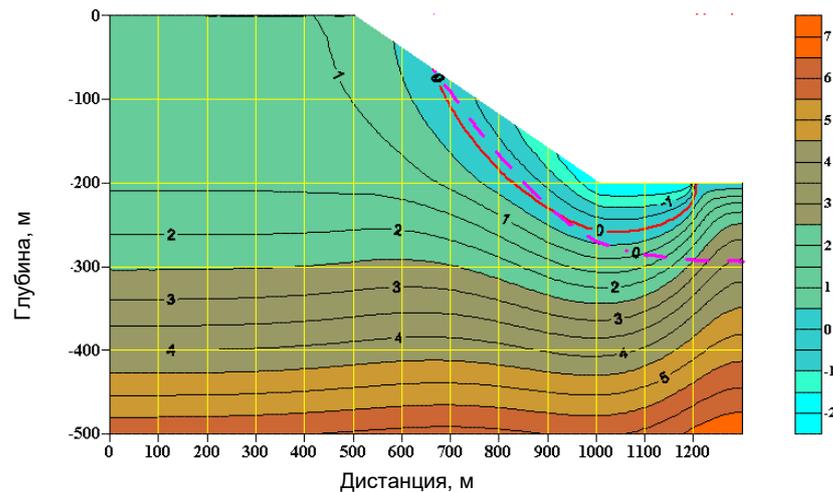


Рисунок 2.8 Сравнение конфигурации мёрзлого массива под склоном долины с учётом (красная сплошная линия) и без учёта (малиновая пунктирная линия) фильтрации атмосферных вод (инфильтрационное питание 0.18 м/год, среднегодовая температура поверхности на водоразделе +1°C, в долине -2°C. Цветовая шкала сопоставлена диапазонам температуры пород.

Вывод: В данном примере источником опасности является *изменение конфигурации массивов ММП, влияющее на режим подземных вод и, следовательно, их запасы*. Оценка геокриологической опасности проводится в этом случае с учётом конвективного переноса тепла с подземными водами, в широкой расчётной области, позволяющей корректно описать фильтрационный поток меж- и подмерзлотных вод, а также тепловые потоки, перераспределяющиеся в соответствии с особенностями рельефа и путей движения подземных вод.

Интересным примером оценки динамики геокриологических опасностей, связанной с изменением состояния вечной мерзлоты, служит связь поверхностного и подземного стока, прослеженная на моренах рек Средний Сакукан и Нижний Ингамакит (Северное Забайкалье) (Макарычева, Капралова, Сергеев, 2015; Kapralova et al., 2019). Динамика таликовых зон, связанная как с внутренней

циклическостью их развития, так и с изменениями климата, приводит к временным различиям в объемах водообмена между подземными и поверхностными водами в районах распространения вечной мерзлоты. Циклические колебания уровня воды в озере Вега свидетельствуют о неустойчивой связи между поверхностными и подземными водами (рис. 2.9). Колебания уровня в озерах не всегда синхронны и не связаны с режимом атмосферных осадков (рис. 2.10). Авторы связывают это с изменением мерзлотных условий. В частности, скважина, пробуренная на берегу озера в конце 80-х годов XX века, показала в разрезе моренных крупнообломочных отложений два горизонта льда в интервале глубин 2.5-6.2 м и 9.5-10.3 м. При высокой проницаемости крупнообломочных отложений оттаивание ледяного слоя в наиболее тонких его местах приводило к периодическому сбросу озера через подозёрный талик, который периодически становился сквозным. После сброса фильтрационная зона заиливалась, и, возможно, даже временно замерзала. В последний наблюдавшийся цикл «наполнение озера – сброс воды» наполнению способствовало временное похолодание в период 2010-2013 г.г.

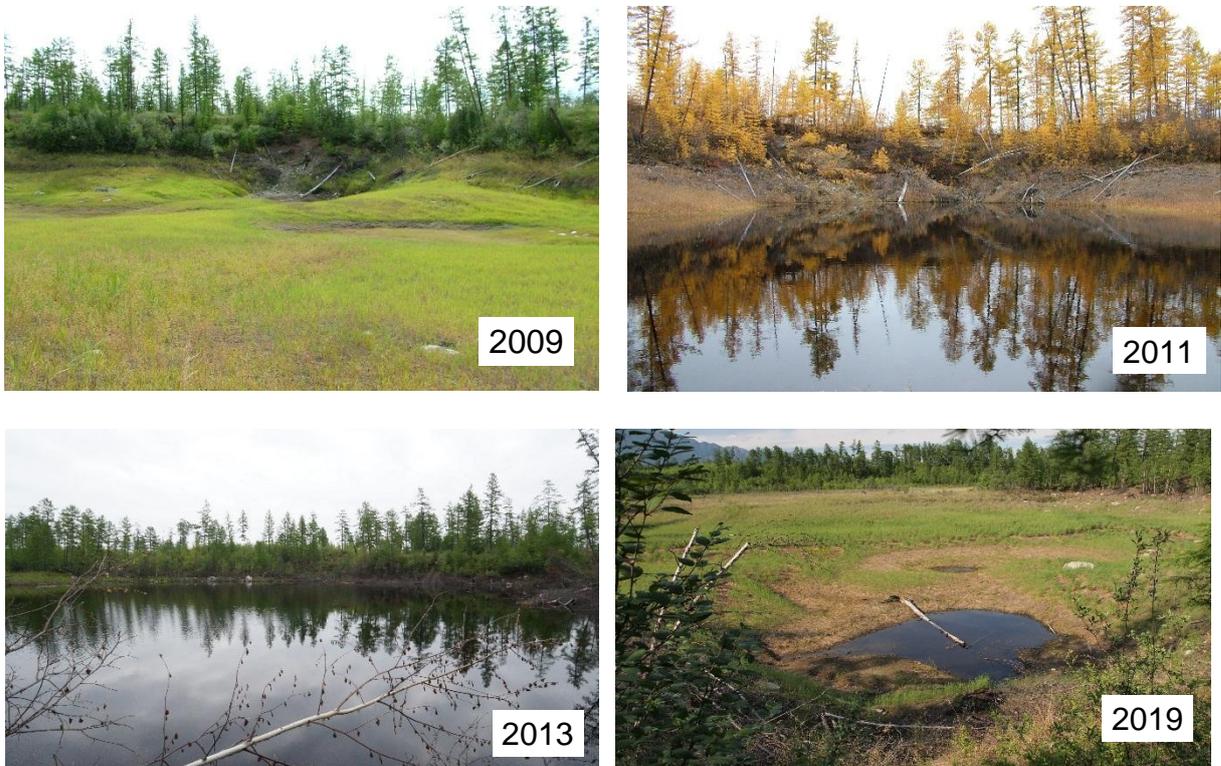


Рисунок 2.9 Положение уровня воды в озере Вега в разные годы.

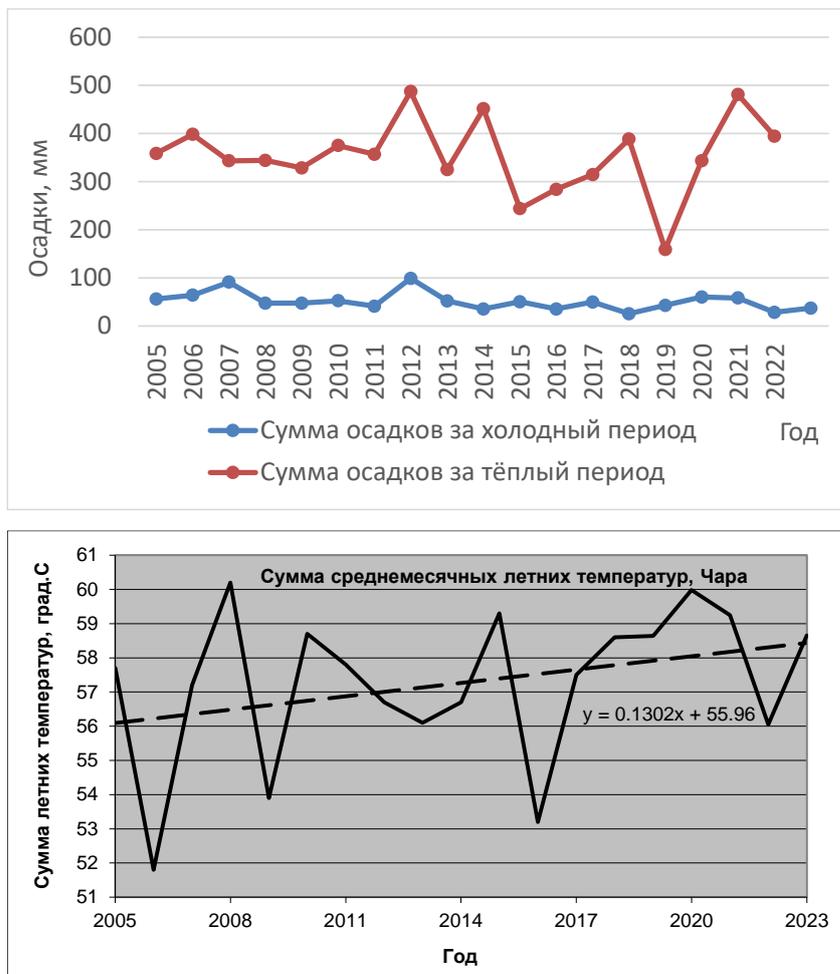


Рисунок 2.10 Климатические изменения по данным метеостанции Чара.

При следующем цикле наполнения озера вытаивание ледяного слоя происходило уже в другом «слабом» месте и снова происходил сброс озера. Однако после 2019 года наполнение озера уже не наблюдалось, что, возможно, связано со значительной площадью вытаивания льда.

В данном примере источником опасности является *резкое циклические изменения подземного стоку, обусловленное динамикой границ подозёрного талика.*

Таким образом, оценка геокриологических опасностей, связанных с изменениями геокриологических условий, сводится к оценке вероятности активизации геокриологических процессов, которые необратимо изменяют характеристики ландшафтов на территории криолитозоны. При таком подходе расстановка приоритетов оценки связана с суммарным ущербом, наносимым

природным ресурсам или инженерной инфраструктуре. Характеристика же направленности процессов складывается на основе понимания их пространственной приуроченности (близости очага процесса к инженерному сооружению), пространственной тенденции изменения этой приуроченности и временных тенденций изменения активности процесса (экстенсивности и/или экстенсивности).

Главным научным выводом второй главы является критериальная основа выбора показателей состояния и динамики вечной мерзлоты применительно к характеристике наличия, степени и динамики геокриологических опасностей.

Главным практическим выводом второй главы является уточнение расширенного списка показателей состояния и динамики вечной мерзлоты, необходимого для оценки геокриологических опасностей.

Глава 3 Методические приёмы анализа геокриологических опасностей

3.1 Учёт детерминированности и стохастичности характеристик геокриологических условий

В цикле наук о Земле количественные исследования используют оба подхода – детерминированного и стохастического. Каждый из них имеет свои ограничения, сильные и слабые стороны. Например, большим достоинством детерминированных моделей является однозначный учёт причинно-следственных связей, возможность понять и оценить роль основных определяющих факторов, а значит – находить оптимальные решения при управлении исследуемым процессом. С другой стороны, в развитии природных систем, как правило, значительную роль играет множество случайных величин (факторов). Их большое число плюс относительное несовершенство моделей уже сами по себе придают выводам из детерминистских исследований вероятностный характер. В известной мере в этом отражается дуализм нашего понимания сущности природных явлений. Однако данный вопрос выходит за гносеологические рамки, поскольку напрямую связан с качеством исследований в конкретных естественных и технических науках.

Количественный анализ природно-технических систем выдвигает две главные проблемы. Первая – правильная постановка задачи, а вторая – корректное моделирование. Часто затруднения возникают именно потому, что неправильно формулируется задача. При этом обычно делаются попытки переложить трудности решения проблемы на её вычислительные аспекты. Важный вопрос связан и с тем, как правильно провести факторный анализ.

При оценке модели важно чётко представлять границы её применимости, т.е. знать, описывает она систему в рамках её естественных колебаний, без выхода в иное качественное состояние или же даёт возможность прогнозировать какие-то качественные изменения. Именно в этом состоит большая проблема для всех природоведов. Для работоспособности модели очень важна генетическая парадигма, учитывающая, в частности, предысторию развития криогенных геосистем (палеогеографическую ситуацию). Сказанное полностью справедливо по отношению к проблеме количественного изучения криогенных геосистем.

Криогенные геосистемы, особенно содержащие высокольдистые и засоленные мёрзлые грунты и подземные льды, весьма чувствительны к внешним воздействиям. При температуре, близкой к точке замерзания воды, сравнительно малые изменения могут вызвать в них необратимый отклик, что особенно важно при оценке техногенных воздействий. Возможные последствия перехода из квазиравновесного состояния в неустойчивое трудно прогнозируемы.

В результате колебаний климатических условий, прежде всего, меняются параметры деятельного слоя. Однако вслед за этим может происходить смена фитоценозов, режима поверхностного и подземного стока, активизация мерзлотных процессов (Perlshtein et al., 2005; Перльштейн, Сергеев, 2005). Эти явления, в свою очередь, отражаются на температуре многолетнемёрзлых пород, интенсивности ЭГП. В зависимости от силы внешнего импульса и внутренних особенностей геосистемы изменения могут постепенно затухать или приобретать резонансное развитие вплоть до полного разрушения геосистемы.

Стационарное состояние любой системы определяется соотношением управляющих параметров. Основным управляющим параметром криогенных геосистем является температура мёрзлых пород. Повышение температуры уводит криогенную систему всё дальше и дальше от равновесия. При некотором критическом значении температуры система достигает порога устойчивости, который называется точкой бифуркации. В точке бифуркации система становится неустойчивой относительно случайных флуктуаций. Следует отметить, что дальнейший путь развития зависит и от предыстории системы.

Количественные исследования природных систем связаны с методикой пространственно-временной интерполяции и экстраполяции результатов точечных наблюдений. Обычно их распространяют на всю территорию выделенных ландшафтных единиц (геосистем, мерзлотных микрорайонов). Однако из практики крупномасштабных инженерно-геологических изысканий хорошо известно, что даже в пределах однородных ландшафтов, расположенных на одном элементе рельефа, состав и свойства пород могут существенно отличаться (например, влажность меняется кратно, глубина промерзания – в 1.5-2.0 раза). В этих условиях для оценки распределения характеристик грунтовых массивов наиболее эффективны стохастические методы. При обработке результатов изысканий и всех

измерений для различных ландшафтов необходимо помнить, что они принадлежат к статистически разнородным совокупностям.

Некоторые возможности вероятностных методов в геокриологии можно понять на примере работ А.С.Викторова (Викторов, 2006). Речь идет об анализе геометрии ландшафта на участке тундры с термокарстовыми озёрами и дренажной сетью, которая может эти озёра осушать. В пределах одной ландшафтной единицы выделено три потока событий: случайное возникновение термокарстовых озёр, их независимое развитие и также независимый случайный спуск озера эрозионной сетью. Наиболее важным понятием здесь является независимость событий. Кроме того, было сделано допущение, что новые озёра на территории старых не формируются. В результате стохастического анализа мезорельефа удалось выяснить, в каких условиях устанавливается динамическое равновесие между случайными событиями образования и спуска озёр. Среднее количество и геометрические характеристики термокарстовых озёр и хасыреев становятся стационарными. Чем дольше живёт озеро, тем выше вероятность его осушения.

Одним из ключевых вопросов методологии геокриологических прогнозов и вообще количественных исследований криолитозоны следует признать соотношение вероятностных и детерминированных подходов к анализу природных и технологических процессов. Эти подходы уже применяются во многих областях науки и техники (метеорологические и гидрологические прогнозы, проектирование зданий и других инженерных сооружений и т.д.). При проектировании фундаментов сначала определяется несущая способность грунтов основания и рассчитывается допустимая нагрузка, а затем вводится коэффициент запаса. Последний назначается по СНиП'ам, которые в данной части были разработаны «из опыта», с учётом важности объекта, а по существу – произвольно. Допустим, некоторое ответственное сооружение требует коэффициента запаса 3.0, а менее ответственное – 1.2. Обоснованно ответить, обоснованно ли назначены эти коэффициенты запаса, мы сегодня не в состоянии. Обычно ссылаются на опыт, но из какого опыта и как это делается, не понятно. Профессор Л.Н.Хрусталеv предлагает использовать для этого функцию надёжности. При расчёте фундамента допустимая нагрузка должна быть равна несущей способности, делённой на коэффициент запаса (надёжности). Вероятностные методы дают возможность

сравнивать не только начальные стоимости сооружения, но и затраты с учётом надёжности, эквивалентом которой является понятие «цена риска». Если решить задачу оптимизации, то можно выйти на ту надёжность, которая соответствует не только природным факторам, но и экономическим показателям (уровню жизни, уровню развития производства). Пример такой оптимизационной задачи: сумма начальной стоимости плюс «цена риска» должна равняться минимуму. Надёжность достигается путём увеличения глубины заложения фундамента. Поэтому с увеличением надёжности начальная стоимость растёт, а цена риска – наоборот. В результате мы имеем минимум, соответствующий оптимальной надёжности.

Существует ещё одна важная область применения вероятностных методов исследования для оценки геокриологических опасностей – это оценка пространственной вероятности возникновения неблагоприятного явления. При хозяйственном освоении территории возникновение очагов развития геокриологических процессов является пространственной функцией пересечения площадей с высокой льдистостью грунтов с площадями техногенных воздействий, которые нарушают условия теплообмена через поверхность. Если известны закономерности залегания высокольдистых грунтов, то оказывается возможным вычислить вероятность пересечения с ним областей техногенной нагрузки (Stanilovskaya et al., 2015).

Рассмотренные в данном разделе результаты были внедрены при составлении отчётов по научным программам Президиума РАН (2006) и ОНЗ РАН (№14 – 2007-2008 г.г.).

3.2 Учёт активности и направленности геокриологических процессов

Активность процессов оценивается с помощью показателей интенсивности и экстенсивности (Голодковская и Елисеев, 1989). Интенсивность процесса означает меру результативности его протекания за единицу времени. Например, для термической просадки результативностью считается приrost просадки поверхности, для наледообразования – приrost объёма льда или толщины наледи и т.п. Экстенсивность процесса характеризует пространство, в пределах которого развивается процесс. Например, экстенсивность термических просадок может

косвенно оцениваться по площадям изменённой растительности или по площадям термокарстовых озёр. Экстенсивность наледеобразования – по площади наледи и т.п. Заметим, что экстенсивность и интенсивность являются показателями, отнесёнными к заданному промежутку времени. Прослеживание временной изменчивости их значений даёт информацию о цикличности и направленности процесса. Например, криогенное пучение происходит каждый холодный сезон. Однако от зимы к зиме величина пучения может закономерно возрастать в течении нескольких лет, а затем – подобным же образом снижаться.

Экстенсивность и интенсивность процессов рекомендуется использовать для оценки геокриологических опасностей. Основная методическая сложность при этом заключается в том, что криогенные процессы весьма трудно поддаются непосредственному измерению и мы часто судим об их протекании по параметрам криогенных явлений. Например, об активности термокарста судят по приросту площадей термокарстовых озёр (Кравцова, Быстрова, 2009). Но строго говоря, так делать не следует, поскольку формирование и развитие озера – по сути комплексный процесс, в котором термокарст играет значимую роль только на некоторых стадиях развития озера.

Динамика геокриологических процессов наблюдалась сотрудниками лаборатории геокриологии им. Г.З.Перльштейна ИГЭ РАН на Чарском геокриологическом полигоне с 2005 года. Благодаря наличию повторно-жильных льдов, в береговом обнажении наблюдаются процессы интенсивной боковой термоэрозии (рис. 1.21, 1.22, 3.1).

Впоследствии, в прибрежной зоне р.Чары шириной около 100 м началось развитие термоэрозионных оврагов, приуроченных к отдельным ледяным жилам. При этом овраги развивались не по механизму пятащейся эрозии, а путём первоначальных термокарстовых просадок (рис. 3.2).

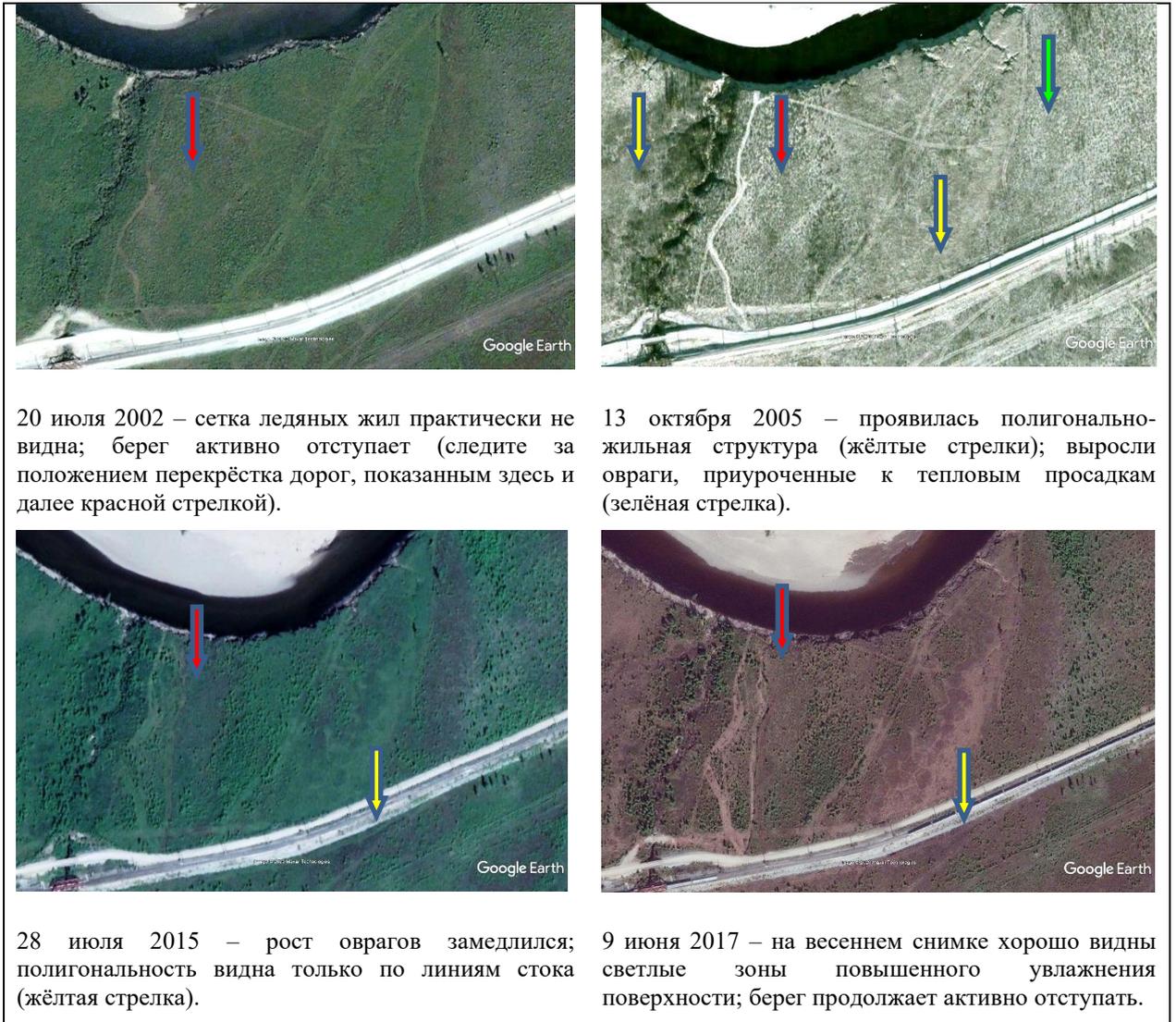


Рисунок 3.1 Серия космических снимков Google, показывающая развитие береговой термоэрозии и термокарста на участке течения реки Чара близ впадения ручья Беленький.



Рисунок 3.2 Овраги формируются не по механизму пятащейся эрозии, а начинаются с тепловых просадок на некотором удалении от берега (показано стрелкой). Съёмка с квадрокоптера 11 августа 2013 г.

Эти просадки, в условиях возможности дренажа в близко расположенную реку с уровнем воды на 8 м ниже поверхности террасы, способствовали формированию туннельного подповерхностного стока по нижней оконечности ледяных клиньев и одновременным частичным оттаиванием жилы сверху (рис. 3.3, 3.4).



Рисунок 3.3 Полигональные просадки поверхности по повторно-жильным льдам. Первая терраса р.Чары, Северное Забайкалье.



Рисунок 3.4 Характер подповерхностного стока при оттаивании повторно-жильных льдов.

Берег реки при этом отступал довольно интенсивно: за период 2002-2005 г.г. горизонтальное отступление составило 5 м, а с 2005 по 2011 г.г. – 21 м. В восточной части террасы, где существует слабо различимая линия стока, овраги росли быстрее всего. В 2011 году наблюдался скачкообразный рост числа первичных просадок, в том числе и в западной части террасы, где кустарник несколько гуще, а поверхность несколько суше, чем в восточной части. В 2012 году прирост оврагов по длине практически не наблюдался, но они стали заметно глубже. В настоящее время произошедшее частичное оттаивание системы повторно-жильных льдов быстро залечивается (рис. 3.5, 3.6), однако после пожара 2019 года термомпросадки снова активизировались.

Затухание термокарста приводит к частичному промерзанию сезонно-талого слоя и таберированных отложений с формированием горизонтально слоистых криогенных текстур (рис. 3.7). Важным обстоятельством становится тот факт, что геокриологическая опасность после такого частичного оттаивания становится скрытой, т.е. не проявленной с поверхности, а льдистость отложений может при этом даже нарастать, о чём свидетельствует элементарная жилка, растущая над старой жилой на рисунке 3.7. Именно поэтому изучение геокриологической истории территории столь важно при оценке геокриологических опасностей.

Автором предлагается поход, в котором на основе исходного ландшафтного деления территория подразделяется на участки с различными стадиями развития мерзлотных форм. Эти стадии зависят от особенностей исторического развития участка, особенностей дренажа, растительных покровов, перераспределения снега. В качестве примера было проведено сравнение особенностей развития термокарста на разных участках первой надпойменной террасы реки Чара. В отличие от вышеописанного участка, где установлены приборные комплексы геокриологического мониторинга, поверхность террасы в полукилометре западнее подверглась термокарсту в полосе, удалённой на 200 м от берега реки, ещё до начала XXI века (рис. 3.8, участок 1).



Рисунок 3.5 Космические снимки Google поверхности первой надпойменной террасы р.Чары в районе участка Беленький в период активного оттаивания полигонально-жильных льдов.

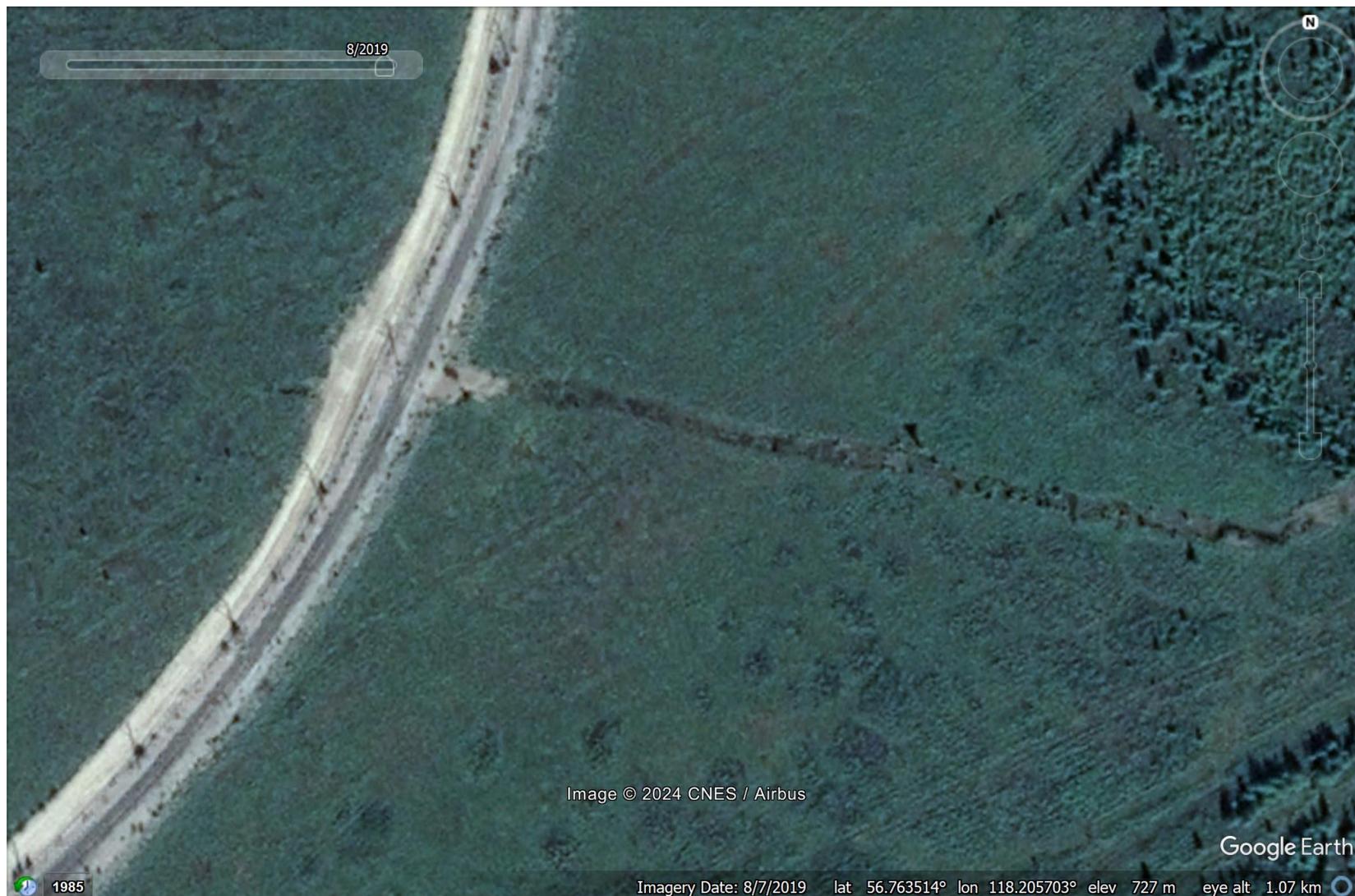


Рисунок 3.6 Космические снимки Google поверхности первой надпойменной террасы р.Чары в районе участка Беленький в период затухания оттаивания полигонально-жильных льдов.



Рисунок 3.7 Строение разреза частично оттаявших полигонально-жильных льдов первой надпойменной террасы р.Чары после затухания термокарстовых процессов: 1 – повторно-жильный лёд; 2 – многолетнемёрзлые таберированные оторфованные супеси с горизонтально-слоистой криогенной текстурой; 3 – оторфованные супеси сезонноталого слоя; 4 – морозобойная трещина (фото Д.М.Шестернёва).

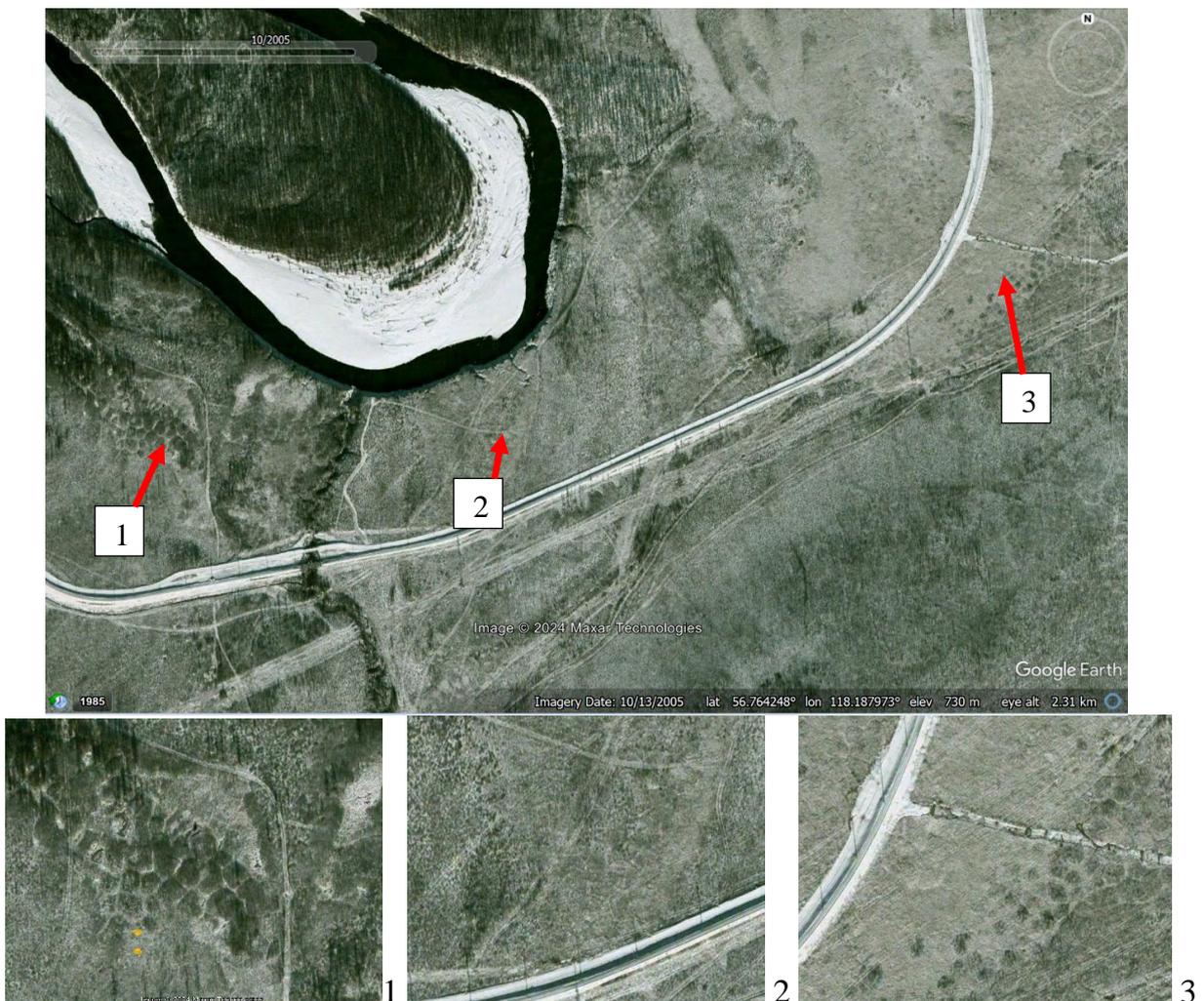


Рисунок 3.8 Участки с различными стадиями оттаивания повторно-жильных льдов (объяснение в тексте).

Поскольку поверхностный дренаж в этом месте затруднён, то термоэрозионных оврагов здесь не возникло, хотя и общий уровень заболоченности сравнительно невысок. Важно заметить, что повторно-жильные льды в береговой зоне напротив этого участка не встречены. Прогрессивное развитие термокарста продолжилось в последнее десятилетие, также без термоэрозионных оврагов, но на значительно большей площади. Удивительно сильно отличаются поверхности в западнее и восточнее устья ручья Беленький, хотя это один геоморфологический уровень со сходным геологическим строением (косослоистые разнотермные гравелистые пески). В «западном» природном комплексе термокарст начался раньше и развивается, захватывая всё большую площадь без образования форм, существенно меняющих условия поверхностного стока, рельеф или растительность. Оценку неоднородностей на данном участке необходимо проводить с учётом существующих термокарстовых форм. На «восточном» участке 2 (где ведется геотемпературный мониторинг ИГЭ РАН), термокарст в последние десятилетия не проявлялся, но в настоящее время наблюдается его резкая активизация. Прогноз для подобных мест необходимо нацеливать на поиск участков и климатических условий, при которых возможен старт процесса, парагенетически связанного с термоэрозией из-за улучшенного дренажа в береговой зоне.

В добавление к рассмотренным, третий участок расположен в средней части того же геоморфологического уровня в 1.0 км на восток-северо-восток от участка 2. В нём присутствует техногенный компонент в виде насыпей железной и подъездной автомобильной дорог (рис. 3.8). Сравнение снимков 2002 и 2005 г.г. показывает слабую динамику термокарста на ненарушенных частях поверхности террасы. Эта зона затруднённого дренажа поверхности с высокой заболоченностью из-за влияния насыпи железной дороги (река и общее направление стока расположены слева). Заболоченные поверхности с кочкарником оказывают охлаждающее действие на температурный режим подстилающих грунтов. Однако насыпь подъездной дороги подверглась за рассмотренные три года прогрессирующему термокарсту. Данная природно-техническая система демонстрирует неоднородности геокриологических условий, привнесённые в

природную обстановку геологической деятельностью человека. Природная часть обладает буферными свойствами, обеспечивающими затухание или сдерживание активности термокарста.

Последний пример показывает, что у геокриологического прогноза есть две принципиальные сложности: неоднородность условий и смена этих условий по мере развития процессов, места возникновения («слабое звено ландшафта») которых трудно предсказуемы. Данное исследование позволило обосновать предложения по смене тактики численного моделирования, когда для прогноза температурного режима будут использованы не средние характеристики ландшафта, а характеристики и факторы, важные для «слабого звена» - части ландшафта, реагирующего первым или наиболее сильно на внешние воздействия природного или техногенного происхождения.

Полученный опыт подсказывает, что активность процессов связана с климатическими аномалиями, а направленность их развития – с постепенными преобразованиями климата. Многолетние результаты наблюдений за факторами температурного режима горных пород свидетельствуют о постоянном изменении разных компонентов климата, что влечёт за собой фоновые изменения геокриологической обстановки разной интенсивности и направленности, которые реализуются в изменении активности геокриологических процессов на локальном уровне. *Ключевым вопросом в данном случае является выявление и прогнозирование таких изменений геокриологических условий, которые приводят к необратимым (сохраняющимся после прекращения внешнего воздействия) изменениям природной среды.* Например, потепление воздуха, в общем случае, приводит к прогреву верхних горизонтов горных пород, причем это нагревание сменится охлаждением при похолодании климата. Однако если льдистость верхних горизонтов многолетнемерзлых пород изменится в результате такого колебания, то изменятся и теплофизические свойства последних. Другими словами, такая природная или природно-техническая система претерпит эволюцию, изменив свою восприимчивость к природным процессам и техногенным воздействиям. Для отслеживания подобных изменений необходимо существенно расширять состав наблюдений на площадках геокриологического мониторинга. В частности, необходимо отслеживать динамику толщины и плотности снежного покрова,

увлажнение поверхности, льдистость прикровлевой части многолетнемерзлых пород, положение дневной поверхности.

Эндогенные геологические процессы обуславливают потенциал формирования контрастного рельефа. Наряду с эндогенными процессами выветривание и общая денудация формируют предпосылки активности склоновых процессов. Движение на склонах может быть медленным (десерпция, солифлюкция и др.) или быстрым (обвалы, осыпи, оползни/осовы, водо-каменные сели и др.). Указанные предпосылки включают такие характеристики как, крутизна склона, состав и влажность сползающего грунта, толщина слоя рыхлого или скального грунта, способного к движению, длина пути возможного смещения, характер подложки, по которой идёт смещение, техногенные нарушения склона и т.п. В настоящем исследовании рассматриваются только быстрые смещения.

Начало склоновых смещений обусловлено, помимо обязательных «консервативных» предпосылок (наличие подвижного материала, достаточная крутизна склона и т.п.), наличием событий, «запускающих» процесс. Например, для схода селя или обвала достаточно бывает ливня определённой интенсивности или сейсмического толчка. Триггерным фактором также могут послужить случайные события, нарушающие растительный покров и меняющие температурно-влажностный режим деятельного слоя (снежная лавина, пожар), а также нарушающие геометрию поверхности (например, техногенная подрезка склона).

Развитие склоновых смещений (объём грунтового материала и протяжённость схода) реализует их потенциальную опасность для инженерных сооружений. Здесь решающими факторами служат форма склона в плане и по падению, характер подложки, по которой идёт скольжение и др. факторы (Божинский и др., 1997).

И оценка природных опасностей, и оценка изменения геокриологических условий возможны только при комплексировании методов натурных наблюдений, ведении специализированного мониторинга, сопоставления и анализа получаемой информации и моделировании ЭГП с учётом условий криолитозоны.

Сами по себе геокриологические условия не воздействуют на инженерные объекты и, следовательно, не представляют опасности. Опасности связаны с

неблагоприятными геокриологическими процессами, развитие которых меняет условия работы оснований инженерных сооружений или хозяйственной деятельности. Другими словами, *объектом* инженерно-геологического мониторинга в криолитозоне должны быть *процессы*, а не геологическая среда. Например, процесс тепловой осадки грунта зависит от динамики температурного режима. Однако расположение точек измерения этой температуры должно подчиняться методам наблюдения или моделирования именно процесса тепловой осадки, иначе наблюдаемую температурную динамику можно неправильно интерпретировать.

При подготовке геокриологических прогнозов следует отдельно рассматривать влияние:

- общих трендов изменений для каждого из климатических факторов (среднегодовая температура воздуха, сезонная амплитуда температур, суммы тепло- и морозоградусочасов, толщина и плотность снежного покрова по месяцам, радиационные характеристики, скорость ветра, влажность воздуха);
- аномальных климатических событий, оказывающих кратковременное, но сильное воздействие на условия теплообмена через поверхность.

Последнее особенно важно для выявления возможности активизации неблагоприятных геокриологических процессов. Для решения таких задач особенно необходим геокриологический мониторинг ненарушенных техногенезом ландшафтов – т.н. мониторинг «фоновых» условий. Один из участков режимных геотемпературных наблюдений Института геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН, расположенный около впадения ручья Беленький в реку Чара в Северном Забайкалье, как раз и нацелен на отслеживание природных тенденций изменения геокриологических условий.

Участок режимных наблюдений «Беленький» приурочен к ровной поверхности первой надпойменной террасой, покрытой мохово-травянистой растительностью с разреженным кустарником (ива и ольха) и редкими лиственницами. Средняя толщина почвенно-растительного слоя составляет 0.1 м. Под этим слоем залегает тёмно-бурый слабо и среднеразложившийся торф, мощность которого меняется от 0.1 до 1.0 м и более. Ниже залегает метровый слой супеси, перекрывающий повторно-жильные льды раннеголоценового возраста

(Васильчук, 2006). Верхняя поверхность ледяных жил расположена на глубине 1.3 м, ширина по верху краю достигает 3 м, а вертикальная мощность 7 м. Вмещающей породой служит толща косослоистых гравелистых песков общей мощностью более 15 м. На участке ведутся почасовые наблюдения за температурой воздуха, поверхности почвы и грунтов, а также за влажностью грунтов в слое сезонного оттаивания (рис. 3.9-3.12). Среднегодовая температура горных пород на глубине 15 м составляет -1.75°C . Режимные наблюдения демонстрируют неоднозначную реакцию температуры поверхности почвы и грунта на изменения температуры воздуха. Заметим, что измерительный датчик на глубине 0.5 м ежегодно попадает в область сезонного оттаивания, а датчик на глубине 1.3 м находится в постоянно мёрзлой области.

Градиент среднегодовой температуры грунта в интервале глубин 0.5-1.3 м возрастал в 2009 и в 2011 годах, достигая абсолютного максимума в 2009 году ($0.17^{\circ}\text{C}/\text{м}$). Среднее значение градиента температуры косвенно характеризует количество тепла, поступающее через рассматриваемый слой грунта.

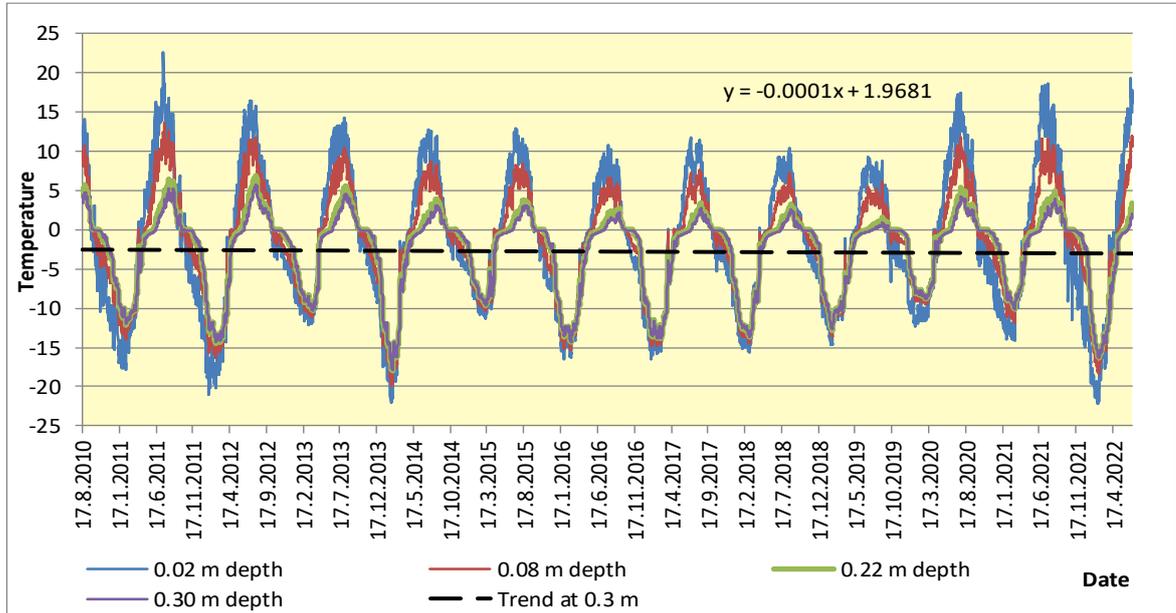


Рисунок 3.9 Ход срочных температур грунта на разных глубинах на участке Беленький (Северное Забайкалье).

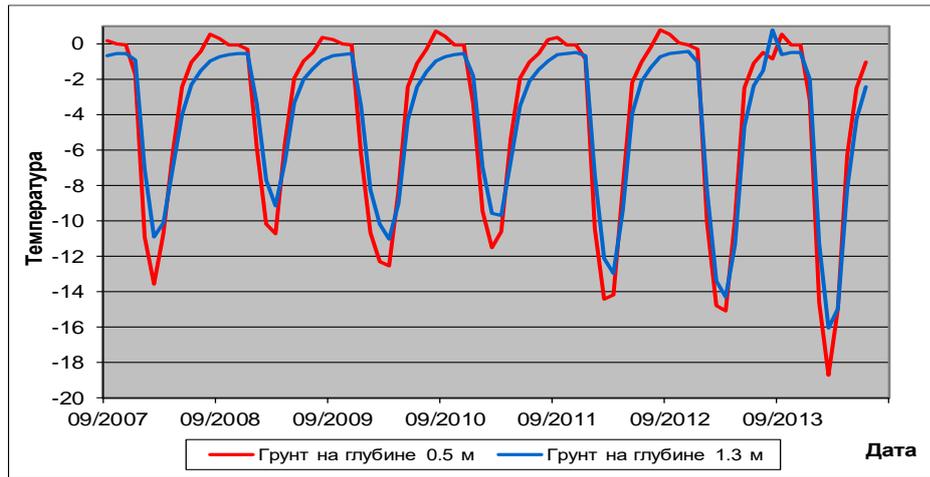


Рисунок 3.10 Ход среднемесячных температур грунта на разных глубинах на участке Беленький (Северное Забайкалье).

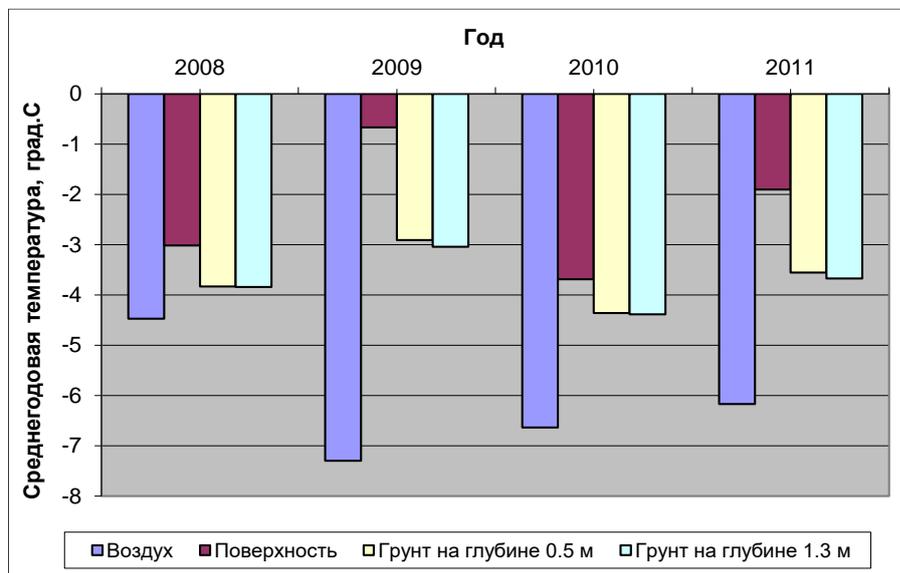


Рисунок 3.11 Ход среднегодовых температур на участке Беленький (Северное Забайкалье).

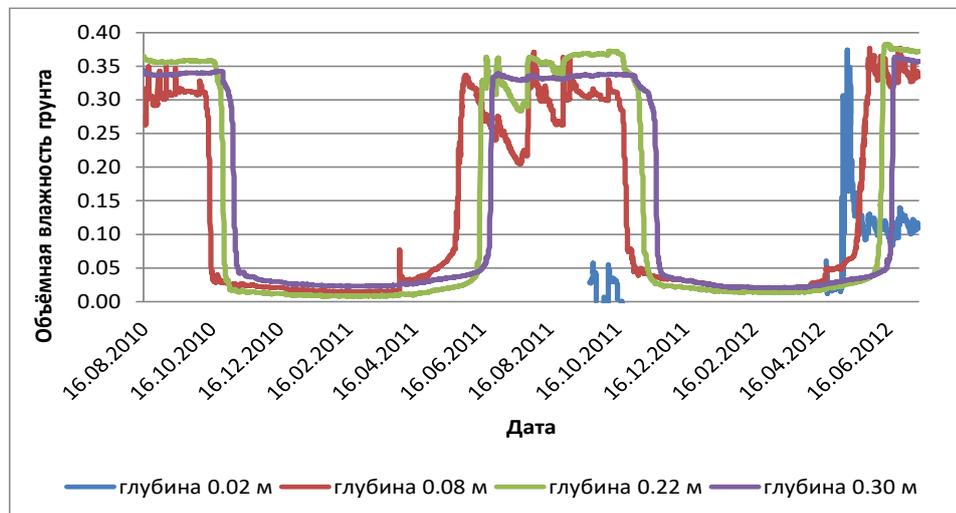


Рисунок 3.12 Ход среднесуточной влажности грунта на разных глубинах на участке Беленький.

Полученные данные заставляют задуматься о том, что отдельные годы и даже непродолжительные цепочки лет с повышенной среднегодовой температурой воздуха, относительно среднемноголетней, не приводят к синхронному повышению температуры грунта и глубины сезонного оттаивания. В нашем случае самым тёплым годом был 2008, при этом максимальные среднегодовые температуры поверхности и грунта наблюдались в 2009 году. Этот эффект обусловлен не «памятью» грунта, поскольку в 2008 году наблюдался крайне небольшой теплопоток вниз, в многолетнемёрзлый грунт (градиент температур составил -0.01°C). Для обоснованного объяснения этого явления требуется постановка численного эксперимента, но следует обратить внимание на значительный снежный покров зимой 2008-2009 г.г. и максимум жидких атмосферных осадков летом 2009 г..

Примером сопряжённых исследований температурного режима грунтов и активности геокриологических процессов служат работы лаборатории геокриологии университета Аляски (Романовский и др., 2007; Romanovsky et al., 2008).

3.3 Учёт пространственного масштаба исследования

Масштаб исследования влияет не только на точность проведения пространственных границ. Основание деления признаков геокриологических опасностей при районировании зависит от источника информации, который существенно связан с детальностью исследований.

Понимание механизма формирования геокриологических явлений и эволюции ландшафта позволяет учитывать наличие разных механизмов теплообмена в грунте. В частности, курумы, являющиеся криофациальной разновидностью отложений продуктов выветривания, требуют учёта воздушной конвекции в крупнообломочной толще, лишённой мелкодисперсного заполнителя. На рисунке 3.13 показана разница годового хода температур в теле курума и в супесчаном грунте, с преобладанием кондуктивного механизма передачи тепла. Зимой в теле курума в сезонноталом слое практически отсутствует градиент температур, которые оказываются довольно близки к температуре воздуха. Летом, напротив, градиент температур довольно высок, что обеспечивает большое значение температурной сдвижки между земной поверхностью и кровлей многолетнемёрзлых пород.

Приведённый пример анализа результатов режимных наблюдений показывает, насколько важно понимание механизмов теплообмена в грунте для правильной постановки задачи геокриологического прогноза. Курумы здесь не являются редким случаем. Обычные кочкарники на переувлажнённых ландшафтах также демонстрируют очень быстрое выхолаживание грунта осенью и в начале зимы – в том числе и благодаря воздушной конвекции в приповерхностном слое у основания кочек, это явление было замечено Л.С.Гарагулей (устное сообщение) и наблюдалось В.Е.Романовским при участии автора в 2001-2002 г. на участке Smith Lake - 4 в Центральной Аляске (рис. 3.14).

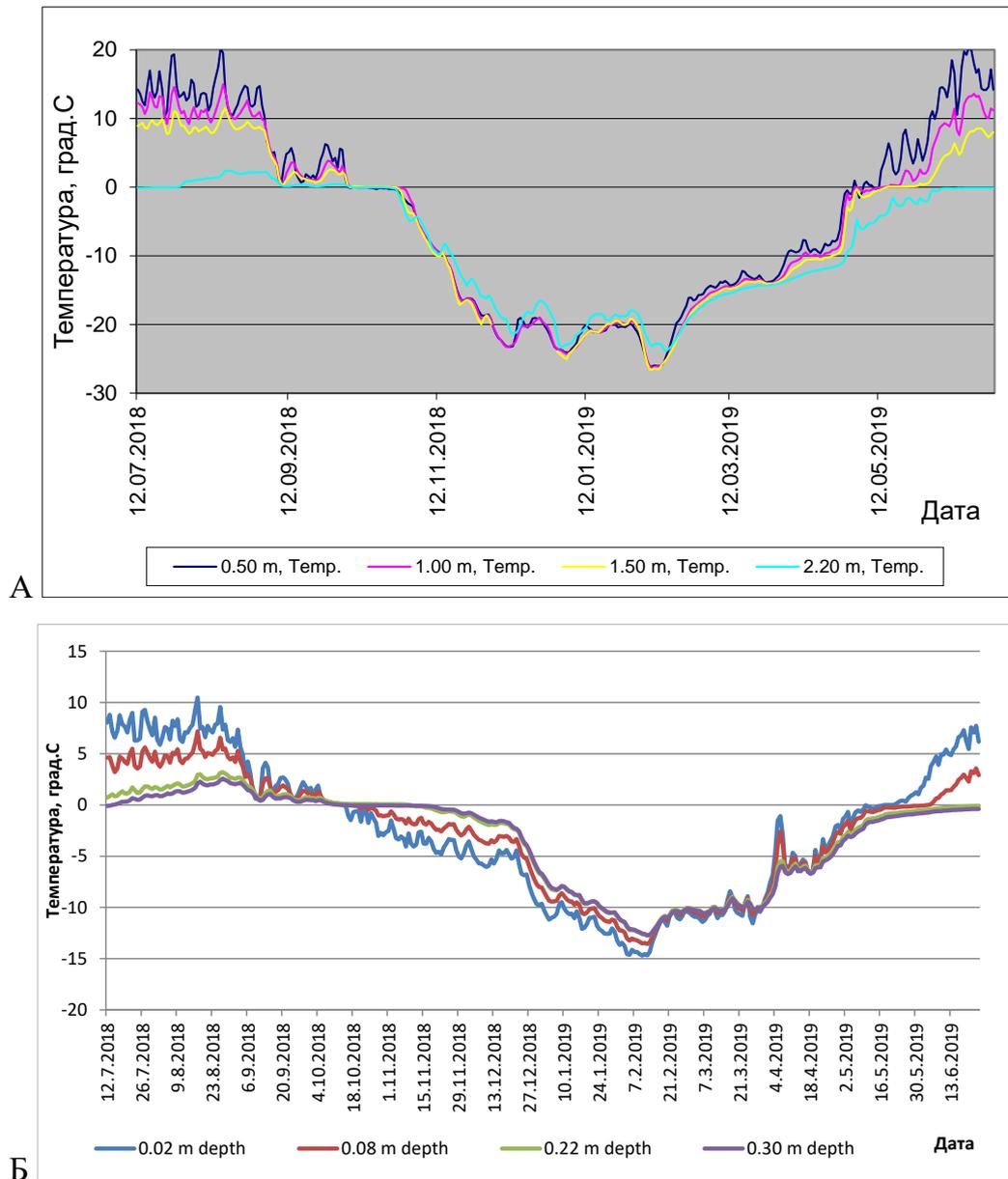


Рисунок 3.13 Сравнение температурного режима крупнообломочного грунта в теле курума (А) и в супесчаных аллювиально-озёрных отложениях (Б) – Северное Забайкалье.

Сходным образом отслеживается влияние конвективного теплопереноса за счёт интенсивной водной фильтрации в грунтах. Характерной особенностью такого механизма является отличие фаз сезонных колебаний температуры, по сравнению с общераспространёнными грунтовыми условиями, или даже изотермическое распределение положительных значений температур на значительных интервалах разреза (рис. 3.15; см. также пример оценки опасностей для Вилуйской ГЭС в разделе 5.4).



Рис. 3.14 Аблационный лёд вокруг продухов, прилегающих к основанию кочки; участок Smith Lake – 4. Центральная Аляска, май 2001 г. - ноябрь 2002 г.

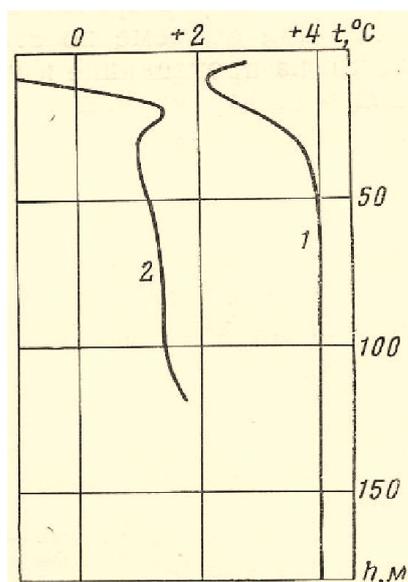


Рис. 3.15 Зависимость температуры (t) от глубины (h), по скважинам: 1 – в верховьях ручья Озёрный, 2 – на конусе выноса ручья Скользящий в долине реки Наминга (Шасткевич, 1966).

Визуально незначительные колебания среднегодовых температур в верхней части разреза горных пород не свидетельствуют о существенных изменениях температурного режима, однако в наблюдаемый период активно развивались процессы термокарста и термоэрозии в пределах данного ландшафта. Локально значительные объёмы тепла, поступившие в грунт и вызвавшие сезонное оттаивание глубже 1.3 м (глубины залегания повторно-жильных льдов) приурочены к ограниченным по площади локальным участкам, в пределах которых, складывается сочетание условий, приводящее к большему сезонному протаиванию, чем в среднем по данному ландшафту.

Одним из свидетельств такой неоднородности условий являются разовые наблюдения за пространственным распределением температур грунта и глубин сезонного оттаивания по профилю, проложенному вдоль линии русла реки Чара на расстоянии около 100 м от берега (рис. 3.16-3.17). Заметим также, что пространственная изменчивость существенно выше межгодовых вариаций наблюдаемых величин. В этих условиях отдельной задачей является выбор подхода к усреднению любых величин, служащих характеристиками ландшафта (Власов, Саваторова, Талонов, 2009).

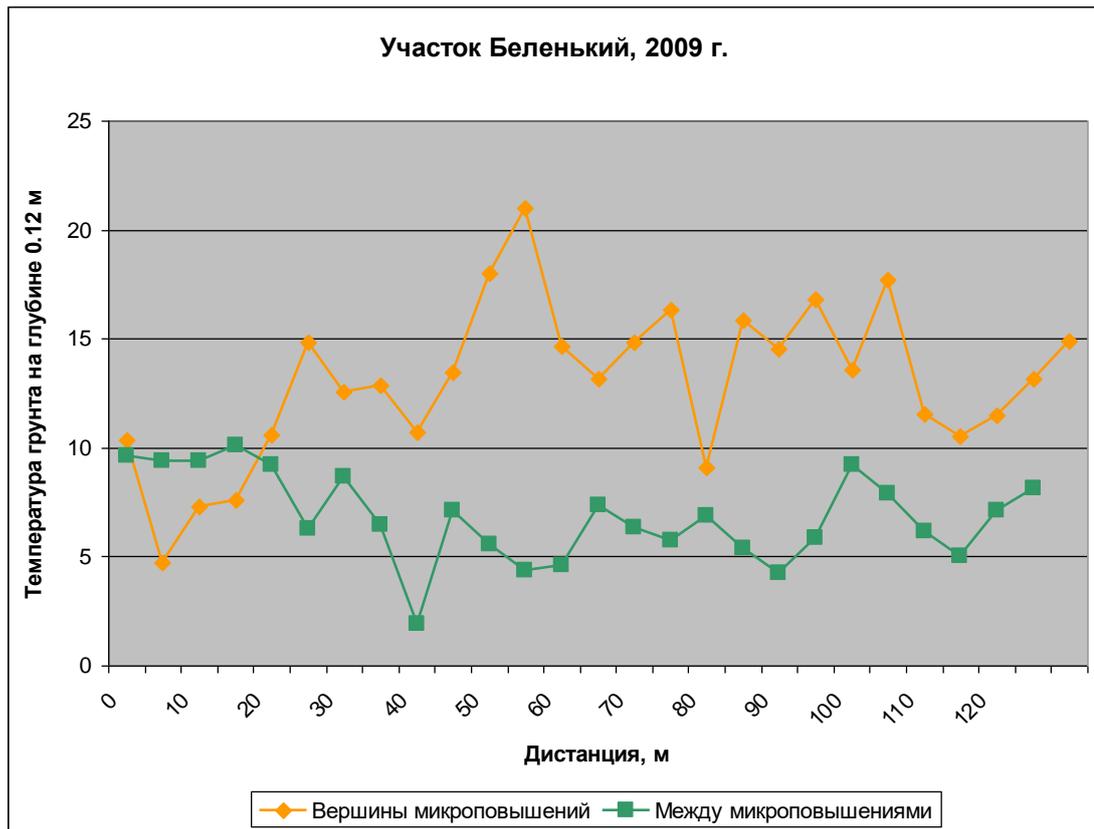


Рисунок 3.16 Пространственная изменчивость температуры грунта на глубине 12 см по профилю на площадке мониторинга (измерено в течение двух часов).

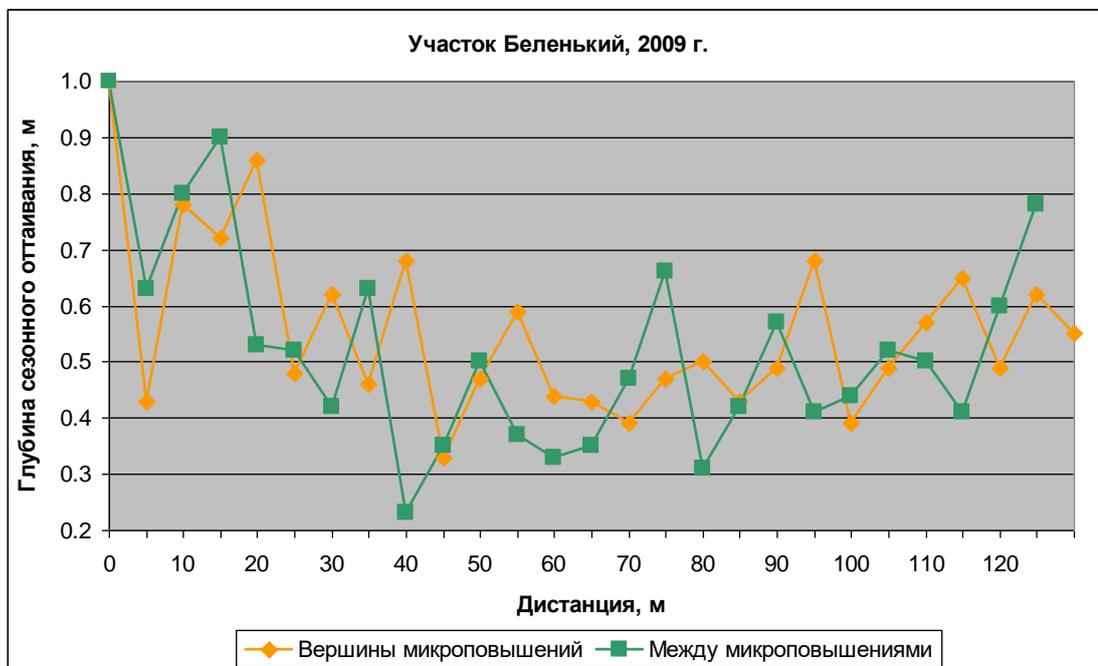


Рисунок 3.17 Пространственная изменчивость глубины сезонного оттаивания по профилю на площадке мониторинга.

Рекомендации регионального уровня вырабатываются на основе геокриологического районирования масштабов 1:1 000 000 – 1:100 000. На этом уровне детальности проявляются как региональные климатические тенденции, так и ландшафтные особенности, определяющие характер фоновой реакции криолитозоны на изменение климата. Наиболее совершенным инструментом для описания такой реакции является повторная геокриологическая съёмка, методика которой наиболее детально была разработана на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова в 1970-80е годы XX века.

ИГЭ РАН участвовал в становлении Воркутинской инженерно-геокриологической учебной практики геологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова с 2015 года, в результате чего были получены новые данные о тенденциях и закономерностях эволюции геокриологических условий в южной части Большеземельской тундры, которые необходимо учитывать при строительстве и ведении хозяйственной деятельности. Использован комплекс методов, стандартных для мерзлотной съёмки, дополненный использованием беспилотных радиоуправляемых летательных аппаратов и инновационных геофизических методов. Состояние многолетней мерзлоты является одним из важнейших факторов, влияющих на экологические последствия хозяйственной деятельности в Арктике.

Нарушение условий теплообмена через поверхность в искусственных и природных ландшафтах Севера часто приводит к активизации геокриологических процессов, нарушению устойчивости техногенных сооружений и неблагоприятным экологическим последствиям. Указанные последствия напрямую связаны с нарушениями природоохранного законодательства и должны отслеживаться государственными надзорными органами и специализированными службами экологического и геотехнического мониторинга на предприятиях (Логунова, Сергеев, 2014). Геокриологический прогноз включает в себя расчёт температурного режима грунта, по результатам которого выносятся суждения о закономерностях сезонного и многолетних изменениях режима фазового состояния поровой влаги (Основы ..., 1974). Температурное поле грунта и его температурный режим весьма изменчивы по латерали и от ландшафта к ландшафту, а геокриологические процессы, меняющие рельеф, обводнённость и механические свойства грунта

всегда локальны, но зависят не только от локальных воздействий, но и от региональных климатических тенденций, а также от истории геокриологического развития (Кудрявцев, 1983).

При постановке задач геокриологического прогноза требуется схематизация расчётной области и обоснование сценария изменений условий теплообмена. Весьма удобно представление расчётной области как целостного пространства с взаимодействующими инженерно-геологическими элементами и воздействующими на них природными и техногенными агентами. Такое пространство по-существу и является ПТС. Одной из важнейших характеристик ПТС в криолитозоне являются её геокриологические условия, которые описываются среднегодовыми параметрами фазового состояния поровой влаги и многолетними тенденциями изменения этих параметров. Вопросом является степень обусловленности этих параметров техногенными воздействиями, климатическими изменениями или естественными процессами развития природно-технической системы в связи с её геокриологическим прошлым.

В равной степени и мониторинговые подсистемы должны развиваться на разных уровнях масштабной детализации. Подобный подход был реализован лабораторией геокриологии ИГЭ РАН в 2008 г. в рамках работ по Программе Президиума РАН № 16 - «Катастрофические процессы в криолитозоне в условиях глобального потепления климата». Для выбранных модельных участков севера Западной Сибири и Северного Забайкалья разработан комплекс показателей для установления допустимого воздействия на криогенные геосистемы. Предложены математические методы оценки распределения неоднородности природной среды (поверхностных условий, свойств грунтов), влияющих на динамику криолитозоны. Обосновано подразделение системы геоэкологического мониторинга на региональную мелкомасштабную и локальную крупномасштабную.

Региональная система мониторинга должна служить, главным образом, задачам фундаментальной науки и призвана фиксировать характеристики фоновых природных процессов, приводящих в условиях данного типа землепользования к изменениям свойств ландшафтов.

Локальная система геоэкологического мониторинга реализуется в рамках производственного экологического или геотехнического мониторинга. Она

призвана фиксировать характеристики интенсивных процессов, прежде всего, техногенного происхождения. Результаты наблюдений и моделирования служат основой для карт оценки риска физического ущерба на конкретном инженерном сооружении.

И в региональной, и в локальной системах геоэкологического мониторинга осуществляется вероятностная оценка неблагоприятных криогенных процессов с учётом государственных, инвесторских и общественных (муниципальных) интересов.

Главным принципом определения приоритетных показателей мониторинга является учёт территориальной специфики рассматриваемых природно-территориальных комплексов. На региональном уровне пространственная неоднородность грунтов и почвенно-растительных покровов задаётся статистически, а динамику климата допустимо описывать линейными трендами или сценарно, на основе регионального климатического моделирования. На локальном уровне, напротив, свойства грунтов задаются осреднёнными величинами, приуроченными к ландшафтному микрорайонированию, а климатические события и техногенные воздействия задаются как случайные величины.

До сих пор остаётся нерешённой задача назначения региональных характеристик геоэкологических условий. Как было показано выше, определение таких характеристик путём простого осреднения данных фактических наблюдений некорректно.

3.4 Учёт временного масштаба исследования при разновременных внешних воздействиях

Постепенные изменения значений характеристик состояния мерзлоты («тренды») приводят к закономерной эволюции геокриологических условий, которые уже довольно неплохо изучены и с успехом моделируются на временных интервалах 20-100 лет. Наиболее отработаны два подхода к заданию динамики верхних граничных условий: первый – предполагает линейное изменение выбранных климатических характеристик, интенсивность которого либо опирается на наблюдаемые региональные тренды, либо задаётся сценарно. Второй подход предполагает использование региональных климатических моделей, которые генерируют не только тенденции, но внутри- и межгодовую изменчивость климатических параметров. Современные возможности климатических моделей не превосходят сроков моделирования 100-200 лет. Остаётся недостаточно освещенной роль кратковременных аномальных климатических событий в развитии геокриологических процессов (аномально тёплые или влажные сезоны и т.п.).

Интересный анализ региональных трендов изменения климата и геокриологических условий содержит монография А.В.Павлова (Павлов, 2008). В монографии приведено мелкомасштабное районирование территории криолитозоны России – в основном по темпу изменения температур воздуха. Эти изменения сопоставляются с тенденциями температурных изменений в криолитозоне для выявления основных закономерностей реакции многолетней мерзлоты на изменения климата. Этот анализ позволяет уяснить для каждого региона некую обобщенную характеристику такой реакции, но не даёт представлений о пределах её изменения. Эти пределы определяются, с одной стороны, случайным сочетанием природных условий в какой-либо год, с другой стороны, механизмами теплообмена через поверхность на конкретных ландшафтах. Сильно усложняют картину ещё два обстоятельства. Во-первых, существуют многолетние тренды других климатических характеристик (толщина снежного покрова, приходящая к поверхности коротко- и средневолновая радиация, осадки, скорость ветра), оказывающих локально более сильное воздействие на

формирование температуры грунта, чем температура воздуха. Во-вторых, потеряна непрерывность рядов метеорологических наблюдений в горах из-за закрытия метеостанций в 90-е годы. Это привело к фактическому исключению из анализа горных территорий, что в Восточной Сибири приводит к существенным информационным потерям.

Перечисленные обстоятельства предопределили направленность настоящего исследования на восполнение пробелов в понимании механизмов реакции криолитозоны на изменения климата в привязке к региональным характеристикам. В лаборатории геокриологии ИГЭ РАН были выполнены работы по сбору и систематизации таких региональных климатических характеристик, как температура и влажность воздуха, солнечная радиация, скорость ветра, толщина и плотность снежного покрова на территории Севера Западной Сибири и Северного Забайкалья – как на основе средних многолетних значений, так и с привлечением рядов многолетних наблюдений с детальностью от среднемесячных до суточных значений климатических параметров (Рис. 3.18).

Авторы не в первый раз убедились, что существует проблема корректного задания входных рядов данных при выполнении геокриологических прогнозов (Перльштейн, Павлов, Буйских, 2006). В частности, направленность и крутизна трендов различных климатических характеристик сильно меняются в зависимости от интервала времени, по которому строится тренд.

Аналогично, становится очевидным, что характеристика динамики толщины снежного покрова должна даваться по средней толщине за первые 1-2 месяца зимнего периода, когда отепляющее действие снежного покрова проявляется сильнее всего. Ранее исследователи при выполнении геокриологического прогноза пользовались значением максимальной за зиму толщины снежного покрова, которая не очень важна, поскольку эта величина достигает к марту-апрелю, когда выхолаживание грунта уже реализовалось и термическое сопротивление снега оказывает слабое отепляющее воздействие. Мы убедились, что многолетние тенденции изменения толщины снежного покрова в начале и в конце зимы могут иметь противоположные значения (рис. 3.19).

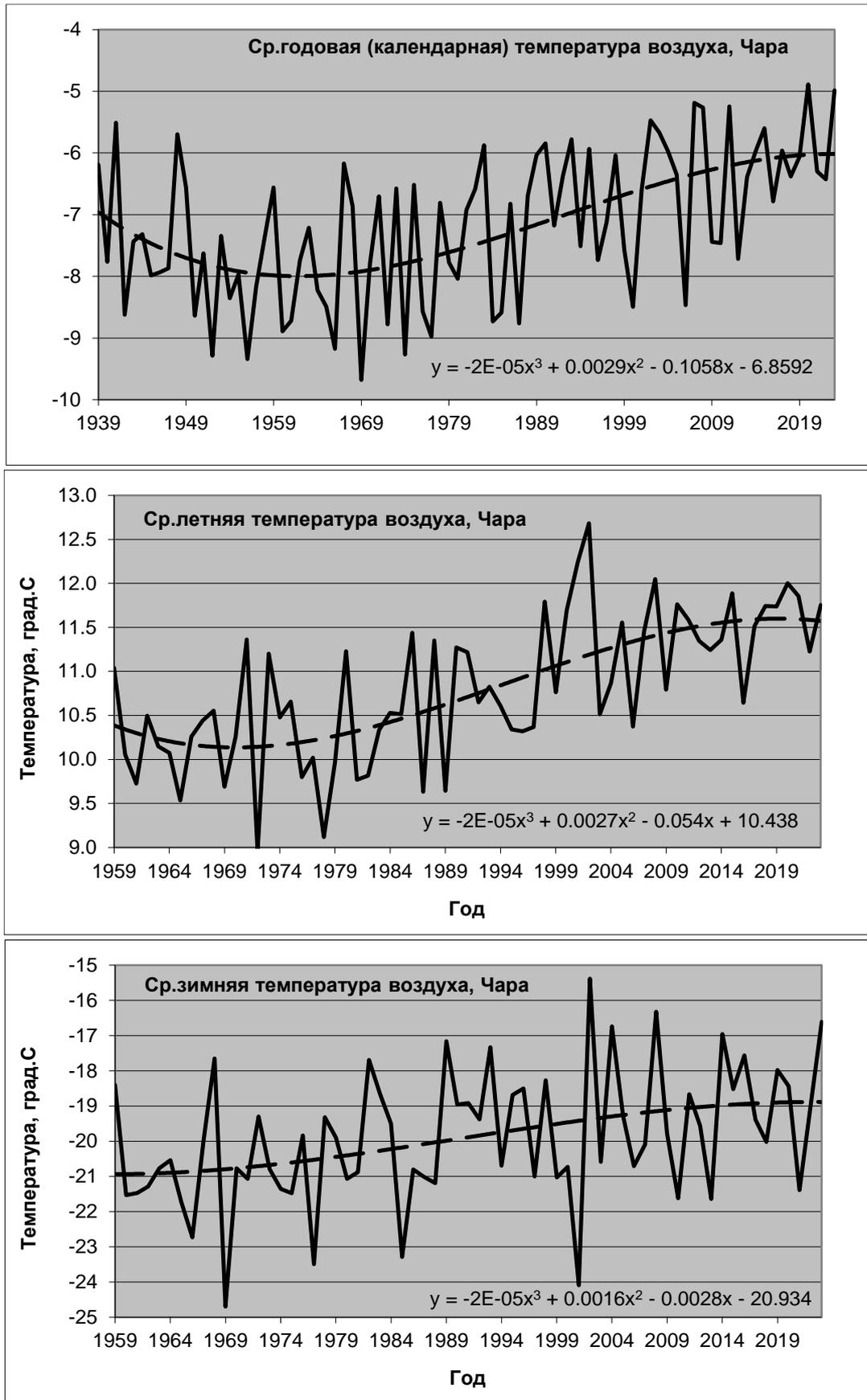


Рисунок 3.18 Межгодовой ход изменения среднегодовых и среднесезонных температур воздуха по метеостанции Чара (Северное Забайкалье), градусы Цельсия.

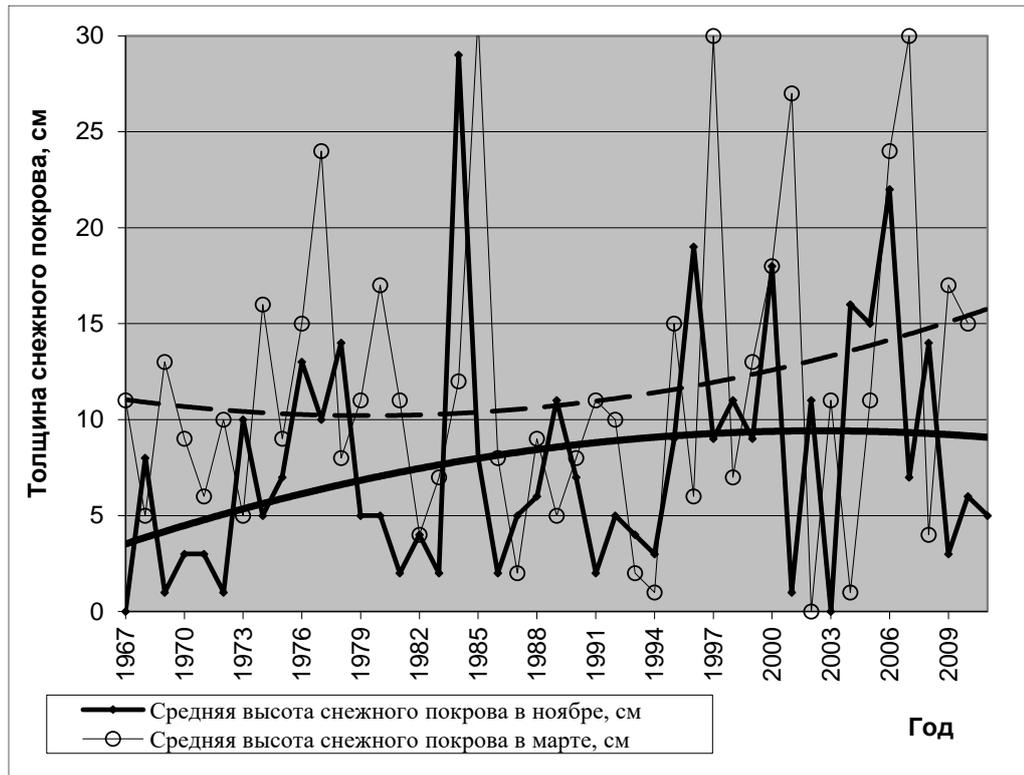


Рисунок 3.19 Межгодовой ход изменения средней толщины снежного покрова по месяцам по метеостанции Бомнак (Амурская область).

Параллельно собирается информация по фактическим данным наблюдений на геокриологических стационарах различных организаций, в том числе на геотермических площадках ПГО Читагеология, МГУ и ИГЭ РАН в Северном Забайкалье и ООО Надымгазпром на Севере Западной Сибири (п-в Ямал и территория Надым-Пур-Тазовского междуречья). Определённый вклад в укрепление системы стационарных геокриологических наблюдений вносит международная программа по термическому состоянию криолитозоны (TSP – Thermal State of Permafrost), вошедшей составной частью в систему исследований Международного полярного года (Romanovsky et al., 2008). В ходе выполнения этой программы осуществляются синхронные измерения температур горных пород на фиксированных глубинах с использованием одинаковых приборов и приёмов геотермических наблюдений. Зачастую при этом используются скважины, имеющие длинные ряды наблюдений в XX веке. Возобновление этих наблюдений даёт основу для региональной характеристики особенностей реакции температуры многолетнемерзлых пород на климатические изменения.

Во внутривековых колебаниях климата могут проявляться различные тенденции на коротких отрезках времени (10-15 лет) и это учитывается при моделировании в явном виде при задании хода климатических данных. Если же рассматриваются длительные периоды развития многолетней мерзлоты в плейстоцене, то мы вынуждены полагаться на палеогеографические реконструкции, что является свидетельством потребности прикладных исследований в фундаментальных знаниях. Примером последнего подхода служит исследование временных закономерностей формирования ММП в Южной Якутии, выполненное в ИГЭ РАН в содружестве с МГУ им. М.В.Ломоносова (Сергеев и др., 2005).

оценить значение колебаний климатических условий, геометрии рельефа и характера высотной геокриологической поясности для эволюции мерзлотных и гидрогеологических условий.

В модели исследовались влияние рельефа и климатических изменений на распространение ММТ и таликов при помощи моделирования с использованием двумерной конечно-разностной схемы (Самарский и др., 1965; Самарский, 1977; Marchuk, 1982; Marchuk et al., 1986; Вабищевич, 1991; Alexiades, Solomon, 1993; Verdi, 1994) в оригинальной программно-компьютерной реализации. Математическая постановка задачи подробно описана в предыдущей работе авторов (Сергеев и др., 2003) и поэтому в настоящей работе опущена.

Геометрически область моделирования представляет собой разрез через плоскодонную долину, расположенную между двумя плосковершинными массивами пород. Днище депрессии находится на высоте 740 м над уровнем моря. Абсолютная высота поверхности водораздельного массива, ориентированного, как и долина, с севера на юг, составляет 950 м. Такая ориентация, рельеф и абсолютные высоты типичны для Чульманского плато, входящего в Алдано-Тимптонское междуречье Южной Якутии. Это плато занимает значительную часть верховий и среднего течения р. Лены. Характерная крутизна склонов принята в размере 10°. Современное распространение и мощности ММТ приняты как начальное условие. Кроме того, приняты предположения, что расчлененность рельефа не менялась на протяжении последних 100000 лет, земная поверхность не покрывалась ледниками, а объёмы и режим атмосферных осадков были неизменны.

На нижней границе области моделирования (речная долина) задавались температуры поверхности пород, в зависимости от абсолютных отметок (в соответствии с закономерностями высотной поясности) и хода климатических изменений. Для условий трещиноватого скального массива содержание незамерзшей воды принималось равным нулю. Нижняя граница модели была выбрана на уровне абсолютной отметки 950 м ниже уровня моря. На боковых поверхностях модели (в силу симметрии) тепловой поток равен нулю, а на нижней границе задавался геотермический градиент равный $0.01^{\circ}\text{C}/\text{м}$. В качестве верхних граничных условий задавались изменения температуры поверхности горных пород во времени, синхронные для всех высотных уровней.

Расчеты динамики массива многолетнемерзлых пород начинались для условий периодически установившегося температурного режима, соответствующего начальным климатическим условиям. Сначала расчет проводился для восстановленного хода климатических условий, определяемого гляциально-межгляциальными циклами продолжительностью около 115000 лет (Maximova, Romanovsky, 1988). Эта реконструкция основана на широко известных циклах Миланковича (рис. 3.20а).

На втором этапе расчетов учитывались колебания климатических и мерзлотных условий в период между последним климатическим минимумом и Голоценовым Оптимумом. Предположено, что эти колебания носили синусоидальный характер, имели период 1500 лет при средней температуре 0°C и амплитуде 0.6°C (Campbell et al., 1998) и находились в суперпозиции с длиннопериодными колебаниями. 14300 лет назад это соответствовало максимальному развитию мерзлоты в позднем плейстоцене (рис. 3.20б).

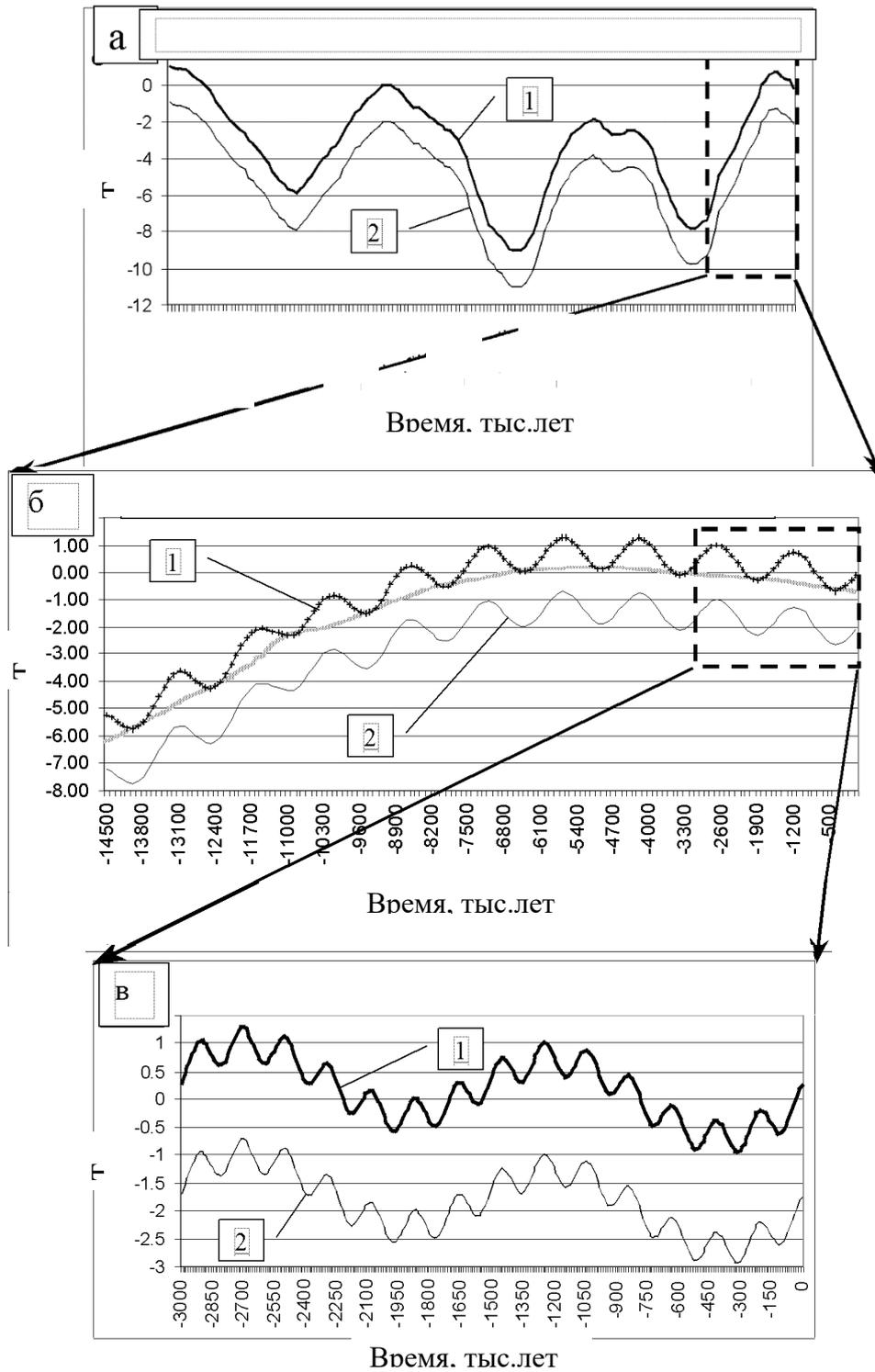


Рисунок 3.20 Верхние граничные условия моделирования: а – с учетом восстановленной палеоклиматической кривой за последние 115 тыс.лет (по Maximova, Romanovsky, 1988); б – с учётом наложения на заключительный этап палеоклиматической кривой «среднепериодных» колебаний (с периодом 1500 лет); в – с учётом наложения «короткопериодных» колебаний (с периодом 208 лет) на «средне-» и «длиннопериодные» климатические колебания. 1 – 2 – Динамика температуры пород на поверхности (Тпов): 1 – на водораздельных поверхностях, 2 – в долинах.

На третьем этапе расчета предполагаемая синусоидальная гармоника с периодом 208 лет, средней температурой 0°C и физической амплитудой 0.3°C (Romanovsky et al., 1992a,b) накладывалась на кривую длинно- и среднепериодных колебаний на промежутке последних 3 тыс.лет. Таким образом, в качестве верхних граничных условий использовалась температурная кривая, полученная путем наложения длинно-, средне- и короткопериодных колебаний (рис. 3.20в). Заметим, что выбор гармоник для определения верхних граничных условий был сделан со значительными условностями, в силу отсутствия достаточно достоверной палеогеографической информации, а выбранные условия призваны исследовать значимость для динамики криолитозоны трех принципиально возможных видов климатических импульсов.

Высотная геофизиологическая поясность учитывалась для всего интервала времени, для которого проводилось моделирование. При этом было сделано допущение, что её характер оставался неизменным во времени. Характер изменения температуры поверхности горных пород с высотой был принят в соответствии с данными детальных исследований высотной геофизиологической поясности в Северном Забайкалье (Romanovskii et al., 1991), что в целом типично и для Южной Якутии с её континентальным климатом и глубокими зимними инверсиями. Отклонения от «базовой» палеотемпературной кривой изменения температур поверхности составило в днищах депрессий -2.1°C , а на поверхности плато $+1.1^{\circ}\text{C}$. При этом температура поверхности пород с высотой повышалась по линейному закону.

Моделирование было осуществлено Г.С.Типенко. Первым шагом в моделировании был расчет мощности ММТ в условиях длиннопериодных колебаний температуры поверхности. Были получены чувствительные различия в характере эволюции мерзлотных условий в пределах депрессий и на междуречьях, выразившиеся в постоянстве наличия мерзлоты во впадинах и в её периодическом существовании и отсутствии на междуречьях. Так при похолоданиях в интервалы времени от 112 до 90 и от 88 до 8 тыс.лет назад, а также в последнее пятисотлетие перед современностью на междуречьях образовывалась многолетняя мерзлота, мощность которой достигала 320 м (рис. 3.21а). В этот же период, мощность ММТ под депрессиями менялась от 150 (80 тыс.лет назад) до 370 м (12 тыс.лет назад). 14

тыс.лет назад мощность ММТ была наибольшей, а их температуры самыми низкими по сравнению с предшествующими и последующими эпохами (рис. 3.21б).

Усложнение сценария динамики верхних граничных условий за счет наложения средне- и короткопериодных вариаций климата на кривую длиннопериодных колебаний позволило уточнить верхние граничные условия моделирования и получить представления о том, как реагирует горная мерзлота на частые климатические изменения. Анализ результатов моделирования показал, что время достижения наибольшей мощности ММТ после пика похолодания одинаково в депрессиях и на междуречьях. Объяснением этому, видимо, является невысокая тепловая инерция пород в массивах. В ходе рассматриваемого периода моделирования в депрессиях мощность ММТ изменялась от 370 до 220 м (рис. 3.22в,г), в то время как на междуречьях и в верхних частях склонов они протаивали полностью или имели незначительную мощность (рис. 3.22а,б). Заметим, что именно для нашего ближайшего будущего это означает неустойчивость мерзлотных условий на междуречьях, и, следовательно, скачок от условий, при которых инфильтрация атмосферных осадков вглубь массива пород невозможна, к условиям, при которых начинается питание подземных вод в массиве через талики на междуречьях. Вероятно, что подобные изменения неоднократно происходили в течение последних 14 тыс.лет. Наше моделирование показало, что в результате голоценового оптимума примерно 7.5 тыс.лет назад произошло оттаивание ММТ на междуречье и в верхней части склонов. После этого мерзлота то появлялась, то исчезала вновь. Это показывает, что 1500-летние циклы колебаний температур обуславливают быстрое и глубокое промерзание на междуречных пространствах и в верхних частях склонов. При этом мерзлота сохраняется под нижними частями склонов и депрессиями рельефа.

Колебания с 208-летним периодом учитывались на заключительном этапе моделирования для детального анализа чувствительности температур горных пород к короткопериодным колебаниям климата на протяжении последних 3000 лет.

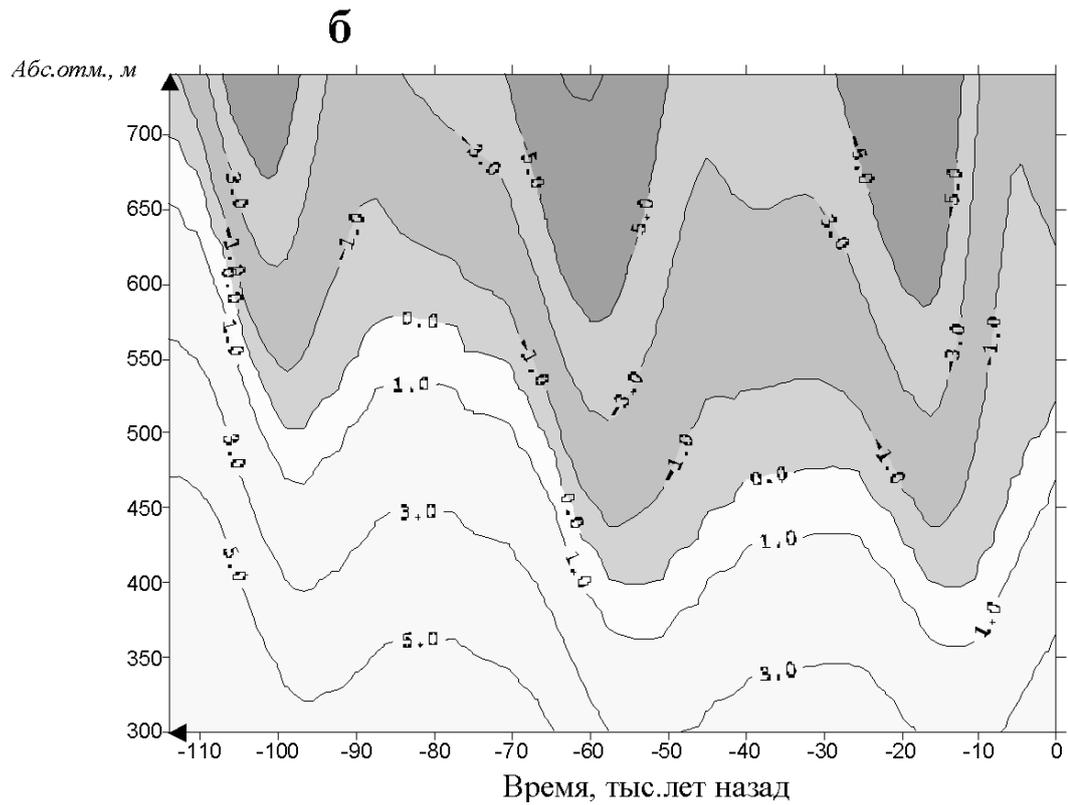
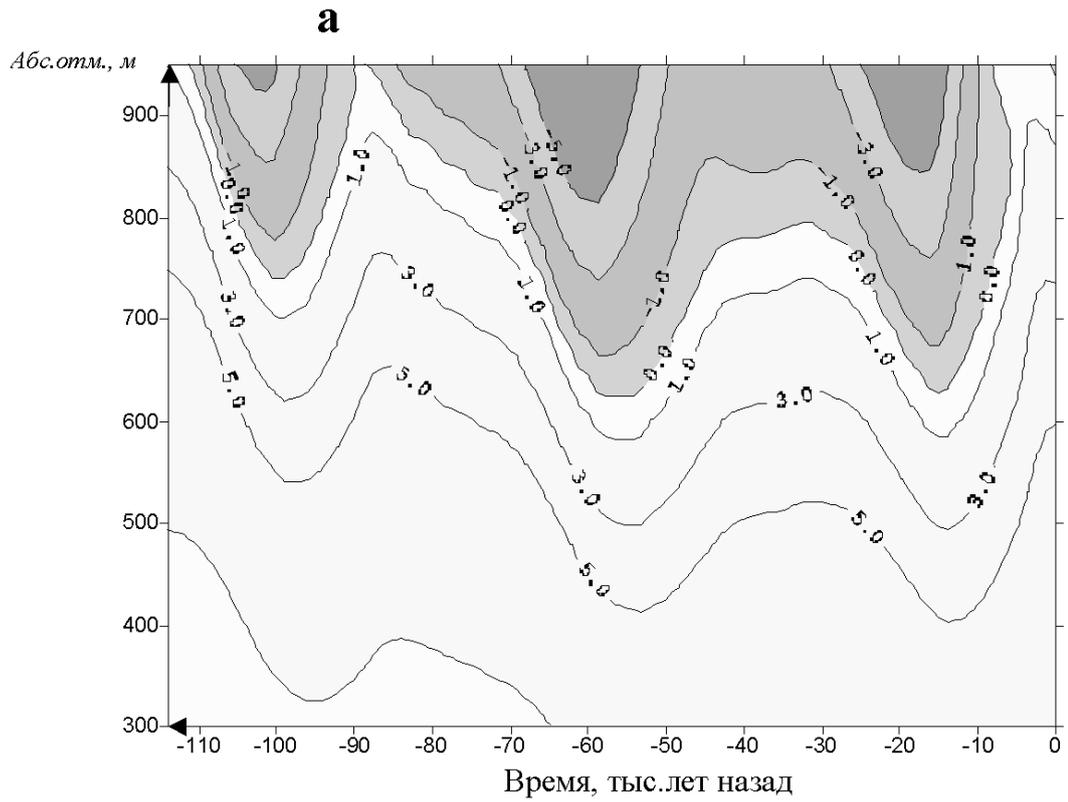


Рисунок 3.21 Динамика температурного поля пород ($^{\circ}\text{C}$) под водораздельной поверхностью (а) и под днищем долины (б) под влиянием «длиннопериодных» климатических колебаний в течение последних 115 тыс.лет. Затененная область указывает на мёрзлое состояние пород.

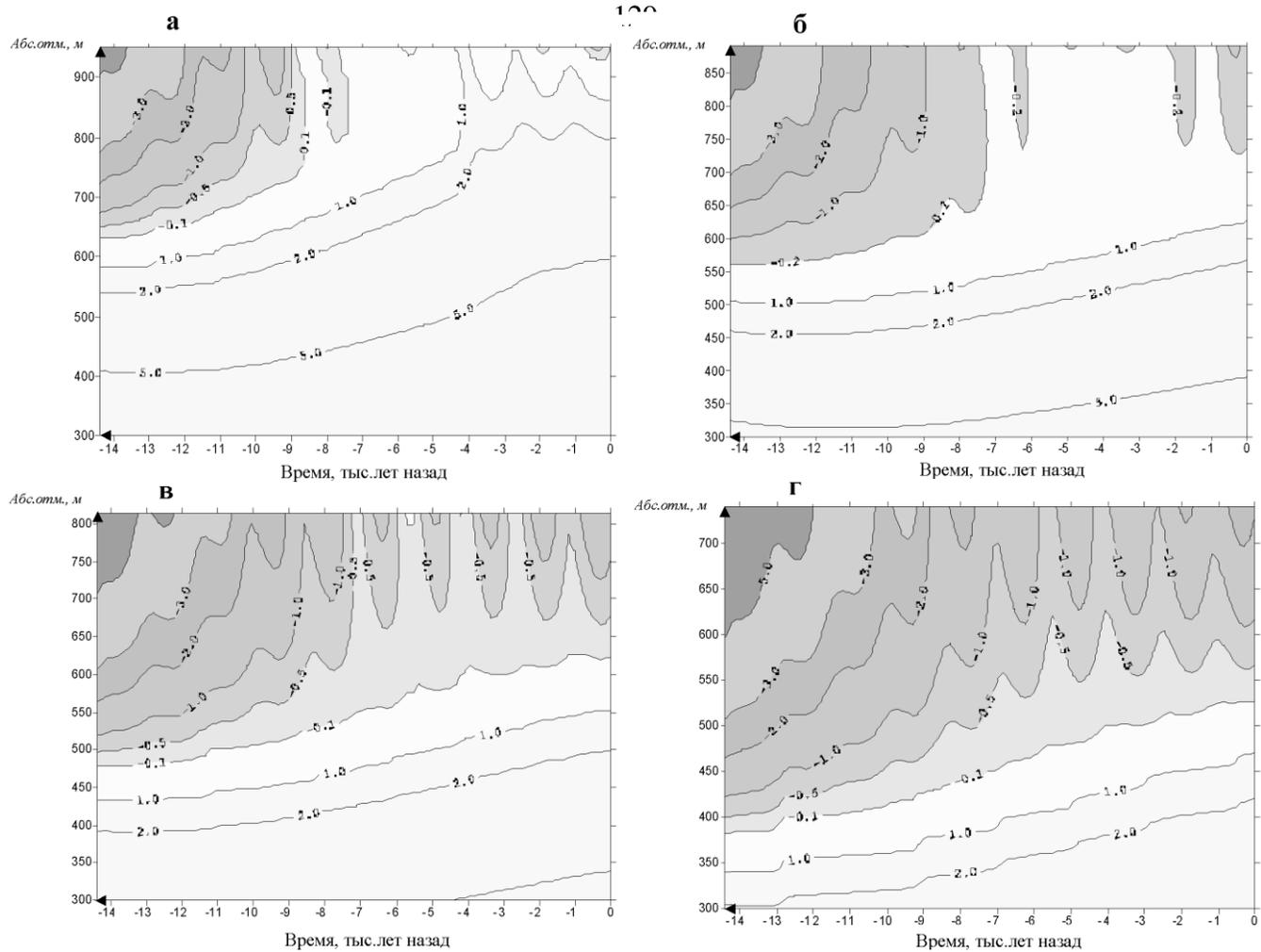


Рисунок 3.22 Динамика температурного поля пород (°С) под поверхностями: водораздела (а), верхней части склона (б), средней части склона (в) и днища долины (г) – с учетом длиннопериодных (в соответствии с палеоклиматической кривой для последних 115 тыс.лет) и среднепериодных (1500-летние циклы) климатических колебаний. Затененная область указывает на мерзлое состояние пород.

Моделирование показало, что даже небольшие изменения температур на поверхности пород приводили к появлению и исчезновению мерзлоты в пределах междуречий (рис. 3.23а), в то время как породы в долинах и под подножьями склонов сохранялись в мёрзлом состоянии (рис. 3.23в,г). Мощность и длительность существования ММТ на междуречьях были невелики, поскольку средние температуры поверхности пород колебались около 0°C, а амплитуда этих колебаний составляла около 1°C. По результатам моделирования ММТ существовали под приводораздельными поверхностями в течение 500-700 лет, следовательно, в этот период подземные воды не пополнялись за счет атмосферных осадков (рис. 3.23а). В верхней части склонов мерзлота существовала в течение 600-800 лет, а её мощность достигала 150 м (рис. 3.23б).

Полученные при моделировании результаты весьма близки к натурным данным о распространении и мощности мерзлоты в Чульманской впадине Южной Якутии (Фотиев, 1965; Чижов и др., 1975; Геокриология СССР, 1989 – с.298). Данные многочисленных натуральных исследований в этом регионе свидетельствуют о том, что в настоящее время толщи многолетнемерзлых пород в долинах и на их склонах, являясь криогенными водоупорами, создают напор подмерзлотных вод. В скважинах, пробуренных в днищах долин, происходит самоизлив подземных вод. На склонах и днищах долин многолетние изменения положения нижней границы ММТ формируют зоны повышенной трещиноватости пород, называемые «зонами криогенной дезинтеграции», которые способствуют установлению гидравлической связи между водами, инфильтрующимися на талых междуречьях и подмерзлотными водами в долинах (Романовский, 1983). Заметим, что водообмен в горных регионах отличается большой сложностью. Талики имеют разнообразную форму и размеры. Разрывные тектонические зоны или слои высокопроницаемых пород, а также «зоны криогенной дезинтеграции» образуют благоприятные пути для быстрой инфильтрации подземных вод от междуречий до таликов в днищах долин рек (рис. 3.24). Такие пути имеют разнообразную конфигурацию в летнее и зимнее время, а также в разные годы – в зависимости от количества инфильтрующихся подземных вод (Сергеев и др., 1989).

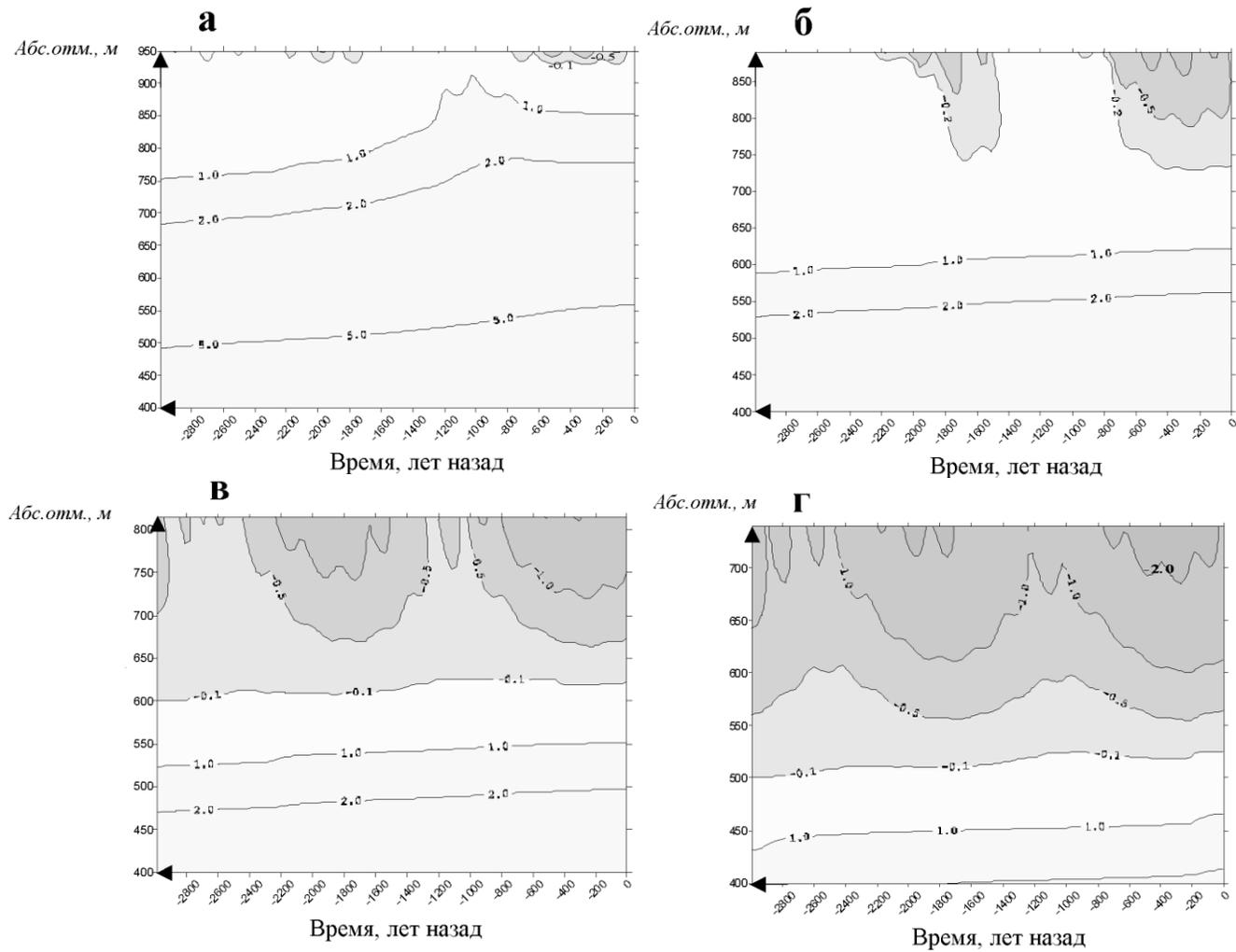


Рисунок 3.23 Динамика температурного поля пород (°C) под поверхностями: водораздела (а), верхней части склона (б), средней части склона (в) и днища долины (г) – с учетом длиннопериодных (в соответствии с палеоклиматической кривой для последних 115 тыс.лет), среднепериодных (1500-летние циклы) и короткопериодных (208-летние циклы) климатических колебаний. Затенённая область указывает на мёрзлое состояние пород.

Результаты полевых региональных исследований и мерзлотно-гидрогеологического картирования, а также гидрогеологического моделирования в зоне перехода от зоны со сплошным к зоне с островным распространением ММТ свидетельствуют об уменьшении роли подземных вод в водном балансе при уменьшении прерывистости мерзлоты на междуречьях (Всеволожский, Куринова, 1989). Это отражается на водном режиме малых и больших рек, особенно зимой в водно-критический период, когда весь поверхностный сток в водотоках формируется за счет подземных вод.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают представления о том, что в регионах с низкогорным платообразным рельефом с проявлением высотной поясности ММТ в долинах относительно стабильны во времени и слабо реагируют на климатические колебания. Напротив, ММТ на междуречьях весьма динамичны, что оказывает сильное воздействие на гидрогеологические и гидрологические условия.

Климатические колебания с периодом 115 000 лет в холодные этапы циклов приводят к промерзанию пород на междуречьях и исключению их из участков, через которые происходит питание подземных вод (другими словами, в криохроны в Южной Якутии складывались условия, аналогичные современным в пределах северной части Верхоянских гор).

В теплые этапы 115 000 летних климатических циклов для плоских междуречий Южной Якутии были характерны весьма динамичные мерзлотные условия, а именно частое появление и исчезновение таликов на междуречьях, через которые осуществлялось питание подземных вод междуречных массивов. Такая динамичная мерзлотная обстановка, вызванная средне- и короткопериодными колебаниями климата, порождала глубокие и быстрые изменения гидрогеологических условий, что влияло на гидрологический режим поверхностных водотоков.

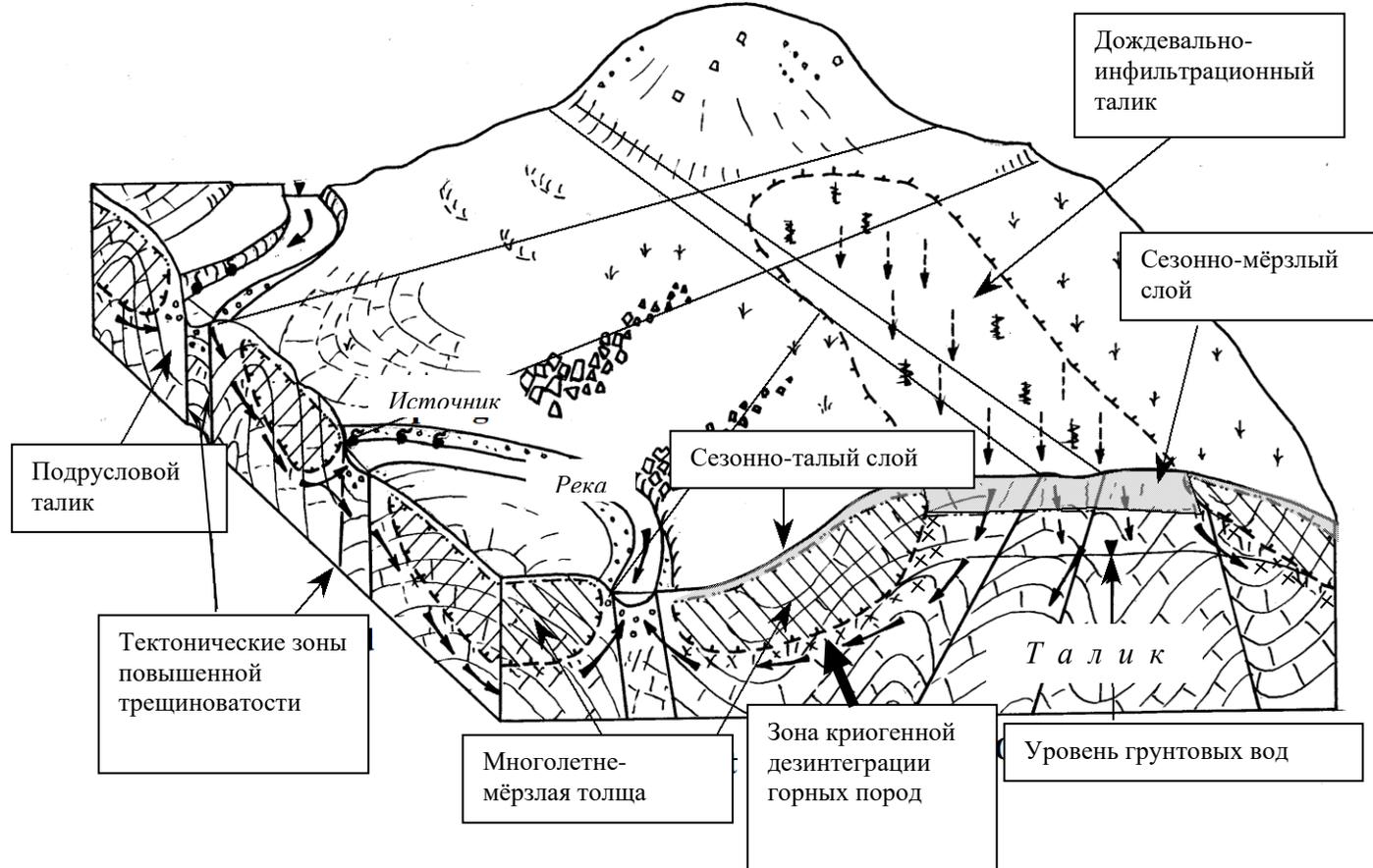


Рисунок 3.24 Соотношение массивов многолетней мерзлоты и путей движения подземных вод (объяснения в тексте; рисунок А.В.Гаврилова).

В этапы отсутствия мерзлоты на междуречьях происходила летняя инфильтрация атмосферных осадков, уровень подземных вод повышался, что приводило к разгрузке части этих вод в подрусловые талики в днищах долин рек и интенсивному питанию поверхностных водотоков.

В настоящее время даже небольшие по абсолютной величине потепления и похолодания климата могут привести, и, видимо, приводят к существенным изменениям мерзлотных условий на плоских плато Южной Якутии. Поскольку последние представляют собой в настоящее время места питания подземных безнапорных вод междуречных массивов, эти изменения, судя по некоторым данным, влияют на местную разгрузку подземных вод в водотоки и подрусловые талики.

Проведённое моделирование показало необходимость специального изучения влияния динамики сезонного промерзания и летних атмосферных осадков на режим подземных вод и их взаимодействия с поверхностными водами.

Вывод: Постепенные (длиннопериодные) изменения природных условий формируют региональные предпосылки геокриологических опасностей, а резкие и краткие воздействия факторов влекут за собой локальную активизацию криогенных процессов, очаги которых приурочены к элементам природно-технических системам, оказывающихся в существенно неравновесных термодинамических условиях.

3.5 Учёт геокриологической истории развития территории

Под геокриологической историей в данном случае понимается модель чередования эпох с различным состоянием многолетнемёрзлых толщ. Изменения геокриологических условий влекут за собой развитие геокриологических процессов, формирующих соответствующие явления, и изменения теплового поля и криолитологического строения горных пород.

Для характеристики геокриологических опасностей принципиальны изменения льдистости грунта, которая определяет их пространственное распределение в плане и по разрезу отложений. Например, эпоха похолодания и соответствующие фациальные обстановки, благоприятствующие формированию полигонально-жильных структур, формируют опасность, связанную с распространением полигонально-жильных льдов.

Важным вопросом при контроле изменений в криолитозоне является изучение геокриологических условий, при которых происходят необратимые изменения природной среды (сохраняющиеся после прекращения внешнего воздействия). Например, потепление воздуха, в общем случае, приводит к прогреву верхних горизонтов горных пород, причём это нагревание сменится охлаждением при похолодании климата. Однако если льдистость верхних горизонтов многолетнемёрзлых пород изменится в результате такого колебания, то изменятся и теплофизические свойства последних. Другими словами, такая природная или природно-техническая система претерпит эволюцию, изменив свою восприимчивость к природным процессам и техногенным воздействиям. Хорошим примером этого служит разрез, показанный на рисунке 3.7. Временное потепление климата привело к частичному оттаиванию ледяной жилы (1) и формированию перекрывающих её супесчаных отложениях (2), которые при следующей относительно холодной эпохе промёрзли. Однако в современных условиях отложения подвержены морозобойному растрескиванию (4) и в них начала формироваться новая жилка, постепенно увеличивая общую льдистость отложений.

История теплообмена через поверхность отражается и в сложном распределении температур в разрезе ММТ, находящихся даже на различных участках в пределах одной тектонической структуры (рис. 3.25).

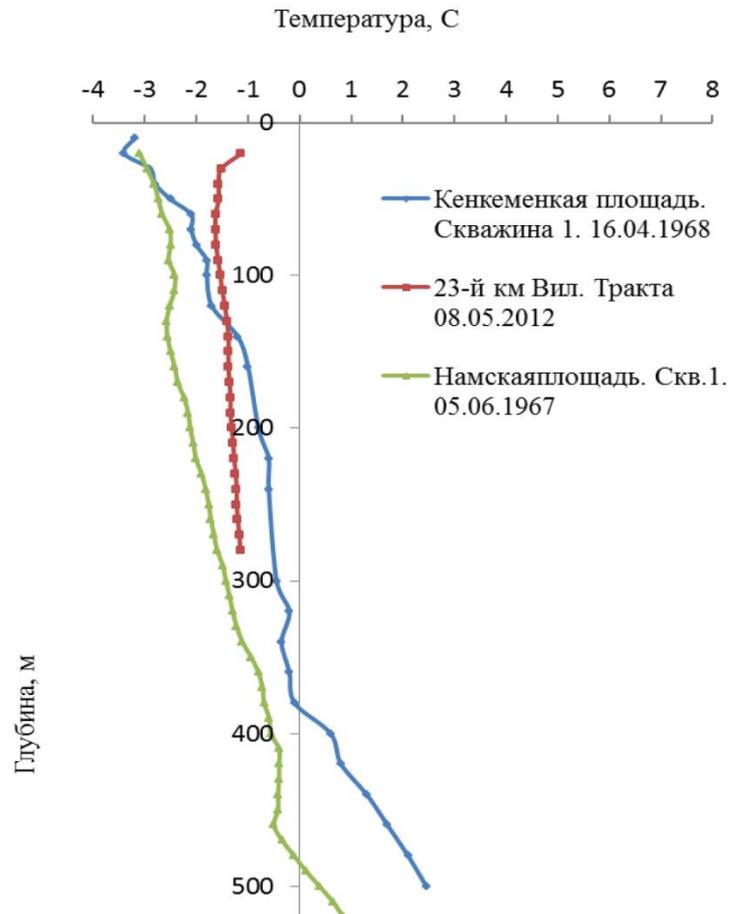


Рисунок 3.25 Различия в распределении температуры с глубиной в разных скважинах в пределах Бескюельской моноклинали Вилюйской синеклизы (Семёнов, 2018).

Главным научным результатом третьей главы является обобщение опыта учёта детерминированности и стохастичности характеристик геокриологических условий, активности и направленности геокриологических процессов, пространственного масштаба исследования, временного масштаба исследования при разновременных внешних воздействиях, а также геокриологической истории региона в процедуре оценки опасностей.

Главным практическим выводом третьей главы является рекомендация координации мониторинговых программ с проектами районирования территории и выработки геокриологического прогноза..

Глава 4 Опыт анализа геокриологических опасностей

4.1 Оценка геокриологических опасностей по разрезу толщи многолетнемёрзлых пород

Всякое сооружение на поверхности Земли или в её недрах имеет зону влияния на окружающую среду, размер которой зависит от силы и продолжительности техногенных воздействий, а также от характера и степени «отклика» природно-техногенных геологических процессов (Голодковская, Елисеев, 1989). Наиболее яркая реакция на техногенные воздействия проявляется в приповерхностной области: там, где теплообмен через поверхность наиболее сильно меняется в результате техногенных нагрузок и где активность геокриологических процессов наиболее очевидна. Однако процессы смены фазового состояния могут протекать на разных глубинах в массиве многолетнемёрзлых пород. Это происходит в результате прогрессирующего оттаивания с поверхности, когда кровля многолетнемёрзлых пород разобщается с деятельным слоем, а также в случае протекания фазовых переходов на больших глубинах, возникающих, например, при изменении режима подземных вод или при закачке промстоков в глубокие горизонты горных пород. Подошва ММП также может менять свою конфигурацию при тепловом воздействии от газодобывающих скважин и при нарушении условий оттока внутриземного тепла в приповерхностные горизонты. Во всех этих случаях предметом изучения становится тепловое взаимодействие талых и мёрзлых массивов.

Нижеприведённые примеры выполненных исследований демонстрируют наиболее яркие аспекты геокриологического прогноза и оценки геокриологических опасностей в массиве ММП. Хорошим примером сложности процессов объёмного преобразования массива ММП на фоне регионального потепления климата является пример Гаконь (Аляска, США), где расположена исследовательская станция университета Аляски (Фербенкс), и в которой автору удалось поработать в 2001-2003 г.г. (рис. 4.1).

Обсерватория Гаконь расположена в пределах обширной межгорной депрессии бассейна реки Коппер, для которого характерно сплошное

распространение высокотемпературной мерзлоты. Межгорная котловина заполнена преимущественно озёрно-ледниковыми отложениями подводных конусов выноса: ленточными глинами, диамиктитами, песками и отложениями лахаров (Bennet, Huddart and Thomas, 2002).

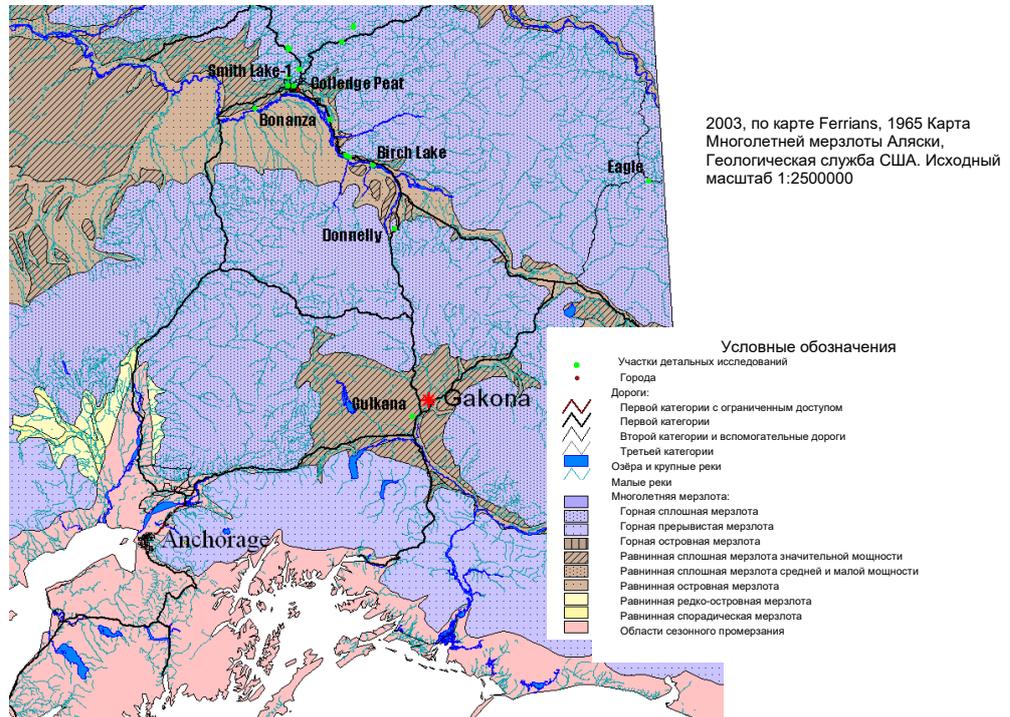


Рисунок 4.1 Геокриологические условия района Гаконны (Южная Аляска).

В эпохи оледенений в котловине формировалось подпрудное ледниковое озеро, в осадках которого несогласно залегает ледниковый и флювиальный материал, поставляемый близко расположенными горными системами. Возраст этих отложений колеблется от 58600 до 9400 лет (Сопног, 1984). Массив ледниково-озёрных отложений эпигенетически промёрз после спуска последнего озера, послужив высоко-льдиистой основой для своеобразного ландшафта, представленного еловым лесом, перемежающимся с линейно вытянутыми заболоченными полянами, вытянутыми вне зависимости от уклонов рельефа с северо-востока на юго-запад. Весовая влажность глинистых отложений меняется от 60 до 80% (Shur and Zhestkova, 2003). Формирование столь высокой влажности стало возможным благодаря смешанному фациальному составу отложений, промерзание которых шло в условиях «открытой системы» и происходило подтягивание влаги к глинистым прослоям по проницаемым песчаным каналам.

Среднегодовая температура воздуха в районе Гаконны возросла с -3.5°C в начале 50-х годов XX века до -1.6°C к началу 2000-х. Летние температуры в этот период также возрастали (рис. 4.2).

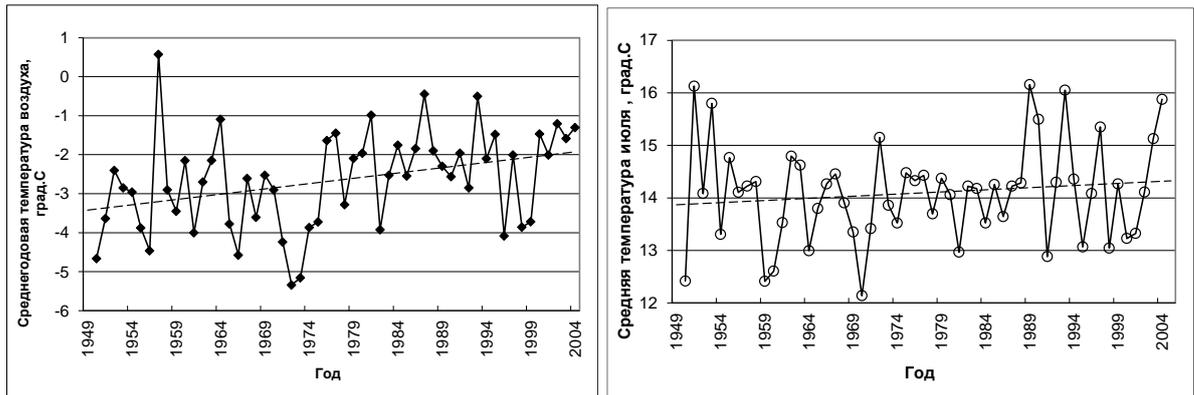


Рисунок 4.2 Среднегодовая и среднеиюльская температура воздуха (метеостанция Галкена, Южная Аляска).

Условия высоких температур воздуха и сплошного распространения мерзлоты не вполне соответствуют друг другу. Температура грунта в настоящее время не проявляет сезонных колебаний глубже трёх метров и составляет -0.6°C в интервале глубин от 3 до 30 метров (рис. 4.3). Столь малая глубина проникновения сезонных колебаний связана с тем обстоятельством, что тепло расходуется на фазовые переходы в глинистых породах, идущие в спектре температур. Это хорошо видно по кривым содержания жидкой фазы, измеренной в скважинах с применением датчиков Vitel (рис. 4.4).

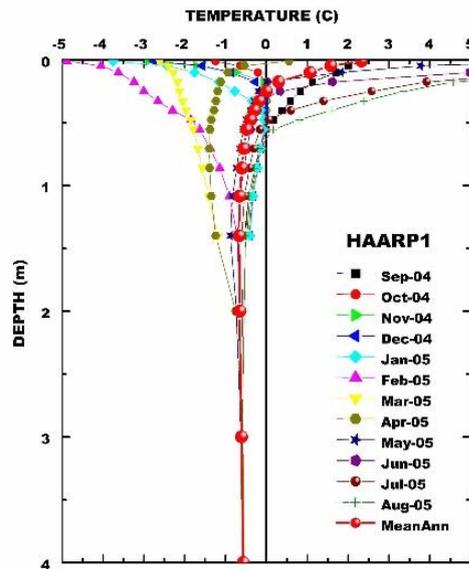


Рисунок 4.3 Сезонное распределение температур в грунте в районе Гаконы (иллюстрация подготовлена В.Е.Романовским).

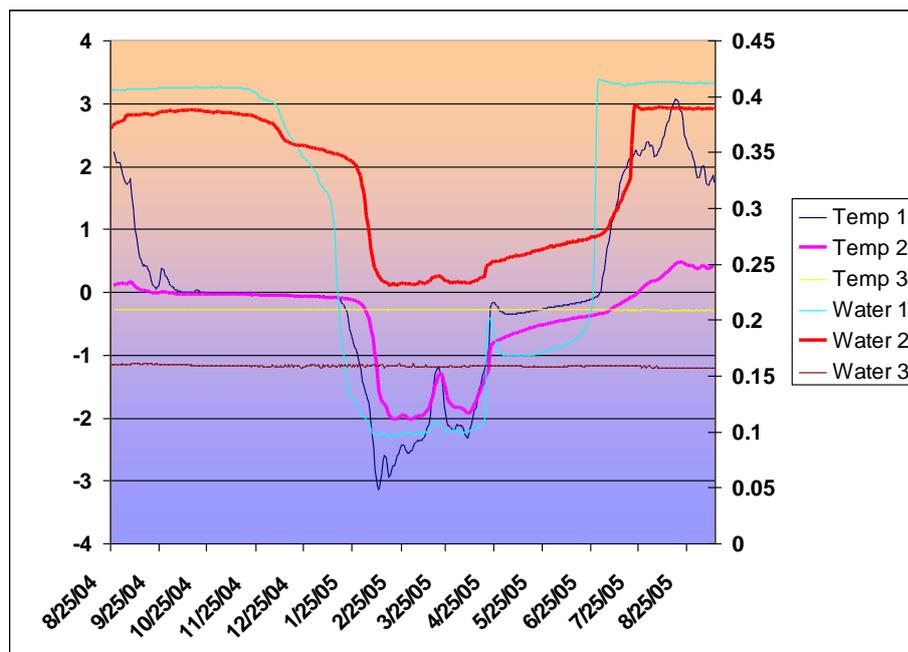


Рисунок 4.4 Сезонные изменения температур (Temp, левая ось ординат, градусы Цельсия) и объёмного содержания влаги (Water, правая ось ординат, доли единицы) в грунте на глубинах 0.35 м - (1), 0.58 м - (2) и 5.00 м - (3) в районе Гаконы.

С течением времени на ряде безлесных заболоченных участков кровля мерзлоты постепенно опускалась с 3.5 метров в 1989 г. до 5 метров в 2004 (Romanovsky et al.,

2005). Участки с погружённой кровлей мерзлоты хорошо диагностируются по микрорельефу, обводнённости и составу растительных сообществ территории. Однако на глубине форма таликов определяется не столько особенностями теплообмена через поверхность, сколько наличием песчаных линз, приуроченных с подводным конусам выноса ледникового материала в эпоху существования в межгорной котловине подпрудного озера (рис 4.5).

Развитие таликов, конфигурация которых на глубине не совпадает с конфигурацией линий поверхностного стока и теплолюбивой растительности на поверхности, создаёт необычные сложности для изысканий и строительства сооружений. Кроме того, развитие таких таликов, меняет гидрогеологическую ёмкость массивов и характеристики водного стока с территории.

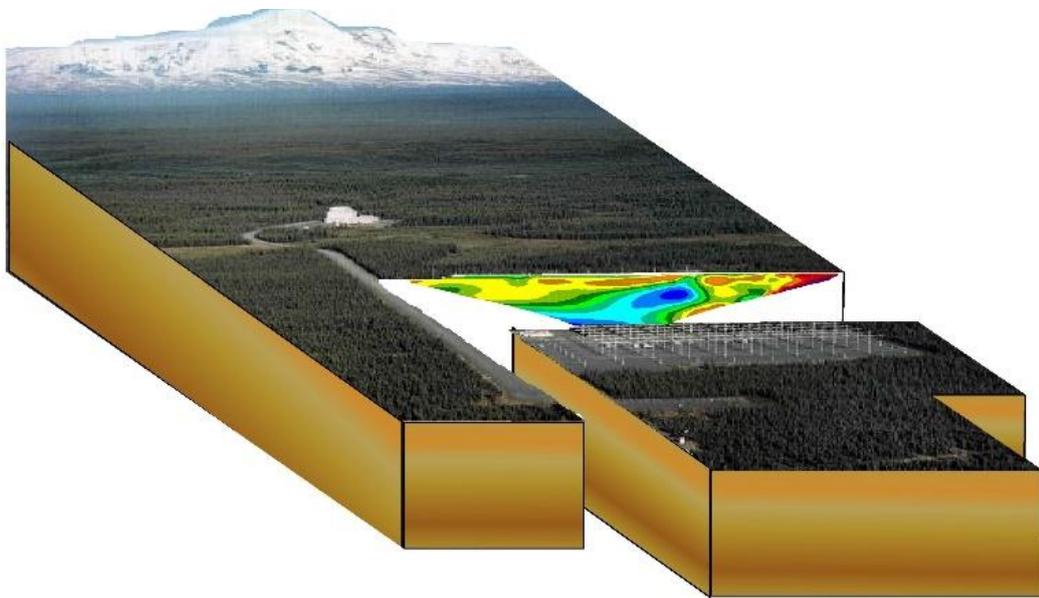


Рисунок 4.5 Области растепления (голубые тона) и сохранившейся мерзлоты грунтов (красные тона), выявленные по материалам электроразведки (Syscal Pro R1 switch 72 channel resistivity system) в районе Гаконы (данные и иллюстрация В.Е.Романовского и К.Йошикавы).

В данном примере источником опасности является «объёмное» оттаивание многолетнемёрзлых толщ, в результате чего меняются структура и режим подземного стока, а также прочностные свойства пород. Оценка геокриологической опасности проводится в этом случае в трёхмерном аспекте: как по латерали, так и *по всему разрезу толщи ММП* и с учётом *конвективного теплопереноса*, связанного с движением подземных вод на фоне регионального

прессинга потепления климата. Соответственно, геокриологический прогноз должен строиться с учётом свойств глубоких горизонтов и процессов развития таликов в условиях высокой фациальной неоднородности массива.

Слабая изученность физико-химических основ частичных фазовых переходов в ММТ подтверждается находками газовых гидратов существующих за пределами условий их равновесия (Истомин и др., 2006). Оценка геокриологической опасности проводится в этом случае в двухмерной или трёхмерной постановке с учётом возможности одновременного присутствия в порах льда, газового гидрата, газового раствора, воды с переменной засоленностью и газа (Перльштейн и др., 2015). Физика процессов, протекающих в таких условиях на микро и макроуровнях, пока не познана. Яркой иллюстрацией этого утверждения является отсутствие удовлетворительных гипотез, объясняющих природу формирования воронок Ямальского типа (Sergeev et al., 2016).

Обзор существующих гипотез и предварительные расчёты позволили сформулировать две основные проблемы в понимании ведущих процессов возникновения кратеров Ямальского типа:

- Что является источником давления не менее 10-12 атмосфер на глубинах от 8 до 60 метров?
- Какой процесс мог сформировать полость, сопоставимую с размерами воронки, в которой накапливались избыточное давление?

Оба этих вопроса не имеют на сегодняшний день однозначного ответа из-за недостаточности прямых натуральных наблюдений. Тем не менее, проведённое в лаборатории геокриологии ИГЭ РАН численное моделирование позволило охарактеризовать типичные временные и геометрические особенности эволюции температурных полей, присущие району исследований, позволяющие выбраковывать заведомо невероятные сценарии и ситуации. Моделирование температурного поля позволило:

- 1) Определить условия для моделирования напряжённо-деформированного состояния грунтового массива;

- 2) Уяснить, что изменения климата, наблюдавшиеся в XX и начале XXI веков не способны вызвать ни катастрофическое разложение газогидратных залежей, ни формирование подземных полостей на глубинах более 50 м;
- 3) Показать, что эволюция несквозных подошёрных таликов способна приводить к деградации многолетнемёрзлых толщ сверху до глубины 100 м и вызывает возмущения температурного поля на глубинах более 100 м, т.е. способна служить источником тепла для разложения реликтовых газогидратных залежей (рис. 4.6).
- 4) Рассчитать, что при исчезновении озера (дренировании, латеральной миграции или зарастании) остаточный талик сохраняется в течение 1500 лет на глубинах до 100 м. Максимумы газопроявлений на глубинах 60 и 100-110 м косвенно подтверждают значение озёр, как источников тепла, формирующих глубинные неоднородности температурного поля в многолетнемёрзлых толщах (рис. 4.7, 4.8).

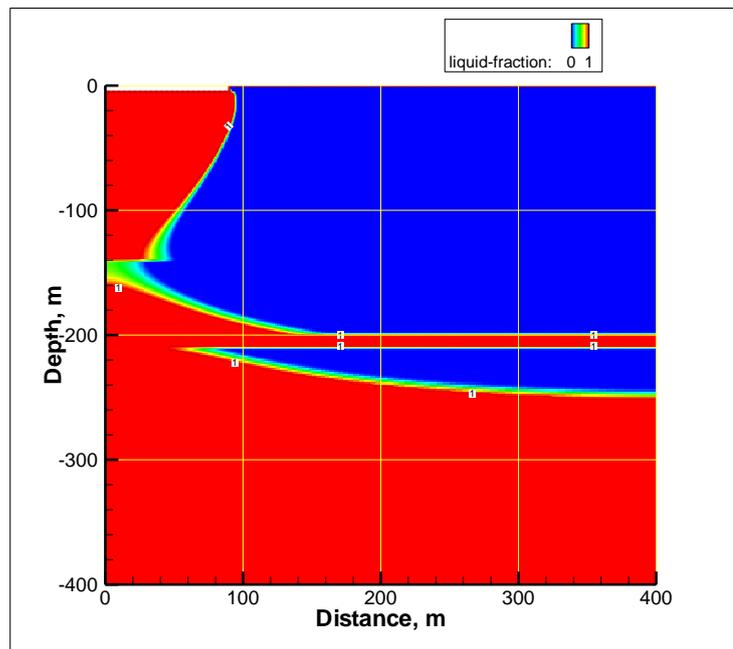


Рисунок 4.6 Фазовое состояние массива под озером диаметром 90 м (синие тона – мёрзлая область, красные тона – талая область; условия Центрального Ямала, расчёты Г.С.Типенко).

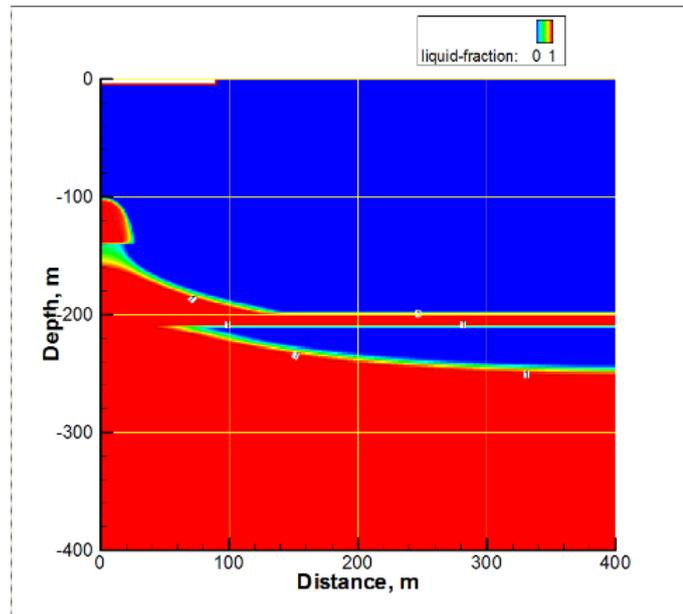


Рисунок 4.7 Фазовое состояние массива после 1000 лет промерзания с поверхности после исчезновения озера диаметром 90 м (синие тона – мёрзлая область, красные тона – талая область; условия Центрального Ямала, расчёты Г.С.Типенко).

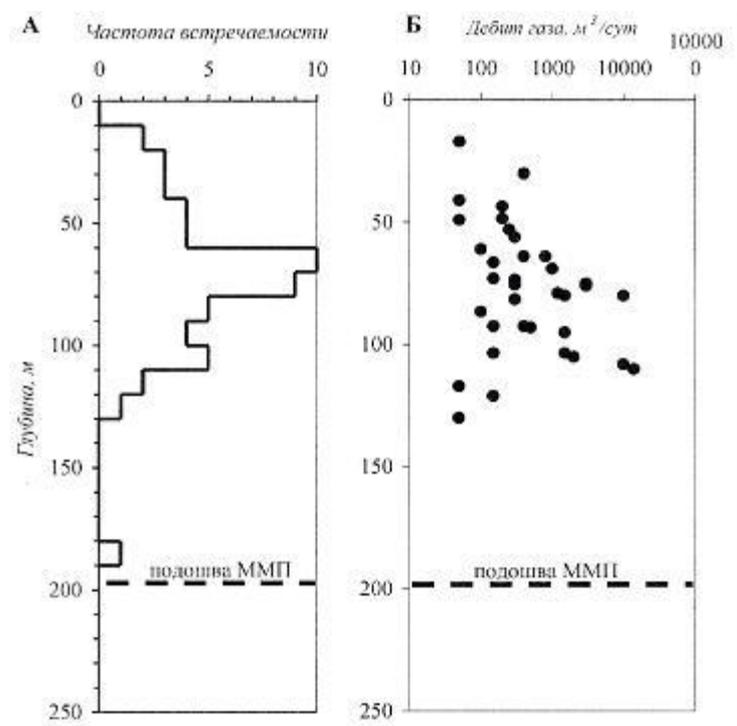


Рисунок 4.8 Распределение частоты встречаемости (количества газопроявлений на десятиметровый интервал) - (А) и начальных дебитов газа по глубине мёрзлой толщи в пределах Бованенковского ГКМ - (Б); по (Строение и свойства..., 2007).

5) Показать, что эволюция температурного поля от приповерхностных локальных источников тепла приводит к развитию устойчивых (сохраняющихся

более 1000 лет) глубинных температурных аномалий, геометрия которых характеризуется как вертикальной, так и горизонтальной ориентировкой главных размеров областей прогрева, что определяется неоднородностями засоления отложений и вертикальным теплопотокком.

Моделирование напряжённо-деформированного состояния грунтов в окрестности естественных полостей различного размера и формы сопрягалось с температурным моделированием на уровне задания распределения температур, как одного из важных условий, определяющих механические свойства грунта. Моделирование напряжённо-деформированного состояния грунтового массива позволило подтвердить вывод, что полости размером более 2 м в поперечнике не могут существовать геологически значимое время в ледогрунтовом массиве без дополнительного внутриволостного давления.

Важным выводом из результатов моделирования явилось понимание высокой степени вертикальной и горизонтальной неоднородности температурных полей в условиях эволюции ландшафтов центрального Ямала.

В качестве практического результата исследований были обоснованы будущие приоритетные направления комбинирования полевых, модельных и экспериментальных исследований, включающие:

- выяснение роли газовых гидратов в эволюции структуры мёрзлых пород;
- описание физики напорных процессов в промерзающих и оттаивающих породах, в том числе в присутствии газов;
- описание структурных и текстурных преобразований мёрзлых грунтов при протекании в них пластических деформаций в результате возникающих неоднородных внутриволостных давлений, в том числе в присутствии газов.

В данном примере источником явной опасности является *изменение фазового состояния поровых флюидов*, включающих в себя одновременно воду и газ. Такое изменение влечёт за собой изменение проницаемости пород, переменное для флюидов разного типа, а также изменение их физико-механических свойств. Источником неизученной опасности является распределение давлений в поровом пространстве с неоднородными геокриологическими условиями. Оценка этой опасности должна проводиться методом сопряжения фундаментальных исследований, включающих полевые работы (бурение, опробование,

геофизические исследования), лабораторные исследования поведения газовых гидратов в поровом пространстве с переменным засолением, а также модельные расчёты с совместным решением температурной и механической задач.

Разобшение верхней границы ММП и подошвы слоя сезонного промерзания наблюдается на обширных территориях Севера Европейской части и Севера Западной Сибири (Геокриология СССР..., 1988). При положении кровли мёрзлого массива глубже 10 м (и глубже проникновения сезонных колебаний температур) он зачастую игнорируется при изысканиях. Как следствие, здание строится на такой площадке по второму принципу и спустя годы и десятилетия эксплуатации, когда ореол растепления под зданием «дотягивается» до кровли ММП и развивается просадка фундамента, приводящая к выводу здания из эксплуатации (рис. 4.9). Заметим, что этот процесс оттаивания развивается существенно медленнее, чем при классическом термокарсте и, в равной степени, чувствителен как к техногенным воздействиям (прорывы коммуникаций, поток радиационного тепла в грунт от перекрытий здания), так и к многолетним тенденциям потепления климата.



Рисунок 4.9 Разрушение жилого дома в г. Воркуте в результате неравномерной осадки угловой части фундамента (фото 2016 г.).

С похожими проблемами сталкиваются объекты транспортной инфраструктуры при фоновом оттаивании многолетнемерзлых грунтов сверху. В данном случае осадка при оттаивании усугубляется динамическим воздействием транспортных объектов на подстилающие грунты. Тиксотропные свойства водонасыщенных талых пород, залегающих выше кровли ММП, проявляются при динамических нагрузках и приводят к частичной потере несущей способности грунтов основания насыпи (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 Профильные просадки насыпи, возникающие при прогрессирующем оттаивании основания и/или при пластических деформациях оттаявшего слоя грунта (Северная железная дорога близ станции Хановой, 2015 г.).

В данном примере источником опасности является *многолетнее опускание кровли мерзлоты в результате техногенных воздействий и климатических изменений*. Оценка геокриологической опасности проводится в этом случае с увеличением глубины изысканий и с выработкой геокриологического прогноза максимально возможной временной длительности (сопоставимой с периодом эксплуатации сооружения), с учётом изменения климата и переменной техногенной нагрузки.

4.2 Региональная оценка геокриологических опасностей

Региональная оценка геокриологических опасностей имеет свои особенности для природных территорий и территорий с ландшафтами, нарушенными техногенной и хозяйственной деятельностью. В первом случае прогноз преобразования температурного режима выполняется по наблюдаемым трендам или прогнозному сценарию изменения снежного и растительного покровов, а также

динамики климатических характеристик. Во втором случае назначаются дополнительные условия антропогенных воздействий, обусловленных прямой или опосредованной деятельностью человека, например, перераспределение снега, снятие растительного покрова, пожары, временное или постоянное затопление территории и т.п. Такая раздельная оценка опасности необходима для понимания роли природных изменений в эволюции природно-технических систем.

Региональная оценка геокриологических опасностей остаётся весьма проблематичной в методическом плане ещё и из-за недостаточной методической проработанности вопроса, как вообще давать региональную характеристику геокриологических условий (см. раздел 1.4 и рис. 1.34).

4.2.1 Условно ненарушенные территории и меняющиеся природные условия

Природные территории, ландшафты которых считаются мало антропогенно изменёнными, рассматриваются как территории, несущие на себе геокриологические опасности для гипотетической, но не определённой хозяйственной деятельности.

Относительная опасность того или иного геокриологического явления различна для разных категорий хозяйственной деятельности. Выделяются природопользовательский (ресурсно-экономический), природоохранный и инженерный аспекты оценки опасности геокриологических процессов. Значимость каждого из потенциально опасных геокриологических процессов будет различна для названных аспектов, поскольку неблагоприятность последствий динамики криолитозоны есть относительная величина. Заметим, что изменения геокриологических условий влечёт за собой не только изменение активности неблагоприятных процессов, напрямую воздействующих на инфраструктуру, но и изменение других компонентов ландшафта, которые также значимы для человеческой деятельности. Например, изменение геокриологических условий влияет на характер гидрографа рек, что необходимо учитывать при прогнозе наводнений (Сергеев и др., 2009).

Для каждой территории существует множество типов местности, которым соответствует определенный температурный режим. Роль растительного покрова в

формировании температуры грунтов можно проиллюстрировать следующим примером. Межзональный разброс температур грунтов, определяемый поступлением солнечной радиации и общеклиматическими факторами, для природных зон Западной Сибири составляет около 1°C. При этом внутризональный разброс температуры грунтов, формирующийся под влиянием локальных изменений поверхностных условий, достигает 7°C (Геоэкология Севера, 1992).

Ландшафты (типы местности) определяют не только температуру мёрзлых пород, но и различие их реакций на климатические изменения. Например, при современном потеплении, темпы изменения глубины сезонного оттаивания для разных поверхностных условий одной и той же территории будут различными. В тундровых и северо-таёжных зонах максимально реагируют на колебания климата увлажнённые ландшафты: болота и слабодренированные тундры. Минимальное протаивание наблюдается на плоских торфяниках и песчаных раздувах (Мельников и др., 2005). Для района геокриологического стационара Марре-Сале (Западный Ямал), потепление мёрзлых грунтов на глубине 10 м в различных ландшафтных условиях менялось от 0,1 до 1°C. Наибольшее потепление характерно для низкотемпературных тундровых урочищ, наименьшее – для низких пойм и долин рек с относительно высокотемпературными ММП (Pavlov, 1996). В пределах различных ландшафтов Ямала тренды изменения климатических параметров и параметров деятельного слоя могут быть даже противоположными (Лейбман, 2001). Наблюдения в Центральной Якутии показали, что тренды среднегодовых температур на подошве слоя годовых теплооборотов различных ландшафтов отличаются. Положительная реакция (до 0,02 °C/год) на потепление климата наблюдается в аласном, склоновом, песчано-грядовом и близких к ним природных комплексах. Отрицательные тренды (до – 0,04 °C/год) отмечены в пойменном, низкотеррасовом, межгрядово-низинном и мелкодолинном ландшафтах (Скрябин и др., 1999).

Геокриологические процессы на ненарушенных территориях могут служить прямой причиной, источником предпосылок или инициатором (триггером) возникновения:

- неблагоприятных экологических последствий и ситуаций, выражающихся в социально-экономических, медико-биологических и (или) ландшафтно-биосферных показателях;
- геотехнических проблем, выражающихся в нарушении устойчивой эксплуатации технических объектов.

С учётом этого должны быть созданы программы исследования механизмов взаимозависимостей различных природных процессов и регулярных наблюдений за их активностью. Последнее направление включает в себя два аспекта: индикацию (идентификацию) процесса и измерение его активности в показателях площади развития соответствующих процессу явлений и скорости их развития/деградации. По результатам этих наблюдений должна регулярно проводиться оценка относительной опасности геокриологических процессов на разных уровнях детальности (региональном, территориальном и локальном). Результатом такой оценки должны выражаться в рангах опасности каждого из процессов, определённых для конкретных видов хозяйственной деятельности и для определённых уровней территориальной детальности (масштаба).

Очевидно, что в разных регионах и на разных экономических объектах могут возникать разные геокриологические угрозы краткосрочного или долгосрочного характера и оценить вероятность их возникновения количественно на основе обобщённых региональных данных, доступных авторам, не представляется обоснованным. В этой ситуации рекомендуется в каждой конкретной ситуации применять многокритериальный подход, который исходит из сравнительного анализа проблем, обусловленных изменениями в криолитозоне (связанными с изменениями климата). Этот подход учитывает территориальный масштаб (детальность) проблемы и характерное время её возникновения.

Отметим, что сами по себе геокриологические процессы могут представлять опасность, достигнув определённого порога интенсивности, в определённых условиях. Формируются легко фиксируемые геокриологические явления, которые становятся воплощением опасности. Например, процесс многолетнего оттаивания многолетнемёрзлой толщи сверху может представлять опасность для инженерного сооружения в случае пространственной неоднородности величины осадки грунтов при оттаивании, которая может быть обусловлена литологическими

неоднородностями или льдистостью. В этом примере выстраивается цепь причин и следствий, начальным звеном которой служит потепление температур воздуха, за которым следует оттаивание многолетней мерзлоты и, далее — неравномерная тепловая осадка грунта, выражающаяся в виде геокриологического явления (термокарстовой воронки). В этой цепи относительная опасность растёт от потепления климата к процессу тепловой осадки грунта. Таким образом, чем более масштабным (ближе к глобальному проявлению) является процесс, тем меньшую относительную угрозу он несёт, поскольку неблагоприятные последствия от него проявляются лишь при соблюдении многих прочих условий, связанных с локальной обстановкой. Это отражается и в требованиях к принятию управленческих решений: проблемы, связанные с потеплением климата, должны учитываться при решении макроэкономических проблем, связанных с природопользованием, и в общих вопросах технического регулирования. Однако при разработке конкретных технологических регламентов вопросы учёта глобальной динамики геокриологических условий не будут определяющими, по сравнению с учётом их региональной и локальной динамики.

После определения масштаба (детальности) требуемой оценки региональной геокриологической опасности определяются основные элементы ландшафтного деления, которые характеризуются температурным режимом горных пород и основными факторами этого режима. Современная практика такого подхода наиболее глубоко проработана в международной исследовательской программе GTN-P.

ИГЭ РАН участвует в программе GTN-P с 2005 года, организовав геокриологический стационар в Северном Забайкалье. Наши наблюдения показали, что колебания температуры воздуха имеют региональный характер, несмотря на значительные микроклиматические различия различных ландшафтов (рис. 4.11). В разных горных вертикальных поясах температура воздуха меняется синхронно, несмотря на локальную изменчивость микроклимата ландшафтов от 700 до 1700 м над уровнем моря. Интересно, что годовая амплитуда среднемесячных температур при этом менялась незначительно (рис. 4.12).

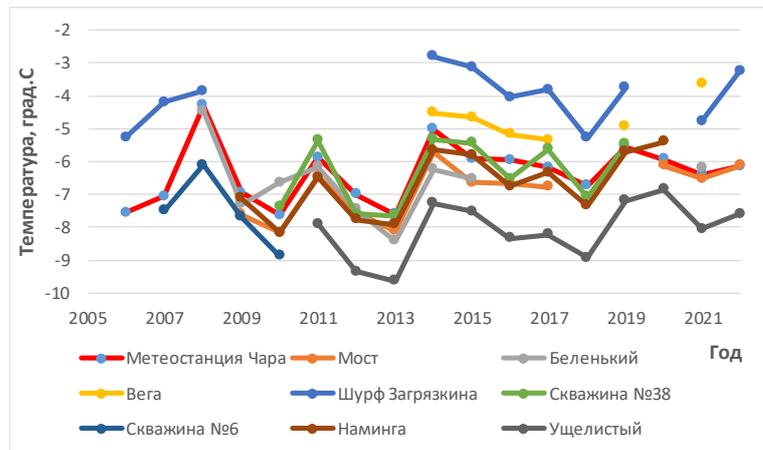


Рисунок 4.11 Изменения среднегодовых температур воздуха (здесь и далее – с сентября по август) в разных микроклиматических условиях Чарской котловины и хребта Удокан (Северное Забайкалье).



Рисунок 4.12 Изменения годовой амплитуды среднемесячных температур воздуха по метеостанции Чара (Северное Забайкалье).

В августе 2006 года, в соответствии с методическими рекомендациями международной программы TSP, нами были установлены автоматизированные режимные термометрические наблюдения в названных скважинах и шурфах в различных микроландшафтных условиях с шестичасовым шагом наблюдений.

Кроме наблюдений в скважинах, нами были организованы режимные наблюдения в сезонноталом слое (СТС) склоновых крупнообломочных отложений. Восстановлен геотемпературный и микрометеорологический шурф, обустроенный Д.Д.Загрязкиным и А.И.Тюриным в 1986 году в верховьях ручья Клюквенный. Температурный режим курумов наблюдался здесь и позднее, И.Ю.Мальчиковой, в 90-х годах. В 2006 г.г. нами были получены данные по температурному режиму в деятельном слое курума (на глубинах 0.38 и 2.05 м с шагом измерения 3 часа), а

также ход температуры на поверхности почвы (на участке, покрытом ягелем) и воздуха (на высоте 2 м) за 2005-2006 год (рис. 4.13). На графике хорошо видно, что ход температуры в куруме на глубине 0.38 м в течение тёплого сезона и весной близок к ходу температуры воздуха.

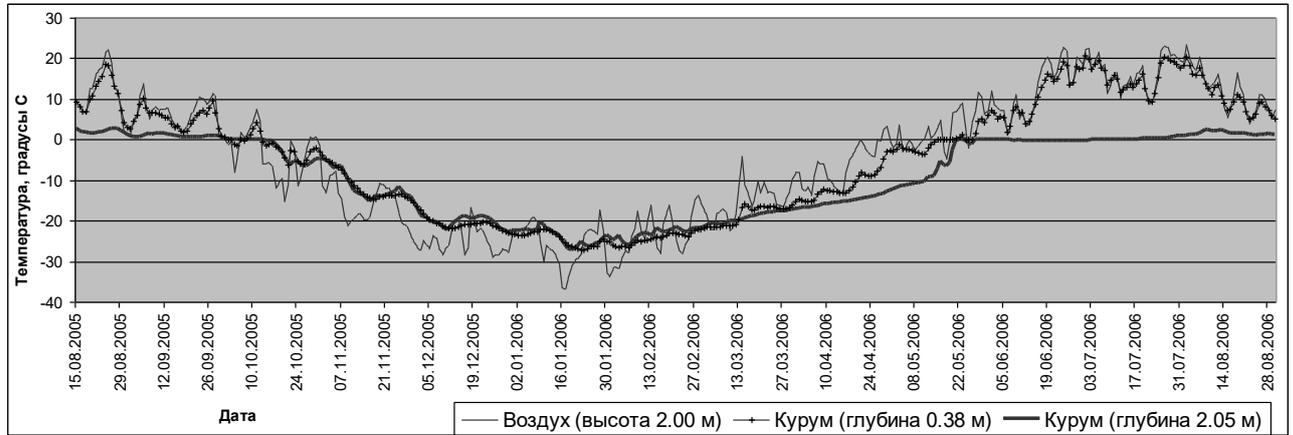


Рисунок 4.13 Ход температур воздуха (на высоте 2 м) и в СТС курума в 2005-2006 г.г.

В период осеннего промерзания в деятельном слое курума устанавливается состояние, близкое к изотермии. На подошве слоя сезонного оттаивания зимой температура близка к температуре воздуха на поверхности из-за несплошного распределения снежного покрова на куруме, что даёт возможность развития конвекции. В середине мая начинает формироваться сезонный гольцовый лёд, постепенно перемещающийся с ходом протаивания вниз по разрезу СТС – вплоть до середины июля. Летом температура грунта на глубине 2.05 м не поднимается выше плюс 3°C, что связано с мощным горизонтальным потоком воздуха, стекающего вниз по склону по подошве СТС. Таким образом, теперь мы располагаем уникальным фактическим материалом, позволяющим количественно охарактеризовать механизм охлаждающего влияния курумов на подстилающие породы.

С ростом абсолютной высоты всю большую долю поверхности склонов занимают курумы и другие крупнообломочные отложения, лишённые мелкодисперсного заполнителя. В таких отложениях реализуются дополнительные механизмы теплообмена (воздушная конвекция и радиационный перенос тепла от обломка к обломку), а также протекают интенсивные процессы испарения и

конденсации. В настоящее время в курумах наблюдаются температуры и влажность воздуха в поровом пространстве крупнообломочного чехла в специальном шурфе, вырытом сотрудниками экспедиции БАМ кафедры геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова в 1986 г. в 30 м от скважины №37 (высота 1155 м). Шурф был оборудован для режимных наблюдений по рекомендациям Д.Д.Загрязкина. За прошедшие 30 лет глубина деятельного слоя возросла с 2,05 до 2,20 м; температура горных пород также выросла на 0,6°C. Короткопериодные тренды состояния мерзлоты могут быть как сонаправлены, так и противоположны ходу климатических изменений и различаться по знаку на близко расположенных ландшафтах. Это обусловлено различными механизмами теплообмена и ставит под сомнение применимость формальных статистических обобщений регионального состояния мерзлоты (рис. 4.14 - 4.16).

Участок Беленький (высота 728 м) расположен в краевой юго-восточной части Чарской котловины на террасе р. Чары вблизи предгорных шлейфов хребта Удокан, сложенных преимущественно песками (рис. 4.16). Участок представлен слабо заболоченной поверхностью, с лиственничным 15-20-летним подростом на месте гари. В 2019 и 2024 году низовые пожары повторились.

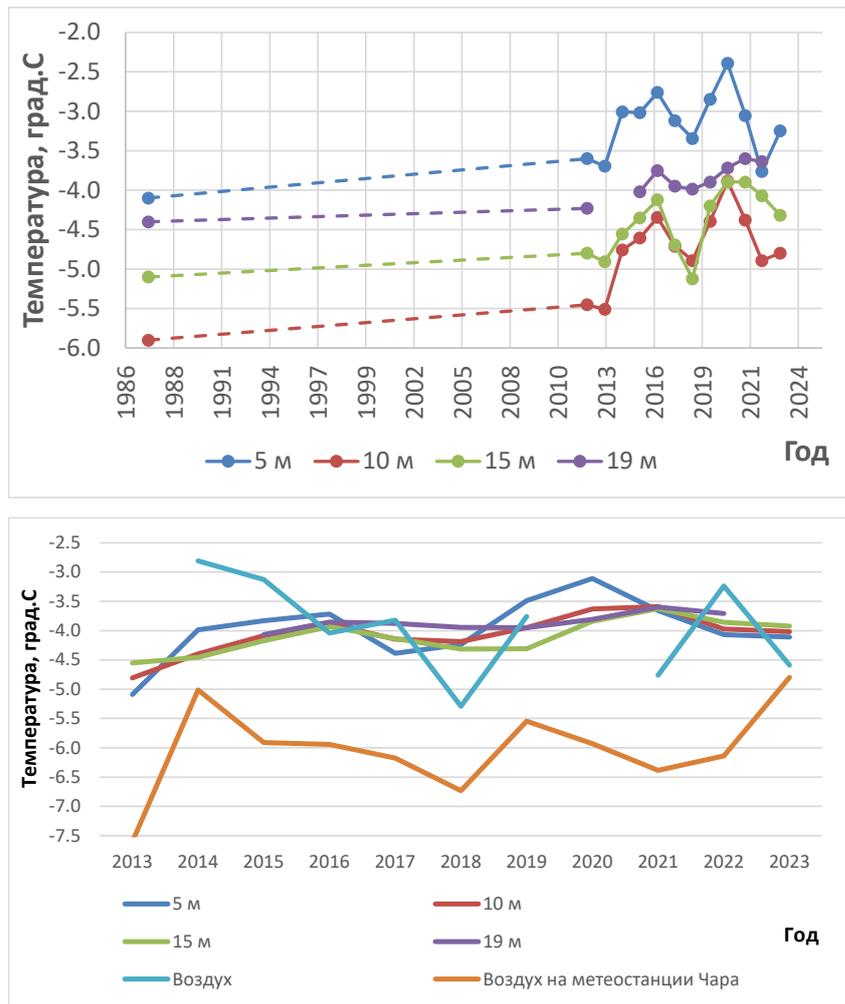


Рисунок 4.14 Изменения среднегодовой температуры воздуха и горных пород на разных глубинах в верхнем течении руч. Клюквенного (скважина №37).

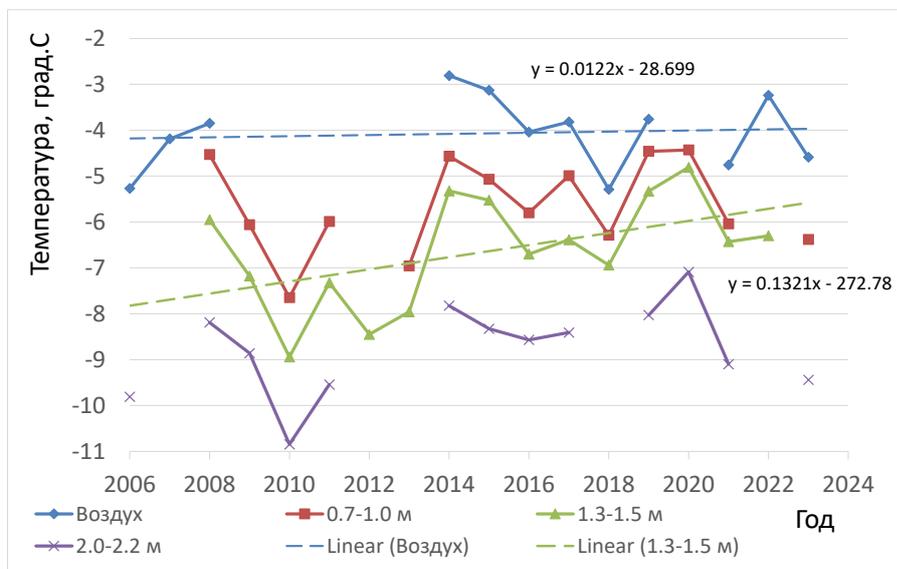


Рисунок 4.15 Изменения температуры грунта в сравнении с температурами воздуха (участок Шурф Загрязкина, хребет Удокан, Северное Забайкалье).

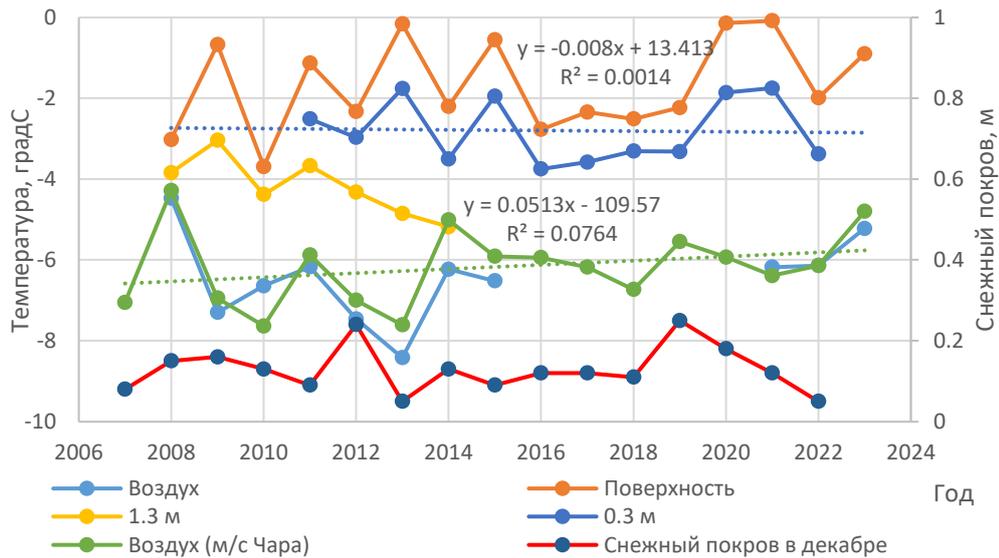


Рисунок 4.16 Изменения температуры грунта в сравнении с температурами воздуха, поверхности и толщины снежного покрова (участок Беленький, Чарская котловина, Северное Забайкалье).

Среднегодовая температура поверхности и слоя сезонного оттаивания демонстрирует устойчивую тенденцию похолодания на протяжении последних 8 лет с постепенным сокращением амплитуды сезонных колебаний. Мониторинг позволяет убедиться в неоднозначной реакции температуры грунтов на климатические осцилляции: аномалии среднегодовых температур грунта как положительного, так и отрицательного знака не совпадают с аномалиями температуры воздуха и толщины снежного покрова (рис. 4.16). Возможно, этой тенденции также способствует изменение растительных сообществ, инициированное пожаром и антропогенным влиянием.

В средней части Чарской котловины на открытом заболоченном кочкарнике расположен участок Мост (высота 700 м), организованный ПГО «Читагеология» в 1989 году. На 20-метровой глубине с 1990 по 2008 г.г. потеплело на 0,8°C. После 2008 г. началось монотонное падение температуры до с -4,8 до -5,3°C в 2012 г. На коротком отрезке времени эта динамика оказалась сонаправлена с динамикой температур поверхности и противоположна общему ходу среднегодовых температур воздуха и в результате, несмотря на климатические события последних 30 лет, температурное состояние многолетнемерзлых пород пришло к тому же состоянию, которое наблюдалось в 1990 году (рис. 4.18).

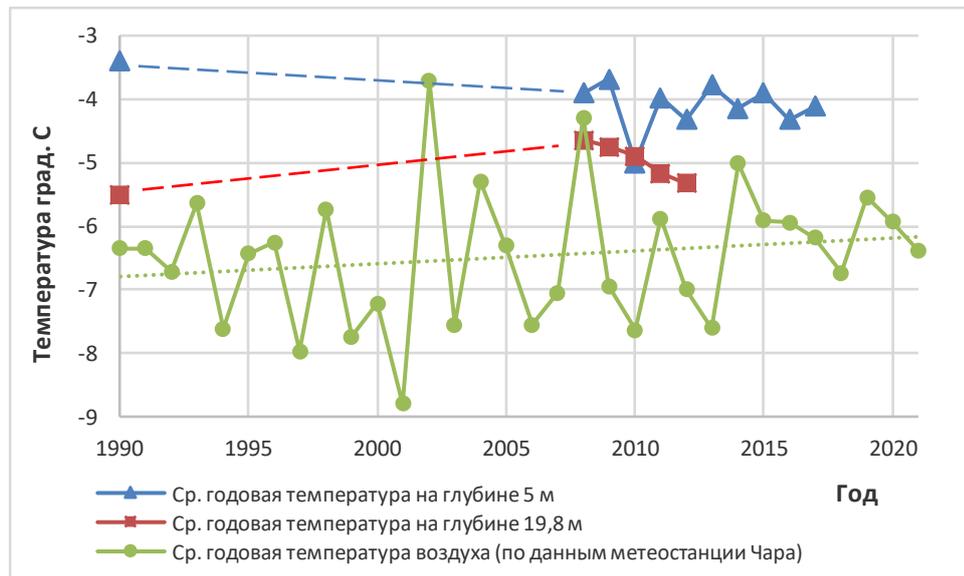


Рисунок 4.18 Изменения среднегодовой температуры грунта на разных глубинах на площадке Мост, в сравнении со среднегодовой температурой воздуха (Чарская котловина, Северное Забайкалье).

Другой участок наблюдений в центральной части Чарской котловины расположен в знаменитом урочище «Пески» (высота 780 м), массиве эоловых песков, подстилаемых водноледниковыми водонасыщенными галечниками. Многолетней мерзлоты здесь нет, среднелетняя температура пород на глубине 15 м составляет плюс 2 градуса, а на подошве слоя сезонного промерзания в последнее десятилетие наблюдается слабый рост среднегодовых температур (рис. 4.19).

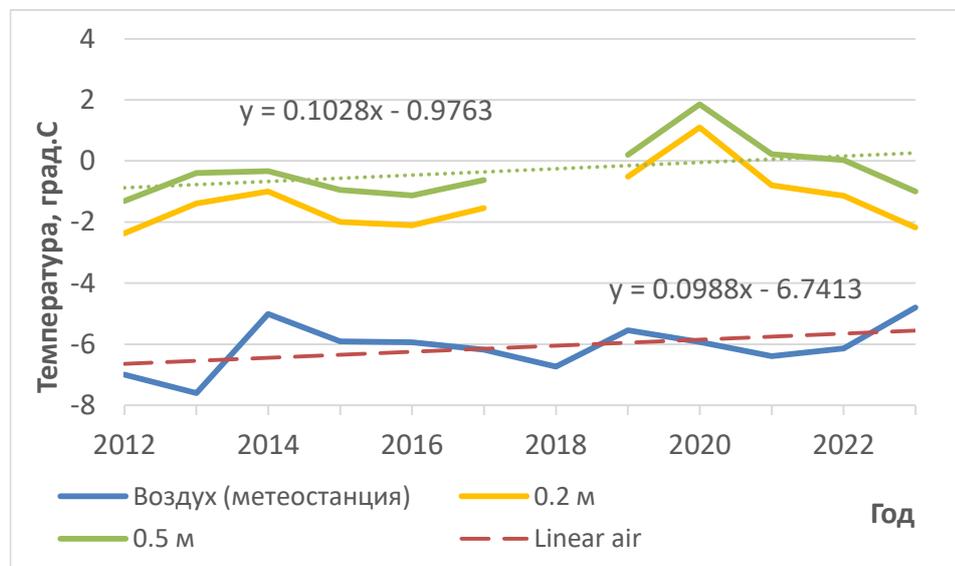


Рисунок 4.19 Изменения среднегодовой температуры грунта на разных глубинах на площадке Пески (Чарская котловина, Северное Забайкалье).

Участок Вега (высота 805 м) расположен на конечной морене Среднего Сакукана на северо-западной окраине Чарской котловины и также демонстрирует тенденцию относительного похолодания температуры горных пород на протяжении последних шести лет. С 1990 года температура на глубине проникновения сезонных колебаний здесь изменилась незначительно (рис. 4.20). Мощность ММТ пород здесь, по-видимому, не превышает 35-40 м из-за подстилающей толщи галечников со значительными запасами воды (Среднесакуканское месторождение подземных вод).

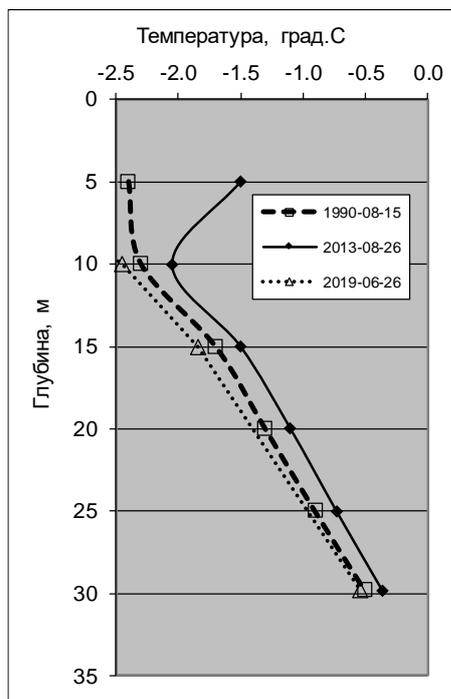
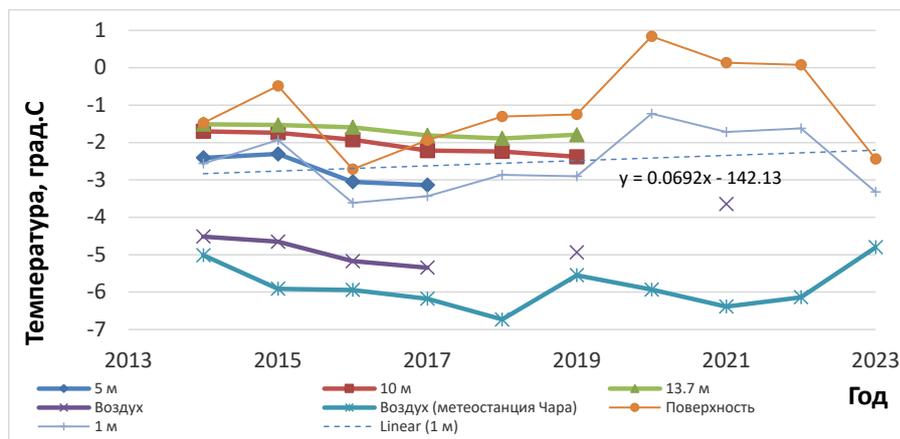


Рисунок 4.20 Изменения среднегодовой температуры пород на разных глубинах на участке Вега.

Таким образом, благодаря продолжающемуся геокриологическому мониторингу, удалось сделать следующие выводы:

- региональные климатические тенденции синхронны на разных участках территории и в различных высотных поясах гор Северного Забайкалья;
- горная часть хребта Удокан демонстрирует современное потепление приповерхностных горизонтов многолетней мерзлоты, которое, в целом, сонаправлено с региональным потеплением климата;
- межгорные котловины характеризуются современным относительным похолоданием приповерхностной части массивов многолетнемерзлых пород, что не совпадает с ходом температуры воздуха.

Полученные результаты продемонстрировали необходимость оценки представительности объектов, опираясь на которые участники программы исследований собираются характеризовать термическое состояние горных пород и их деятельного слоя. Бурение новых скважин в современных экономических условиях является дорогим удовольствием, однако и существующие наблюдательные скважины не должны оснащаться современным оборудованием по валовому принципу. Тем не менее, критерии представительности отдельно взятой скважины (площадки наблюдений) остаются не общеупотребительными, хотя базовые подходы к решению этой проблемы были разработаны довольно давно (Методическое пособие..., 1968). Опыт показал, что словесная (пусть даже весьма подробная) характеристика природных условий площадки наблюдений затрудняет сопоставление полученных геокриологических данных, особенно по однотипным ландшафтам, расположенным в разных регионах.

Всё многообразие ландшафтных и геологических описаний мы предлагаем обобщить в три количественных критерия представительности (репрезентативности) площадки наблюдений:

- 1) Представительность характеризуемого термометрической скважиной ландшафта, определяемая как удельная площадь (%) исследуемого ландшафта, выделяемого наблюдателем с детальностью, соответствующей масштабу не мельче 1:200000, в составе макроландшафта классификации А.Г.Исаченко (Исаченко, 1985);

- 2) Площадная изменчивость температур в пределах характеризуемого термометрической скважиной ландшафта, определяемая как дисперсия среднегодовых температур ММТ, полученная по единовременным замерам в близкорасположенных скважинах, расположенных в сходных геолого-геоморфологических условиях (с указанием объёма анализируемой выборки);
- 3) Количественная оценка степени нарушенности температурного поля в непосредственной близости от скважины/площадки за счёт влияния природных и техногенных агентов.

Полученные геотемпературные данные, с учётом индексов их представительности, могут быть использованы для верификации глобальных и региональных моделей реакции ММТ на климатические и антропогенные изменения, а также служить реперными значениями в сравнительном анализе территориальной и временной изменчивости температурного поля горных пород.

Оценка латеральных неоднородностей геокриологических условий является относительно хорошо развитым направлением геокриологии. Опыт мерзлотной съёмки, разнообразных видов изыскательских работ и геокриологического мониторинга даёт возможность оценить значимость информации по усреднённым характеристикам и их разбросу в пределах условно однородных выделов территории.

В последние два десятилетия геокриологическая наука столкнулась с рядом вызовов в связи с наблюдаемыми климатическими изменениями, структура которых оказалась также не однородной по территории. Очевидно, что разные геокриологические районы должны демонстрировать разную реакцию на изменения климата, но как раз этот вопрос оказался недостаточно изученным, в том числе из-за недостаточного количества мониторинговых станций (Biskaborn et al., 2015).

В настоящее время существуют два основных подхода к прогнозу реакции мерзлоты на глобальные изменения природной среды (например, климата): математическое моделирование и метод палеоаналогов. Первый подход основан на использовании строго заданных характеристик мерзлых пород и граничных

условий на всем рассматриваемом пространственно-временном интервале и является детерминистским. Применять его для прогнозирования природных катастроф в области криолитозоны можно только с серьезными ограничениями.

Метод палеоаналогов предполагает использование реконструкций для периодов геологического прошлого, во время которых изменения средней глобальной температуры воздуха соответствовали уровням, ожидаемым в будущем. Данный метод требует дальнейшего совершенствования, поскольку существующие палеогеографические реконструкции отражают лишь самые общие тенденции изменения криолитозоны.

Рост числа катастроф с человеческими потерями и колоссальным материальным ущербом, выдвигает в качестве приоритетной задачу совершенствование методов прогнозирования и предупреждения природных катастроф (Осипов, 2001). Возникла необходимость в разработке новой методологии количественного прогноза, основанной на сочетании детерминистских и вероятностных подходов.

Катастрофические изменения природно-технических систем возникают после длительного подготовительного периода накопления деформаций естественного и техногенного происхождения. При рассмотрении катастроф в криолитозоне приходится решать совокупность задач, в том числе: анализ основных естественных и техногенных факторов, обуславливающих динамику природной среды; учет геокриологических особенностей формирования природно-технических систем; картографическое отображение опасности техногенных катастроф в области распространения многолетнемерзлых пород (ММП).

В последние годы были предложены схемы районирования криолитозоны с учетом особенностей строения толщ ММП, видов хозяйственного освоения и тенденций изменения климата (Грива и др., 2008).

Динамика криолитозоны связана не только с современным повышением температуры воздуха, но и с многолетними вариациями снежного покрова, солнечной радиации и других характеристик. Цикличность современных изменений температуры воздуха, атмосферных осадков и высоты снежного покрова не совпадает во времени (рис. 3.18, 3.19, 4.16, 4.21).

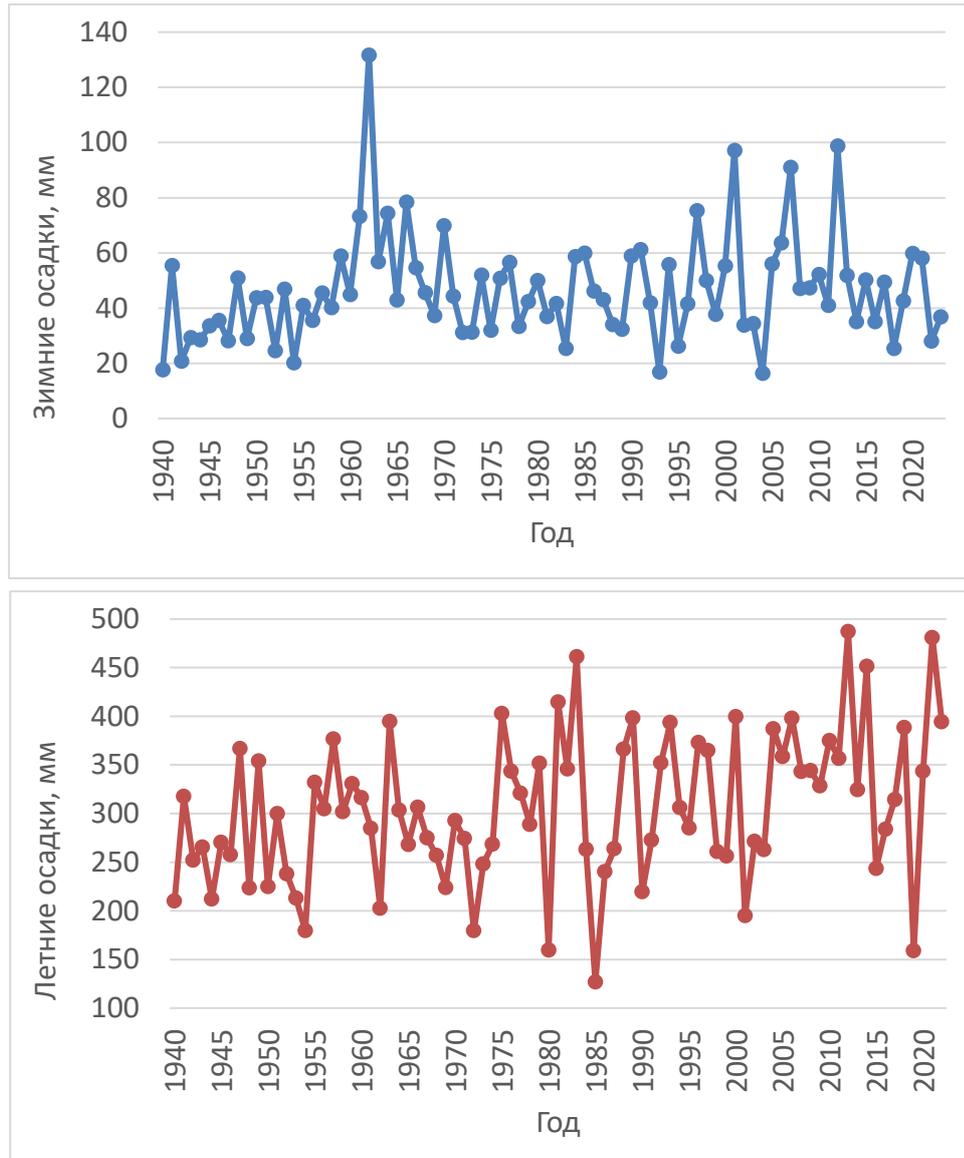


Рисунок 4.21 Изменения величин зимних и летних осадков по данным метеостанции Чара.

Региональные и локальные условия на поверхности горных пород значительно осложняют влияние изменений температуры воздуха на состояние ММП. Ещё в тридцатых годах XX века В.А.Кудрявцев, изучая южную окраину криолитозоны, обнаружил, что на одном и том же небольшом участке происходят два совершенно противоположных процесса: формирования и деградации многолетнемёрзлых пород (Кудрявцев, 1939). Важно отметить, что существуют мощные региональные факторы, которые могут вызвать направленное промерзание значительных площадей при стабильном состоянии климата. Например, тектоническое опускание территории, её увлажнение и заболачивание ведет к

региональному охлаждению и нарастанию мощности ММП даже при общем повышении температур воздуха. В случае интенсивного заболачивания температура пород может в течение 10 лет дополнительно понизиться примерно на 0,5 °С, за счёт зарастания поверхности мхами (Белопухова, 1973). В таежной зоне наблюдается интенсивное нарастание мохового покрова и продуктов его первичного разложения. По нашим наблюдениям в Чарской котловине на участке Беленький-1 датчик температуры поверхности, установленный в 2007 году на глубину 0.01 м, был обнаружен в 2017 году на глубине 0.12 м, на границе слабо- и среднеразложившихся остатков травяно-мохового покрова.

Ежегодная площадь заболачивания в лесоболотной зоне составляет 60 квадратных километров. При сохранении таких темпов заболачивания вся территория Западно-Сибирской равнины через несколько тысячелетий может оказаться заторфованной (Гиличинский, 1986). Данный процесс является уже региональным фактором, предопределяющим возможное новообразование ММП даже на фоне глобального потепления климата. К естественным неклиматическим факторам, которые способствуют повышению температуры ММП, следует отнести дренирование поверхности и уменьшение влажности пород деятельного слоя. Данный фактор может быть связан с понижением базиса эрозии (тектоническое поднятие, подмыв берегов и др.), связанным с ним врезанием речной и овражной сети, лесными пожарами и др.

Термическое состояние верхних горизонтов ММП тесно связано с условиями их теплообмена с атмосферой, который осуществляется через ландшафтную составляющую природной среды. Влияние широтной поясности, определяющей поступление солнечного тепла к поверхности Земли, оказывается значительно изменённым. Динамика растительного покрова под воздействием естественных и техногенных факторов нередко сопровождается глубокими изменениями вечной мерзлоты, обуславливая её формирование, деградацию, или стабильное состояние. Сам растительный покров не является пассивной средой. Направленные изменения климата далеко не всегда вызывают однонаправленный отклик в почвенно-растительном слое и, соответственно, в подстилающих породах. На фоне общего повышения температуры грунтов могут реализовываться и противоположные тенденции.

4.2.2 Антропогенно нарушенные территории при меняющемся климате

По одному из определений, "ПТС — это любая комбинация из технического устройства (или даже части его, выполняющей некоторую функцию) и природного тела любой размерности, технические и природные элементы которых обладают связью и объединяются единством выполняемой социально-экономической функции" (Природа..., 1978).

Спецификой ПТС криосферы является существенная зависимость от температурного фактора, поскольку их литогенной основой являются мерзлые породы или льды. Возникающие в процессе хозяйственной деятельности нарушения поверхности отражаются на характеристиках деятельного слоя, температурном режиме многолетнемерзлых грунтов, интенсивности денудационных или аккумулятивных процессов. Вслед за этим могут происходить и другие изменения мерзлотной геосистемы такие, как смена фитоценозов, режим поверхностного и подземного стока, активизация мерзлотных рельефообразующих процессов и т.д. Таким образом, возникает цепь взаимосвязанных процессов изменения параметров геосистемы. В зависимости от интенсивности внешнего импульса и внутренних особенностей изменения могут постепенно затухать или приобретать резонансное развитие вплоть до полного разрушения геосистемы.

Применительно к целям и масштабам исследований можно выделить несколько иерархических уровней ПТС криолитозоны.

Первый уровень. Элементарная ПТС, связанная с взаимодействием отдельного сооружения с мерзлыми породами. В качестве пространственного объекта данные ПТС можно выделить как точечные (до нескольких кв. км.). На данном уровне исследований следует установить ведущие черты техногенеза в пределах крупных хозяйственных объектов, выявить параметры мерзлых толщ (температура пород, мощность сезонноталого слоя и др.) и особенности взаимодействия сооружений и мерзлых пород.

Второй уровень. Хозяйственный комплекс, включающий совокупность сооружений, объединенных для выполнения определенных хозяйственных задач (предприятие в целом, населенный пункт и т.д.). ПТС данного уровня соответствует локальным пространственным образованиям (до нескольких

десятков кв. км.). Каждый из них характеризуется специфическими видами воздействия на геокриологические условия.

Третий уровень – отраслевой. На данном уровне ПТС рассматриваются крупные отраслевые технические системы, (они реализуются на региональном масштабе и могут занимать площади в сотни кв. км). Данные ПТС включают в себя разнообразные источники техногенеза, характеризующиеся специфическим для данной отрасли набором воздействий на криолитозону. Возможно выделение и более дробных уровней детальности.

Стратегия управления и прогнозирование изменений ПТС различного масштаба должна базироваться на знании динамики естественной и техногенной составляющей и обеспечивать их оптимальное соотношение в конкретных природных условиях.

Началом формирования ПТС обычно считают начало строительства или какой-либо иной хозяйственной деятельности. На первой стадии (с момента возведения первых инженерных сооружений) происходит резкое расширение пространственных границ ПТС на поверхности ландшафтов и внутри толщ пород. Этот временной интервал характеризуется существенно нестационарными термовлажностными полями в грунтах. Ранняя стадия развития ПТС продолжается в среднем 60 лет. В этот период формируются температуры грунтов, соответствующие особенностям производства (вплоть до оттаивания под тепловыделяющими сооружениями), заканчивается активное проявление инженерно-геологических процессов, деформации существующих объектов обустройства (Попов, 2005). Завершение первой стадии Г.К.Бондарик предлагает фиксировать по времени относительной стабилизации инженерно-геологических процессов. Например, для ПТС "наземное сооружение – геологическая среда" — это момент завершения консолидации грунтов в основании сооружения, затухание осадки и т.д.

Зрелая стадия ПТС соответствует установившемуся состоянию или трендовому (однонаправленному с постоянной скоростью) изменению физических полей в грунтах, когда природная среда в целом и массивы горных пород находятся в устойчивом динамическом равновесии со сложившейся инфраструктурой инженерных сооружений. Одновременно стабилизируются или даже сужаются

пространственные границы ПТС (по простиранию), но продолжается их продвижение вглубь грунтовых массивов с постоянной скоростью.

Изменения геокриологических условий могут быть слабыми, сильными или коренными в зависимости от их влияния на инженерно-геокриологические условия территории.

Слабые изменения мерзлотных условий связаны с такими изменениями различных (одной или нескольких) характеристик ММТ, величина которых не приводит к качественному изменению инженерно-геологических свойств пород и не вызывает активизацию или развитие новых мерзлотных процессов.

Сильные изменения геокриологических условий определяются изменениями одной или нескольких характеристик многолетнемерзлых толщ (ММТ), приводящими к ухудшению инженерно-геологических свойств пород, активизации существующих и развитию новых мерзлотно-геологических процессов (пучения и осадки грунтов, термокарста, термоэрозии и др.). При этом сохраняется многолетнемерзлое состояние пород, хотя в отдельных случаях может происходить либо разобщение ММТ с промерзающим зимой слоем пород, либо ее частичное оттаивание снизу.

Коренные изменения геокриологических условий определяются сменой знака среднегодовой температуры пород и многолетним оттаиванием. Это приводит не только к существенному изменению всех инженерно-геологических свойств пород в связи с их оттаиванием, интенсивному развитию мерзлотных процессов (прогрессивному и необратимому развитию некоторых из них), но и к изменению гидрогеологических условий и рельефа.

Вполне очевидно, что равновесия между природной и техногенной составляющей ПТС сохраняется лишь в случаях, когда степень техногенного воздействия не превышает пределов устойчивости первой из них. Разрушение ПТС связано с разрывом и преобразованием связей, структуры и функций природной, природно-антропогенной или антропогенной системы, в результате чего происходит потеря устойчивости, деградация и полное или частичное ее разрушение. Разрушению предшествует период накопления внешних воздействий. В это время происходит накопление деформаций, которые постепенно достигают пороговых значений. Для области распространения ММП основным

отрицательным фактором устойчивости ПТС является повышение температуры пород до значений интенсивных фазовых переходов (около 0°C). Ключевым моментом в решении проблемы выявления критических тепловых нагрузок на многолетнемерзлые породы является количественное определение пороговых и критических уровней воздействия. Под пороговым понимается уровень воздействия, вызывающий значительные изменения основных параметров ММП (температура, механические свойства), которые все же остаются в пределах устойчивости (Грива, 2006). К критическим относятся воздействия, выводящие параметры ММП за границу устойчивости. Критические нагрузки приводят к локальному или полному разрушению мерзлых пород, что соответствует состоянию экологического бедствия и проявляется в развитии или активизации комплекса опасных геокриологических процессов. Для установления критерия допустимого воздействия Ю.А.Израэль использует понятие обобщенной функции состояния экосистемы (Израэль, 1984). Различие между предельно допустимым и фактическим состоянием характеризует экологический резерв системы. Для криогенных геосистем в качестве показателя экологического резерва можно выбрать температуру мерзлых пород на подошве слоя годовых колебаний (за критическое значение принимается 0°C) или глубину сезонного оттаивания.

Особенности, характер, интенсивность и направленность изменений природной среды и, как следствие, формирование геокриологических условий в том или ином районе, определяются, с одной стороны, естественными факторами (состоянием и строением окружающей природной среды), а с другой - теми видами хозяйственной деятельности и техническими сооружениями, которые воздействуют на неё.

В зависимости от целей исследований технические системы изучаются на разных уровнях: региональном, локальном и детальном. На региональном уровне рассматриваются крупные технические системы, имеющие сложную внутреннюю инфраструктуру. Они включают в себя разнообразные источники техногенеза, характеризующиеся различными воздействиями на окружающую среду – от точечных и линейных до площадных, от приповерхностных до глубинных. На этом уровне в технических системах должны быть выявлены главные виды воздействия

на природную среду, возможные масштабы ее изменений, общие закономерности и тенденции экологических последствий. Локальный уровень исследования требует выделения в пределах региональных технических систем отдельных крупных источников техногенеза. Каждый из них характеризуется специфическими видами воздействия на геокриологические условия. На детальном уровне исследований следует установить конкретные источники техногенеза (отстойники, пруды-накопители и другие объекты в пределах промышленных предприятий, отвалы пород, обогатительные фабрики, хвостохранилища и т.п.).

В каждом районе устойчивому состоянию социально-хозяйственных объектов и окружающей среды отвечает определенный диапазон природных и технических параметров.

Глобальное потепление климата изменяет устойчивость природно-технических систем (потеря устойчивости грунтов, изменение воздействия техногенной составляющей на природную среду, усиление воздействия криогенных процессов на техногенный и природный компоненты). Следовательно, для любой территории отраслевые особенности оценки геокриологических опасностей для устойчивого состояния природно-технических систем будут различаться.

Каждой отрасли хозяйства соответствуют свои особенности взаимодействия техногенной и природной составляющих, поэтому следует учитывать отраслевую специфику природно-технических систем. Существующие источники техногенеза по особенностям, масштабам, интенсивности воздействия на природную среду, нарушению экологического равновесия можно объединить в семь крупных технических систем: градопромышленные, горнодобывающие, военно-промышленные, сельскохозяйственные, лесозаготовительные, гидротехнические, линейных сооружений. Специфика геосистем криолитозоны проявляется в реакции теплового поля горных пород (сопровождающейся изменением механических характеристик грунтов в основании сооружений) и динамикой ЭГП, обусловленных многолетнемёрзлым состоянием горных пород. Для каждой технической системы характерен свой набор воздействий, оказывающих негативное влияние на окружающую природную среду и приводящих к созданию неблагоприятных ситуаций.

Режимные наблюдения на осваиваемых территориях показывают, что изменения рельефа земной поверхности и соответственные нарушения температурного режима пород связаны как с планировочными работами под наземные сооружения, так и с добычей полезных ископаемых. При этом создаются искусственные формы микро- и мезорельефа (карьеры, отвалы, выемки, насыпи, терриконы), а также происходит новообразование и/или активизация природных ЭПП. В результате наблюдается существенная перестройка рельефа: увеличиваются протяженность и глубина вреза оврагов, неустойчивыми становятся склоны (происходят оплывы грунтовых масс, обрушение блоков породы и др.), формируются бугры пучения пород, термокарстовые просадки поверхности и др.

Естественно, что наиболее сильные изменения рельефа происходят при развитии горнодобывающей промышленности. Так, в Воркуте шахтная разработка угольных месторождений привела к созданию терриконов высотой до 50 м, которые изменили облик рельефа на площади более 2 км². В Якутии Нерюнгринский карьер с открытой добычей угля достигает многих сотен метров в диаметре и многих десятков метров в глубину. Создание таких гигантских карьеров не только изменяет облик ландшафта, но и влияет на сейсмичность территории. По данным Б.А.Оловина (Охрана..., 1980), при открытой разработке россыпных месторождений в циклах выемка-отвалообразование происходит понижение базиса денудации склонов, возрастает интенсивность склоновых процессов, при которых идет перемещение больших масс породы. При стекании оттаивающих тиксотропных грунтов обнажаются и вытаивают подземные льды, образуются просадки поверхности глубиной до 3-5 м. Такого типа изменения ландшафтных условий происходят на больших площадях.

При строительстве на участках, где широко распространены неустойчивые торфяные и сильнольдистые грунты, часто производится их замена. Эти нарушения исходных условий в комплексе с тепловым влиянием сооружений, изменениями микроклимата и режима поверхностных вод на застраиваемых участках приводят к изменению термовлажностного режима пород, часто сопровождаемому неравномерным по площади и глубине многолетним оттаиванием или новообразованием мерзлоты. Естественно, что именно эти изменения являются наиболее сильными по возможным практическим последствиям. К значительным

можно отнести и такие изменения грунтовых толщ, которые не приводят к многолетнему оттаиванию подстилающих отложений, однако, существенно сказываются на их свойствах и на активизации инженерно-геологических процессов. Незначительными назовем такие изменения грунтовых толщ в криолитозоне, которые происходят вследствие техногенных нарушений тепломассообмена в сезонноталом слое, но, несмотря на изменения среднегодовой температуры и глубины сезонного оттаивания, не сказываются на инженерно-геологической оценке подстилающих пород (Природные ..., 2000).

Сравнение фактических и модельных данных о реакции многолетней мерзлоты на изменение внешних условий теплообмена (на примере северной части месторождения Медвежье, Западная Сибирь) (Ukhova et al., 2008).

В последние годы реальной стала проблема, связанная с изменением температуры грунта на месторождениях природного газа, расположенных в пределах криолитозоны на севере Западной Сибири. В особенности это касается старейшего газового месторождения Медвежье, освоение которого началось с 1973-го года. Сооружения на месторождении Медвежьем не оснащены сезонно охлаждающими устройствами, которые весьма эффективно применяются при обустройстве современных месторождений (Бованенково, Юбилейное и др.). Устойчивость объектов, построенных по I принципу СНиП (с сохранением грунтов в мерзлом состоянии), обеспечивается только за счет работы холодного проветриваемого подполья.

Для Севера Западной Сибири характерен один из наибольших трендов повышения температуры воздуха за 1960-1995 г.г.: $0.05^{\circ}\text{C}/\text{год}$ - за летний и $0.07^{\circ}\text{C}/\text{год}$ – за зимний период. В условиях планируемой реконструкции объектов месторождения Медвежье нами была поставлена задача найти метод различения влияния климата и влияния техногенеза на газовых промыслах, чтобы в дальнейшем ясно представлять последствия повышения температуры воздуха и динамики других факторов динамики температурного режима.

Для ее решения была реализована одномерная численная модель температуры грунта для условий месторождения Медвежье в период 1978-2004 г.г., выработаны критерии выбора наблюдательных скважин, пригодных для

калибровки созданной модели и выработан метод оценки степени техногенной нарушенности температурного режима грунтов по совпадении направленности тренда наблюдаемых и смоделированных температур.

Данные по динамике температуры верхних горизонтов криолитозоны в естественных условиях получают либо на мерзлотных стационарах (см. раздел 4.2.1), либо в системах геотехнического мониторинга, приуроченного к различным промышленным и гражданским сооружениям. Скважины, испытывающие в той или иной степени техногенное воздействие, демонстрируют разнонаправленные тенденции изменения температуры мерзлоты. По таким данным затруднительно судить о роли климата в изменении температуры грунтов, поскольку влияние техногенных сооружений и хозяйственной деятельности в локальном аспекте значительно мощнее природных факторов. Выходом в такой ситуации может оказаться использование моделирования.

В качестве входных данных при моделировании температурного режима использовались:

- 1) Характеристики грунтового разреза:
 - Пористость (дол. ед.)
 - Температура начала замерзания ($^{\circ}\text{C}$)
 - Теплопроводность в мерзлом и талом состоянии ($\text{Вт/м}\cdot\text{К}$)
 - Теплоемкость в мерзлом и талом состоянии ($\text{кДж/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$)
- 2) Характеристики климата:
 - Температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$)
 - Высота снежного покрова (м)
 - Плотность снежного покрова (г/см^3)
 - Альбедо поверхности
 - Характеристики радиационного баланса
 - Давление водяного пара атмосферы
 - Влажность воздуха

Заметим, дополнительно, что температура воздуха входит в качестве одного из важнейших параметров в условие радиационно-теплового баланса через конвективный тепловой поток в атмосферу.

В качестве начального распределения температуры по разрезу был выбран 200-метровый грунтовый разрез, представленный незасоленным однородным суглинком. Начальная температура изменяется от -1°C в верхних горизонтах до 0°C на подошве мерзлоты на глубине 200 м.

Чтобы привести температуру по разрезу к периодически установившемуся режиму, мы выдерживали в модели среднемноголетние климатические условия в течение 10 лет. Дальнейший счет осуществлялся с использованием измеренных температур воздуха и толщины снежного покрова. В результате моделирования были получены расчётные значения температуры грунта на глубине 9 м для ненарушенных условий, которые были сопоставлены наблюдаемыми значениями в скважинах в пределах природно-технических систем и с ходом климатических характеристик (рис. 4.22-4.23). Видно, что в долгосрочном аспекте ход динамики снежного покрова оказывает более сильное воздействие на температуру пород на небольших глубинах, по сравнению с ходом температур воздуха.

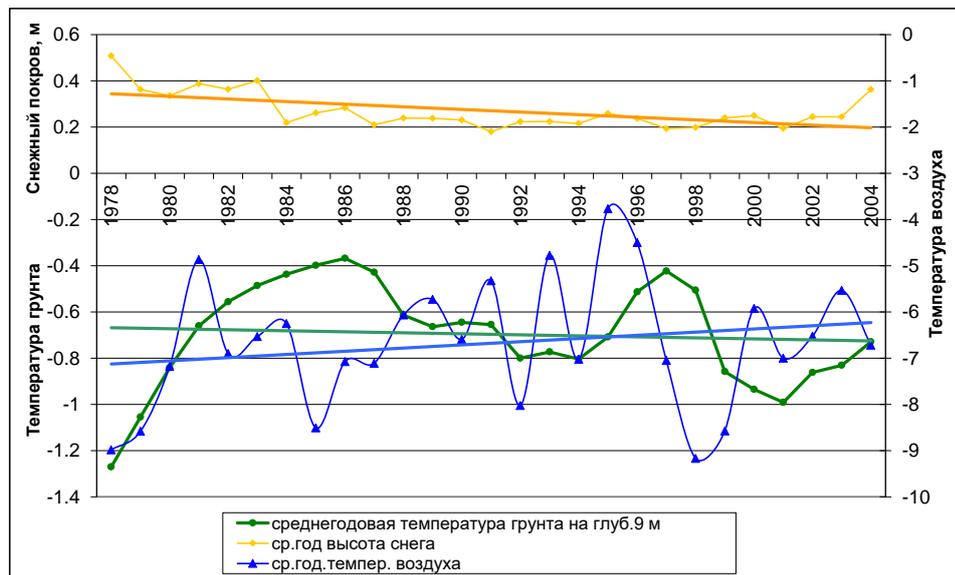


Рисунок 4.22 Сопоставление наблюдённой температуры грунта, температуры воздуха и толщины снежного покрова (месторождение Медвежье).

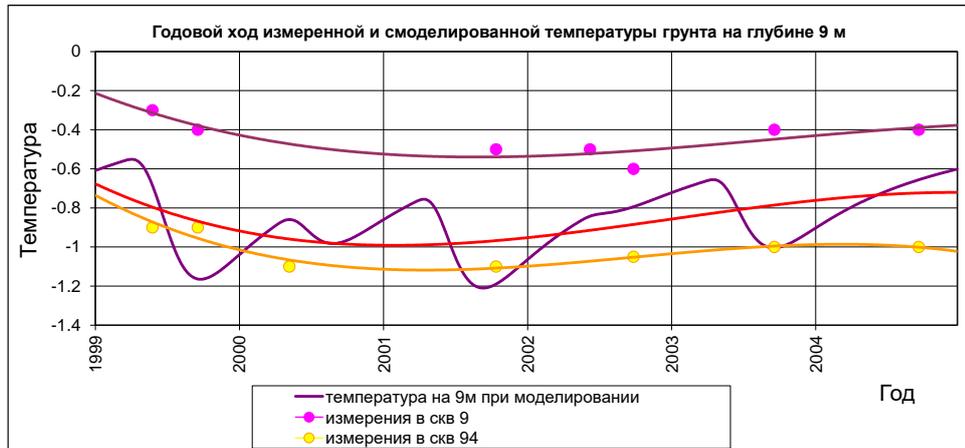


Рисунок 4.23 Сонаправленность наблюденной и расчётной температуры грунта (месторождение Медвежье).

Результаты моделирования были сопоставлены с измерениями в скважинах №9 и №94 на территории месторождения Медвежье. Несмотря на то, что скважины расположены около трубопроводных систем, их условия можно условно считать ненарушенными по признакам растительности, режима увлажнения поверхности и снегонакопления. Видно, что в краткосрочном аспекте ход температуры грунта, полученный при моделировании, в целом повторяет ход температур грунтов, измеренных в скважинах № 9 и 94 (рис. 4.23). Различия в значениях измеренных температур в этих скважинах, вероятно, обусловлены неоднородностями в распределении снежного покрова на площадке, детальные данные о котором не доступны. Однако межгодовой ход температур грунта определяется динамикой климатических характеристик.

Мы предполагаем, что совпадение тенденций изменения температуры грунта в модели и в скважинах в ненарушенных условиях на небольших глубинах (до 10 м) свидетельствует об отсутствии существенных техногенных воздействий за период наблюдений. Этот подход может быть использован для отделения влияния климата от влияния техногенного сооружения.

В противоположность рассмотренному случаю, скважины №2(202) и №6(206), расположенные вблизи других сооружений подвергаются значимому техногенному влиянию и демонстрируют другую тенденцию (рис. 4.24).

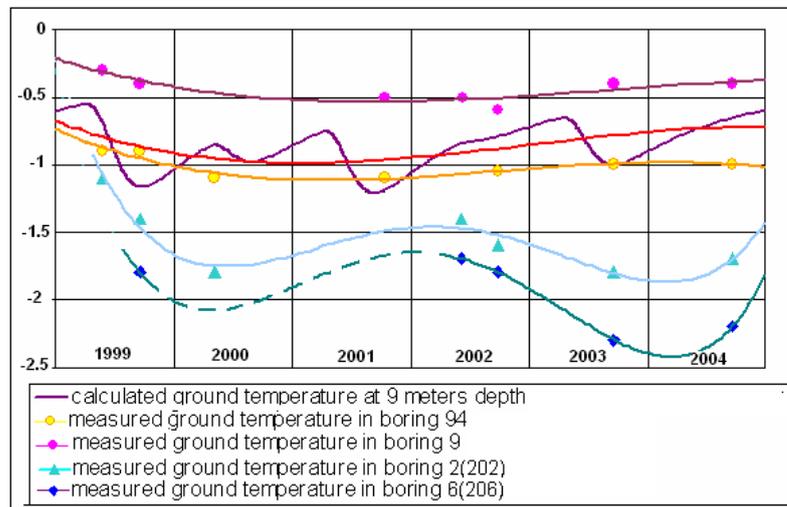


Рисунок 4.24 Различия хода наблюдаемой и расчётной температуры грунта в различных природно-технических системах (месторождение Медвежье).

При составлении геокриологических прогнозов необходимо учитывать особенности хозяйственной деятельности, преобладающей на рассматриваемой территории. Это можно осуществить на основе современных представлений о ПТС (см. раздел 1.2). Понятие ПТС объединяет характерные черты технологического воздействия на мерзлоту и особенности природных мерзлотно-геологических условий, оказывающие влияние на сооружения и хозяйственную деятельность.

На всех иерархических уровнях выделение элементов ПТС производится с учётом границ протекания природно-техногенных процессов. Общая схема таких работ может быть следующей. В первую очередь определяются преобладающие виды антропогенной нагрузки на окружающую среду. Затем выявляется направленность криогенных процессов, обусловленная воздействием техногенной и природной компонент данной ПТС. После этого оцениваются перспективы использования известных в науке моделей для прогноза динамики криолитозоны, причем основное внимание уделяется возможной активизации опасных мерзлотных процессов (термокарст, солифлюкция, термоэрозия, морозное пучение и др.).

В настоящее время имеется большое количество данных, свидетельствующих об изменении температурного режима, теплового состояния и свойств грунтов в основании различных сооружений на территории криолитозоны. Изменения происходят в больших массивах горных пород, проникают на несколько десятков метров вглубь и выходят за пределы фундаментов сооружений

(Афанасенко и др., 1995; Браун, Граве, 1981; Гарагуля, Гордеева, 1997; Геокриология СССР..., 1989; Геокриологический..., 1983; Геологическая..., 1985). Многолетние наблюдения в Воркуте (Хрусталева, 1971) показали, что на застроенной территории среднегодовая температура грунтов повысилась на 1-2°, на 80-90% площади города сформировались техногенные талики. Кровля мерзлых толщ опустилась, в зависимости от возраста и вида застройки, на 2-10 и более метров. В основании зданий усилилась фильтрация грунтовых вод, что способствовало слиянию отдельных чаш протаивания и формированию обширного техногенного талика сложной геометрии. Подобные изменения теплового состояния грунтов основания наблюдаются в Игарке, Мирном и других северных городах.

В Якутске, напротив, в черте застройки наблюдается понижение среднегодовой температуры грунта на 1-4°C. Причем температура тем ниже, чем больше возраст застройки. Характерной особенностью изменения грунтовой толщи в Якутске является формирование техногенного слоя из строительных и промышленных отходов, который отличается повышенной засоленностью. По данным Н.П.Анисимовой, на глубине 3.5-6.0 м сформировались криопэги с минерализацией воды от 35 до 200 г/л. Такая засоленность грунтовых вод отрицательно сказывается на инженерно-геологической ситуации, так как она угрожает устойчивости фундаментов и подземных коммуникаций, а также приводит к "опустыниванию".

Многолетние режимные наблюдения, которые проводились кафедрой геокриологии МГУ на территориях нефтегазовых месторождений севера Западной Сибири (Медвежье, 1972-76 г.г.; Юбилейное, Ямсовейское, 1995-99 г.г.), позволили изучить особенности изменения компонентов природной среды и геокриологических условий, формирование техногенных ландшафтов. Так, на большей части одного из участков месторождения Медвежье в процессе обустройства был практически полностью уничтожен почвенно-растительный слой, произведена планировка поверхности и подсыпка грунта под здания, вертолетные площадки и дороги (Гарагуля, Гордеева, 1997). При этом существенно изменились микрорельеф, высота и плотность снега, влажность грунтов, режим стока поверхностных и надмерзлотных вод. Резко возросла неравномерность

снегонакопления: его высота увеличивается более чем в 2 раза в карьерах и на площадках снегоотвалов, на дорогах – уменьшается до 5 – 10 см (при плотности более 0.3 г/см³), на застроенной площадке высота снега варьирует от 0.1 – 0.2 до 1.5 – 2.0 м, местами снег постоянно счищается.

Отсыпка дорожных насыпей обычно сопровождается либо заболачиванием прилегающих ландшафтов с образованием мелких озёр, либо формированием сосредоточенного стока. Если на склонах террас насыпь отсыпана даже под небольшим углом к общему уклону поверхности, то вдоль нее формируется сосредоточенный сток поверхностных вод и образуются эрозионные промоины. На плоских, ранее заболоченных участках вдоль насыпи образовались мелкие блюдца воды. Отсыпка насыпей в полосах стока и в верховьях пологих логов всегда приводит к образованию мелких озер.

На дорогах и вертолетных площадках среднегодовая температура грунта у подошвы сезонно талого слоя понижается на 1 – 2°C. Отмечен некоторый подъем кровли многолетнемерзлой толщи, особенно на участках с насыпным грунтом высотой более 0,8 – 1,0 м. при этом глубина сезонного оттаивания увеличилась в 1,2 – 1,5 раза (по сравнению с существовавшей ранее в естественных условиях). Именно, повышение кровли многолетнемерзлых пород способствует заболачиванию участка, прилегающего к дороге. Стабилизация нового температурного режима происходит за 3-4 года.

На заболачиваемых участках наблюдалось погружение кровли многолетнемерзлых пород и образование не сливающейся мерзлоты через 2 – 5 лет после начала эксплуатации производственного комплекса. В теплые годы глубина сезонного оттаивания значительно возросла по сравнению с наблюдаемой до строительства. Для положения кровли многолетнемерзлых пород характерны межгодовые колебания, обусловленные погодными условиями. за 5 лет наблюдений температурный режим пород не стабилизировался. Расчеты показали, что при сохранении тенденции к заболачиванию (с образованием блюдца воды глубиной 0.2 – 0.4 м) может начаться многолетнее оттаивание пород.

в отработанном карьере, заполненном водой, началось многолетнее оттаивание пород. Глубина залегания многолетнемерзлых пород, по данным геофизических работ, составила 5 – 7 м. В действующем карьере наблюдалось

значительное (в 1.5 – 2.0 раза) увеличение глубины сезонного оттаивания с локальными пятнами несливающейся мерзлоты.

На участках, где при подготовке территории был удален мохово-торфяной слой, среднегодовая температура пород повысилась на 1.0-1.7° С, а глубина сезонного оттаивания увеличилась в 1.2-1.5 раза. Стабилизация нового температурного режима произошла за 5-7 лет.

Наименьшими изменениями геокриологической обстановки характеризуются участки с частичным удалением растительного покрова и достаточно хорошим дренажем поверхности. Здесь через 2-3 года началось восстановление растительности. Температурный режим пород соответствовал таковому на аналогичных ландшафтах с ненарушенными условиями. На выпуклых дренированных поверхностях, сложенных песчано-супесчаными породами, при глубине сезонного оттаивания больше 1.0 м восстановление растительности идет хорошо по линии возобновления коренных сообществ через разнотравно-злаковые. В местах распространения с поверхности тонкодисперсных грунтов (глинистых, суглинистых), где глубина сезонного оттаивания невелика и почвы сильно увлажнены, восстановление идет медленнее, через стадию влажнотравно-злаковых ассоциаций. В понижениях рельефа восстановление растительности тормозится большой влажностью почвы.

На склонах, сложенных песчаными грунтами, которые наиболее подвержены действию ветровой и водной эрозии, самостоятельное (естественное) восстановление растительности идет очень медленно. Здесь необходимо проводить специальный подсев трав, которые своими корневыми системами закрепляли бы субстрат (мятлик луговой, овсяница овечья, иван-чай).

На торфяниках с наиболее суровыми мерзлотными условиями восстановление растительности затруднено из-за низких температур почвы. Здесь формирование растительных сообществ происходит только при полном прекращении использования участка и только в тех случаях, когда слой торфа не разрушен и идет формирование болотных сообществ (осоково-пушицевых).

Существенные изменения геокриологических условий наблюдались в 1970-78 г.г. на трассе газопровода Мессояха-Норильск. Сотрудниками кафедры геокриологии МГУ отмечены изменение температурного режима грунтов,

увеличение глубины сезонного оттаивания, активизация мерзлотно-геологических процессов. Неблагоприятные последствия усиления морозного пучения грунтов на участке заглубленного газопровода выразились в образовании свищей в сварных швах труб. Многолетние геокриологические наблюдения за изменением условий на трассах магистральных трубопроводов и на участках месторождений на севере Западной Сибири проводились институтом ВСЕГИНГЕО, географическим и геологическим факультетами МГУ и другими организациями (Геокриологический..., 1983; Ландшафты..., 1983).

Следует отметить, что на участках с песчаными подсыпками изменение теплового состояния грунтов часто происходит неоднозначно. В одних случаях идет многолетнее оттаивание изначально мерзлых грунтов, в других – промерзают изначально талые отложения. На этапе создания песчаной насыпи на Ямсовейском месторождении, по данным геотермических наблюдений в скважинах, стало заметно холоднее, чем в предстроительный период – среднегодовая температура грунтов понизилась на 1°C , существенно больше стала глубина сезонного промерзания (до 3-5 м). Это произошло, главным образом, благодаря снижению мощности и увеличению плотности снежного покрова, и созданию насыпи с малой влажностью песчаного грунта. На этом же этапе, при очень сходной технологии освоения месторождения "Юбилейное", изменения геокриологической обстановки оказались иными. На большей части промплощадки среднегодовая температура пород повысилась на $1.0-1.5^{\circ}\text{C}$ и составила $-0.3\div-0.5^{\circ}\text{C}$. При этом глубина оттаивания грунтов достигла 2 м. Насыпь здесь оказала тепляющее влияние вследствие того, что при незначительных изменениях свойств снежного покрова увеличение глубины деятельного слоя привело к оттаиванию льдистых верхних горизонтов многолетнемёрзлой толщи. Произошла просадка насыпи на глубину более 1 м, а также её подтопление практически на всю мощность. Это, в свою очередь, привело к увеличению тепляющего влияния снежного покрова.

Этап монтажа производственных корпусов и технологического оборудования в целом характеризуется возрастанием сложности и пространственной неоднородности геокриологической обстановки. Главными причинами таких изменений являются:

- уплотнение или полное снятие снежного покрова вокруг строящихся объектов и на подъездных путях;
- резкое возрастание роли метелевого перераспределения снега в связи с созданием корпусов и других наземных конструкций (трубопроводов, ёмкостей и др.), когда его мощность изменяется от 0 до 3 м;
- создание крытых производственных корпусов с холодными подпольями, при отсутствии в них отопления.

На месторождении "Ямсовейское" отмечено многолетнее промерзание грунтов под холодными подпольями до глубины 4-6 м, а также на участках выдувания снега в обрамлении цехов и под подъездными дорогами. Изменение теплового состояния грунтов вызвало нарушение условий стока грунтовых вод и повышение их уровня (на отдельных участках более чем на 1 м). В целом же можно говорить об аградационной тенденции в динамике геокриологических условий.

На месторождении "Юбилейное" среднегодовая температура грунтов продолжала повышаться, вследствие увеличения высоты снега в этот период. Глубина сезонного оттаивания достигла практически предельно возможных значений, после превышения которых кровля ММП отрывается от деятельного слоя. При этом продолжались осадки поверхности и повышение уровня надмерзлотных вод в техногенной насыпи. Исключение составляют «холодные» здания, под которыми температура грунтов снизилась до $-2 \div -3^{\circ}\text{C}$.

Этап постоянной эксплуатации на Ямсовейском месторождении отмечен включением отопления в технологических корпусах и подсобных зданиях, началом транспортировки тёплого ($16-20^{\circ}\text{C}$) газа по надземным и подземным трубопроводам. К этому времени окончательно сложилась картина ветрового перераспределения снега на промплощадках. В связи с этим, произошли следующие изменения геокриологической обстановки:

- оттаивание новообразований многолетнемёрзлых пород, возникших в период строительства под отапливаемыми зданиями и в их обрамлении, а также в местах прокладки подземных газопроводов;
- сохранение и даже аградация многолетнемёрзлых пород под дорогами и холодными проветриваемыми подпольями;

- небольшие изменения глубин сезонного оттаивания и промерзания в связи с естественными колебаниями климата.

На месторождении "Юбилейное" изменение геокриологических условий было связано с естественной динамикой климата и выразилось в практически повсеместном достижении предельной глубины сезонного оттаивания (2-3 м) и формировании несливающейся мерзлоты в наиболее тёплые годы.

Режимные наблюдения на центральном участке Байкало-Амурской железной дороги в период с 1989 по 1992 г. показали, что под влиянием изменения температурного режима пород в земляном полотне и на прилегающих к нему участках произошли активизация и новообразования мерзлотно-геологических процессов, специфика которых обусловлена характером исходной (до строительства) геокриологической обстановки (Афанасенко и др., 1995). Это иллюстрируется содержанием таблицы 4.1.

Особенностью развития процессов является их парагенезис, выражающийся в образовании цепочечного ряда с усилением деструктивных эффектов. В качестве примера приведём картину развития экзогенных процессов и явлений на участке «236 км», где грунтовая толща имеет двухслойное строение. Верхний горизонт сложен биогенными торфами мощностью 2.0-2.5 м, подстилающий - аллювиальными супесями и песками, мощностью 6-8 м. Рельсово-шпальная решётка уложена на насыпь высотой от 3 до 5 м с двусторонними бермами, шириной 5 м каждая. Причиной развития негативных процессов явилось подтопление нагорной части полосы отвода в результате нарушения поверхностного и грунтового стока земляным полотном. Образовалось неглубокое, до 1.5-2.0 м, но достаточно обширное озеро. Произошло интенсивное оттаивание многолетнемёрзлых пород под дном озера, и тепловые осадки дна составили 0.3-0.5 м. В первые 2-3 года после подтопления под озером начал образовываться талик. В течение следующих трёх лет началось протаивание льдистых мёрзлых пород под бермой. Это привело к просадкам бермы, поверхность которой на отдельных участках опустилась ниже проектных нулевых отметок. Поверхность бермы с нагорной стороны была преобразована многочисленными просадками, суффозионными воронками, трещинами оседания протяжённостью до 100 м и

более. Затем деформации охватили и само тело насыпи - начались односторонние просадки с нагорной стороны, сопровождаемые эрозионным размывом и оплыванием тела земляного полотна. Интенсивность термокарстовых процессов ежегодно инициировалась зимним пучением грунтов основания, которое сопровождалось образованием инъекционных бугров пучения, внедрявшихся в земляное полотно, что способствовало возникновению оплывин и небольших оползней на откосах. Суммарный эффект развития цепи взаимосвязанных процессов привёл к формированию просадок земляного полотна, устранить которые подсыпками и подъёмом пути на балласт не удаётся, т.к. процессы термокарста и пучения вызывают расползание земляного полотна в его основании.

Таблица 4.1 Динамика экзогенных геологических процессов и явлений на БАМе под воздействием строительства и эксплуатации железной дороги (составлена по материалам кафедры геоэкологии геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова).

Тип	Экзогенные геологические процессы и явления до начала строительства	Нарушения природных условий в период строительства и эксплуатации	Инженерно-геоэкологические процессы и явления (а – активизирующиеся, н – вновь образующиеся)
А	Практически отсутствуют	Разработка выемок, отсыпка кавальеров	Выветривание в бортах выемок (а), эрозия в бортах выемок (н), осыпи (н), наледообразование (н), пучение (н)
Б	Заболачивание	Разработка выемок, отсыпка кавальеров	Эрозия в бортах выемок (н), оползни (н), наледообразование (н), пучение (н)
В	Практически отсутствуют	Удаление растительного покрова, отсыпка обломочными грунтами, запыление поверхности	Эрозия в полосе отвода (н)
Г	Термоэрозия	Сведение древесного покрова, удаление растительного покрова, отсыпка обломочными грунтами, запыление поверхности	Термоэрозия в полосе отвода (а)
Д	Термоэрозия, делювиальный сплыв, заболачивание	Обжатие мохово-торфяного покрова, удаление мха, отсыпка обломочными грунтами	Термоэрозия в полосе отвода (а), заболачивание (а), термокарст (н), наледообразование (н)
Е	Инъекционное пучение, наледи, повторно-жильные льды, термокарст, заболачивание	Обжатие мохово-торфяного покрова, удаление мха, подтопление слоев воды, отсыпка обломочными грунтами	Термокарст (а), заболачивание (а), термоэрозия в полосе отвода (н), эрозия земляного полотна (н), наледообразование (а)

Режимные наблюдения на осваиваемых территориях показывают, что изменения рельефа земной поверхности и соответственные нарушения

температурного режима пород связаны как с планировочными работами под наземные сооружения, так и с добычей полезных ископаемых. При этом создаются искусственные формы микро- и мезорельефа (карьеры, отвалы, выемки, насыпи, терриконы), а также происходит новообразование и/или активизация природных процессов. В результате наблюдается существенная перестройка рельефа: увеличиваются протяженность и глубина вреза оврагов, неустойчивыми становятся склоны (происходят оплывы грунтовых масс, обрушение блоков породы и др.), формируются бугры пучения пород, термокарстовые просадки поверхности и др.

Естественно, что наиболее сильные изменения рельефа происходят при развитии горнодобывающей промышленности. Так, в Воркуте шахтная разработка угольных месторождений привела к созданию терриконов высотой до 50 м, которые изменили облик рельефа на площади более 2 км². В Якутии Нерюнгринский карьер с открытой добычей угля достигает многих сотен метров в диаметре и многих десятков метров в глубину. Создание таких гигантских карьеров не только изменяет облик ландшафта, но и влияет на сейсмичность территории. По данным Б.А.Оловина, при открытой разработке россыпных месторождений в циклах выемка-отвалообразование происходит понижение базиса денудации склонов, возрастает интенсивность склоновых процессов, при которых идет перемещение больших масс породы (Охрана ..., 1980). При стекании оттаивающих тиксотропных грунтов обнажаются и вытаивают подземные льды, образуются просадки поверхности глубиной до 3-5 м. Такого типа изменения ландшафтных условий происходят на больших площадях.

При строительстве на участках, где широко распространены неустойчивые торфяные и сильнольдистые грунты, часто производится их замена. Эти нарушения исходных условий в комплексе с тепловым влиянием сооружений, изменениями микроклимата и режима поверхностных вод на застраиваемых участках приводят к изменению термовлажностного режима пород, часто сопровождаемому неравномерным по площади и глубине многолетним оттаиванием или новообразованием мерзлоты. Естественно, что именно эти изменения являются наиболее сильными по возможным практическим последствиям. К значительным можно отнести и такие изменения грунтовых толщ, которые не приводят к многолетнему оттаиванию подстилающих отложений, однако, существенно

сказываются на их свойствах и на активизации инженерно-геологических процессов. Незначительными назовем такие изменения грунтовых толщ в криолитозоне, которые происходят вследствие техногенных нарушений теплообмена в сезонноталом слое, но, несмотря на изменения среднегодовой температуры и глубины сезонного оттаивания, не сказываются на инженерно-геологической оценке подстилающих пород (Природные..., 2000).

Развитие методов количественной оценки риска геокриологических процессов имеет огромное значение для рационального ведения народного хозяйства на территории криолитозоны. Наиболее эффективным инструментом оценки риска служит моделирование на основе сочетания детерминированных и вероятностных подходов. При выборе модели и правила использования исходных параметров для расчётов сталкиваются с проблемой оценки неоднородностей окружающей среды (как временных, так и пространственных). Разработаны подходы к оценке неоднородностей природной среды с учетом её иерархической организации и детальности изучения.

При анализе условий строительства и эксплуатации линейных объектов Восточной Сибири выделены неоднородности определяющих факторов на региональном и локальном уровнях. Выявление источника опасности на локальном уровне осуществляется с учетом зон влияния конкретного техногенного объекта (рис. 4.25). Данные представления о структуре природно-технических систем и зонах влияния техногенеза развивают классические подходы школы инженеров-геологов МГУ (Голодковская и Елисеев, 1989; Хименков и др., 2011).

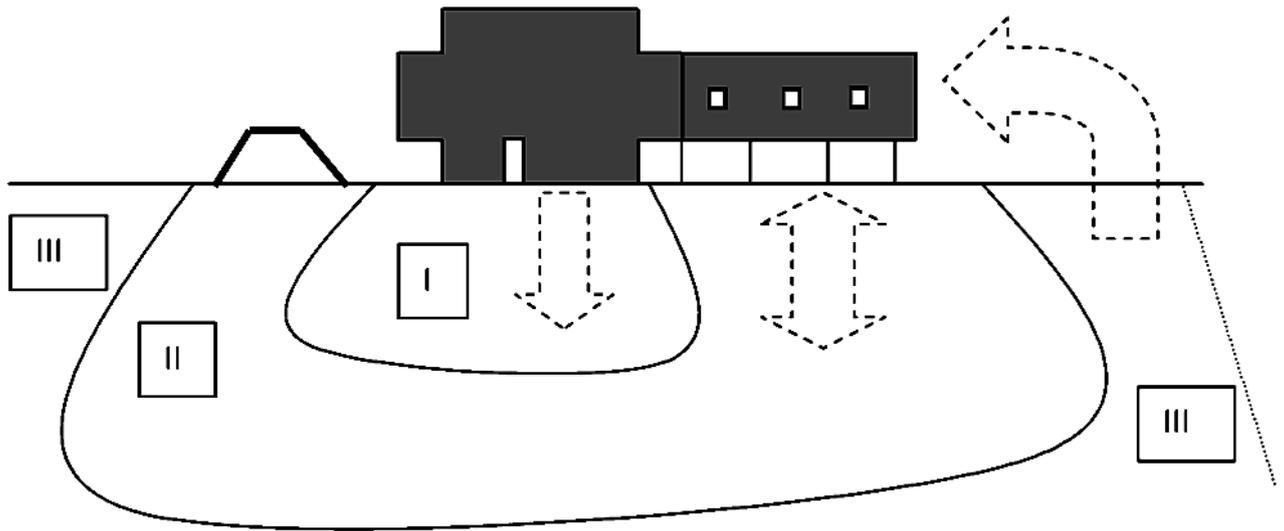


Рисунок 4.25 Зоны взаимодействия сооружений с геологической средой:

I – Воздействие сооружения определяет интенсивность негативных процессов (здания с тепловыделением, водохранилища и т.п. – рекомендуется «простой» геотехнический мониторинг по типу «доза-эффект»).

II – Интенсивность негативных процессов зависят как от природных факторов, так и от антропогенных воздействий (здания с минимизированным воздействием и элементы инфраструктуры, меняющие естественные условия теплообмена через поверхность – рекомендуется «сложный» геотехнический мониторинг, предусматривающий наблюдения как в окрестности сооружений, так и за пределами территории землеотвода).

III – Природные опасности доминируют (рекомендуется фоновый геокриологический мониторинг в пределах ненарушенных ландшафтов).

Главным научным выводом четвёртой главы является анализ причин неоднозначной реакции вечной мерзлоты на природные и техногенные воздействия.

Главным практическим выводом четвёртой главы является обобщение методического опыта анализа геокриологических опасностей для природных и техногенно нарушенных территорий, а также по разрезу толщи многолетнемёрзлых пород.

Глава 5 Адаптация хозяйственной деятельности на основе анализа геокриологических опасностей

Термин адаптация имеет чрезвычайно широкое распространение в быту, медицине, сельском хозяйстве, социальных, политических и естественных науках. Областью рассмотрения адаптации в настоящем проекте является приспособление хозяйственной деятельности общества и разработка соответствующих технических, технологических, организационных и управленческих решений по снижению социальных и материальных потерь в условиях глобального изменения климата.

Термин «адаптация» в настоящее время активно используется при обсуждении вопросов изменения климата, но, в некоторых случаях, он требует уточнения.

Определение термина претерпевало изменения за последние два с половиной десятилетия, в зависимости от контекста. В таблице 5.1 даны определения адаптации к изменениям климата как из политических, научных и технических документов разного уровня.

Таким образом, можно считать, что в широком смысле адаптация – это приспособление живых или технических систем к изменяющимся условиям среды, как с помощью человека (техническая адаптация), так и без него (природная адаптация). Применительно к любой конкретной задаче это понятие сужается и конкретизируется.

Под адаптацией хозяйственной деятельности человека к происходящим или ожидаемым изменениям природной среды в результате динамики климата, следует понимать любую деятельность, направленную на уменьшение негативных последствий климатических изменений или использование появляющихся новых возможностей для дальнейшего социально-экономического развития общества и рационального природопользования (Lemmen et al., 2008). Таким образом, адаптация к изменениям климата происходит с вмешательством человека, то есть является частью стратегии его деятельности.

Таблица 5.1 - Существующие определения термина «адаптация» (с 1992 г. по н.в.)

<i>Источник</i>	<i>Определение</i>
Европейская Комиссия, 2018	<i>Предвосхищение неблагоприятных последствий изменения климата и принятие надлежащих мер для предотвращения или сведения к минимуму ущерба, который они могут причинить, или использования возможностей, которые могут возникнуть. Хорошо спланированное адаптационное действие на ранних сроках развития последствий экономит деньги и предотвращает будущие возможные последствия.</i>
Межгосударственная комиссия по изменению климата, 2014	<i>Процесс приспособления к существующему или ожидаемому климату и его воздействиям. В антропогенных системах целью адаптации является уменьшение или предотвращение ущерба, или использование благоприятных возможностей. В некоторых естественных системах вмешательство человека может способствовать приспособлению к ожидаемому климату и его воздействиям.</i>
Руководство по адаптации. Регион Меконг. 2010	<i>Процесс подстройки (корректировки) к новым условиям, стрессам и природным опасностям, которые возникают в результате изменения климата. Адаптация к изменению климата происходит в ответ на уже осуществленное воздействие, а также в ожидании прогнозирующих воздействий.</i>
Межгосударственная комиссия по изменению климата, 2007	<i>Инициативы и меры по снижению уязвимости природных и человеческих систем от фактических или ожидаемых последствий изменения климата. Существуют различные типы адаптации: упреждающим и реактивным, частным и общественным, автономным и планируемым.</i>
Доклад Правительства Канады, 2007	<i>Любая деятельность, которая уменьшает негативные последствия изменения климата и / или позволяет нам использовать новые возможности, которые могут быть представлены</i>
Научная статья, Смит и Уандел, 2006	<i>Процесс, действие или результат в системе (домохозяйство, сообщество, группа, сектор, регион, страна), чтобы система могла лучше справиться, управлять или корректировать некоторые изменяющиеся условия, стресс, опасность, риск или возможность.</i>
Научная статья, Фюссель и Клайн, 2006	<i>Все изменения в системе по сравнению с исходным случаем, которые уменьшают неблагоприятные последствия изменения климата.</i>
Справочник ООН. Бертон и др. 1998	<i>Весь комплекс ответов на изменение климата, которые могут быть использованы для снижения уязвимости.</i>
Научная статья, Пильке, 1998	<i>Корректировки индивидуального, группового и институционального поведения в целях снижения уязвимости общества к изменению климата.</i>
Научная статья, Шерага и Грамбш, 1998	<i>Комплекс ответов или действий, предпринятых для повышения устойчивости уязвимых систем, тем самым уменьшая ущерб человеческим и природным системам от изменения климата и его вариативности.</i>
Научная статья, Ренни и Сингх. 1996	<i>Подходы, при которых местные жители, домашние хозяйства и общины изменили порядок деятельности, а также изменили свои правила и институты сообщества в ответ на уязвимость к изменениям климата, чтобы удовлетворить их потребности в средствах к существованию.</i>
Научная статья, Бертон, 1992	<i>Процесс, посредством которого люди уменьшают неблагоприятные последствия климата для их здоровья и благополучия и используют возможности, которые предоставляет их климатическая среда.</i>

Адаптационный подход заключается в том, что человек стремится не преобразовать природные условия, а развивать свою хозяйственную деятельность в согласии с природными процессами (Осипов, 2017). Следуя таким путем, общество добивается повышения природной безопасности, а также улучшения социальных, интеллектуальных и эмоциональных условий для комфортного и безопасного проживания на Земле без существенного преобразования и деградации

окружающей среды. Поэтому в хозяйственной деятельности человека адаптационный принцип считается одним из важнейших.

Важным условием адаптации считается то, что проводимые на её основе мероприятия осуществляются не вопреки законам развития природы, а должны «вписываться» в природные процессы, не вызывая их вторичного изменения. Таким образом, адаптация является эффективным механизмом управления природопользованием, позволяющим сохранять природу и одновременно использовать её для создания комфортных и безопасных условий проживания людей.

В условиях быстро развивающихся климатических изменений необходима упреждающая, заблаговременная адаптация, основной целью которой должно быть повышение сопротивляемости и устойчивости общества к происходящим в окружающей среде изменениям. Игнорирование адаптационных мероприятий вызовет увеличение уже в ближайшей перспективе числа и тяжести чрезвычайных ситуаций, приводящих к значительным экономическим затратам и возрастанию риска гибели людей.

Термин «адаптация» хозяйственной деятельности означает любую корректировку управленческих решений человека, а также функционирования деятельности существующего объекта или заблаговременное включение в проект создаваемого сооружения мероприятий, направленных на смягчение ожидаемых неблагоприятных последствий изменения климата. В связи с этим адаптацию можно подразделить на оперативную - быстро реагирующую на изменения штатного состояния и поведения уже функционирующего объекта, и запланированную – предусматривающую заблаговременное приспособление создаваемого объекта к ожидаемым изменениям и тем самым позволяющим продлить его жизненный ресурс и предотвратить возможные риски. Такие адаптационные меры часто называют упреждающими или превентивными (Burton, Smith and Lenhart, 1998).

Примером первого типа адаптации могут быть мероприятия по повышению несущей способности грунтов под работающими объектами, снизившейся в результате оттаивания мерзлых грунтов. Примером запланированной адаптации является строительство объектов в криолитозоне с заранее запроектированной

системой поддержания температурного режима пород или их инженерной защиты от возможных природных опасностей и снижения несущей способности грунтов.

Как оперативная, так и планируемая адаптация может потребовать дополнительной внешней поддержки с точки зрения финансирования, знаний и технологий по оценке того, что и как должно адаптироваться. Планирование адаптации включает широкий спектр мероприятий, в который входят последовательные процедуры по оценке изменения климата и трансформации многолетнемерзлых пород (ММП), прогноз дальнейших климатических изменений и состояния ММП, разработка механической модели и оценка несущей способности пород с учетом изменения их состояния, наконец, принятие решения по адаптации.

5.1 Процедуры оценки геокриологических опасностей как адаптационного мероприятия

Оценка геокриологических опасностей представляется процедурой информационного обеспечения управленческой деятельности. Каждый шаг такой процедуры требует описания технологии обработки данных, а этапы такой обработки предполагают принятие решения по выбору технологии дальнейшего шага анализа, либо – по выбору управленческого решения по корректировке хозяйственной деятельности, устройства инженерной защиты или других видов защитных или компенсирующих мероприятий.

Укрупненно оценка описывается целью шагов в ряду «Районирование территории по современным или историческим геокриологическим условиям» → «Геокриологический, ландшафтный и геотехнический мониторинг» → «Оценка состояния и динамики геокриологических условий» → «Геокриологический прогноз» → «Типизация и ранжирование опасностей для разных видов освоения территории».

В соответствии с Национальным планом России по адаптации к изменению климата экономические и социальные меры должны снизить уязвимость населения, экономики и природы России к последствиям изменения климата, а также использовать возможности, возникающие в результате таких изменений.

Для мерзлотоведения под адаптацией понимают меры инженерной защиты или новые конструктивные решения для уязвимых элементов инфраструктуры.

Вопросы: «Где?», "Когда?" и "Как?" имеют ответы в организации соответствующих процедур: районирования состояния и динамики вечной мерзлоты, моделирования и использование специальных показателей, и интеграции программ адаптации на разных уровнях и секторах бизнеса. На национальном уровне разрабатывается мелкомасштабный геокриологический прогноз в стиле программы GIPL Университета Аляски (Marchenko et al., 2024), а также определение территориальных и временных приоритетов адаптации, используя районирование по различному прогнозируемому состоянию мерзлоты. На региональном уровне составляется список объектов, нуждающихся в локальном геокриологическом прогнозе и защитных мероприятиях, поскольку эти объекты, размещены на территориях с прогнозируемым преобразованием мерзлотных условий. Одновременно оцениваются социальные эффекты от возможных неблагоприятных последствий воздействия мерзлоты на инфраструктуру на региональном уровне. На объектовом уровне разрабатывается локальный геокриологический прогноз и оценивается несущая способность грунтов, опираясь на рамочные результаты мелкомасштабного геокриологического прогноза, включая выбранный ранее сценарий климатических изменений. Оценивается экономическая эффективность конкурентных вариантов инженерной защиты и составляется план адаптации для выбранного объекта.

При интерпретации результатов геокриологического прогноза в общем случае долговременные тренды изменений геокриологических условий ценны для проектировщиков, выбирающих тип фундамента и другие инженерные решения для обеспечения устойчивости сооружения. Кратковременные осцилляции и экстремумы изменений геокриологических условий важны для прогноза активизации криогенных процессов и должны учитываться при проектировании сетей геотехнического мониторинга.

Выделенные геокриологические опасности исследуются путём геокриологического прогнозирования с учётом пространственных и временных факторов (табл. 5.2). Подходы к построению операционных схем оценки геокриологического риска могут быть многообразны.

Таблица 5.2 Типизация алгоритмических схем оценки риска в связи с его факторами.

Пространственные факторы риска	Временные факторы риска			
	Фактические данные		Сценарии	
	среднемноголетние ландшафтно-климатические характеристики и аномальные природные явления	история прошлых техногенных воздействий и типичные актуальные техногенные воздействия	многолетние изменения ландшафтно-климатических характеристик и аномальных природных явлений	многолетние изменения техногенных воздействий на разных стадиях освоения территории/жизненного цикла предприятия
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Недостаточная изученность территории в части закономерностей распространения льдистых и/или засоленных толщ	Расчёт риска неблагоприятного исхода в следующем году с привлечением литературных данных по типичному строению и температурному режиму грунтов	Расчёт риска неблагоприятного исхода в следующем году для заданного проектного решения и наихудших грунтовых и климатических условий	Расчёт риска на стадию жизненного цикла с учётом климатических трендов или по данным климатического моделирования	Расчёт риска на стадию жизненного цикла с учётом меняющихся во времени техногенных воздействий
Неоднородности грунтовых характеристик, обусловленные неизвестной историей развития ландшафта	Расчёт риска неблагоприятного исхода в следующем году для ландшафтов, находящихся на разных стадиях криогенного преобразования	Расчёт риска неблагоприятного исхода в следующем году для заданного проектного решения и спектра грунтовых и климатических условий	Расчёт риска на стадию жизненного цикла предприятия с учётом моделирования развития геокриологических процессов	Расчёт риска на стадию жизненного цикла предприятия с учётом переменной техногенной нагрузки
Недостаточная изученность закономерностей развития геокриологических процессов (положение «слабых звеньев» в ландшафте)	Расчёт риска неблагоприятного исхода в следующем году для участков развития геокриологических процессов	Расчёт риска неблагоприятного исхода в следующем году для «слабых звеньев» ландшафта	Расчёт риска на стадию жизненного цикла для участков, выбранным по результатам фонового мониторинга	Расчёт риска на стадию жизненного цикла для участков, выбранным по результатам геотехнического мониторинга
Неопределённости выбора участков освоения	Расчёт риска неблагоприятного исхода в следующем году для конкурентных участков освоения	Расчёт риска неблагоприятного исхода в следующем году для конкурентных участков освоения	Расчёт риска на стадию жизненного цикла с учётом пространственной изменчивости трендов ландшафтно-климатических характеристик и аномальных природных явлений	Расчёт риска на стадию жизненного цикла с учётом переменной техногенной нагрузки

Главное, чтобы при построении этих схем соблюдалось правило повторности оценки риска на протяжении жизненного цикла предприятия, по мере изменения

обстоятельств, влияющих на размер потенциального ущерба. Исследователь, во взаимодействии с Заказчиком оценки геокриологического риска, определяет требуемую степень детализации оценки риска, которая зависит от степени ответственности принятия решений (категории сооружения), наличия необходимых данных и объёма средств, доступных для проведения исследовательских работ.

Из полученного опыта работ проистекают два важных практических вывода:

- 1) Поверхностных геокриологических исследований недостаточно для программ адаптации. Для прогноза на срок более 5 лет необходимы наблюдения за глубинными слоями вечной мерзлоты и моделирование всего разреза вечной мерзлоты.
- 2) Наиболее сложными являются программы адаптации для протяженных линейных сооружений, так как они связаны с разнообразием ландшафтных условий и имеют различное содержание по трассе сооружения.

Каждая из стадий освоения территории (решение об инвестициях, изыскания, проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция, рекультивация и др.) характеризуются собственным набором техногенных воздействий, определяющих эволюцию природно-технических систем (ПТС) и активность геокриологических процессов в её пределах. Кроме того, различная характерная продолжительность этих этапов влияет на перечень и характеристики неопределённостей при задании сценариев геокриологического прогноза. Например, этап строительства намного короче периода эксплуатации. Для успешного строительства не обязательно прогнозировать климатические изменения. Напротив, их учёт абсолютно необходим при осуществлении геокриологического прогноза для оценки геокриологических опасностей на этапе эксплуатации.

5.2 Адаптация к геокриологическим опасностям на предпроектных стадиях освоения территории

Предпроектные стадии освоения территории включают в себя предварительные решения по размещению объектов строительства и принципиальные проектные решения. На этой стадии необходимо учитывать наличие мерзлоты как таковой, льдистость горных пород и условия развития криогенных процессов. Адаптация опирается здесь главным образом на геокриологическое районирование.

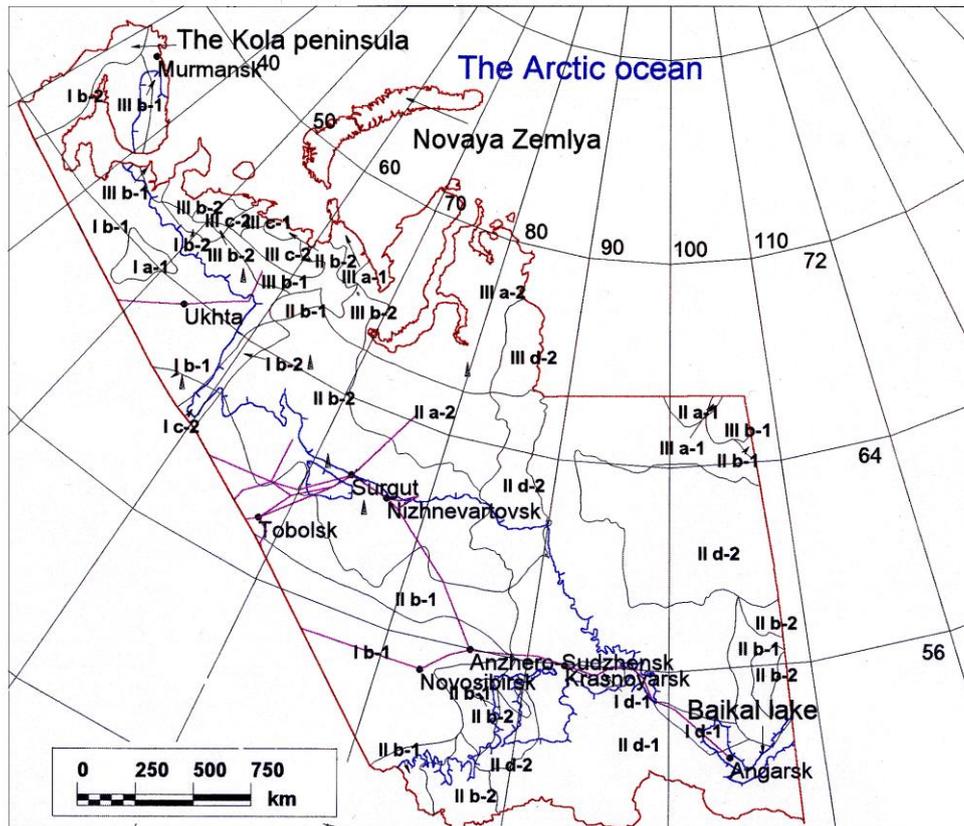
Примером реализации таких подходов являются рекомендации по выбору варианта прохождения трасс нефтепроводов на территории криолитозоны (Yavelov et al., 1998). Природные условия криолитозоны обуславливают специфическую реакцию экосистемы (почвы, животных и растительных сообществ) на разливы нефти. В почвах углеводороды нефти подвергаются химическому и биологическому разложению. Однако на территории криолитозоны это происходит медленно из-за низкой температуры воздуха и почвы в течение большей части года. Когда эффективное биологическое разложение нефти затруднено, преобладает химическое разложение.

Вечная мерзлота является преградой для движения нефтяных токсичных веществ, что приводит к накоплению этих веществ в почве. Аккумуляция увеличивается за счет низкой скорости миграции нефти в болотах, широко распространенных в районе вечной мерзлоты. Таким образом, скорость разложения и миграции токсичных нефтяных веществ в районе вечной мерзлоты ниже, чем в незамерзающих районах. В арктической зоне криолитозоны токсичные нефтяные вещества могут длительное время сохраняться в почве (Восстановление..., 1988).

Животные и растительные сообщества в районе вечной мерзлоты более уязвимы к воздействию нефти, чем в других регионах. При загрязнении нефтью растительные сообщества суши, как правило, полностью уничтожаются, а их естественное восстановление занимает от 10 до 30 и более лет (Шуйцев, 1983). Нефтяное загрязнение вызывает структурно-энергетический кризис пресноводных растительных и животных сообществ (Телегин и др., 1988; Юкнявичус, 1977). Одной из важных причин такой уязвимости является низкое биоразнообразие арктических пресноводных сообществ. Наиболее уязвимым компонентом

пресноводного сообщества являются донные виды (Телегин и др., 1988; Юкнявичус, 1977).

Зона вечной мерзлоты России – это регион жизнеобеспечения малочисленных народов Севера, образ жизни которых зависит от традиционной охоты, рыболовства и оленеводства. Разливы нефти могут оказать существенное влияние на вышеназванную хозяйственную деятельность. Фрагмент карты-схемы потенциального экологического ущерба от разливов нефти в криолитозоне России приведён на рисунке 5.1.



- Ia-1 Типологический индекс (экологический ущерб, ущерб природным ресурсам, социально-экономический ущерб)
- Границы регионов
- Граница криолитозоны
- Трубопроводы
- ▲ Районы нефтедобычи
- Населённые пункты

Рисунок 5.1 Фрагмент карты-схемы потенциального экологического ущерба от разливов нефти в криолитозоне России (пояснения в тексте).

Экологический ущерб оценивается по трем составляющим: 1) ущерб природным ресурсам; 2) ущерб экосистеме; 3) социально-экономический ущерб.

Ущерб природным ресурсам оценивается по размеру штрафов в расчете на тонну нефти, разлитой в водоемы, на почву или испарившейся в атмосферу (летучие нефтяные углеводороды). Ущерб экосистеме оценивается по скорости разложения нефти в почвах, времени естественного восстановления наземных растительных сообществ и биоразнообразию донной фауны. Социально-экономический ущерб оценивается по месту проживания этнических меньшинств северного образа жизни.

Ущерб природным ресурсам оценивается по сумме штрафов в расчете на тонну нефти, разлитой 1) в водные объекты, 2) в почву или испарившейся в 3) атмосферу (летучие нефтяные углеводороды). Плата требуется нефтетранспортной или добывающей компанией по законодательству России для возмещения ущерба окружающей среде.

Ущерб экосистеме оценивается по 1) скорости разложения нефти в почвах, 2) периоду времени, необходимому для естественного восстановления наземных растительных сообществ, 3) биоразнообразию донной фауны.

Экосоциальный ущерб оценивается по факту проживания этнических меньшинств северного образа жизни.

Карта потенциального экологического ущерба была построена с использованием стандартных методов синтеза карт. Были построены первые 7 индивидуальных карт, показывающих каждый из экологических элементов. Каждая отдельная карта содержит данные о распределении одного элемента экологического ущерба на исследуемой территории (Атлас..., 1985; Методы..., 1996). Анализ и составление отдельных карт позволили выделить район криолитозоны в отдельные территориальные классификационные единицы (таксоны). Каждый таксон характеризуется тремя индексами, которые отражают ущерб экосистеме, компенсацию ущерба природным ресурсам и эколого-социальный ущерб. Максимальный потенциальный экологический ущерб соответствует символам «Ш» (экосистемный ущерб), «d» (природный ущерб), «2» (экосоциальный ущерб), минимальный ущерб – символам «I», «a» и «1». (таблицы 5.3-5.5).

Карта-схема потенциального экологического ущерба может быть использована при проектировании нефтепроводов. Это особенно полезно при сравнении альтернативных маршрутов, позволяющих выбрать путь с минимальным ущербом для окружающей среды.

Таблица 5.3 Типизация экологических условий прокладки трубопровода (к рис. 5.1).

<i>Индекс на карте</i>	<i>Сравнительная чувствительность экосистем к нефтяному разливу</i>	<i>Биоразнообразие донных сообществ (количество видов)</i>	<i>Сравнительная скорость разложения нефтепродуктов в почвах</i>	<i>Время восстановления растительных сообществ после нефтяного разлива, лет</i>
I	Низкая	200-300	Низкая	10-30
II	Средняя	200-300	Очень низкая	10-30
III	Высокая	100-200	Практически нулевая	Более 30

Таблица 5.4 Типизация ущерба природным ресурсам при прокладке трубопровода (к рис. 5.1).

<i>Индекс на карте</i>	<i>Ущерб водным ресурсам (тыс.руб.)</i>	<i>Ущерб почвам (тыс.руб.)</i>	<i>Ущерб атмосферному воздуху (руб.)</i>
a	1100-1190	135-610	310-500
b	1100-1390	135-610	310-500
c	1100-1390	135-1220	310-500
d	1100-1490	310-1220	310-500

Таблица 5.5 Типизация социо-экономического ущерба (к рис. 5.1)

<i>Индекс на карте</i>	<i>Присутствие коренных и малочисленных народов Севера</i>
1	Отсутствуют
2	Присутствуют

Информация о потенциальном экологическом ущербе необходима при оценке экологического риска. Кроме того, результаты исследования могут быть полезны для оценки экологического риска при экологическом страховании.

Анализ полученного опыта привёл автора к мысли о том, что на данном этапе освоения территории невозможно осуществить достоверную оценку уязвимости объектов, а значит и оценить риск. Другими словами, стандартные процедуры оценки геокриологических опасностей на этапе выбора площадки для инвестиций работают плохо из-за обилия неопределённостей: неопределённостей пространственного распределения подземного льда, неопределённостей будущих

климатических изменений, неопределённостей проектных решений и их практической реализации (в России редко строят, строго следуя тому, что указано в проекте). Вследствие этого рекомендуется уязвимость заменять показателем значимости элементов инфраструктуры, предполагаемых к строительству на оцениваемой территории. Значимость может определяться заказчиком работ или автором оценки исходя из критерия длительности эксплуатации объекта и формы собственности в ряду понижения значимости: муниципальная → общегосударственная → частная (исходя из непосредственности возникновения неблагоприятных последствий воздействия геокриологических процессов на жизнь значительного количества населения).

5.3 Адаптация к геокриологическим опасностям на стадиях проектирования и строительства объектов

Стадия проектирования остро нуждается в научной поддержке при выборе конструктивных решений для правильного учёта актуальных и прогнозируемых геокриологических условий. Современные изыскания не способны решить эту задачу поскольку не предусматривают круглогодичный цикл наблюдений за температурным режимом грунтов и криогенными процессами в основании площадки строительства. Чтобы получить эти сведения, нужна полноценная мерзлотная съёмка с комплексом наблюдений в разные сезоны года (Кудрявцев и др., 1979), дополненная целевым геокриологическим прогнозом, в котором необходимо учитывать характер предполагаемых техногенных воздействий и естественные изменения геокриологических условий на протяжении жизненного цикла сооружения.

Современная практика строительства характеризуется взаимным пересечением сроков изысканий, проектирования и строительства объектов. Научное сопровождение при ускорении реализации проектов становится затруднённым: методы сбора и анализа информации и, тем более, реализация математических моделей, требуют значительного времени. Поэтому растёт роль геотехнического и производственного экологического мониторинга, который даёт возможность оперативного исправления ошибок проектирования и нарушений, допущенных при строительстве.

Например, строительство, эксплуатация и реконструкция трубопроводов всегда сопряжена со значительной нагрузкой на геологическую среду. После этапа строительства ландшафты преобразуются, при этом меняется набор и/или активность сопряжённых с ними ЭГП. Однако и на этапе эксплуатации, после наступления относительного равновесия техногенной нагрузки и реакции на неё элементов природно-технической системы, продолжаются преобразования ландшафтов и развитие ЭГП. Кроме продолжающегося воздействия самого трубопровода, осуществляются нерегулярные операции по его обслуживанию (надзорная деятельность, обследования и ремонт). Трубопроводы, строящиеся или

расположенные в криолитозоне, требуют к себе особого внимания, так как наличие многолетнемерзлых грунтов меняет характер и интенсивность ЭГП.

Вопросы организации и методического обеспечения экологического мониторинга и экологического сопровождения строительства и эксплуатации трубопроводов в настоящее время крайне актуальны и важны для практиков. Так, с 2000 до 2006 года группа специалистов Эколого-аналитического центра газовой промышленности ОАО «Газпром» совместно с Институтом геоэкологии РАН, ЗАО «Ямалгазинвест» и ОАО «Стройтрансгаз» разработала методику экологического сопровождения строительства магистральных газопроводов (Лещинский и др., 2006). Такая методика понадобилась для систематизации экологических нарушений, а также для доказательства связи документируемых признаков нарушений с понятиями природоохранного законодательства.

Основу методики составил Классификатор экологических нарушений (далее «классификатор»), который был разработан для природных условий Европейской части России применительно к этапам строительства магистрального трубопровода для контроля качества работ подрядчиков строительства. Это обстоятельство не позволяет непосредственно использовать классификатор на территории криолитозоны, где в последнее время активизируется хозяйственная деятельность. Территории с распространением многолетнемерзлых грунтов имеют целый ряд особенностей, которые учтены в законодательных и нормативно-правовых актах, ограничивающих хозяйственную деятельность.

В данном примере был сделан акцент на соотношении друг с другом внешних признаков экологических нарушений и их трактовкой в законодательных актах, то есть на установлении однозначного соответствия между внешними (визуально опознаваемыми по материалам аэровизуального обследования) признаками экологического неблагополучия на трассах магистральных трубопроводов в криолитозоне и экологическими нарушениями, терминологически определёнными в нормативных документах природоохранной направленности.

Обосновывая признаки активизации ЭГП (в том числе геоэкологических процессов), авторы опирались на опыт аэровизуальных обследований линейных объектов. Аэровизуальные обследования становятся распространёнными из-за своей относительной дешевизны и оперативности. Этот метод имеет особенное

значение для экологического мониторинга линейных объектов большой протяжённости.

Аэровизуальные обследования, дополненные на проблемных участках наземными обследованиями (рекогносцировка, геофизика, обустройство мониторинговых площадок), позволяют в сжатые сроки (1-3 месяца вместе с обработкой, архивацией и анализом данных) получать информацию о наличии нарушений природоохранного законодательства в окрестности трассы магистрального трубопровода. Одновременно контролируются последствия устранения ранее выявленных нарушений.

В результате аэровизуальных и наземных обследований составляется попикетная ведомость выявленных нарушений, признаки которых соотнесены с пунктами классификатора, а значит однозначно связаны с соответствующими позициями нормативных документов. Это позволит оценить тяжесть нарушения и рекомендовать защитные или компенсирующие мероприятия.

Позднее существующий классификатор был дополнен пунктом №16 «Активизация геокриологических процессов». Помимо этого, столбец классификатора, который в начальной редакции назывался «Этап строительства, с которым сопряжено нарушение данного вида» был переименован в столбец «Этап строительства или режим эксплуатации, с которым сопряжено нарушение». Это позволило нам расширить область применения метода: теперь классификатор можно использовать в процессе экологического сопровождения на этапах строительства и эксплуатации сооружения.

Таблица 5.6 Фрагмент классификатора экологических нарушений. Нормативные ссылки даны в соответствии с (Логунова, Сергеев, 2014).

№	Класс нарушения	Нормативные ссылки ¹	Этап строительства или режим эксплуатации, с которым сопряжено нарушение	Тип нарушения	Код нарушения ²	Возможные долговременные неблагоприятные последствия нарушения	Эталонные фотоснимки нарушения
1	2	3	4	5	6	7	8
16. ³	Активизация геокриологических процессов	(1): пп. 2.9., 4.1., 4.21., 5.2., 5.10-5.17., 6.3., 6.7., 6.8., 9.1.,	Все этапы	1. Возникновение процессов <u>термоэрозии</u> , <u>термокарста</u> (в виде затопляемых западин), солифлюкции ((1): пп. 2.9., 4.1., 5.2., 9.1., (15): пп. 3.32.)	16-1	Коренное изменение ландшафта, почв, утрата земельных ресурсов, гибель леса вследствие подтопления.	 <p>Термокарст.</p>

¹ В квадратных скобках приведен номер нормативного документа в соответствии со списком литературы, через двоеточие – пункты (параграфы, разделы) документа.

² Код нарушения включает номер вида нарушения и через дефис номер признака нарушения данного вида.

³ Первые 15 пунктов первой части классификатора опубликованы в (2).

		<p>9.33., 9.35., (8): пп. 3.4.3., 6.2. (9): пп. 9.8., 10. 23., (11): пп. 8.9., (12): пп. 5.2., (13): пп. 2.3., 2.4., 2.6., 2.7., 2.11., 4.3.8., (15): пп. 3.32., (18): пп. 14.2.- 14.4., 14.8., 14.10.</p>		<p>2. Пучение грунтов при промерзании ((1): пп. 2.9., (15): пп. 3.32.)</p>	16-2	<p>Бугры пучения могут изменить гидрологический режим, отклонив поверхностный сток, что в свою очередь может привести к заболачиванию. Нарушение поверхности.</p>		<p>Бугры пучения.</p>
--	--	--	--	--	------	---	---	-----------------------

В нём были размещены фотоснимки-эталоны, которые существенно упрощают процедуру идентификации экологических нарушений и могут служить примером при анализе экологических нарушений в ходе строительства и эксплуатации разных типов магистральных трубопроводов.

При эксплуатации протяжённых линейных сооружений (в т.ч. магистральных трубопроводов) возможны экологические нарушения, обусловленные антропогенными воздействиями при регулярном обслуживании или ремонтных работах, что обычно не рассматривается в разделе «Охрана окружающей среды» проекта сооружения. Оперативное выявление таких нарушений необходимо для минимизации воздействия объекта на окружающую среду.

Классификатор позволяет проследить следующие цепочки последствий экологических нарушений:

- Нарушение стока – образование затопленных зон – термокарст (иногда наледеобразование или образование вторичных бугров пучения) – гибель леса и разрушение почв;
- Нарушение растительного покрова (в том числе проездом техники вне полосы землеотвода) – изменение температурно-влажностного режима почв – термокарст или термоэрозия – гибель прилегающего участка леса и разрушение почв;
- Вырубка лесной растительности – изменение температурно-влажностного режима почв – термокарст – гибель прилегающего участка леса и разрушение почв;
- Пожары – изменение температурно-влажностного режима почв – термокарст или термоэрозия – гибель прилегающего участка леса и разрушение почв.

Классификатор систематизирует положения нормативных документов в части экологических нарушений при строительстве и эксплуатации магистральных трубопроводов. В дальнейшем классификатор может быть использован для составления таблицы возможности или невозможности расчета ущерба от указанных типов нарушений. Для этого могут быть использованы различные методики расчета ущерба, к примеру, «Методика определения размеров ущерба от деградации почв и земель», «Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель» и ряд других документов.

Выявленные и идентифицированные с помощью разработанного Классификатора нарушения природоохранного законодательства сами по себе не дают возможности оценить размер ущерба или подготовить прогноз последствий воздействия на окружающую среду. По сути, это первый шаг, легализирующий постановку экологической проблемы. Вслед за этим должна разрабатываться специальная программа обследований и борьбы с неблагоприятными процессами. Это позволит предотвратить вторичные последствия экологических нарушений, что особенно существенно для территории криолитозоны, так как многолетняя мерзлота имеет свойство увеличивать масштаб и/или ускорять наступление вторичных нарушений окружающей среды. Например, нарушение стока приводит к образованию затопленных зон, а в криолитозоне вторичным последствием этого процесса зачастую является образование термокарста.

Усовершенствованная методика может быть развита в дальнейшем для:

- 1) расчета ущерба окружающей среде, наносимого при эксплуатации магистральных трубопроводов, расположенных на территории криолитозоны,
- 2) обоснования оперативных управленческих решений, позволяющих ликвидировать или сократить последствия от экологических нарушений,
- 3) обоснования мер государственного воздействия на природопользователя, осуществляющего строительство и эксплуатацию магистрального трубопровода.

Другим примером является опыт, полученный автором при научном сопровождении планирования специализированного мониторинга газотранспортной системы ПАО «Газпром» в районе р.Печоры.

Целью мониторинга геокриологических процессов было поставлено получение данных о текущем состоянии многолетнемерзлых пород и его изменениях под воздействием природных и техногенных факторов, которые могут нарушить устойчивость, осложнить эксплуатацию объектов газопровода или привести к сверхнормативному воздействию технических объектов на окружающую среду. Результаты мониторинга предназначены для

непосредственного использования при принятии управляющих решений по режиму эксплуатации проектируемых инженерных сооружений газопровода.

При движении с севера на юг от р.Воркуты к р.Печоре выделяются зоны со сплошным, прерывистым, островным и редко островным распространением мерзлых пород. Среднегодовая температура мерзлых пород меняется от -3 до 0°C . С севера на юг площадь таликов увеличивается, а их конфигурация в плане, равно как и форма кровли многолетнемерзлых пород становятся всё более причудливой. Всё это отражается на составе и активности геокриологических процессов и обуславливает необходимость в организации различных по составу наблюдений на разных участках газопровода, а также обеспечение возможности оперативной корректировки программ наблюдений в зависимости от изменений геокриологической обстановки.

В рассматриваемом районе распространены следующие природно-обусловленные криогенные процессы: формирование повторно жильных льдов (северная часть участка), формирование многолетних и сезонных бугров пучения, термокарст и другие виды осадки при оттаивании, термоэрозия, термоабразия (в пределах термокарстовых озёр), склоновые процессы (солифлюкция, быстрые сплывы), наледи. При техногенных нарушениях в ходе строительства и эксплуатации объектов газопровода возможна как активизация, так и затухание природно-обусловленных процессов в связи с многолетним протаиванием и новообразованием многолетнемерзлых пород. Косвенно на геокриологические условия оказывают процессы естественного и техногенно-обусловленного заболачивания территории, характерного для долин р.р. Усы и Печоры.

В соответствии с существующим инженерно-геологическим и геокриологическим районированием рекомендуется разделить полосу строительства газопровода на Сейдинско-Усинскую и Интинско-Печорскую зоны.

Северная – Сейдинско-Усинская зона характеризуется сплошным и прерывистым распространением многолетнемерзлых пород и вероятностью развития термокарста на большинстве типов ландшафта. В пределах заболоченных

долин рек обычны заторфованные отложения с инъекционными и миграционными буграми пучения, системы повторно-жильных льдов.

Южная – Интинско-Печорская зона характеризуется развитием термокарста преимущественно на бугристых торфяниках и, в целом, меньшей интенсивностью протеканием геокриологических процессов, но большей изменчивостью геокриологических условий, чем в Сейдинско-Усинской зоне.

Мониторинг опасных геологических процессов включает:

- проведение режимных наблюдений на выделенных площадках за естественным состоянием геологической среды и ее изменениями под влиянием эксплуатации сооружений газового комплекса;
- проведение маршрутных наблюдений вдоль трассы газопровода и по периметру сосредоточенных объектов для выявления участков активизации геокриологических процессов;
- подготовку и документирование исходной информации для прогнозирования динамики геокриологических условий в связи с воздействием объектов газопровода.

Содержание мониторинга геокриологических процессов определяется, в первую очередь, риском отрицательного влияния строительства и эксплуатации линейных и сосредоточенных объектов газопровода на окружающую среду.

Геокриологические процессы контролируются как в полосе трассы ГТС шириной 2 км, так и в районе площадок КС.

На специальных площадках наблюдений (постах контроля), расположенных на территории и непосредственной близости от компрессорных станций Сейдинская, Воркутинская и Усинская контролируются следующие характеристики геокриологических процессов и природных условий (всего 3 поста контроля):

- деформации дневной поверхности (тепловая осадка, пучение);
- показатели наледеобразования (число, размеры и высота наледей);
- расположение, ширина и глубина раскрытия морозобойных трещин;
- скорости развития термоэрозии, термоабразии, склоновых процессов

- температура грунтов;
- глубина протаивания и промерзания;
- высота и плотность снега.

На специальных площадках наблюдений (постах контроля), расположенных на территории и непосредственной близости от компрессорных станций Интинская и Сынинская контролируются следующие характеристики геокриологических процессов и природных условий (всего 2 поста контроля):

- деформации дневной поверхности (тепловая осадка, пучение);
- температура грунтов;
- глубина протаивания и промерзания;
- высота и плотность снега.

На специальных пунктах контроля, расположенных на трассе газопровода в пределах наиболее характерных видов ландшафтов, наблюдаются:

- температура грунтов;
- глубина протаивания и промерзания;
- высота и плотность снега.

Количество пунктов контроля не должно быть меньше 3 между каждой из КС (всего 15 пунктов между Сейдинской и Печорской КС), а их местоположение выбирается на этапе подготовки рабочих чертежей проекта.

Общий контроль активности геокриологических процессов вдоль трассы газопровода осуществляется на основе средств дистанционного зондирования и путём наземного маршрутного визуального обследования. По результатам маршрутных наблюдений на участках трассы, где выявлены факты активизации геокриологических процессов, которые угрожают устойчивости трубопровода, создаются дополнительные наземные пункты контроля, на которых, помимо вышеперечисленных показателей, наблюдаются геодезические характеристики положения объектов газопровода (фундаменты, опоры трубопровода и т.д.).

Общий контроль геокриологических процессов проводится на основе дистанционных средств авиационного или космического базирования 1 раз в 3 года.

Измерение геокриологических параметров на постах и пунктах контроля геокриологических процессов производятся в рамках следующего регламента:

- температуры грунтов - 1 раз в месяц на пунктах и непрерывно (для получения среднесуточных характеристик) на постах контроля;
- глубина протаивания - 1 раз в месяц в летний период (с мая по октябрь);
- деформации дневной поверхности - 2 раза в год (в зимний и летний периоды);
- контроль криогенного растрескивания – 3 раза в год;
- контроль наледеобразования 1 раз в год (апрель);
- высота и плотность снежного покрова - 3 раза в течение зимы;
- контроль термоэрозии, термоабразии, склоновых процессов 2 раза в год (в июне и в сентябре).

А. Общий контроль геокриологических процессов включает выполнение аэро- или космических съемок и дешифрирование их материалов. Общий контроль включает:

- выделение участков деформации земной поверхности;
- выявление участков развития морозобойного растрескивания и деградации полигональных структур,
- выделение участков развития наледей.
- выделение участков техногенных нарушений земной поверхности.

Проявления развития геокриологических процессов наносятся на карту состояния геологической среды соответствующего участка трассы газопровода.

Б. Контроль геокриологических процессов в пунктах контроля включает посещение этих пунктов с помощью средств мобильного геологического контроля и измерение высоты и плотности снежного покрова, деформации дневной поверхности, глубины протаивания и промерзания и температуры грунтов на разных глубинах, изменения положения характерных морфологических элементов (вершина оврага, бровка уступа и т.п.).

В. Контроль геокриологических процессов на постах контроля в районе площадок КС, производится как вручную, так и автоматически, в соответствии с заданной частотой в программе управления постами. При этом контролируется температура грунтов на разных глубинах, при этом данные записываются на компьютерном запоминающем устройстве. Сбор данных производится в режиме посещения.

Посты геокриологического контроля предназначены для наблюдения за изменением геокриологических параметров на площадках КС и в их окрестности – на нарушенных и ненарушенных ландшафтах. Для контроля геокриологических процессов используются:

- геодезические реперы и марки, закрепляемые на земной поверхности и фундаментах сооружений;
- комплект для повторных геодезических измерений (нивелир, рейки);
- комплект для полевого измерения температуры в скважинах, включая автоматизированную систему сбора, регистрации и запоминания температурных данных с использованием логгера в комплекте с термокосой;
- зондировочный щуп для измерения глубины сезонного протаивания;
- снегомерные рейки и плотномеры.

Пункты геокриологического контроля также предусмотрены для наблюдения за изменением геокриологических параметров на трассе газопровода и в полосе его влияния на окружающую среду – на нарушенных и ненарушенных ландшафтах. Для контроля геокриологических процессов используются:

- геодезические реперы и марки, закрепляемые на опорах трубопровода или на поверхности валика траншеи;
- комплект для повторных геодезических измерений (теодолит, нивелир, рейки);
- комплект для полевого измерения температуры в скважинах;
- зондировочный щуп для измерения глубины сезонного протаивания;

- снегомерные рейки и плотномеры.

Часть реперов устанавливается в наиболее мобильной области очага развития процессов (обычно в центральной части), другая – за пределами очага. Измерения относительных превышений проводятся в режиме "посещения" с использованием гидростатического нивелира, который обеспечивает определение превышений между двумя выбранными точками, или традиционных геодезических приборов

Схема размещения наблюдательных реперов и марок, площадок контроля геокриологических процессов, а также скважин для наблюдения за изменениями температуры грунтов определяется на этапе проектирования комплекса сооружений компрессорных станций с учетом реальных геоморфологических, геологических и гидрогеологических условий.

Обобщённой рекомендацией по адаптации к геокриологическим опасностям на стадиях проектирования и строительства объектов является использование геокриологического районирования в качестве основного инструмента обобщения и анализа доступных актуальных, достоверных и сопоставимых данных. На этом этапе должен формироваться ГИС-проект природно-технической системы будущего объекта, в котором в последующем будут накапливаться данные геотехнического и фоновое геокриологического мониторинга и результаты обновляющегося геокриологического прогноза.

5.4 Адаптация к геокриологическим опасностям на стадии эксплуатации объектов и при общехозяйственном использовании территории

Одним из главных практических последствий потепления климата является опасность потери устойчивости жилых зданий и народнохозяйственных объектов в зоне вечной мерзлоты. Именно этим обстоятельством объясняется повышенный и в известной мере тревожный интерес, проявляемый мировой общественностью к реакции многолетнемерзлых пород на глобальное потепление.

Известно, что прочностные и деформационные свойства вечномерзлых грунтовых оснований инженерных сооружений в значительной мере зависят от температуры. Эти данные используются, в частности, существующими строительными нормами и правилами для строительства на мёрзлых грунтах при расчете оснований и фундаментов. Поэтому оценка влияния климатических изменений на устойчивость инженерных сооружений, по существу, сводится к прогнозу температурного режима грунтов в их основании.

На основе известных закономерностей теплообмена через земную поверхность (т.н. «внешнего» теплообмена) Г.С.Типенко при участии автора выполнены численные исследования температурного режима грунтов при повышении температуры воздуха.

Принималось, что все остальные климатические характеристики (солнечная радиация, высота и плотность снега, скорость ветра и др.) из года в год не меняются.

Рассмотрены два сценария изменения климата, которым соответствовали тренды температуры воздуха 0.04 и 0.08 град/год.

Моделирование проводилось применительно к природным условиям г. Якутска. Рассматривался участок, в пределах которого поверхностный 3-метровый слой представлен мелкозернистым песком со следующими характеристиками: объемная влажность 280 кг/м³; коэффициент теплопроводности 1.75 в мерзлом и 1.28 Вт/(м · К) в талом состоянии; теплоемкость соответственно 2344 и 1758 кДж/(м³·К).

К числу наиболее важных результатов численных исследований следует отнести сравнительно слабые изменения температуры горных пород. Даже при высоком темпе потепления среднегодовая температура дневной поверхности становится положительной только через 50 лет. В зависимости от избранного сценария климатических изменений, температура пород на глубине 10 м через 20 лет повышается соответственно на 0.04 и 0.16 °С, а через 50 лет – соответственно на 0.53 и 0.87 °С. При столь незначительном повышении температуры расчетные давления на песчаные и супесчаные отложения и их сопротивление сдвигу снижаются всего на 10-15% (см., например, СНиП 2.02.04-88, табл. 4).

Однако было бы преждевременным делать чрезмерно оптимистичные выводы на этом основании. Дело в том, что большинство зданий, выстроенных на территории криолитозоны по первому принципу (т.е. с сохранением мерзлых грунтов в основании), имеет свайные фундаменты с вентилируемым подпольем. Условия здесь совсем не такие, как на открытых площадках: поверхность грунта защищена в летнее время от солнечной радиации, а зимой свободна от снега, здание имеет значительное собственное тепловыделение и т.д. Наиболее значимыми факторами, определяющими температурный режим грунтов в подполье, следует признать теплообмен грунта с потоком воздуха и перекрытием над подпольем.

Экстремальные оценки изменения температуры воздушного потока при проветривании были выполнены Г.С.Типенко и Г.З.Перльштейном при участии автора для условий г. Якутска, исходя из постоянства температур перекрытия и поверхности грунта. В начальный момент расчетная глубина сезонного протаивания грунтов подполья равнялась 1.91 м. В случае повышения температуры воздуха по «умеренному сценарию», т.е. со скоростью 0.04 град/год, через 20 лет глубина протаивания грунта в вентилируемом подполье увеличится на 3.3 см и составит около 1.95 м. Температура мерзлого грунта вблизи подошвы деятельного слоя повысится на 0.5°С и составит –5.4°С. К 2050 г. глубина деятельного слоя возрастет до 2.02 м, а температура грунта будет равняться –4.4°С.

Приведенные выкладки свидетельствуют, что потепление не должно оказать катастрофического воздействия на устойчивость оснований. Этот вывод еще усиливается тем обстоятельством, что при проектировании обычно принимают

расчетную температуру грунта лишь чуть ниже той, что он имеет в естественных условиях. Применительно к рассмотренному случаю последняя составляет минус 2.0-2.5°C. По-видимому, абсолютное большинство известных случаев деформаций зданий на территории криолитозоны связано не с климатическими изменениями, а с нарушениями правил эксплуатации и ошибками при проектировании. Необходимо, однако, иметь в виду, что в указанном диапазоне температур прочность мерзлых грунтов песчаного состава все же уменьшается за 20 лет на 10%, а за 50 лет – на 20-25%. При повышении температуры воздуха со скоростью 0.08°C/год все основания на свайных фундаментах окажутся в критическом состоянии. В связи с этим необходимо подчеркнуть важность восстановления и расширения сети мониторинга инженерных сооружений, выстроенных по I принципу. Следует также уделить внимание разработке новых методов обеспечения устойчивости инженерных сооружений на территории криолитозоны, включая применение тепловых насосов и новых способов аккумуляции естественного холода в грунтах и ограждающих конструкциях.

В ряде случаев необходимо учитывать климатические изменения в условиях переменной фильтрации подземных вод в массивах горных пород. Интересным опытом оценки геокриологических опасностей послужили работы 2006 года, выполненные по заказу Вилюйской научно-исследовательской мерзлотной станцией Института мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН. В результате усовершенствована методика количественной оценки процессов тепломассопереноса в проницаемых мёрзлых породах на основе оригинальной формулировки математической задачи (Перльштейн, Типенко, Сергеев, 2006). Значимость и актуальность предпринятого исследования обусловлена опасностью прогрессирующего развития фильтрации в обход гидротехнических сооружений, факторы чего изучены недостаточно. Предыдущие аналогичные работы предполагали основное направление развития талика по нормали от линии водосбросного канала, в то время как авторы предположили совпадение направления его развития с направлением фильтрации, а также учли изменения уровня и температуры воды в водохранилище (рис. 5.2).

Главной задачей работы была оценка динамики температурного поля грунтов в правобережном примыкании плотины Вилуйской ГЭС-1,2 на основе моделирования сопряжённых процессов напорной фильтрации и оттаивания многолетнемерзлых отложений.



а)



б)

Рисунок 5.2 Динамика температуры воды в водохранилище на разных глубинах (а) и динамика уровня воды в водохранилище (б).

Исследуемый талик имеет форму трубы неправильной формы, ориентированной длинной осью вдоль водосбросного канала. Тепло от фильтрующейся воды расходуется на нагревание и оттаивание ММП, в процессе чего открываются новые пути фильтрации. В общем случае сложная геометрия растущей таликовой зоны требует постановки моделирования в трёхмерном пространстве. Однако исходных материалы, предоставленные заказчиком,

содержали значительные неопределённости, связанные с изменчивостью береговой линии водохранилища, профиля дна, начальных значений температурного поля в прибрежной зоне водохранилища и в зоне водосброса, а также начальных значений пьезометрического уровня подземных вод. Перечисленные неопределённости можно было разрешить путём ввода в модель некоторых допущений, однако это резко снизило бы её адекватность, поскольку при этом потерялась бы возможность количественной оценки точности получаемых результатов. Данное обстоятельство привело к решению отказаться от трёхмерной реализации и сосредоточиться на двухмерной плоско-симметричной задаче, в которой совместно решаются уравнения фильтрации воды и переноса тепла.

Высота (мощность) прямоугольной области моделирования составляет 250 метров, а её длина – 500 метров. На расстоянии 280 метров от левой границы области моделирования расположена цементационная завеса, призванная препятствовать горизонтальной фильтрации в слое от поверхности до глубины 20 м. Следует отметить, что указанная завеса была создана, когда талик уже существовал, что предположительно снизило её эффективность.

На рисунке 5.3 представлено расчётное поле температур по состоянию на конец седьмого расчётного года без противофильтрационной завесы. Обращает на себя внимание почти горизонтальное залегание нижней границы талика, которая на большей части расчётного сечения находится на глубине около 30 м. Можно заметить, что в вертикальном сечении талика расположение изотерм близко к симметричному. Некоторое увеличение мощности талой зоны отмечается вблизи водохранилища, что объясняется его непосредственным обогревающим влиянием. В районе нижнего бьефа плотины подошва талой зоны круто опускается вниз под влиянием роста плотности теплового потока со стороны фильтрующей воды вследствие резкого возрастания градиентов напора и, следовательно, скоростей фильтрации.

Свои сложности возникают при продолжительной эксплуатации протяжённых транспортных объектов. Это связано с неоднозначной реакцией геокриологических условий в различных типах местности, пересекаемых объектом на его протяжении (Горбунова и др., 2023; Chesnokova & Sergeev, 2017).

Российские службы эксплуатации автодорог на территории криолитозоны признали, что организация инженерно-геокриологического мониторинга позволяет обеспечить информацией процедуры оценки мерзлотных опасностей и обосновать систему защитных мероприятий (Микляев и др., 2022).

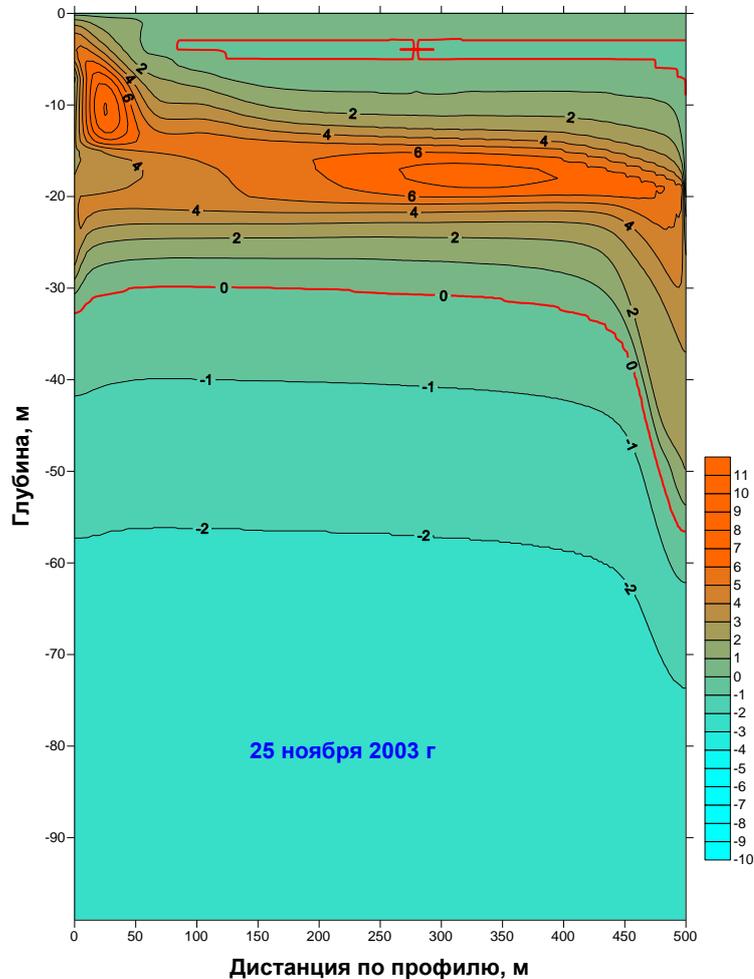


Рисунок 5.3 Температурное поле в правобережном примыкании плотины по результатам численного моделирования (расчёты Г.С.Типенко).

При реализации такого мониторинга на национальном уровне детализируется *дорожно-климатическое районирование* с учётом результатов *мелкомасштабного геокриологического прогноза* изменения фоновых геокриологических условий, вызванных климатическими переменами. Такое районирование позволит учесть территориальную специфику ведущих геокриологических процессов, наносящих ущерб инфраструктуре. В результате определяются актуальные и прогнозируемые тенденции изменения

геокриологических условий и определяется перечень неблагоприятных процессов в привязке к существующим элементам дорожно-климатического районирования.

На уровне отдельно взятой автодороги, за устойчивую эксплуатацию которой обычно отвечает отдельное Федеральное казённое учреждение Росавтодора, мониторинг концентрируется на поиске очагов активных криогенных процессов и на описании динамики этих очагов. Результатом является предварительная диагностика ведущего процесса деформации насыпи. Эта диагностика опирается на мерзлотное районирование трассы в масштабе 1:500 000 – 1: 25 000 и нацелена на обоснование приоритетов территориального расположения автоматизированных постов геотехнического мониторинга.

На уровне условно неблагоприятного участка (полосы шириной до 2 км вдоль отрезка автодороги со *сгущением очагов* нарушения насыпи криогенными процессами) выполняется мерзлотно-ландшафтное районирование с отражением временной изменчивости местоположения и других характеристик очагов проявления криогенных процессов. Оно нацелено на обоснование плана регулярных обследований.

На уровне автоматизированного поста определяется *поперечный и/или продольный разрез (профиль) основания автодороги*, определяющий основные элементы природно-технической системы, их границы, положение точек (скважин) для организации наблюдений и область моделирования для проведения геокриологического прогноза. В результате уточняется диагноз ведущего процесса, разрушающего дорогу, выполняется геокриологический прогноз и обосновывается необходимость и вид инженерной защиты.

На уровне точки наблюдения (скважины) собираются первичные данные для актуализации поперечного/продольного разреза на уровне автоматизированного поста.

Обобщённой рекомендацией по адаптации к геокриологическим опасностям на стадии эксплуатации сооружений и объектов является использование геотехнического, геокриологического и экологического мониторинга в качестве основного инструмента обобщения и анализа доступных актуальных, достоверных

и сопоставимых данных. Анализ данных нацелен на диагноз ведущего неблагоприятного процесса, приводящего к экономическому и социальному ущербу. Данные мониторинга являются основой для параметризации прогнозных моделей и позволяют обосновывать защитные мероприятия.

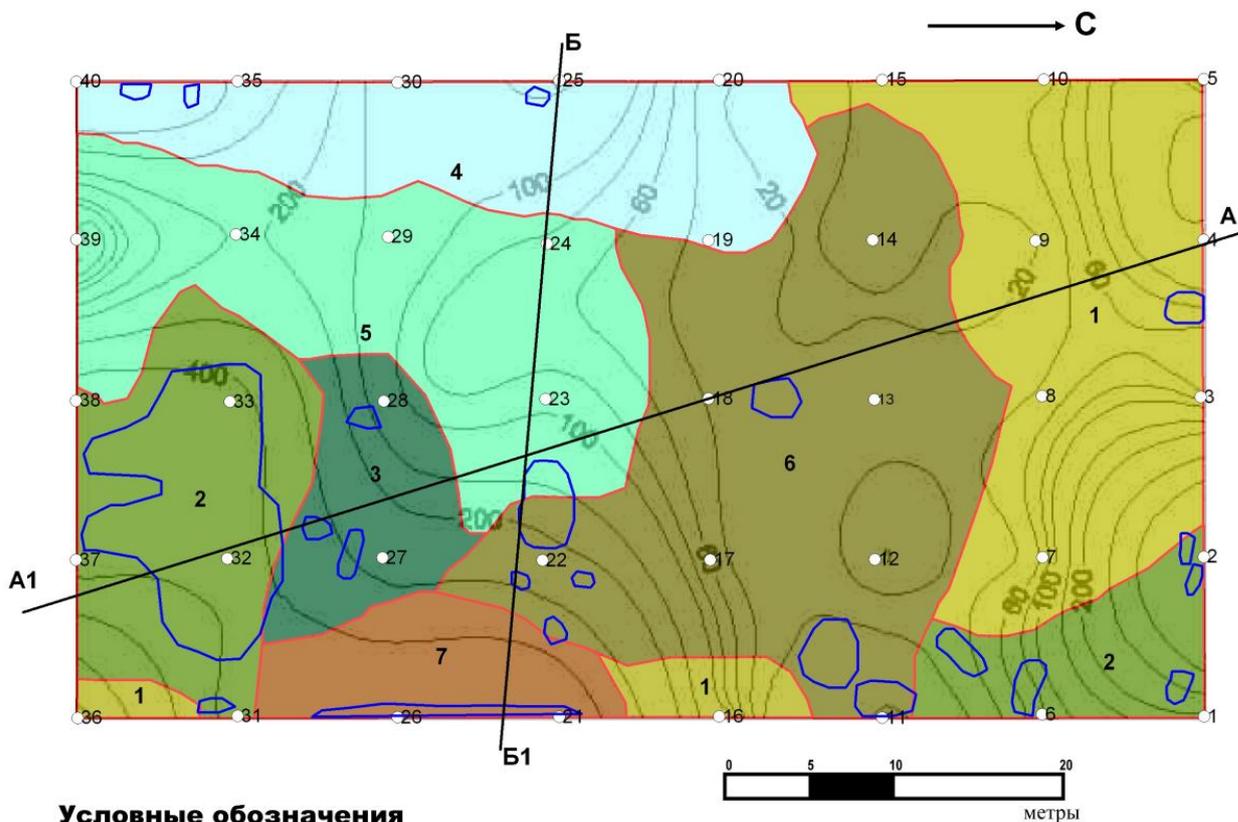
5.5 Адаптация к геокриологическим опасностям на этапе послеэксплуатационной рекультивации и учёт геокриологических опасностей при оценке накопленного ущерба

Опытom оценки динамики климатических и геокриологических условий Ямальского региона и прогноза их изменения до 2050 г. при разработке технологий и программы рекультивации земель являются работы, выполненные по заказу ВНИИГАЗ в 2010-2011 г.г. Работа заключалась в прогнозном математическом моделировании реакции многолетнемерзлых пород на проведение плановой рекультивации с учётом изменения климатических, в том числе нетемпературных, факторов теплообмена через земную поверхность.

В июле - августе 2010 г. ИГЭ РАН выполнил комплекс полевых исследований с последующей камеральной обработкой данных, полученных в районе УКПГ-2 Бованенковского месторождения. Работы проводились на участках с типичными техногенными нарушениями (буровая площадка, песчаный карьер и полоса проезда гусеничного транспорта), на которых планируется проведение работ по рекультивации нарушенных земель. На выбранных площадках изучались проявления экзогенных процессов, особенности растительного покрова, влажностный и температурный режим слоя сезонного оттаивания и изменчивости его нижней границы (рис. 5.4-5.5).



Рисунок 5.4 Техногенные нарушения вблизи законсервированной буровой скважины.



Условные обозначения

Природные территориальные комплексы

- | | |
|---|--|
| 1 | Злаково-пушицево-осоковые зеленомошные хорошо дренируемые слабо нарушенные |
| 2 | Переувлажненные осоковые слабо нарушенные |
| 3 | Переувлажненные осоковые средне нарушенные |
| 4 | Хорошо дренируемые злаково-разнотравные зеленомошные слабо нарушенные |
| 5 | Относительно хорошо дренируемые разнотравно-осоковые слабо нарушенные |
| 6 | Слабо дренируемые с разреженной разнотравно-осоковой растительностью сильно нарушенные |
| 7 | Переувлажненные лишенные растительности абсолютно измененные |

Прочие обозначения

- | | |
|----|--|
| | Границы фаций |
| 21 | Точки описаний |
| | Водные объекты (лужи) |
| | А—А1 Профили, по которым велся анализ данных |
| ↓ | скважина 124 Законсервированная скважина |
| | —20— Значения влажности грунта, % |
- На карте отмечены следующие изолинии: 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 400%

Рисунок 5.5 Ландшафтная карта-схема площадки наблюдений с распределением весовой влажности на глубине 0.15 м (составили Е.О.Брусиловская и Е.Г.Всеволожская).

При сравнительно однородном составе отложений на всей площадке основным фактором смены фитоценозов и почвенных разностей является неравномерность увлажнения деятельного слоя (рис. 5.5). Весомый вклад в ландшафтное разнообразие вносят и антропогенные нарушения. Следствием этого является пространственная изменчивость глубин сезонного оттаивания (рис.5.6).

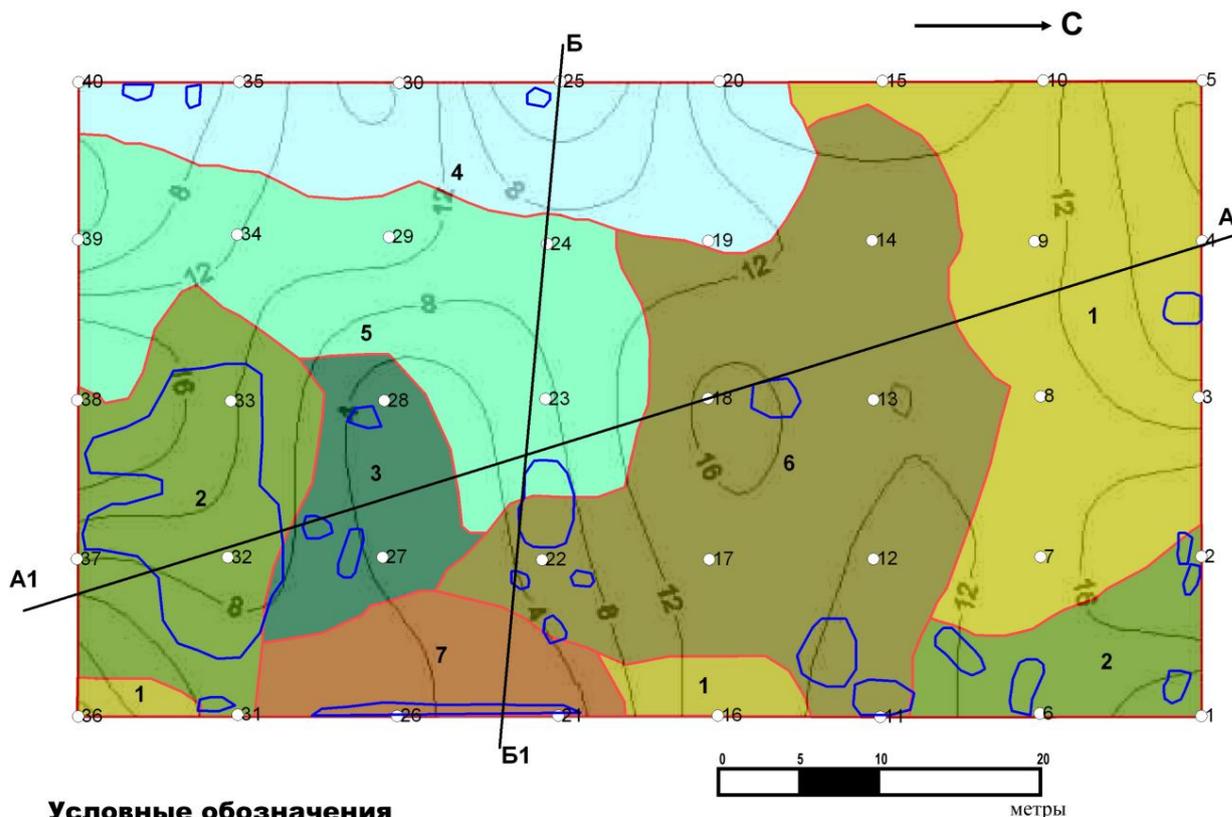


Рисунок 5.6 Ландшафтная карта-схема площадки наблюдений с распределением глубин сезонного оттаивания (составили Е.О.Брусилловская и Е.Г.Всеволожская).

Автоматизированные наблюдения за ходом влажности и температуры грунта на разной глубине и под различными типами поверхности были проведены на участках с различным характером и историей техногенных нарушений. Полученные данные по динамике температур и влажности и пространственной неоднородности глубин сезонного оттаивания использовались при калибровке численной модели температурного поля грунтов.

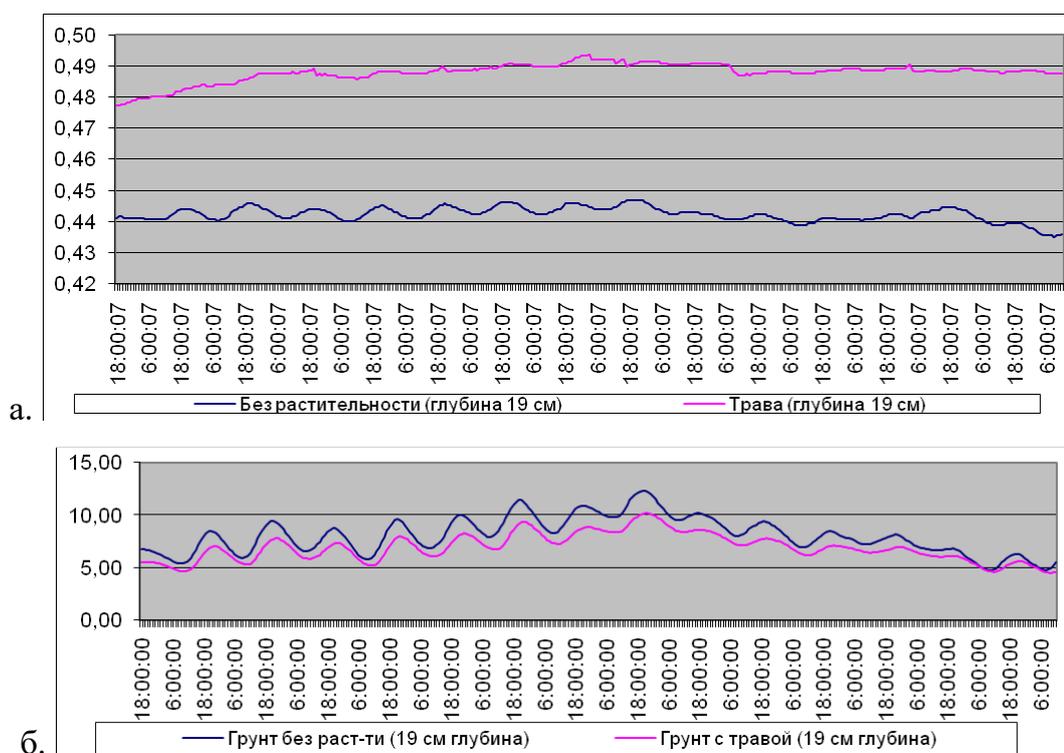


Рисунок 5.7 Измеренный ход температуры и влажности за период 4-19 июля 2010 г.: а - объёмная влажность на глубине 0.19 м; б - температура на глубине 0.19 м.

Отдельное внимание было уделено участкам нарушений со старыми колеями от автотранспорта. В настоящее время процессы термокарста по колеям стабилизировались. Заполненные водой понижения постепенно зарастают, следов активизации термоэрозионной или термокарстовой деятельности не наблюдается. Повторные техногенные нарушения по старым колеям даже на полого наклонных поверхностях не приводят к заметной активизации термокарста. В пределах площадки были установлены температурные логгеры: один в затопленной колее на глубине 15 см, другой – в оторфованном суглинке под моховой кочкой на глубине 15 см. На рис. 5.8 представлены графики, построенные по показаниям логгеров. Обращает на себя внимание, что температура в днище затопленной колеи существенно ниже, чем в кочке. Известно, что открытые мелкие водоемы, размеры которых в плане многократно превышают максимальную глубину сезонного оттаивания, оказывают отепляющее влияние на подстилающие породы. Этот факт объясняется влиянием проникающей солнечной радиации и теплоизолирующей ролью воды (Перльштейн, 2002). Часто именно по этой причине под затопленными площадями развитие термокарста носит прогрессирующий характер.

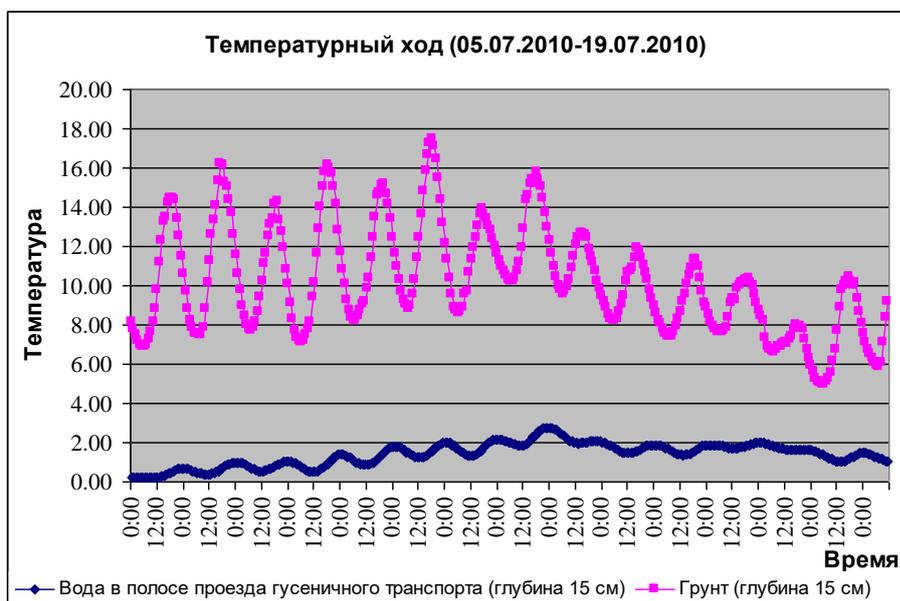


Рисунок 5.8 Температурный ход в полосе проезда гусеничного транспорта и вне ее за период 5-19 июля.

В нашем же случае ширина колеи слишком мала, и основная доля коротковолнового излучения поглощается торфяными кочками, что не позволяет воде нагреться. В результате прирост суммарных тепловых потоков из атмосферы на поверхность полос, поврежденных транспортом, оказывается недостаточным для прогрессирующего развития термокарста. Понимание этих особенностей помогает обосновать отклонение проектов масштабной рекультивации старых вездеходных следов в виде их траншейной экскавации и замены грунта. Ущерб от такой рекультивации будет значительно большим, чем остаточные изменения растительности над старыми дорогами, которые пришли в относительное температурное равновесие с окружающим ландшафтом.

Программой работ предусматривалась прогнозная оценка изменения мерзлотных условий в центральной части Ямала применительно к разработке технологий и программ восстановления земель, ранее нарушенных буровыми скважинами, песчаными карьерами и гусеничным транспортом на территории Бованенковской группы месторождений. В основу прогноза было положено математическое моделирование процессов формирования температурного режима в массиве многолетнемерзлых пород под влиянием естественных и техногенно-измененных поверхностных условий. Предполагалось нанесение на поверхность 10-сантиметрового слоя песка с последующим посевом трав.

Компьютерное моделирование температурного режима пород на площадках рекультивации проводилось по одномерной расчётной схеме. На первом этапе была осуществлена калибровка модели. Для этого использовались данные метеорологических наблюдений на стационаре Тюрин-Тоо за период 1979-1988 г.г. Из имеющегося ряда был выбран 1983 год, как наиболее приближенный по температурному режиму, с одной стороны, к среднегодовым характеристикам, с другой – к условиям 2010 года. Это позволило использовать для калибровки модели локальный двухнедельный ряд почвенных температурных и влажностных наблюдений, поскольку деятельный слой (слой сезонного оттаивания) практически не имеет «памяти» межгодовых климатических колебаний. В течение двадцати расчётных лет с постоянным климатом, соответствующим 1983 году, температурный режим пород достиг периодически установившегося состояния по всей расчетной области. Среднемесячная температура поверхностных слоев в течение года меняется от -12 до 10°C . Вблизи подошвы слоя сезонных температурных колебаний на глубине 20 м установилась температура -3.2°C (рис. 5.9). Эта величина лежит в пределах изменчивости температур, характерных для высоких террас, где расположены объекты рекультивации (Дроздов, 2004).

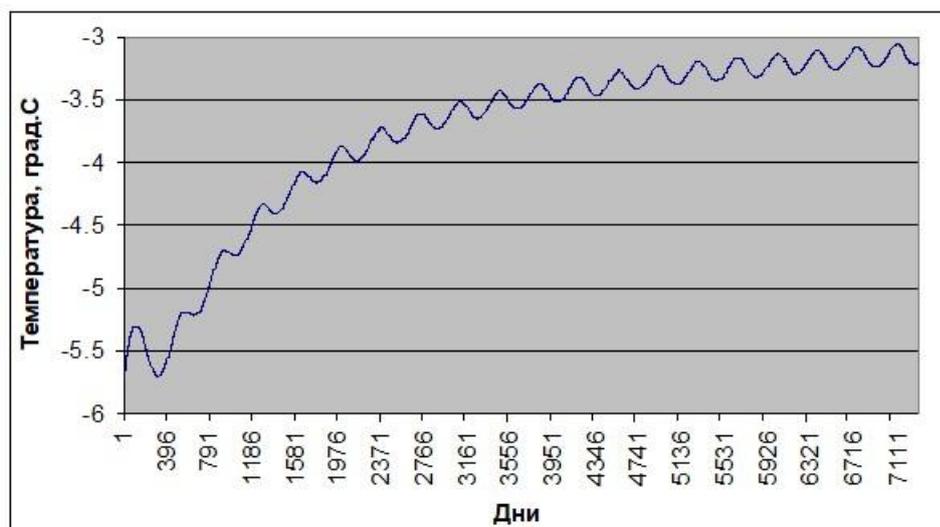


Рисунок 5.9 Расчетная температура пород вблизи подошвы слоя годовых колебаний (пояснения в тексте).

Адекватность калибровки также была проверена с помощью краткосрочных полевых наблюдений температуры и влажности грунтов в приповерхностных горизонтах грунта.

Полученное температурное поле использовалось в качестве начального при моделировании влияния рекультивации и многолетней динамики климата на температурный режим многолетнемёрзлых пород. После этого в расчётную область был включен 10-сантиметровый слой песка, перекрывающий мохово-травянистую подстилку и лишённый с поверхности растительности. При задании верхнего граничного условия для подобных расчётов всегда приходится решать вопрос о влажности приповерхностных слоев. В нашем случае мы опирались на собственные данные по динамике влажности на покрытых растительностью и оголённых участках почвы, полученные на площади песчаного карьера. Прогнозные расчеты выполнены применительно условиям неизменного климата и линейного жесткого сценария потепления.

Результаты расчёта при постоянном климате показали, что за 4 года технического этапа рекультивации температура пород вблизи подошвы слоя годовых колебаний (20 м) повысится на 0.13°C . Таким образом, песчаная отсыпка толщиной 10 см практически не окажет угрожающего воздействия на температурный режим горных пород.

Под влиянием биологического этапа рекультивации изменение температуры пород на глубине 20 м составляет всего около 0.2°C за 20 лет. Таким образом, зарастание участка травянистыми сообществами (вначале искусственно посеянными, а затем постепенно замещаемыми местными видами) не окажет практически важного воздействия на температурный режим пород.

В условиях жесткого сценария потепления климата (тренд $0.1^{\circ}\text{C}/\text{год}$) температурный режим мерзлых толщ должен измениться весьма существенно. Как показывают расчеты через сорок лет после окончания биологического этапа рекультивации температура мерзлоты повысится до -1.7°C (рис. 5.10). Для участков со слабозасоленными и незасоленными грунтами это не угрожает началом деградации мерзлых толщ. Расчетное отношение изменения температур грунта к потеплению воздуха, осредненное за этот период, равняется 0.0325.

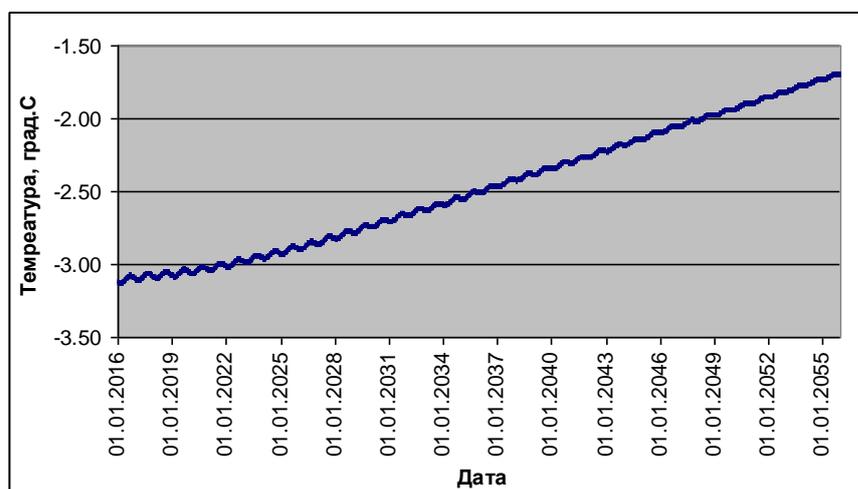


Рисунок 5.10 Прогноз температурного режима на глубине 20 м после биологического этапа рекультивации в условиях роста температур воздуха со скоростью 0.1°C в год.

Для прогноза мерзлотных условий не меньшее значение, чем повышение температуры воздуха имеет возможный рост толщины снега. К сожалению, современная наука не обладает надежными средствами оценки предстоящих изменений термического сопротивления снежного покрова. В связи с этим было проведено моделирование температурного поля ММП при скачкообразном возрастании мощности снежного покрова вдвое и неизменной температуре воздуха. В результате моделирования установлено, что при удвоении снежного покрова температура пород на глубине 20 м за 20 лет повысится с -3.2 до -1.2°C

Практические рекомендации основаны на выполненных оценках температурного режима грунтов в условиях меняющегося климата и техногенной нагрузки. Показано, что мероприятия технического и биологического этапов рекультивации не вызовут критического изменения геокриологических условий на участках незасолённых и слабозасолённых грунтов. Потепление воздуха и увеличение толщины снега также не должно привести к деградации многолетнемерзлых толщ. Тем не менее, развитие геокриологических процессов на прилегающих участках может нарушить ход природоохранных работ. В частности, такая угроза исходит от термоэрозионных оврагов, развивающихся по сети повторно-жильных льдов. При их обнаружении необходимо обеспечить отвод воды. Следует также остерегаться, плоскостного смыва с пологих склонов (что приводит к заиливанию посевов), а также переувлажнения поверхности, в том числе формирования крупных затопленных водой понижений на участках с

высокольдистыми грунтами. Основное приложение настоящей работы состоит в информационном обеспечении управленческих аспектов рекультивации, в частности, в системах геотехнического и экологического мониторинга.

Обобщённой рекомендацией по адаптации к геокриологическим опасностям на стадии рекультивации объектов является использование геокриологического прогноза последствий рекультивационных мероприятий. Накопленный ущерб за время эксплуатации сооружений включает в себя оценку совокупных изменений геокриологических условий, обусловленных техногенным влиянием.

5.6 Территориальные и отраслевые программы адаптации к геокриологическим опасностям как инструмент оптимизации управления

Адаптация к климатическим изменениям в части группы проблем, связанных со строительством и хозяйственной деятельностью на территории криолитозоны требует согласованности в применяемых мерах инженерно-технического, нормативно-юридического, организационного и информационного характера.

Адаптационные технологии и соответствующие временные горизонты планирования должны учитывать пространственно-временную структуру ожидаемых изменений климата. В целом превышение приземного потепления заданного порога происходит раньше зимой, чем летом, и отмечается раньше для наиболее северных регионов России.

На участках территории криолитозоны, проявляющих повышенную чувствительность (уязвимость) при превышении порогового потепления уже на 2°C, относительно среднего для 1981-1999 г.г., разработку и внедрение адаптационных технологий надо начинать незамедлительно, ибо ожидается, что потепление на этих территориях приведёт к существенному изменению геокриологических условий уже в ближайшие два десятилетия. В случае более низкой чувствительности территорий к превышению порогового потепления эти меры могут быть отложены на несколько десятилетий – примерно до середины века. Тем не менее, и в этом случае разработка и внедрение адаптационных технологий будет необходима.

С целью определения приоритетных направлений совершенствования технологий в рамках формирования Программы адаптации производственной деятельности к меняющимся климатическим и геокриологическим условиям разрабатывается обзорный (мелкомасштабный) геокриологический прогноз на глубину 50 лет. Прогноз должен обновляться каждые 5 лет с использованием уточнённых сценарных и мониторинговых данных. Результаты мелкомасштабного геокриологического прогноза используются в качестве входных параметров в локальных прогнозных моделях объектового уровня.

Обзорный геокриологический прогноз использует усреднённые по каждому контуру ландшафтной карты масштаба 1:5 000 000 характеристики выбранного климатического прогнозного сценария (рекомендуются сценарии семейств CanEsm2 и Miroc-esm), начального вертикального распределения температур, послонной теплофизической характеристики горных пород и величину внутриземного теплового потока. Кроме того, требуется задать сезонный режим термического сопротивления растительного и снежного покровов в разрешении не хуже, чем среднемесячные значения. Прогноз реализуется на базе одномерной численной модели любой разработки. Модель должна учитывать частичность фазовых переходов воды и гидратов газов в спектре температур и засоленность пород. Модель должна выдавать на выходе матрицу геотемпературных данных суточного разрешения по глубинам расположения узлов расчётной сети, сгущающейся в областях активных изменений температурного режима. Такая матрица позволяет вычислять вторичные показатели, служащие для характеристики временной динамики геокриологических условий, которые значимы с точки зрения развития неблагоприятных процессов и оценки устойчивости инженерных конструкций и используются при разработке адаптационных программ объектового уровня.

Результаты прогноза отображаются на карте-схеме прогнозных геокриологических опасностей масштаба 1:5 000 000 и используются для определения временных и территориальных приоритетов адаптационной деятельности.

При составлении адаптационных программ разного уровня определяется ключевая адаптационная технология, разработка и внедрение которой

обуславливает успех адаптационных мероприятий. Примеры основных технологий приведены в Таблице 5.7.

Таблица 5.7 Основные адаптационные технологии в последовательности адаптационных мероприятий.

Основное содержание последовательности адаптационных мероприятий	Основная адаптационная технология
1. Составляется общероссийский геокриологический прогноз, по которому определяются районы с ожидаемыми изменениями и определяется очерёдность этих изменений (ранние события делают территорию более приоритетной).	Районирование территории по уязвимости многолетней мерзлоты грунтов к климатическим изменениям.
2. Составляется список дочерних обществ, ответственных за подготовку совместных программ адаптации для приоритетных территорий.	Районирование территории по основным элементам инфраструктуры и применяемым технологиям добычи и транспортировки газа, подверженным геокриологическим опасностям.
3. Для каждой территории подготавливаются два списка (существующих и проектируемых) объектов, для которых необходима разработка локальных планов адаптации.	Выявление ключевых проблем объектового уровня, связанных с изменениями геокриологических условий.
4. Для каждого из объектов выполняется геокриологический прогноз, входными параметрами фоновых геокриологических изменений которого служат результаты общероссийского прогноза и данные локального геотехнического и экологического мониторинга, дополненные экспресс-обследованиями.	1) Совершенствование и объединение систем геотехнического и производственного экологического мониторинга 2) Разработка информационного сопряжения процедур и данных локального геокриологического прогноза и геотехнического мониторинга.
5. На основе данных локального геокриологического прогноза выполняются механические расчёты устойчивости, исходя из которых разрабатывается планы локальных защитных или компенсирующих мероприятий (отдельно для существующих и для проектируемых объектов), а также уточняется программы геотехнического и экологического мониторинга.	Разработка типовых трёхмерных термомеханических моделей устойчивости инженерных сооружений, необходимых для сравнительной оценки эффективности различных защитных и/или компенсирующих мероприятий.

Ключевые адаптационные технологии выбираются с обязательной характеристикой их технологичности (простота реализации), временных затрат, денежных затрат и показателями контроля эффективности.

На основе общих и специальных геокриологических карт мелкого масштаба разрабатываются рекомендации, в число которых, в зависимости от требований потребителей, могут войти:

- территориальные администрации различного уровня (для составления планов социально-экономического развития территорий);
- подразделения МЧС различного уровня (для планирования мероприятий на случай возможных природных и техногенных катастроф);
- инвестиционные компании (для оценки рисков и издержек в связи территориально-отраслевыми геокриологическими опасностями);
- страховые компании (оценка рисков возможных природных и техногенных катастроф);
- отраслевые министерства и ведомства (для оценки развития производства на территориях криолитозоны);
- частные и государственные компании для оценки возможных последствий хозяйственной деятельности (при изменении технологий, строительстве новых объектов, проведении защитных мероприятий);
- проектные организации (для учета геокриологических опасностей при проектировании);
- общественные экологические организации (для контроля хозяйственной деятельности и проектных решений, представляющих опасность для природной среды регионов, расположенных в криолитозоне).

Приведённый список потребителей должен быть уточнён и дополнен путём обсуждения вопроса с представителями заинтересованных министерств, служб и агентств. Перечисленные виды потребителей объединяются в следующие категории:

1. Органы государственного управления (в части функций формирования государственной политики, разработки нормативной документации,

- планирования и контроля);
2. Проектные, изыскательские и строительные организации (в части функций разработки нормативно-технической документации, а также в части проектирования и строительства сооружений);
 3. Организации-природопользователи (в части функций эксплуатации природных ресурсов и сооружений, зависящих от состояния окружающей среды на территории криолитозоны);
 4. Прочие граждане и организации (в части функций фундаментальных исследований, обучения и пр.).

Изменения климата и обусловленная ими динамика геокриологических условий имеет различное значение для названных категорий пользователей, что должно учитываться при характеристике территориальной приуроченности геокриологических опасностей. Например, для первой категории пользователей требуется привязка к административно-территориальному делению соответствующей степени детальности, для второй категории — к инженерно-климатическому районированию, для третьей и четвёртой категорий — к природно-территориальному делению (ландшафтному или водно-бассейновому районированию) и т.д. При этом каждая единица выбранного типа территориального деления характеризуется комплексом существующих и потенциальных геокриологических опасностей, различных для разных видов хозяйственной деятельности.

Таким образом, научное сопровождение хозяйственной деятельности на территории криолитозоны основывается на совокупности взаимно согласованных:

- актуальных, сопоставимых, достоверных и полных исследовательских (архивных) и мониторинговых данных;
- результатов ретроспективных и прогнозных расчётов температурного состояния вечной мерзлоты; локальные прогнозы состояния природно-технических систем используют данные регионального и глобального геокриологического прогноза в качестве граничных условий;

- районирования пространственного распределение актуальных и прогнозируемых геокриологических опасностей и событийную временную шкалу ожидаемого возникновения геокриологических опасностей.

Анализ геокриологических опасностей в условиях меняющегося климата необходим для использования в качестве основы принятия адаптационных управленческих решений на территории криолитозоны, при этом:

- наличие геокриологической опасности определяет принятие региональных решений о необходимости разработки адаптационных программ;
- степень геокриологической опасности определяет преимущественно территориальные приоритеты разработки адаптационных программ;
- динамика геокриологической опасности определяет преимущественно временные приоритеты разработки адаптационных программ.

Управление рисками предполагает переход к более широкому использованию методов гибкого управления температурным режимом грунтов, в противоположность относительно статичной инженерной защите (СОУ, теплоизоляция и т.п.).

Главным научным результатом пятой главы является развитие адаптационного подхода к планированию хозяйственной деятельности в части оценки и прогнозирования геокриологических опасностей для инфраструктуры.

Главным практическим выводом пятой главы является показанная специфика оценки геокриологических опасностей на разных стадиях освоения территории: при проектировании, строительстве, эксплуатации и рекультивации. Показаны приёмы выработки программ адаптации хозяйственной деятельности к меняющимся климатическим и геокриологическим условиям.

Заключение

Методологической основой анализа геокриологических опасностей в условиях меняющегося климата и техногенной нагрузки является согласование программ мониторинга, геокриологического районирования и составления геокриологических прогнозов. Методологическим путём анализа геокриологических опасностей служит разработанная процедура, определяющая желательную очерёдность проведения полевых, камеральных и лабораторных исследований.

Диссертация содержит научно обоснованные технологические решения по совершенствованию научного сопровождения изысканий и процедур по обеспечению безаварийной эксплуатации инженерных объектов. Внедрение результатов настоящей работы показало высокую эффективность обеспечения устойчивого развития субъектов природопользования и региональных бюджетов страны благодаря оптимизации временного распределения затрат, сопряжённых с мероприятиями по инженерной защите территории. Проверка результативности разработанных методов и подходом была осуществлена в ходе хозяйственных работ с подразделениями компаний Газпром, Транснефть, Алроса.

Основными научными достижениями работы являются:

1. Раскрытие содержания понятия геокриологической опасности как современной или прогнозируемой инженерно-геологической, либо экологической ситуации любого масштаба, связанной с развитием геокриологических процессов, которая порождает вероятность вреда существующим или проектируемым техногенным объектам, ресурсам, экосистемам, а также вероятность нарушения плановой хозяйственной деятельности. Охарактеризованы пространственные и временные неопределённости, возникающие при характеристике геокриологических опасностей, учёт которых необходим при постановке задач геокриологического прогноза. Предпосылками (источниками) существования скрытой (непроявленной или потенциальной) геокриологической опасности являются находящиеся в грунтах льды, воды переменной засоленности и газы в различных формах

(свободной, растворённой и гидратной), сформировавшиеся в результате изменения геокриологических условий в прошлом.

2. Для идентификации реализованной геокриологической опасности достаточно установления любого из фактов:

- смены состояния вечной мерзлоты;
- активности геокриологических процессов, в т.ч. при неизменных геокриологических условиях.

Условиями реализации (проявления) природных геокриологических опасностей являются текущие или предстоящие климатические и ландшафтные изменения. Природные геокриологические опасности усугубляются антропогенными воздействиями на условия теплообмена через земную поверхность или в грунтовых массивах.

3. Характеристика геокриологической опасности опирается на описание фонового (естественного) состояния ММТ, которое осуществляется по комплексу осреднённых по времени (сезонных по полупериодам охлаждения и нагревания, а также годовых и трёхлетних) характеристик:

- полей температуры и влаго- и льдосодержания (применяются для описания пределов пространственной изменчивости свойств ММТ);
- геометрии криолитологических элементов (тел) и неоднородностей тепло- и воднофизических свойств слагающих их пород (применяется для построения модельной области при геокриологическом прогнозировании);
- режима теплообмена криолитологических тел и теплообмена через земную поверхность: их сезонных характеристик, межгодовых осцилляций и тенденций за различные периоды – от 5 до 30 и более лет (применяется для калибровки и верификации геотемпературных моделей).

4. Обоснованы принципы адаптации на территории криолитозоны, основанные на новом взгляде на сущность геокриологических опасностей, который заключается в пространственном выделении участков с неблагоприятным криолитологическим строением (пространственная составляющая опасности), и из меняющейся во времени вероятности развития геокриологических процессов, зависящей от климатических изменений и режима техногенной нагрузки (временная составляющая опасности). «Пространственный» риск может быть уменьшен за счёт

улучшения качества предпроектных инженерных изысканий, а «временной» риск – путём принятия оптимальных проектных решений, а также благодаря оперативному реагированию на ухудшение геокриологической ситуации, отслеживаемой при геотехническом мониторинге в ходе эксплуатации сооружения.

5. Комплексный пространственный и временной анализ геокриологических опасностей рекомендуется основывать на соединении материалов мерзлотной съёмки с результатами прогнозного математического моделирования температурного режима ММТ, которое калибруется и верифицируется по ретроспективным расчётам с использованием сопряжённых данных климатического, экологического, геокриологического и геотехнического видов мониторинга. Локальные прогнозы взаимодействия ММТ с техническими объектами основываются на входных данных, получаемых при мелкомасштабном региональном прогнозе изменения фоновых геокриологических условий.

6. Предложены направления совершенствования методики геокриологического прогноза для количественной оценки стоимости строительства и содержания инфраструктурных объектов (добыча полезных ископаемых, селитебные территории, транспорт). Уточнены требования к точности и глубине геокриологического прогноза, зависимые от вида хозяйственного освоения и стадии освоения территории. Долгосрочный прогноз рекомендован при территориальном комплексном планировании, а кратко- и среднесрочный прогноз для минимизации убытков от неблагоприятных геологических процессов для обеспечения устойчивости инженерных сооружений, обосновании режима хозяйственной деятельности, защиты природных ресурсов или экосистем, а также мероприятий по инженерной защите территории.

7. Показана необходимость регулярного пересмотра оценок геокриологических опасностей по ходу эксплуатации сооружения на разных стадиях его жизненного цикла.

8. Автором установлено, что анализ геокриологических опасностей в условиях меняющегося климата необходим для использования в качестве основы принятия адаптационных управленческих решений на территории криолитозоны, при этом:

- наличие геокриологической опасности определяет принятие региональных решений о необходимости разработки адаптационных программ;

- степень геокриологической опасности определяет преимущественно территориальные приоритеты разработки адаптационных программ;
- динамика геокриологической опасности определяет преимущественно временные приоритеты разработки и содержание адаптационных программ.

Автор благодарен академику В.И.Осипову за внимание к работе, ценные советы и конструктивные замечания. За постоянную поддержку автор признателен своей жене И.А.Уткиной, коллективу Института геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН, всем сотрудникам лаборатории геокриологии им. Г.З.Перльштейна, а также В.Г.Подгорбунскому, М.Н.Железняку, В.Е.Романовскому, Ю.Л.Шуру, С.Н.Булдовичу, И.В.Чесноковой, А.П.Безделовой, А.И.Тюрину, общение с которыми на разных этапах способствовало развитию изложенных в работе идей и представлений. За всестороннюю поддержку и терпение огромное спасибо моей семье и близким. Автор хранит светлую память о наставниках и выдающихся учёных, оказавших влияние на выбор профессионального пути и формирование научных интересов: Н.Н.Романовском, Г.З.Перльштейне, В.Н.Зайцеве, В.П.Волковой, Л.Г.Афонской, З.И.Баташёвой, М.И.Заболотской, Н.В.Гордеевой, С.М.Фотиеве, Д.М.Шестернёве, Т.Н.Жестковой, О.К.Миронове, С.П.Горшкове.

Список использованных источников

1. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России // Метеорология и гидрология, 2002, № 6, с.15-22.
2. Анисимов О.А., Лавров С.А. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК // Технологии ТЭК (3), 2004, с.78-83.
3. Афанасенко В.Е., Гарагуля Л.С., Оспенников Е.Н., Нистратова Т.А. Развитие опасных геокриологических процессов на центральном участке БАМ // Геоэкология. 1995. № 4. С.94-103.
4. Белопухова Е.Б. Особенности современного развития многолетнемерзлых пород Западной Сибири // Региональная геокриология: Докл. II Междунар. конф. по мерзлотоведению. Якутск, Инт мерзлотоведения СО АН СССР, 1973, с. 84–86.
5. Бердников Н.М. Картографическая визуализация ожидаемого изменения южной границы области распространения многолетнемерзлых пород в Западной Сибири // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 4, с. 3-15. DOI: 10.15372/KZ20240401.
6. Божинский А.Н., Загрязкин Д.Д., Романовский Н.Н. Оценка устойчивости крупнообломочных отложений курумов // Геоэкология, №2, 1997, с. 78-88.
7. Браун Дж., Граве Н.А. Нарушение поверхности и ее защита при освоении Севера. Новосибирск: Наука, 1981, 88 с.
8. Вабищевич П.Н. Метод фиктивных областей в задачах математической физики // Москва, МГУ, 1991, 156 с.
9. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006, 251 с.
10. Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н. Общая теория рисков. Учебное пособие // М.: Издательский центр «Академия», 2008, 368 с.
11. Власов А.Н., Саваторова В.Л., Талонов А.В. Описание физических процессов в структурно-неоднородных средах: Учебное пособие. – М.:РУДН, 2009, 258 с.

12. Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем / Сб. науч. тр. Москва : Наука, 1988, 253 с.
13. Всеволожский В.А., Куринова Т.А. Водный баланс зоны интенсивного водообмена в районах с южным типом криолитозоны // В сб.: Геокриологические и гидрогеологические исследования зоны свободного водообмена. Москва, Наука, 1989, с. 13–23.
14. Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И. Типизация изменения геологической среды криолитозоны при обустройстве газовых месторождений (на примере Западной Сибири) // Вестн. ун-та. Сер. геол. 1997. № 6. С. 47-54.
15. Геокриологические опасности. Тематический том в серии «Природные опасности России» / под ред. Л.С. Гарагуля, Э.Д. Ершова. М.: Издательская фирма «КРУК», 2000. 316 с.
16. Геокриологический прогноз для Западно-Сибирской газоносной провинции / Отв. ред. С.Е.Гречищев. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1983. 182 с.
17. Геокриология СССР, под ред. Э.Д.Ершова / М.: Недра, том 1. Европейская территория СССР. 1988, 360 с.
18. Геокриология СССР. Средняя Сибирь // Москва, Наука, 1989, 414 с.
19. Геологическая среда центрального участка зоны БАМ как объект хозяйственного освоения. М.: Изд-во МГУ, 1985. 204 с.
20. Геоэкология Севера. М.:Изд-во МГУ,1992, 270 с.
21. Гиличинский Д.А. Сезонная криолитозона Западной Сибири М.: Наука, 1986, 143 с.
22. Голодковская Г.А., Елисеев Ю.Б. Геологическая среда промышленных регионов // М.:Недра, 1989, 220 с.
23. Горбунова А.А., Зарипова Г.З., Исаев В.С., Манский В.Н., Собин Р.В., Сергеев Д.О., Безделова А.П. Временные и пространственные закономерности проявлений криогенных процессов при эксплуатации железных дорог в южной части большеземельской тундры в условиях изменяющегося климата // ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2023, № 3, с. 15–25. DOI: 10.31857/S0869780923020054, EDN: TWJZJD

24. Грива Г.И. Геоэкологические условия разработки газовых месторождений полуострова Ямал. Автореф. док. дисс., Томск, 2006, 46с.
25. Грива Г.И., Мерзляков В.П., Павлов А.В., Перльштейн Г.З., Сергеев Д.О., Типенко Г.С., Хименков А.Н. К проблеме природных и техногенных катастроф на территории криолитозоны в условиях глобальных изменений климата // Изменение окружающей среды и климата, природные и связанные с ними техногенные катастрофы, том 3: Опасные природные явления на поверхности суши: механизм и катастрофические следствия, ИГ РАН, Москва, 2008, с.59-73.
26. Дроздов Д.С. Информационно-картографическое моделирование природно-техногенных сред в геоэкологии. Автореферат дис. доктора г-м. н., Тюмень, 2004. 49 с.
27. Зотова Л.И., Конищев В.Н., Тумель Н.В., Соломатин В.И. и др. Кризисные экологические ситуации в криолитозоне. В сб. «География»; - М., : изд-во МГУ, 1993, с.203-215.
28. Зотова Л.И., Тумель Н.В. Формирование кризисных экологических ситуаций в криолитозоне // Вестник Международной академии наук по экологии и безопасности жизнедеятельности, № 8 (20), 1999.
29. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. Москва: Гидрометеиздат, 1984, 560 с.
30. Исаченко А.Г. Ландшафты СССР // Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1985, 320 с.
31. Истомин В.А., Якушев В.С., Махонина Н.А., Квон В.Г., Чувилин Е.М. Эффект самоконсервации газовых гидратов. Специальный выпуск. Газовые гидраты. Приложение к журналу «Газовая промышленность». 2006, с.36-46.
32. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изучение изменений распространения термокарстовых озер России по разновременным космическим снимкам // Криосфера Земли, 2009, т. 15, №2, с. 16-26.
33. Кудрявцев В.А. Динамика вечной мерзлоты в бассейне среднего течения р. Селемджи и связанные с ней условия строительства в этом районе. Тр. Комит.по вечн. мерзл., т. VIII. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1939, с.81-118.

34. Кудрявцев В.А. Исходные положения теплофизических (геофизических) основ мерзлотоведения // в Сб.: Проблемы геокриологии. М.: Наука, 1983, с. 21-27.
35. Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Романовский Н.Н., Максимова Л.Н., Чижов А.Б. Методика мерзлотной съемки / Изд-во Московского университета, 1979, 358 с.
36. Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции / Под ред. Е.С.Мельникова. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1983. 165 с.
37. Лейбман М.О. Динамика слоя сезонного протаивания пород и методика измерения его глубины в различных ландшафтах Центрального Ямала. Криосфера Земли. Т.5. №3, 2001, с. 17-25.
38. Лещинский В.Б., Михеев А.А., Сергеев Д.О., Сергеев О.Н., Старцев Ю.П., Явелов А.В. Разработка и апробация методики экологического сопровождения строительства магистральных газопроводов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2006, № 3, с. 264-273.
39. Логунова Е.Н., Сергеев Д.О. Развитие методики экологического сопровождения строительства и эксплуатации магистральных трубопроводов на территории криолитозоны // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2014, № 3, с. 277-285.
40. Макарычева Е.М. Региональный анализ распространения термокарстовых явлений в окрестности магистральной нефтепроводной системы / Диссертация на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук. Москва, 2018, 256 с.
41. Макарычева Е.М., Капралова В.Н., Сергеев Д.О. Анализ режима водной поверхности термокарстовых озёр в горах Северного Забайкалья // Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире, Сергеевские чтения, т.2, Москва, РУДН, 2015, с.477-482.
42. Мельников Е.С., Васильев А.А., Лейбман М.О., Москаленко Н.Г. Динамика сезонноталого слоя в Западной Сибири. // Криосфера Земли. Том IX, №2, 2005, с. 23-33.

43. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород // Том I, Изд-во Московского университета, 1968, 348 с.
44. Микляев П.С., Сергеев Д.О., Карпенко Ф.С., Хименков А.Н., Савченко Д.С., Кулаков А.П., Дернова Е.О., Вознесенский Е.А. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В КРИОЛИТОЗОНЕ / Материалы XVII Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», г. Москва, 28 ноября – 2 декабря 2022 г., М.: ООО «Геомаркетинг». 2022, с. 228-233, <https://doi.org/10.25296/978-5-6047951-5-6-2022-12-1-512>.
45. Осипов В.И. Адаптационный принцип природопользования. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2017, № 5, с. 3-12.
46. Осипов В.И. Природные катастрофы на рубеже XXI века // Вестник Российской Академии Наук. Т. 71, 2001, №4, с. 291-302.
47. Основы геокриологии, Ч.6, Геокриологический прогноз и экологические проблемы в криолитозоне / под ред. Э.Д.Ершова. – М.: Изд-во МГУ, 2008, 768 с.
48. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / под ред. Проф. В.А.Кудрявцева, Изд-во Московского университета, 1974, 432 с.
49. Охрана окружающей среды при освоении области многолетнемерзлых пород. М.: Наука, 1980. 140 с.
50. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / Под ред. А.Л.Рагозина. М.: Издательская фирма "КРУК", 2003. 320 с.
51. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны // Новосибирск, Наука, 2008, 230 с.
52. Перльштейн Г.З. Теплообмен деятельного слоя с атмосферой: теоретические и прикладные аспекты // Криосфера Земли, т. VI, №1, 2002, с.25-29.
53. Перльштейн Г.З., Д.О.Сергеев, Г.С.Типенко, В.Е.Тумской, А.Н.Хименков, А.Н.Власов, В.П.Мерзляков, Ю.В.Станиловская Углеводородные газы и криолитозона шельфа Арктики // Арктика. Экология и Экономика, № 2 (18), 2015, с.35-44.

54. Перльштейн Г.З., Павлов А.В., Буйских А.А. Изменения криолитозоны в условиях потепления климата. *Геоэкология*. 2006. №4. С.305–312.
55. Перльштейн Г.З., Сергеев Д.О. О детерминистском и вероятностном подходах в количественных геоэкологических исследованиях // Тезисы Международной конференции «Приоритетные направления в изучении криосферы Земли», Пушино, 25-28 мая 2005 г., ISBN 5-201-14546-9, с.111.
56. Перльштейн Г.З., Типенко Г.С., Сергеев Д.О. Отчёт о научно-исследовательской работе «Оценка динамики растепления многолетнемерзлых пород в правобережном примыкании плотины Вилюйской ГЭС-1,2 на основе математического моделирования» / Москва, ГеоНТС, 2006, 37 с.
57. Попов А.П. Управление геотехническими системами газового комплекса в криолитозоне: прогноз состояния и обеспечение надежности / Диссертация на соискание степени доктора технических наук, Тюмень, 2005, 713 с.
58. Природа, техника, геотехнические системы. М.: Наука, 1978, 151 с.
59. Рагозин А.Л. Общие положения оценки и управления природным риском // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*, 1999, № 5, с. 417-429.
60. Романовский В.Е., Марченко С.С., Даанен Р., Никольский Д.Д., Сергеев Д.О., Уолкер Д.А. Температура воздуха и почвы, а также морозное пучение на мерзлотно-экологической трансекте в Арктической части Северной Америки // Международная конференция «Криогенные ресурсы полярных регионов, Салехард, июнь 2007 г.», Материалы, т.1, 2007, с. 39-42.
61. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны // Москва, Изд-во МГУ, 1983, 232 с.
62. Романовский Н.Н., Булдович С.Н., Типенко Г.С., Сергеев Д.О., Касымская М.В., Гаврилов А.В. Оценка влияния климатических изменений на поверхностный сток с помощью моделирования теплового взаимодействия многолетнемерзлых пород и подземных вод (на примере верхней части водосборного бассейна р. Лена) // *Криосфера Земли*, 2009, Том XIII, № 1, с. 55–64.
63. Самарский А.А. Теория разностных схем // Москва, Наука, 1977, 656 с.

64. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичные схемы сквозного счета в многомерной задаче Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики, 5, 1965, с. 816-817.
65. Семёнов В.П. Геотемпературное поле и криолитозона Вилюйской синеклизы / Диссертация на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук, Якутск, 2018, 174 с.
66. Сергеев Д.О. Формирование и эволюция курумов в гольцовом поясе гор / Диссертация на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук, Москва, 1991, 246 с.
67. Сергеев Д.О., Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Булдович С.Н., Типенко Г.С., Йошикава К., Романовский В. Влияние динамики климата и геокриологических условий на режим регионального стока и наледообразования горных водосборов бассейна реки Лена // Криосфера Земли, 2009, Том XIII, № 3, с. 29–35.
68. Сергеев Д.О., Волкова В.П., Климов И.В., Рощупкина Н.А. Особенности фильтрации в зонах повышенной трещиноватости в условиях вечной мерзлоты рифтовых областей (на примере хребта Удокан) // В сб.: Геокриологические исследования, Москва, Изд-во МГУ, 1989, с. 144-149.
69. Сергеев Д.О., Типенко Г.С., Романовский В.Е., Романовский Н.Н., Березовская С.Л. Влияние горного рельефа и вертикальной геокриологической поясности на эволюцию мощностей многолетнемерзлых толщ Южной Якутии. Криосфера Земли, 2005, т. IX, №2, с. 33-42.
70. Сергеев Д.О., Типенко Г.С., Романовский Н.Н., Романовский В.Е. Динамика мощности мёрзлых толщ в горах под влиянием длиннопериодных колебаний климата (результаты численного моделирования для условий северной геокриологической зоны) // Криосфера Земли, Том VII, №2, 2003, с. 15-22.
71. Скрыбин П.Н., Скачков Ю.Б., Варламов С.П. Потепление климата и изменение термического состояния грунтов в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 1999. Т 111, №3, с. 32-40.
72. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоеонденсатного месторождения / Отв. ред. Е.М. Чувиллин, М.: ГЕОС, 2007, 137 с.

73. Сумгин М.И. Вечная мерзлота Л., Изд-во АН СССР, 1934, 82с.
74. Телегин Л.Г., Ким Б.И., Зоненко В.И. Охрана окружающей среды при сооружении и эксплуатации газонефтепроводов. М.: Недра, 1988, 187 с.
75. Тюрин А.И., Романовский Н.Н., Полтев Н.Ф. Мерзлотно-фациальный
76. Фотиев С.М. Геокриологические летописи Сибири // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 3, с. 3-16.
77. Фотиев С.М. Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна // М.: Наука, 1965, 231 с.
78. Хименков А. Н., Власов А. Н., Сергеев Д. О., Козырева Е. А., Рыбченко А.А., Пеллинен В. А. Влияние криогенеза на развитие склоновых процессов степных территорий Прибайкалья // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2015а, № 6, с. 535–543.
79. Хименков А.Н., Перльштейн Г.З., Сергеев Д.О., Власов А.Н., Мерзляков В.П., Халилова Ю.В. Геоэкологические аспекты оценки риска опасных процессов в криолитозоне // В сб. Экстремальные природные явления и катастрофы : в 2 т. / Отв. ред. А.О. Глико; т. 2 : Геология урана, геоэкология, гляциология / Отв. ред. В.М. Котляков, ИГ РАН; отв. сост. А.Л. Собисевич, ИФЗ РАН; – М. : ИФЗ РАН, 2011, с. 205-212.
80. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Власов А.Н., Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Светлаков А.А. Криогенные и посткриогенные образования на острове Ольхон // Криосфера Земли, 2015б, № 4, с. 54–63.
81. Хрусталева Л.Н. Температурный режим вечномерзлых грунтов на застроенной территории. М.: Наука, 1971. 168 с.
82. Чижов А.Б., Булдович С.Н., Чижова Н.И. Гидрогеологические условия Чульманской впадины // Южная Якутия. Изд-во МГУ, 1975, с. 291–311.
83. Шасткевич Ю.Г. Многолетнемерзлые породы высокогорной части хребта Удокан и условия формирования их температурного режима / В сб. Геокриологические условия Забайкальского Севера, М.: Наука, 1966, с. 24-43.
84. Шуйцев Ю.К. Восстановительная способность растительности как основа прогнозного районирования (на примере нефтедобычи)» в сборнике

- «Ландшафтно-геохимическое районирование и охрана среды», М.: 1983, с. 145-154.
85. Юкнявичюс Л.К. Изменения компонентов водной экосистемы в условиях загрязнения нефтепродуктами. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. биол. наук / АН УССР. Ин-т биологии юж. морей им. А.О. Ковалевского. — Севастополь: (б. и.), 1977. — 23 с.
86. Alexiades, V. and Solomon, A. D. Mathematical modeling of melting and freezing processes. Washington: Hemisphere, 1993, 323 p.
87. Bennett M.R., Huddart D. and Thomas G.S.P. Facies architecture within a regional glaciolacustrine basin: Copper River, Alaska // QUATERNARY SCIENCE REVIEWS. Elsevier Science Publishing Company, Inc., Vol. 21, #20-22, 2002, pp.2237-2279.
88. Biskaborn B.K., Lanckman J.P., Lantuit H., Romanovsky V., Sergeev D., Vieira G., Cable W., Pogliotti P., Nötzli J., Christiansen H.H., Jóhannsson H. Quality assessment of permafrost thermal state and active layer thickness data in GTN-P // Geo Quebec, 2015, #617.
89. Burton, I., J.B. Smith and S. Lenhart. 1998. Adaptation to Climate Change: Theory and Assessment. In: Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies. J.F. Feenstra, I. Burton, J.B. Smith, R.S.J. Tol (eds). United Nations Environmental Programme and Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit amsterdam. <http://lib.icimod.org/record/13767/files/7157.pdf> доступ 06.2018
90. Campbell I. et al. Late Holocene ~1500 yr climatic periodicities and their implications // Geology, May 1998, p. 471-473.
91. Cascini L. Risk assessment of fast landslide-From theory to practice. General Report // Proceedings of International Conference on "Fast Slope Movements - Prediction and Prevention for Risk Mitigation". Patron Editore, (2), 2005, pp. 33-52.
92. Cascini L., Bonnard Ch., Corominas J., Jibson R., Montero-Olarte J. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development. - State of the Art report // Proceedings of International Conference on Landslide Risk Management, Hungr, Fell, Couture & Eberhardt (eds), 2005, pp. 199-235.

93. Castellanos Abella, E.A. & van Westen, C.J. Spatial landslide risk assessment in Guantanamo Province, Cuba // *Landslides and engineered slopes, from the past to the future*. 2008. pp.1879-1885.
94. Chesnokova I., Sergeev D., 2017. Complex analysis of the damage caused by geocryologic processes (as exemplified by effects on the Chara-China Railway track, Transbaikal region) // *Science in Cold and Arid Regions*, 9(3): 0335-0338. DOI: 0.3724/SP.J.1226.2017.00335
95. Connor, C.L., 1984: Late Quaternary Glaciolacustrine and Vegetational History of the Copper River Basin, South-Central Alaska, PhD, University of Montana: 121.
96. Fell R., Ho K.K.S., Lacasse S., Leroi E. A framework for landslide risk assessment and management // *State of the Art Paper 1. International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, June, 2005*, pp. 3-25.
97. Haeberli, W. (1992). Construction, environmental problems and natural hazards in periglacial mountain belts. *Permafrost and Periglacial Processes*, 3(2), 111–124.
98. Haeberli, W. (1992b): Construction, environmental problems and natural hazards in periglacial mountain belts. *Permafrost and Periglacial Processes* 3(2): 111–124.
99. Haeberli, W., Wegmann, M., Vonder Muehll, D. (1997). Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. *Eclogae geologicae Helveticae* 90: 407 – 414.
100. Hayley D.W. and Horne B. Rationalizing climate change for design of structures on permafrost: A Canadian perspective // *NICOP, Fairbanks, Alaska, 2008*, pp. 681-686.
101. Kääb A. Remote sensing of permafrost-related problems and hazards // *Permafrost and periglacial processes, 2008, Vol.19*, pp. 107-136.
102. Kapralova, V.N., Chesnokova, I.V., Makarycheva, E.M., Sergeev D.O. Importance of the Variability of Geocryological Conditions in the Determination of the Significance of the Lakes in the Structure of Regional Water Discharge // *Water Resources (2019) 46 (Suppl. 2): pp 81-86*. <https://doi.org/10.1134/S0097807819080116>.
103. Kapralova, V.N., Chesnokova, I.V., Makarycheva, E.M., Sergeev D.O. Importance of the Variability of Geocryological Conditions in the Determination of the Significance of the Lakes in the Structure of Regional Water Discharge //

- Water Resources (2019) 46 (Suppl. 2): pp 81-86.
<https://doi.org/10.1134/S0097807819080116>.
104. Kizyakov A.I., Leibman M.O., Sonyushkin A.V., Zimin M.V., & Khomutov A.V. Gas-emission crater, geomorphological characteristics and relief dynamics on Yamal Peninsula, Russia / XI. International Conference On Permafrost – Book of Abstracts, 20 – 24 June 2016, Potsdam, Germany. Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, 2016, p. 987-988. doi:10.2312/GFZ.LIS.2016.001
 105. Lemmen, D. et al. 2008. From Impacts to Adaptation: Canada in a Changing Climate 2007. Government of Canada, Climate Change Impacts and Adaptation Division, Earth Sciences Sector, Natural Resources Canada, Ottawa, ON, Canada, 448 pp. <https://www.weadapt.org/placemarks/maps/view/27001>
 доступ 06.2018
 106. Marchenko S., Bjella K., Nicolsky D., Romanovsky V. Modeling Dynamics of Permafrost Degradation and their Impact on Ecosystems Across Entire Alaska: Arctic and Subarctic Engineering Design Tool (Part-1). 2024. Preprints.org, 36 p. DOI: 10.20944/preprints202403.0927.v2
 107. Marchuk, G. I. Kuznetsov, Yu. A. and Matsokin, A. M. Fictitious domain and domain decomposition methods // Soviet J. Num. Anal. Math. Modelling 1: 1-82, 1986.
 108. Marchuk, G. I. Methods of numerical mathematics. New York: Springer-Verlag, 1982, 510 p.
 109. Maximova L.N., Romanovsky V.E. A hypothesis of the Holocene permafrost evolution, Proceedings of the Fifth International Conference on Permafrost, Norwegian Inst. Tech., Trondheim, Norway, 1988, p. 102-106.
 110. Nelson F.E., Anisimov O.A. & Shiklomanov N.I. Climate Change and Hazard Zonation in the Circum-Arctic Permafrost Regions // Natural Hazards, Volume 26, Number 3, 2002, pp. 203-225.
 111. Osterkamp T.E. Establishing long-term permafrost observatories for active layer and permafrost investigations in Alaska: 1977–2002, Permafrost Periglacial Processes, 2003, 14, 331–342.

112. Pavlov A.V. Permafrost-climating monitoring of Russia: analysis of field data and forecast // *Polar Geography*, 1996, vol. 20, № 1, p. 44-64.
113. Perlshtein, G., Levashov, A., Sergueev, D.O. Analysis of the thermokarst's early stage with deterministic and probabilistic methods // *Terra Nostra – 2nd European Conference on Permafrost*, June 12-16, 2005, Potsdam, Germany. Programme and Abstracts, ISSN 0946-8978, p.p. 143-144.
114. Péwé T.L. Geological Hazards of the Fairbanks Area, Alaska. Department of Natural Resources, Division of Geological & Geophysical Survey, Special Report 15, Fairbanks, Alaska, 1993, 109 p.
115. Romanovskiy N.N.; Zaitsev V.N.; Volchenkov S.Yu.; Zagryazkin D.D., Sergeyev D.O. Alpine Permafrost Temperature Zonality, Northern Trans-Baikal Region, USSR. *Permafrost and Periglacial Processes*. Wiley. 1991. vol.2, (pp.187-195).
116. Romanovsky V., Yoshikava K., Sergueev D., Shur Y. Permafrost Observatory near Gakona, Alaska. Local-Scale Features in Permafrost Distribution and Temperatures. *Eos Trans. AGU*, 86, Fall Meet. Suppl., 2005, pp
117. Romanovsky V.E., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Oberman N.G., Drozdov D.S., Malkova G.V., Moskalenko N.G., Vasiliev A.A., Sergeev D.O., Zheleznyak M.N. Thermal State and Fate of Permafrost in Russia: First results of IPY. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost University of Alaska Fairbanks*, Volume 2, June 29–July 3, 2008, pp. 1511-1518.
118. Romanovsky, V. E., Nicolsky, D. J., Marchenko, S. S., Cable, W. L., Kholodov, A. L., Panda, S. K., et al. (2016). Past, present and future changes in permafrost temperatures in Alaska. In: *Eleventh International Conference on Permafrost*, Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein Telegrafenberg 14473 Potsdam, Germany, 20–24 June 2016: 472–473.
119. Romanovsky, V.E., Garagula L.S. and Seregina N.V. Freezing and thawing of soils under the influence of 300- and 90-year periods of temperature fluctuation // *Proceedings of the International Conference on the Role of Polar Regions in Global Change*, Geophysical Institute University of Alaska Fairbanks, 2, 1992a, p. 543-548.

120. Romanovsky V.E., Marchenko S.S., Daanen R., Sergeev D.O., and Walker D.A. Soil Climate and Frost Heave Along the Permafrost/Ecological North American Arctic Transect. Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost University of Alaska Fairbanks, Volume 2, June 29–July 3, 2008, pp. 1519-1524.
121. Romanovsky V.E., Maximova L.N. and Seregina N.V. Paleotemperature reconstruction for freeze-thaw processes during the Late Pleistocene through the Holocene // Proceedings of the International Conference on the Role of Polar Regions in Global Change, Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks, 2, 1992b, p. 537-542.
122. Sergeev D., Chesnokova I., Morozova A. Estimation of the Past and Future Infrastructure Damage Due the Permafrost Evolution Processes // AGU Proceedings, San Francisco, 2015, per.№ 63245, 28.07.2015, confirmation number is agu-fm15-63245-5358-5240-6569-9765 <электронная публикация>.
123. Sergeev D., Khimenkov A., Tipenko G., Vlasov A., Cauquil E., Green E., Dauboin P., Stanilovskaya J. Yamal Craters: State of Knowledge and Wished In-situ Investigations // ICOP Proceedings, Potsdam, Session “Hazards and risks related to changing mountain, low-land and coastal permafrost”, 2016, #414, p. 997. <http://doi.org/10.2312/GFZ.LIS.2016.001>.
124. Shur Y. and Zhestkova T. Cryogenic Structure of a Glaciolacustrine Deposit. Proceedings of the Eight International Conference on Permafrost, 21 - 25 July 2003, Zurich, Switzerland, vol. 2, 2003, p.1051-1056.
125. Shur Y., Kanevskiy M., Walker D.A., Jorgenson T., Buchhorn M., Raynolds M.K., & Toniolo H. Permafrost-Related Causes and Consequences of the Sagavanirktok River Flooding in Spring 2015 / XI. International Conference On Permafrost – Book of Abstracts, 20 – 24 June 2016, Potsdam, Germany. Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, 2016, p. 998-1000. doi:10.2312/GFZ.LIS.2016.001
126. Shur Y.L., Jorgenson M.T. Pattern of Permafrost Formation and Degradation in Relation to Climate and Ecosystems // Permafrost and Periglacial Processes, #18, 2007, pp. 7-19.

127. Shur, Y., & Osterkamp T. E. (2007, April). Thermokarst (Report no. INE06.11, Awards ARC-0454939 and ARC-0454985). National Science Foundation, Arlington, VA.
128. Smith S.L., V.E. Romanovsky A.G. Lewkowicz, C.R. Burn, M. Allard, G.D. Clow, K. Yoshikawa and J. Thoop. Thermal state of permafrost in North America - A contribution to the International Polar Year // Permafrost and Periglacial Processes, 2010, 21:117-135
129. Stanilovskaya J., Merzlyakov V., Sergeev D. Probabilistic Assessment of Ice Wedge Hazard for Linear Structure // Engineering Geology for Society and Territory - Volume 1, Springer, 2015, p. 311-314.
130. Ukhova J., Osokin A., Sergeev D., and Stanilovskaya J. Permafrost response to Dynamics of External Heat Exchange: Comparison of Observed and Modeled Data (Nadym-Pur-Taz Region), NICOP 2008, Ninth International Conference on Permafrost. Extended Abstracts. Kane and Hinkel, Editors, Fairbanks, 2008, pp. 321-322.
131. van Everdingen, R. (Ed.). (1998) Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology.
132. Verdi C. Numerical aspects of parabolic free boundary and hysteresis problems. In Lecture Notes in Mathematics 1584: 213-284. New York: Springer-Verlag, 1994.
133. Yavelov A., Movchan V., Obridco S., Sergeev D., Utkina I., Shchadrina T. Map of potential environmental damage due to oil spills in the permafrost region of Russia / PERMAFROST. Seventh International Conference. Program, Abstracts, Reports of the IPA. June 23-27, 1998 (pp. 212-213).

Список публикаций по теме диссертации

1. Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Жданеев О.В., Осокин А.Б., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Федоров Р.Ю., Фролов К.Н. К вопросу о необходимости выработки целостной системы мер по предупреждению деформаций зданий и сооружений в криолитозоне в условиях меняющегося климата // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, — № 4. — С. 605-616. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-605-616.
2. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Кулаков А.П., Романов А.В. — Особенности организации инженерно-геокриологического мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территориях распространения многолетнемерзлых пород // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.4.68814 EDN: ICMZSC URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=68814.
3. Мониторинг вечной мерзлоты. - М.: Академический проект, 2024, 463 с. DOI 10.61828/9785829142780-2024-1-468. ISBN 978-5-8291-4278-0. 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., Бадина С.В., Великин С.А., Жданеев О.В., Кузнецов М.Е., Малкова Г.В., Остарков Н.А., Фёдоров Р.Ю., Фролов К.Н.
4. Орлов Т.В., Викторов А.С. Капралова В.Н., Архипова М.В., Бондарь В.В., Гонников Т.В., Зверев А.В., Сергеев Д.О. Пространственная информация как основа ландшафтно-геокриологического районирования условий прохождения автомобильной дороги Амур «Чита – Хабаровск» в зоне развития высокотемпературных многолетнемерзлых пород / Сергеевские чтения, Сергеевские чтения. Региональная инженерная геология и геоэкология. Выпуск 25. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (28-29 марта 2024 г.). Москва: Издательство «Геоинфо», 2024, с. 429-433.
5. A.N. Khimenkov, Yu.V. Stanilovskaya and D.O. Sergeev The Gas Component in the Structure of Frozen Soils / 2024, Books, Earth Sciences, Geology, Geology and Mineralogy Research Developments. Nova, Science and Technology, Upcoming Publications, p. 47-95. ISBN: 979-8-89530-148-7.
6. Несмеянов С.А., Сергеев Д.О., Воейкова О.А., Кулаков А.П. Неоструктурное районирование и опасные процессы в районе Чарской рифтовой впадины // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2024, № 3, с. 11–59.
7. Быстров Н.В., Вознесенский Е.А., Сергеев Д.О., Железняк М.Н., Ефименко В.Н., Ефименко С.В. Разработка подхода к дорожно-климатическому районированию в зоне вечной мерзлоты в первой дорожно-климатической зоне // Фундаменты, № 4, 2024, с. 26-28.

8. V.E. Romanovsky, D. Nicolsky, D. Sergeev High-Resolution Permafrost Modeling Across the Yamal Peninsula, Russia (Invited). Thermal State of Permafrost team; GC045 - Environmental, Socio-Economic, and Climatic Changes in Northern Eurasia - Pavel Groisman, North Carolina State University Raleigh, CISESS, Raleigh, United States, Shamil S Maksyutov, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan and Geoffrey M Henebry, Michigan State University, Department of Geography, Environment, and Spatial Sciences & Center for Global Change and Earth Observations, East Lansing, United States. AGU-2023.
9. M. Rossi, M. Dal Cin, S. Picotti, D. Gei, V.S. Isaev, A.V. Pogorelov, E.I. Gorshkov, D.O. Sergeev, P.I. Kotov, M. Giorgi, M.L. Rainone Geophysical and geocryological surveys for active layer and permafrost characterization in the Khanovey Railway Station area, Komi Republic, NE European Russian Arctic / 41st National Conference “Geophysics for the future of the Planet”, 7-9 February 2023, Bologna, Italy (доклад).
10. Chesnokova I., Kulakov A., Sergeev, D. Transport Infrastructure Monitoring as Adaptation Measure in Permafrost Regions / IAEG XIV CONGRESS 2023 (доклад).
11. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Кулаков А.П., Романов А.В. — Особенности организации инженерно-геокриологического мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территориях распространения многолетнемерзлых пород // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.4.68814 EDN: ICMZSC URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=68814
12. Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Жданеев О.В., Железняк М.Н., Мельников В.П., Окунев С.Н., Осокин А.Б., Остарков Н.А., Садуртинов М.Р., Сергеев Д.О., Фёдоров Р.Ю. и Фролов К.Н. (2023) Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне, Записки Горного института, 263, сс. 742-756. доступно на: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16277> (просмотрено: 9 ноябрь 2023). (Brushkov , A. V., Alekseev , A. G., Badina , S. V., Drozdov , D. S., Dubrovin , V. A., Zhdaneev , O. V., Zheleznyak , M. N., Melnikov , V. P., Okunev , S. N., Osokin , A. B., Ostarkov , N. A., Sadurtinov , M. R., Sergeev , D. O., Fedorov , R. Y. and Frolov , K. N. (2023) “Structure maintenance experience and the need to control the soils thermal regime in permafrost areas”, Journal of Mining Institute, 263, pp. 742-756. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16277> (Accessed: 9 November 2023)).
13. Пособие по Воркутинской геокриологической научно-учебной практике: учебно-методическое пособие / В. С. Исаев, П. И. Котов, В. З. Хилимонюк и др.; под общей ред. П. И. Котова, Г. И. Гордеевой. — М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2023. — 228 с. ISBN 978-5-4344-0999-5. Составители: В. С. Исаев, П. И. Котов, В. З. Хилимонюк, Е. Н. Оспенников, А. В. Кошурников, О. М. Лисицына, Д. О. Сергеев, С. Н. Булдович, Г. И.

- Гордеева, М. Ю. Чербунина, Е. П. Шибилia, А. В. Погорелов, А. П. Безделова, И. А. Комаров, О. В. Левочкина, Е. С. Максименко.
14. Sergeev D. and Utkina I. Results of Permafrost Monitoring in the Mountains of Northern Transbaikalia / BOOK OF ABSTRACTS - 6th European Conference on Permafrost (EUCOP 2023), Puigcerdà (Catalonia, Spain), 18-22 June 2023. Editors José M. Fernández-Fernández (Universidad Complutense de Madrid), Josep Bonsoms (Universitat de Barcelona), Julia García-Oteyza (Universitat de Barcelona), Marc Oliva (Universitat de Barcelona), p.527. DOI: 10.52381/EUCOP6.abstracts.1
 15. Кулаков А.П., Сергеев Д.О. Развитие экзогенных геологических процессов и явлений на автомобильной дороге “Удокан–Наминга” (Северное Забайкалье) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2023. №4. с. 53-62. DOI: 10.31857/S0869780923040057
 16. Горбунова А.А., Зарипова Г.З., Исаев В.С., Манский В.Н., Собин Р.В., Сергеев Д.О., Безделова А.П. Временные и пространственные закономерности проявлений криогенных процессов при эксплуатации железных дорог в южной части большеземельской тундры в условиях изменяющегося климата // ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2023, № 3, с. 15–25. DOI: 10.31857/S0869780923020054, EDN: TWJZJD
 17. Микляев П.С., Сергеев Д.О., Карпенко Ф.С., Хименков А.Н., Савченко Д.С., Кулаков А.П., Дернова Е.О., Вознесенский Е.А. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В КРИОЛИТОЗОНЕ / Материалы XVII Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», г. Москва, 28 ноября –2 декабря 2022 г., М.: ООО «Геомаркетинг». 2022, с. 228-233, <https://doi.org/10.25296/978-5-6047951-5-6-2022-12-1-512>.
 18. Isaev V., Komarov I., Uvarova A., Koshurnikov A., Sergeev D., Komarov O., Pogorelov A. Results of Geotechnical monitoring at the scientific test site "Khanovey" in the North East part of Russian Arctic (Стендовый доклад), AGU Fall meeting 2022, Chicago, USA, 12-16 декабря 2022.
 19. Povoroznyuk O., Vincent W.F., Schweitzer P., Laptander R., Bennett M., Calmels F., Sergeev D., Arp C., Forbes B.C., Roy-Léveillé P., and Walker D.A. Arctic roads and railways: social and environmental consequences of transport infrastructure in the Circumpolar North // Arctic Science, 11 August 2022, <https://doi.org/10.1139/AS-2021-0033>
 20. В.П. Мельников, В.И. Осипов, А.В. Брушков, А.Г. Алексеев, С.В. Бадина, Н.М. Бердников, С.А. Великин, Д.С. Дроздов, В.А. Дубровин, М.Н. Железняк, О.В. Жданеев, А.А. Захаров, Я.К. Леопольд, М.Е. Кузнецов, Г.В. Малкова, А.Б. Осокин, Н.А. Остарков, Ф.М. Ривкин, М.Р. Садуртдинов, Д.О.

- Сергеев, Р.Ю. Федоров, К.Н. Фролов, Е.В. Устинова, А.Н. Шеин 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. DOI: 10.15372/KZ20220401
21. Tananaev, N., Isaev, V., and Sergeev, D.: Hydrological surface-subsurface connectivity in permafrost tundra environment, European Russian Arctic, IAHS-AISH Scientific Assembly 2022, Montpellier, France, 29 May–3 Jun 2022, IAHS2022-604, 2022. <https://meetingorganizer.copernicus.org/IAHS2022/session/41879>
22. Rossi M, Dal Cin M, Picotti S, Gei D, Isaev VS, Pogorelov AV, Gorshkov EI, Sergeev DO, Kotov PI, Giorgi M and Rainone ML (2022) Active Layer and Permafrost Investigations Using Geophysical and Geocryological Methods—A Case Study of the Khanovey Area, Near Vorkuta, in the NE European Russian Arctic. *Front. Earth Sci.* 10:910078. doi: 10.3389/feart.2022.910078
23. Брушков А.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Осокин А.Б. ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ / Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных учёных, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14 - 17 июня 2022 г.: сборник статей, (электронное издание сетевого распространения) / Под редакцией Р.Г. Мотенко. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022, с. 5-11. doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130
24. Уварова А.В., Исаев В.С., Комаров И.А., Сергеев Д.О., Кошурников А.В., Котов П.И. РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА УЧЕБНО-НАУЧНОМ ПОЛИГОНЕ ХАНОВЕЙ / Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных учёных, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14 - 17 июня 2022 г.: сборник статей, (электронное издание сетевого распространения) / Под редакцией Р.Г. Мотенко. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022, с. 343-347. doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130
25. Киока Арата, Исаев Владислав, Котов Павел, Сергеев Дмитрий, Уварова Александра, Кошурников Андрей, Комаров Олег и Росси Мара ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЫТНЫЕ ПЛОЩАДКИ: ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРЕ РОССИИ/ Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных учёных, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14 - 17 июня 2022 г.: сборник статей, (электронное издание сетевого распространения) / Под редакцией Р.Г. Мотенко. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022, с. 639-658. doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130

26. Брушков А.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Осокин А.Б., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Малкова Г.В. Структура и параметры геокриологического мониторинга // Научный вестник Арктики. 2022. №12. С. 78-88. doi: 10.52978/25421220_2022_12_78-88
27. V.P. Mel'nikov, V.I. Osipov, A.V. Brushkov, S.V. Badina, S.A. Velikin, D.S. Drozdov, V.A. Dubrovin, O.V. Zhdaneev, M.N. Zheleznyak, M.E. Kuznetsov, A.B. Osokin, N.A. Ostarkov, M.R. Sadurtdinov, D.O. Sergeev, E.V. Ustinova, R.Yu. Fedorov, K.N. Frolov, and R. V. Chzhan Decreased Stability of the Infrastructure of Russia's Fuel and Energy Complex in the Arctic Because of the Increased Annual Average Temperature of the Surface Layer of the Cryolithozone // Herald of the Russian Academy of Sciences, 2022, Vol. 92, No. 2, pp. 115–125. © Pleiades Publishing, Ltd., 2022. Russian Text © The Author(s), 2022, published in Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk, 2022, Vol. 92, No. 4, pp. 303–314. DOI: 10.1134/S1019331622020083 (Снижение устойчивости инфраструктуры ТЭК РФ в Арктике в связи с повышением среднегодовой температуры приповерхностного слоя криолитозоны)
28. Melnikov, V.P.; Osipov, V.I.; Brouchkov, A.V.; Badina, S.V.; Sadurtdinov, M.R.; Drozdov, D.S.; Malkova, G.V.; Zheleznyak, M.N.; Zhdaneev, O.V.; Ostarkov, N.A.; et al. Past and Future of Permafrost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure // Energies 2022, 15, 3190. <https://doi.org/10.3390/en15093190>
29. Isaev V., Kioka A., Kotov P, Sergeev D., Uvarova A, Koshurnikov A. and Komarov O. Multi-Parameter Protocol for Geocryological Test Site: A Case Study Applied for the European North of Russia // Energies 2022, 15, 2076. <https://doi.org/10.3390/en15062076>
30. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Falaleeva A.A., Badina S.V., Zheleznyak M.N., Sadurtdinov M.R., Ostrakov N.A., Drozdov D.S., Osokin A.B., Sergeev D.O., Dubrovin V.A., Fedorov R.Yu. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050 / Natural Hazards, Springer, 2022, 21 pp. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05179-6>.
31. Osipov V., Aksyutin O., Sergeev D., Tipenko G., and Ishkov A. Using the Data of Geocryological Monitoring and Geocryological Forecast for Risk Assessment and Adaptation to Climate Change // Energies 2022, 15, 879. <https://doi.org/10.3390/en15030879>
32. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Окунев С.Н., Остарков Н.А., Осокин А.Б., Федоров Р.Ю. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов // Криосфера Земли, 2021, т. XXV, № 6, с. 3–15. DOI: 10.15372/KZ20210601
33. Сергеев Д.О. Мониторинг мёрзлых пород и управление рисками / Современные исследования трансформации криосферы и вопросы

- геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Под ред. В.П.Мельникова и М.Р.Садуртдинова. – Салехард: 2021, с. 380-382. SDI: 007.001.978-5-6046108-4-8. ISBN: 978-5-6046108-4-8. DOI: 10.7868/9785604610848103
34. Исаев В.С., Безделова А.П., Сергеев Д.О. Комплексный ландшафтный мониторинг многолетней мерзлоты в южной тундре (на примере полигона Хановей) / Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Под ред. В.П.Мельникова и М.Р.Садуртдинова. – Салехард: 2021, с. 173-176. DOI: 10.7868/9785604610848045
35. Chesnokova I.V., Bezdelova A.P., Sergeev D.O., Tananaev N.I., Grishakina E.A. The Signs and the Role of Structures of Subsurface Flow in Permafrost Zone // Water Resources, 48, #5, 2021, Maik Nauka/Interperiodica Publishing, pp. 804-812. DOI: 10.1134/s0097807821050067. Чеснокова И.В., Безделова А.П., Сергеев Д.О., Тананаев Н.И., Гришакина Е.А. Признаки и значение структур подповерхностного стока на территории криолитозоны // Водные ресурсы, Том: 48, № 5, 2021, М: Наука, с. 578-587. DOI: 10.31857/s0321059621050060.
36. Хименков А.Н., Власов А.Н., Брушков А.В., Кошурников А.В., Волков-Богородский Д.Б., Сергеев Д.О., Гагарин В.Е., Соболев П.А. Геосистемы газонасыщенных многолетнемерзлых пород. М.: Геоинфо, 2021, 288 с., ISBN 978-5-9908-493-3-4.
37. M. Rossi, M. Dal Cin, S. Picotti, D. Gei, V. Isaev, A. Pogorelov, E. Gorshkov, D. Sergeev, P. Kotov and M.L. Rainone, Geophysical and Geocryological Investigation of Active Layer Along the North Russian Railway (Khanovey, Russia). Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers Source: Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2021, Apr 2021, Volume 2021, p.1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152171>
38. Chesnokova I.V., Popova A.A., Sergeev D.O., and Tipenko G.S. Infrastructure's Adaptation to Climate Change at the Russian Cold Region's Territories / Permafrost 2021: Merging Permafrost Science and Cold Regions Engineering. Edited by Jon Zufelt, Ph.D., P.E., D.WRE, 2021. ISBN (PDF): 9780784483589, pp. 260-265. <https://doi.org/10.1061/9780784483589>
39. Irina Chesnokova, Dmitry Sergeev "Living Permafrost": Man and the Environment / ASSW2021 Science Conference, 19-26 March, Online, Portugal, p. 313.
40. А.Н. Хименков, А.В. Кошурников, Д.О. Сергеев, П.А. Соболев Газонасыщенные мерзлые породы криолитозоны // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология № 2, 2021, с. 3–16. DOI:10.31857/S0869780921020041
41. В.П.Мельников, В.И.Осипов, А.В.Брушков, С.В.Бадина, Д.С.Дроздов, В.А.Дубровин, М.Н.Железняк, М.Р. Садуртдинов, Д.О.Сергеев,

- Н.А.Остарков, А.А.Фалалеева, Я.Ю.Шелков Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании вечной мерзлоты в арктической зоне российской федерации к середине XXI века // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 2021, № 1, с. 14–31. DOI: 10.31857/S0869780921010070
42. Светлаков А.А., Козырева Е.А., Сергеев Д.О. Температура мёрзлых грунтов в современной природно-климатической обстановке лесостепного Прибайкалья (на примере о.Ольхон) // *Криосфера Земли*, 2021, т. XXV, № 5, с. 13–21. DOI: 10.15372/KZ20210502. A.A. Svetlakov, E.A. Kozyreva, D.O. Sergeev Soil Temperature in the Contemporary Natural-climatic Situation of the Steppe Baikal Region (on the Example of Olkhon Island) // *Earth's Cryosphere*, 2021, vol. XXV, No. 5, pp. 11–18.
43. Tananaev, N.; Isaev, V.; Sergeev, D.; Kotov, P.; Komarov, O. Hydrological Connectivity in a Permafrost Tundra Landscape near Vorkuta, North-European Arctic Russia // *Hydrology* 2021, 8, 106. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030106>
44. Книжников А., Сергеев Д. Уроки на будущее: Авария с разливом дизтоплива в Норильске и фактор многолетнемерзлых пород // «Нефтегазовая вертикаль» №3, 2021, с. 93-97.
45. Khimenkov A.N., Sergeev D.O., Vlasov A.N., Volkov-Bogorodsky D.B., Tipenko G.S., Merzlyakov V.P., Stanilovskaya Y.V. Explosive Processes in Permafrost Areas - New Type of Geocryological Hazard / Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. Natural Hazards and Risk Research in Russia. Springer International Publishing, Switzerland, 2021, pp. 83 - 101.
46. Sergeev D. Western section of the Baikal–Amur railway under the influence of climate warming and multidirectional permafrost dynamics: environmental and economic consequences / *Arctic Change 2020 Conference Book of Abstracts // Arctic Science, Volume 7, Number 1, March 2021, p. 66-67.* <https://doi.org/10.1139/as-2021-0001>
47. Чеснокова И. В., Сергеев Д. О. Российский национальный план адаптации к изменениям климата: реализация в Арктике / Ресурсная экономика, изменение климата и рациональное природопользование: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. Российского общества экологической экономики. Отв. за вып. Д. А. Козяева. – Электрон. дан (8,42 Мб). – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021. – Электрон. опт. диск (CD-Rom). ISBN 978-5-7638-4533-4, с. 188-190.
48. Sergeev D. Environmental and Economic Consequences of Operation of the Western Section of the Baikal-Amur Railway in Conditions of Climate Warming and Multidirectional Permafrost Dynamics / *Arctic Change 2020*, December 7-10, Toronto, Canada.

- 49.Сергеев Д.О., Исаев В.С., Горшков Е.И., Погорелов А.А., Аманжуров Р.М., Тананаев Н.И., Котов П.И., Безделова А.П. Структурно-динамический длительновременной мониторинг криогенной геосистемы южной тундры в современных климатических условиях (на примере научно-учебного стационара Хановой) / В сб.: II Всероссийская научная конференция с международным участием «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны», 25-27 ноября 2020 г. Расширенные тезисы докладов. Москва, ИГКЭ им. Академика Ю.А.Израэля, ISBN 978-5-9631-0836-9, Ижевск, ООО Принт, с. 314-317
- 50.Sergeev D., Chesnokova I. On the Implementation of the Russian National Plan for Adaptation to Climate Change in the Arctic / Heininen, L., H. Exner-Pirot, & J. Barnes (eds.). (2020). *Arctic Yearbook 2020*. Akureyri, Iceland: Arctic Portal. Available from <<https://www.arcticyearbook.com>>, ISSN 2298–2418, pp. 123-131.
- 51.Сергеев Д.О., Чеснокова И.В., Безделова А.П., Дернова Е.О. Итоги геокриологического мониторинга в Чаре за период 1986-2019: состояние и динамика горной мерзлоты / В сб.: *Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне : материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск (Россия)*, 28–30 сентября 2020 г./ ФГБУН Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения РАН; отв. ред-ры: д.г.-м.н. М. Н. Железняк; д.г.-м.н. В. В. Шепелёв; д.т.н. Р. В. Чжан. – Якутск: Издательство ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2020, ISBN 978-5-93254-195-1, с. 164-168.
- 52.Сергеев Д.О. Итоги геокриологического мониторинга в Чаре 2005-2019 г.г.: состояние и динамика горной мерзлоты / В сб.: *Материалы 5-ой конференции «День науки 2020»*, Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Звенигородская биостанция МГУ имени М.В. Ломоносова, 22-23 января 2020 г., “КДУ”, “Добросвет” Москва, с. 49-57. DOI 10.31453/kdu.ru.91304.105
- 53.Безделова А.П., Исаев В.С., Сергеев Д.О. Длительновременной мониторинг в южной тундре на основе пространственно-временной классификации геосистем (на примере научно-учебного полигона Хановой) / В сб.: *Материалы 5-ой конференции «День науки 2020»*, Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Звенигородская биостанция МГУ имени М.В. Ломоносова, 22-23 января 2020 г., “КДУ”, “Добросвет” Москва, с. 27-38. DOI 10.31453/kdu.ru.91304.105
- 54.Сергеев Д.О., Чеснокова И.В. Адаптационные подходы к трансформации геопространства в условиях меняющегося климата / *Материалы V Международной научно-практической конференции*, г.Волгоград, 1-4 октября 2019 г., Волгоград, Изд-во ВГУ, с. 110-114.

55. Сергеев Д.О., Перльштейн Г.З., Хименков А.Н., Халилова Ю.В., Угаров А.Н. Аэровизуальные обследования для оценки опасности экзогенных геологических процессов на трассе магистрального нефтепровода (глава 13) // *Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность средств хранения и транспорта энергоресурсов*. Науч. рук. Махутов Н.А. М.: МГОФ "Знание", 2019, с. 295-309.
56. Voytenko A., Sergeev D. & Chesnokova I. The main directions of securing geocryological safety of economic activity in the Arctic region / Heininen, L., H. Exner-Pirot, & J. Barnes (eds.) *Redefining Arctic Security: Arctic Yearbook, 2019*. Akureyri, Iceland: Arctic Portal. Available from <https://www.arcticyearbook.com>, p.p. 210-216.
57. Гинзбург А.А., Кальбергенов Р.Г., Исаев В.С., Типенко Г.С., Сергеев Д.О., Хименков А.Н. Значение и технические возможности натурального изучения динамики грунтового порового давления в условиях промерзания и оттаивания // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 2019, № 5, с. 82-88.
58. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. Взрывные процессы в области распространения многолетнемёрзлых пород – новый вид геокриологической опасности // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 2019, № 6, с. 30-41.
59. L.M. Farquharson, V.E. Romanovsky, B.M. Jones, G. Grosse, D. Sergeev Importance of cross-border team science in permafrost research for risk mitigation / AGU invited Report PA24A-03: <https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/564454>.
60. Vladislav Isaev, Elena Scibilia, Pavel Kotov, Dmytry Sergeev, Vladimir Tumskoy, Andrey Koshurnikov, Vitaly Verbovsky, Inge Hoff, Nikita Tananaev, Alla Bezdelova / *Proceeding of 1-st Southern Hemisphere conference on Permafrost, Conference handbook, серия Permafrost, New Zealand, Queenstown, 2019, vol. 1, p. 52-54.*
61. Kapralova, V.N., Chesnokova, I.V., Makarycheva, E.M., Sergeev D.O. Importance of the Variability of Geocryological Conditions in the Determination of the Significance of the Lakes in the Structure of Regional Water Discharge // *Water Resources* (2019) 46 (Suppl. 2): pp 81-86. <https://doi.org/10.1134/S0097807819080116>.
62. Tananaev N., Isaev V., and Sergeev D. Stable isotope composition and dissolved organic carbon content in surficial and near-surface waters in the Bolshaya Zemlya tundra region, north European Russia / *Reports of 16th International Symposium on Water-Rock Interaction and 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference)*, July 21-26, 2019, Tomsk, Russia, 5 p. (Scopus).

63. Осипов В.И., Аксютин О.Е., Ишков А.Г., Грачёв В.А., Сергеев Д.О. Адаптация – важнейшая технология освоения субарктических территорий России // *Вестник Российской академии наук*, 2019, том 89, № 1, с. 56-63. V.I. Osipov, O.E. Aksyutin, A.G. Ishkov, V.A. Grachev, and D.O. Sergeev Adaptation — an Important Technology in the Development of Russia's Subarctic Territories // *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, Vol. 89, No. 1, pp. 65–71. © Pleiades Publishing, Ltd., 2019.
64. Biskaborn B., Sharon L. Smith, Jeannette Noetzli, Gonçalo Vieira, Dmitry Streletskiy, Philippe Schoeneich, Vladimir E. Romanovsky, Antoni G. Lewkowicz, Andrey Abramov, Michel Allard, Julia Boike, Hanne H. Christiansen, Reynald Delaloye, Bernhard Diekmann, Dmitry Drozdov, Bernd Eitzelmueller, Guido Grosse, Mauro Guglielmin, Thomas Ingeman-Nielsen, Ketil Isaksen, Mamoru Ishikawa, Margareta Johannson, Halldor Johannsson, Anseok Joo, Dmitry Kaverin, Alexander Kholodov, Pavel Konstantinov, Tim Kröger, Christophe Lambiel, Jean-Pierre Lanckman, Dongliang Luo, Galina Malkova, Heidrun Matthes, Ian Meiklejohn, Natalia Moskalenko, Marc Oliva, Marcia Phillips, Miguel Ramos, A. Britta K. Sannel, Dmitrii Sergeev, Cathy Seybold, Pavel Skryabin, Qingbai Wu, Kenji Yoshikawa, Mikail Zheleznyak, Hugues Lantuit Global permafrost temperatures increased over the last decade // *Nature Communications*, volume 10, Article number: 264 (2019), <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>.
65. A. I. Tyurin, V. S. Isaev, D. O. Sergeev, V. E. Tumskoi, N. G. Volkov, I. S. Sokolov, O. I. Komarov, A. V. Koshurnikov, A. Yu. Gunar, I. A. Komarov, and V. V. Anan'ev Improvement of Field Methods for Engineering Geocryological Surveying // *Moscow University Geology Bulletin*, 2019, Vol. 74, No. 3, pp. 297–309. © Allerton Press, Inc., 2019. Russian Text © The Author(s), 2019, published in *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya 4: Geologiya*, 2019, No. 2, pp. 70–82 {Тюрин А.И., Исаев В.С., Сергеев Д.О., Тумской В.Е., Волков Н.Г., Соколов И.С., Комаров О.И., Кошурников А.В., Гунар А.Ю., Комаров И.А., Ананьев В.В. Совершенствование полевых методов инженерно-геокриологических исследований // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*, № 1, 2019, № 2, 2019, с.70-82}.
66. Isaev V.S., Koshurnikov A.V., Pogorelov A., Amangurov R.M., Podchasov O., Sergeev D.O., Buldovich S.N., Aleksyutina D.M., Grishakina E.A., Kioka A. Cliff retreat of permafrost coast in the southwest Baydaratskaya Bay of Kara Sea during 2005–2016 // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2019, p. 1-13. DOI: 10.1002/ppp.1993.
67. Khimenkov A.N., Sergeev D.O., Stanilovskaya J.V., Vlasov A.N., Volkov-Bogorodsky D.B., Merzlyakov V.P., Tipenko G.S. Structural reorganizations in frozen grounds within the gaz emission crater formation / *Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering*. Springer International Publishing, 2019, p. 305-316. <https://doi.org/10/1007/978-3-319-91833-4>
68. Sergeev D., Khimenkov A., Stanilovskaya J. Methodologic aspects of studying gas emission craters in permafrost / *International conference «Solving the puzzles*

- from cryosphere»* (April 15-18, 2019, Pushchino, Russia), Program and conference materials, p. 61-62.
69. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Мерзляков В.П., Типенко Г.С. Влияние техногенеза на формирование воронок газового выброса / В сб.: *Анализ, прогноз и управление природными рисками с учётом глобального изменения климата – ГЕОРИСК – 2018*. Материалы X Международной конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков. Т.2, с. 271-276.
70. Khimenkov A., Stanilovskaya J., Sergeev D., Vlasov A., Volkov-Bogorodsky D. The fluid dynamics role of gases in the cryogenic craters formation / In: Deline P., Bodin X. and Ravel L. (Eds.) (2018): *5-th European Conference on Permafrost – Book of Abstracts*, 23 June - 1 July 2018, Chamonix, France, < <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01816115/> >, p. 168-169.
71. Isaev V., Koshurnikov A., Komarov O., Sergeev D. Engineer-geocryological scientific-educational field work of Moscow university Master of Science students at polar regions of European Russian arctic / In: Deline P., Bodin X. and Ravel L. (Eds.) (2018): *5-th European Conference On Permafrost – Book of Abstracts*, 23 June - 1 July 2018, Chamonix, France, < <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01816115/> >, p. 247-248.
72. Sergeev D., Chesnokova I. Identification of the Active Layer Heat Exchange Mechanisms in Mountain Permafrost Conditions by using GTN-P data / In: Deline P., Bodin X. and Ravel L. (Eds.) (2018): *5-th European Conference On Permafrost – Book of Abstracts*, 23 June - 1 July 2018, Chamonix, France, < <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01816115/> >, p. 605-606.
73. Чеснокова И.В., Сергеев Д.О. Развитие системы повторных геокриологических наблюдений в Северном Забайкалье / *Сборник докладов расширенного заседания Научного совета по криологии Земли РАН «Актуальные проблемы геокриологии» с участием российских и зарубежных учёных, инженеров и специалистов*. МГУ им. М.В.Ломоносова, 15-16 мая 2018 г., т.1, М.: «КДУ», «Университетская книга», 2018, с. 218-223.
74. Sergeev, D. (2018-01-24). Permafrost-Related Geohazards in Cold Russian Regions / *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. Retrieved 25 Jan. 2018, from <http://naturalhazardscience.oxfordre.com/view/10.1093/acrefore/9780199389407.001.0001/acrefore-9780199389407-e-291>. DOI: 10.1093/acrefore/9780199389407.013.291
75. Чеснокова И.В., Сергеев Д.О., Морозова А.В., Войтенко А.С. Влияние геокриологических процессов на хозяйственные объекты России в XXI веке / *Тезисы конференции «Природные процессы в полярных регионах Земли в эпоху глобального потепления»*, 9–11 октября 2017 г., г. Сочи, с. 54.
76. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Типенко Г.С. Локальный прогрев толщи многолетнемерзлых пород, как одна из причин образования воронок

- газового выброса в криолитозоне / *Тезисы конференции «Природные процессы в полярных регионах Земли в эпоху глобального потепления»*, 9–11 октября 2017 г., г. Сочи, с. 43.
77. Войтенко А.С., Орехов П.Т., Костовска С.К., Сергеев Д.О. Морфометрические исследования тундровых ландшафтов Арктической зоны РФ (Республика Коми: ж/д станции Хановой и Песец, остров Белый: полярная станция им. М.В.Попова) // *Проблемы Региональной экологии. Общественно-научный журнал (Regional Environmental Issues)*, №2, 2017, ИГ РАНу Издательский дом «Камертон», с. 85-91.
78. Chesnokova I., Sergeev D., 2017. Complex analysis of the damage caused by geocryologic processes (as exemplified by effects on the Chara-China Railway track, Transbaikal region) // *Science in Cold and Arid Regions*, 9(3): 0335-0338. DOI: 0.3724/SP.J.1226.2017.00335.
79. Безделова А.П., Сергеев Д.О., Румянцева Я.В., Болотюк М.М. Высотнопоясная структура растительного покрова как основа мониторинга изменения климата и состояния окружающей среды (на примере Баргузинского хребта) // *Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития»*. Москва, 20-22 марта 2017 г. / Отв. сост. А.А. Трунов, П.Д. Полумиева, А.А. Романовская. (Электронный ресурс) — М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2017. - с.278-280. ISBN 978-5-600-01726-9 <www.igce.ru/conferences_pem2017>
80. Войтенко А.С., Гришакина Е.А., Исаев В.С., Кошурников А.В., Погорелов А.А., Подчасов О.В., Сергеев Д.О. Значение изменения геокриологических условий для эксплуатации инфраструктуры и охраны окружающей среды (на примере участка детальных исследований в нижнем течении р.Воркуты) // *Арктика: экология и экономика*, 2017. - № 2 (26). – с. 53-61. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-2-53-61
81. Сергеев Д.О., Перльштейн Г.З., Мерзляков В.П., Хименков А.Н., Типенко Г.С., Власов А.Н., Станиловская Ю.В., Макарычева Е.М. Геоэкологические риски функционирования ведущих природно-технических комплексов на территории криолитозоны России / В сб.: *Вопросы географии*. Сб. 142: География полярных регионов. Отв. Ред. В.М.Котляков. М.: Издательский дом «Кодекс», 2016, с. 57-75.
82. Войтенко А.С., Сергеев Д.О. Технология проведения эволюционных эколого-экономических оценок на примере линейного объекта (железнодорожного полотна) / В сб.: *Природа и общество: технологии обеспечения продовольственной и экологической безопасности. Серия «Социально-естественная история. Генезис кризисов природы и общества в России»*. Под. ред. Ковалевой Н.О., Костовска С.К., Борисовой Е.А. Вып. XL. М.: МАКС-Пресс, 2016, с. 181-187.

83. Romanovskii, N. N.; Tipenko, G. S.; Buldovich, S. N.; Sergeev, D. O.; Gavrilov, A. V.; Romanovsky, V. E.; Duxbury, N. S.; Yoshikawa, K. Mathematical Modeling of Climate - Permafrost - Groundwater Dynamics: a Study of Bestyakh Terrace, Lena River, Siberia // *ICOP Proceedings*, Potsdam, 2016, #65, p. 673. <http://doi.org/10.2312/GFZ.LIS.2016.001>.
84. Voytenko A.S., Sergeev D.O. The cumulative economic damage in the permafrost on the example of the linear object (railway Khanovey - Pesets) // *ICOP Proceedings*, Potsdam, 2016, #140, p. 1133. <http://doi.org/10.2312/GFZ.LIS.2016.001>.
85. Chesnokova I., Sergeev D., Borsukova O., Morozova A. Experience in the assessment of long-term social-economic damage caused by the development of geocryological processes (by the Chara-China railway example) // *ICOP Proceedings*, Potsdam, 2016, #191, p. 1113. <http://doi.org/10.2312/GFZ.LIS.2016.001>.
86. Tananaev N., Makarycheva E., Litovko A., Sergeev D. Field Education in Discontinuous Permafrost Region, Igarka Geocryology Lab // *ICOP Proceedings*, Potsdam, 2016, #367, p. 1240. <http://doi.org/10.2312/GFZ.LIS.2016.001>.
87. Makarycheva E., Tananaev N., Sergeev D., Litovko A. Permafrost map update for the Igarka region as a climate change and human impact tracking tool // *ICOP Proceedings*, Potsdam, 2016, #658, p. 385. <http://doi.org/10.2312/GFZ.LIS.2016.001>.
88. Sergeev D., Khimenkov A., Tipenko G., Vlasov A., Cauquil E., Green E., Dauboin P., Stanilovskaya J. Yamal Craters: State of Knowledge and Wished In-situ Investigations // *ICOP Proceedings*, Potsdam, Session "Hazards and risks related to changing mountain, low-land and coastal permafrost", 2016, #414, p. 997. <http://doi.org/10.2312/GFZ.LIS.2016.001>.
89. Sergeev D.O., Chesnokova I.V., Morozova A.V., Voytenko A.S. Cartographic analysis of the damage, associated with geocryological processes // *ICOP Proceedings*, Potsdam, Session "Permafrost mapping", 2016, #406, p. 398. <http://doi.org/10.2312/GFZ.LIS.2016.001>.
90. Schollaen K., Lewkowicz A.G., Christiansen H.H., Romanovsky V.E., Lantuit H., Schrott L., Sergeev D., Wei M. The International Permafrost Association: current initiatives for cryospheric research // *ICOP Proceedings*, Potsdam, Session "Permafrost mapping", 2016, #1047, p. 1239. <http://doi.org/10.2312/GFZ.LIS.2016.001>.
91. Исаев В.С., Кошурников А.В., Сергеев Д.О., Погорелов А.А., Соколов И.С., Подчасов О.В., Аманжуров Р.Т. Методика проведения и некоторые итоги учебно-научной инженерно-геокриологической практики для магистров 1 курса инженерного потока геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова в сентябре 2015 г. / *Труды Пятой конференции геокриологов России*, Москва, МГУ, 2016, т.3, с. 310-325.

92. Исаев В.С., Тюрин А.И., Сергеев Д.О., Горшков Е.И., Волков Н.Г., Стефанов С.М. День науки и инноваций: новые методы и подходы в полевых геокриологических исследованиях в рамках практики для студентов 4 курса инженерного потока геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в январе 2015 г. / *Труды Пятой конференции геокриологов России*, Москва, МГУ, 2016, т.3, с. 325-331.
93. Сергеев Д.О., Чеснокова И.В. Выявление характера теплообмена в слое сезонного оттаивания по данным режимных термометрических наблюдений (Чара, Северное Забайкалье) / *Труды Пятой конференции геокриологов России*, Москва, МГУ, 2016, т.2, с. 118-123.
94. Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В., Перлыштейн Г.З., Романовский В.Е., Безделова А.П., Алексютина Д.М., Болотюк М.М., Хименков А.Н., Капралова В.Н., Мотенко Р.Г., Малеева А.М. Фоновый геокриологический мониторинг в Северном Забайкалье // *Криосфера Земли*, 2016, т. XX, № 3, с. 24–32, DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-3(24-32).
95. Сергеев Д.О., Чеснокова И.В., Борсукова О.В., Морозова А.В., Макарычева Е.М., Войтенко А.С. Оценка стоимости содержания инфраструктуры на территории криолитозоны в связи с развитием геокриологических процессов / В сб.: *Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи*, выпуск 18, Материалы годичной сессии Научного Совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (24-25 марта 2016 г.), Москва, РУДН, 2016, с. 566-569.
96. Чеснокова И.В., Сергеев Д.О., Борсукова О.В. Опыт оценки социально-экономического ущерба, обусловленного развитием геокриологических процессов (на примере железной дороги Чара-Чина) / В сб.: *Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи*, выпуск 18, Материалы годичной сессии Научного Совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (24-25 марта 2016 г.), Москва, РУДН, 2016, с. 575-579.
97. Исаев В.С., Тюрин А.И., Сергеев Д.О., Горшков Е.И., Волков Н.Г., Стефанов С.М. «День науки и инноваций»: новые методы и подходы полевых геокриологических исследований // *Вестник Московского Университета*, Серия 4, Геология, № 1, 2016, с. 98-102 (ISSN 0145-8752, *Moscow University Geology Bulletin*, 2016, Vol. 71, No. 2, pp. 212–215. © Allerton Press, Inc., 2016. Original Russian Text © V.S. Isaev, A.I. Tyurin, D.O. Sergeev, E.I. Gorshkov, N.G. Volkov, S.M. Stefanov, 2016, published in *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Geologiya*, 2016, No. 1, pp. 98–102).
98. Sergeev D., Stanilovskaya J. Geocryological Risk: Conception and Estimation Algorithms / *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 1*, Springer, 2015, p. 229-231.

99. Stanilovskaya J., Merzlyakov V., Sergeev D. Probabilistic Assessment of Ice Wedge Hazard for Linear Structure / *Engineering Geology for Society and Territory* - Volume 1, Springer, 2015, p. 311-314.
100. Перльштейн Г.З., Д.О.Сергеев, Г.С.Типенко, В.Е.Тумской, А.Н.Хименков, А.Н.Власов, В.П.Мерзляков, Ю.В.Станиловская Углеводородные газы и криолитозона шельфа Арктики // *Арктика. Экология и Экономика*, №2 (18), 2015, с.35-44.
101. Хименков А. Н., Власов А. Н., Сергеев Д. О., Козырева Е. А., Рыбченко А.А., Пеллинен В. А. Влияние криогенеза на развитие склоновых процессов степных территорий Прибайкалья // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, 2015, № 6, с. 535–543.
102. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Власов А.Н., Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Светлаков А.А. Криогенные и посткриогенные образования на острове Ольхон // *Криосфера Земли*, 2015, № 4, с. 54–63.
103. Biskaborn V.K., Lanckman J.P., Lantuit H., Romanovsky V., Sergeev D., Vieira G., Cable W., Pogliotti P., Nötzli J., Christiansen H.H., Jóhannsson H. Quality assessment of permafrost thermal state and active layer thickness data in GTN-P / *Geo Quebec*, #617.
104. Sergeev D., Chesnokova I., Morozova A. Estimation of the Past and Future Infrastructure Damage Due the Permafrost Evolution Processes / *AGU Proceedings*, San Francisco, 2015, пер.№ 63245, 28.07.2015, confirmation number is agu-fm15-63245-5358-5240-6569-9765.
105. Макарычева Е.М., Капралова В.Н., Сергеев Д.О. Анализ режима водной поверхности термокарстовых озёр в горах Северного Забайкалья / *Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире, Сергеевские чтения*, т.2, Москва, РУДН, 2015, с.477-482.
106. Мерзляков В.П., Сергеев Д.О. Оценка опасности возникновения морозобойных трещин для областей с резкоконтинентальным климатом / *Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире, Сергеевские чтения*, т.2, Москва, РУДН, 2015, с.486-492.
107. Кошкарёв А.В., Сергеев Д.О., Чеснокова И.В. К вопросу оценки природных геологических и геокриологических рисков природопользования / *XXXIV Пленум Геоморфологической комиссии РАН. Экзогенные рельефообразующие процессы: результаты исследований в России и странах СНГ*, г.Волгоград, ВГСПУ, 7-8 октября 2014 г. (электронное издание), с. 1-2.
108. Чеснокова И.В., Сергеев Д.О. Оценка последствий проявлений опасных геологических и геокриологических процессов / *Всероссийская конференция с международным участием «Эндогенная активность Земли и биосоциальные процессы» (ГеоБио2014)* 5-7 ноября 2014 г., ИФЗ РАН, Москва, с. 48-49.

109. Станиловская Ю.В., Мерзляков В.П., Сергеев Д.О., Хименков А.Н. Оценка опасности полигонально-жильных льдов для линейных сооружений // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, 2014, №4, с. 368-379.
110. Stanilovskaya J., Sergeev D. Permafrost Hazards and Long Linear Structures / *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 16, EGU2014, Vienna, 2014, pp. 229.
111. E. Makarycheva, D.Sergeev, V.Kapralova, H.Jin Water level regime of thermokarst lakes in the mountain areas / *Book of Abstracts of EUCOP4 – 4th European Conference on Permafrost 18-21 June 2014 - Évora, Portugal*, p.206.
112. D. Sergeev, G. Perlshtein, J. Stanilovskaya, I. Utkina, D. Aleksyutina, A. Bezdelova, V. Kapralova, E. Makaricheva Chara Permafrost Monitoring Results: Local Variability and Regional Trends / *Book of Abstracts of EUCOP4 – 4th European Conference on Permafrost 18-21 June 2014 - Évora, Portugal*, p.503.
113. Логунова Е.Н., Сергеев Д.О. Развитие методики экологического сопровождения строительства и эксплуатации магистральных трубопроводов на территории криолитозоны // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 2014, № 3, с 277-285.
114. Сергеев Д.О., Чеснокова И.В. Проблемы оценки устойчивого развития территории в криолитозоне // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 2014, № 2, с. 127-130.
115. Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В., Савельев К.В., Йошикава, К. Использование тепловизора при геокриологических исследованиях. // *ХолодОК!*, №1(10) 2013. – с. 62-69.
116. Stanilovskaya Yu.V., Yoshikava K., Sergeev D.O. School-based Permafrost Monitoring Project in Russia / *International Conference “Earth Cryology: XXI Century”*, September 29 – October 3, 2013, Pushchino, Moscow Region, Russia, p.94.
117. Sergeev D. Geocryological Risk: Conception and Estimation Algorithms / *International Conference “Earth Cryology: XXI Century”*, September 29 – October 3, 2013, Pushchino, Moscow Region, Russia, p.106 (150-151).
118. Дроздов Д.С., Малкова Г.В., Абрамов А.А., Константинов П.Я., Сергеев Д.О., Романовский В.Е., Холодов А.Л. Мониторинг криолитозоны России и создание единой национальной информационной базы / *International Conference “Earth Cryology: XXI Century”*, September 29 – October 3, 2013, Pushchino, Moscow Region, Russia, p.138
119. Е.М.Макарычева, Д.О.Сергеев, Ю.В.Станиловская, Г.З.Перльштейн, А.Н.Хименков Аэровизуальные обследования как источник геокриологической информации и их роль в обеспечении устойчивого развития территории / *В сб.: Сергеевские чтения. Устойчивое развитие:*

задачи геоэкологии (инженерно-геологические, гидрогеологические и геокриологические аспекты). Выпуск 15, с. 449-454.

120. Т.С.Антипкина, Г.З.Перльштейн, Д.О.Сергеев, Г.С.Типенко, А.Н.Цеева Перспективы применения тепловых насосов при освоении намывных территорий в Якутске / В сб.: *Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озёр и водохранилищ. Труды 3-й международной конференции «Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акватории водных объектов»*. Иркутск, 29 июля – 3 августа 2013 г., Иркутск, Институт Земной коры СО РАН, с. 9-11.
121. А.Н.Хименков, Ю.В.Халилова, Д.О.Сергеев, Г.З.Перльштейн, А.Н.Угаров Проблемы получения и использования актуальной информации о развитии геологических процессов при мониторинге трасс линейных объектов большой протяжённости // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 2013, № 3, с.264-271.
122. Khalilova Y., Sergeev D., Yoshikawa K. Permafrost map in Russia using community-based permafrost and active layer monitoring network / *Third International Symposium on the Arctic Research (ISAR-3)*. Tokyo, Japan, 2013, p.40.
123. A.L.Dorozko, V.M.Makeev, D.O.Sergeev, J.V.Khalilova, A.N.Ugarov, S.P.Sushchev. Evaluation of geodynamic factors in the formation of negative exogenous processes on the oil pipeline route / *33-rd General Assembly of the European Seismological Commission (GA ESC)*, 2012, Moscow, Russia, p. 431.
124. Dmitry O. Sergeev, Nikolai N. Romanovskiy, Gennadiy S. Tipenko, Sergey N. Buldovich, Anatoly V. Gavrilov, Kenji Yoshikawa, Vladimir E. Romanovsky The Influence of the Changing Climate and Geocryological Conditions on the Regime of Regional Discharge and Icing in the Upper Part of Lena River's Basin // *Socially Scientific Magazine "Geography, Environment, Stability"* No 01 (v. 05) 2012, pp 41-51.
125. Д.О. Сергеев, Ю.В. Халилова, Г.З. Перльштейн, А.Н. Хименков, Е.М. Макарычева, А.Н. Угаров Идентификация, диагностика и ранжирование геокриологических опасностей для протяжённых трубопроводов и других линейных объектов / *Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению – ТИСОП «Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире»*, Том 3, 2012, с. 463-466.
126. Sergeev D.O., J.V. Khalilova, G.Z.Perlshtein, A.N. Khimenkov, E.M. Makaricheva & A.N. Ugarov. 2012. Identification, Diagnostics and Ranking of Geocryological Hazards for Lengthy Pipelines and Other Linear Structures / *Tenth International Conference on Permafrost: Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World*. Vol.2. – Fort Dialog-Iset: Ekaterinburg, Russia, pp. 382-384.

127. Makarycheva E.M., Yu.V. Stanilovskaya, D.O. Sergeev, G.Z. Perlshtein & A.N. Khimenkov, A.N. Ugarov. 2012. Aerovisual Observations as a Source of Geocryological Information / *Tenth International Conference on Permafrost: Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World*. Vol.4/1: Extended Abstracts. – Fort Dialog-Iset: Ekaterinburg, Russia, pp. 348-349.
128. Stanilovskaya J.V., Sergeev D.O., Ugarov A.N. Experience of pipeline aerial survey / *International Symposium on Changing Cryosphere. Water Availability and Sustainable Development in Central Asia*, 2012, pp. 63.
129. Sergeev D.O., Stanilovskaya J.V., Perlshtein G.Z., Khimenkov A.N., Makarycheva E.M., Ugarov A.N. Ranking of geological hazards for oil pipelines' exploitation // *Journal of international scientific publications: Ecology and safety*, 2012, pp. 164-170.
130. Сергеев Д.О., Перльштейн Г.З., Хименков А.Н., Халилова Ю.В., Угаров А.Н. Использование результатов аэровизуального обследования при оценке опасности экзогенных геологических процессов на трассе магистрального нефтепровода // *Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело"*. 2011. №6, с. 101-115. URL: http://www.ogbus.ru/authors/SergeevDO/SergeevDO_1.pdf.
131. А.Н.Хименков, Г.З.Перльштейн, Д.О.Сергеев, А.Н.Власов, В.П.Мерзляков, Ю.В.Халилова Геоэкологические аспекты оценки риска опасных процессов в криолитозоне / В сб. *Экстремальные природные явления и катастрофы*: в 2 т. / Отв. ред. А.О. Глико; т. 2: Геология урана, геоэкология, гляциология / Отв. ред. В.М. Котляков, ИГ РАН; отв. сост. А.Л. Собисевич, ИФЗ РАН; – М.: ИФЗ РАН, 2011, с. 205-212.
132. D. O. Sergeev, A. V. Khimenkov, Y. V. Stanilovskaya, V. P. Antonov-Druginin Some Aspects of Permafrost Hazards Evaluation / *Extended Abstracts to the Proceedings of the 11th Congress of the IAEG. Geologically Active*. 5-10 September 2010 Active, Auckland, Aotearoa, New Zealand, p.p. 193.
133. V. E. Romanovsky, D. S. Drozdov, N. G. Oberman, G. V. Malkova, A. L. Kholodov, S. S. Marchenko, N. G. Moskalenko, D. O. Sergeev, N. G. Ukraintseva, A. A. Abramov, D. A. Gilichinsky, A. A. Vasiliev Thermal state of permafrost in Russia // *Permafrost and Periglacial Processes*, Volume 21 Issue 2 (April/June 2010). Special Issue: The International Polar Year, 2010, p.p. 136-155.
134. D.O.Sergeev, G.Z.Perlshtein, A.N.Khimenkov, G.S.Tipenko, N.B.Pystina Identification and quantitative assessment of permafrost hazards to land resources in the central Part of Yamal Peninsula / *Geological Engineering Problems in Major Construction Projects. Proceedings of the International Symposium and the 7th Asian Regional Conference of IAEG, 2009*, p.p.526-527.
135. Antonov-Druginin V.P., Perlshtein G.Z., Sergeev D.O. Geocryological hazards to underground winning of Buryatia buried placers / *Geological Engineering Problems in Major Construction Projects. Proceedings of the*

International Symposium and the 7th Asian Regional Conference of IAEG, 2009, p.638.

136. J.V.Stanilovskaya & D.O.Sergeev Russian and foreign experience review of territorial geocryological hazards assessment and risks of geocryological processes' impact / *Geological Engineering Problems in Major Construction Projects. Proceedings of the International Symposium and the 7th Asian Regional Conference of IAEG, 2009, p.268.*
137. Stanilovskaya J.V., Sergeev D.O. Review of geocryological hazards and risks assessment / *Abstracts of the First World Young-Earth-Scientists (YES) Congress 2009, Oct. 25-28 2009, China University of Geosciences, 2009, pp.65.*
138. Станиловская Ю.В., Сергеев Д.О. Обзор российского и зарубежного опыта территориальной оценки геокриологических опасностей и рисков активизации геокриологических процессов / *Проблемы снижения природных опасностей и рисков. Материалы Международной научно-практической конференции «Геориск-2009», т.1, М., Российский университет дружбы народов, 2009, с. 251-257.*
139. Д.О.Сергеев, Н.Н.Романовский, А.В.Гаврилов, С.Н.Булдович, Г.С.Типенко, К.Йошикава, В.Романовский Влияние динамики климата и геокриологических условий на режим регионального стока и наледообразования горных водосборов бассейна реки Лена // *Криосфера Земли, 2009, Том XIII, № 3, с. 29–35.*
140. Г.З.Перльштейн, Д.О.Сергеев, Г.С.Типенко Численный прогноз температурного режима грунтов в основании зданий при хозяйственном освоении Ямала / *11-е Сергеевские чтения, Москва ГЕОС, 2009, с.213-217.*
141. Романовский Н.Н., Булдович С.Н., Типенко Г.С., Сергеев Д.О., Касымская М.В., Гаврилов А.В. Оценка влияния климатических изменений на поверхностный сток с помощью моделирования теплового взаимодействия многолетнемерзлых пород и подземных вод (на примере верхней части водосборного бассейна р. Лена) // *Криосфера Земли, 2009, Том XIII, № 1, с. 55–64.*
142. Г.И.Грива, В.П.Мерзляков, А.В.Павлов, Г.З.Перльштейн, Д.О.Сергеев, Г.С.Типенко, А.Н.Хименков К проблеме природных и техногенных катастроф на территории криолитозоны в условиях глобальных изменений климата / *Изменение окружающей среды и климата, природные и связанные с ними техногенные катастрофы, том 3: Опасные природные явления на поверхности суши: механизм и катастрофические следствия, ИГ РАН, Москва, 2008, с.59-73.*
143. Д.М. Шестернев, В.С. Шейкман, Чупрова А.А., В.В. Поповнин, А.А. Алейников, Д.О. Сергеев, М.В. Шахгеданова Трансформация криогляциальных систем в северном забайкалье в условиях глобального изменения климата / *Труды Международного симпозиума «Изменение*

климата Центральной Азии: социально-экономические и экологические последствия» в рамках международной научно-практической конференции «Приграничное сотрудничество: Россия, Китай, Монголия» 22 - 24 октября 2008 г., Чита, Россия.

144. J.Ukhova, A.Osokin, D.Sergeev, and J.Stanilovskaya Permafrost response to Dynamics of External Heat Exchange: Comparison of Observed and Modeled Data (Nadym-Pur-Taz Region) / *NICOP 2008, Ninth International Conference on Permafrost. Extended Abstracts*. Kane and Hinkel, Editors, Fairbanks, 2008, pp. 321-322.
145. S.Buldovich, N.Romanovskiy, G.Tipenko, D.Sergeev, V.Romanovsky Permafrost Dynamics within an Upper Lena River Tributary: Modeled Impact of Infiltration on the Temperature Field Under a Plateau / *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, University of Alaska Fairbanks, Volume 1, June 29–July 3, 2008, pp. 211-214.
146. V.E.Romanovsky, A.L.Kholodov, S.S.Marchenko, N.G.Oberman, D.S.Drozdov, G.V.Malkova, N.G.Moskalenko, A.A.Vasiliev, D.O.Sergeev, M.N.Zheleznyak Thermal State and Fate of Permafrost in Russia: First results of IPY / *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, University of Alaska Fairbanks, Volume 2, June 29–July 3, 2008, pp. 1511-1518.
147. V.E.Romanovsky, S.S.Marchenko, R.Daanen, D.O.Sergeev, and D.A.Walker Soil Climate and Frost Heave Along the Permafrost/Ecological North American Arctic Transect / *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, University of Alaska Fairbanks, Volume 2, June 29–July 3, 2008, pp. 1519-1524.
148. J.Stanilovskaya, J.Ukhova, D.Sergeev, I.Utkina Thermal State of Permafrost in Northern Transbaykalia, Eastern Siberia / *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, University of Alaska Fairbanks, Volume 2, June 29–July 3, 2008, pp. 1695-1700.
149. Станиловская Ю.В., Сергеев Д.О. Разработка легенды опасности термокарста / *Всероссийский научный молодежный форум честь 100-летия П.И.Мельникова «Геокриология – прошлое, настоящее, будущее»*, 2008, Институт мерзлотоведения СО РАН, Тезисы конференции, с. 24-26.
150. Романовский В.Е., Марченко С.С., Даанен Р., Никольский Д.Д., Сергеев Д.О., Уолкер Д.А. Температура воздуха и почвы, а также морозное пучение на мерзлотно-экологической трансекте в Арктической части Северной Америки / *Международная конференция «Криогенные ресурсы полярных регионов, Салехард, июнь 2007 г.»*, Материалы, т.1, 2007, с. 39-42.
151. Сергеев Д.О. Изменчивость климатических факторов геокриологических условий Аляски и Северной Канады / *Международная конференция «Криогенные ресурсы полярных регионов, Салехард, июнь 2007 г.»*, 2007, Материалы, т.1, с. 163-165.

152. Станиловская Ю.В., Ухова Ю.А., Сергеев Д.О., Романовский В.Е. Температурный режим многолетнемерзлых толщ и сезонноталого слоя в горах Северного Забайкалья (реализация программы TSP) / *Международная конференция «Криогенные ресурсы полярных регионов*, Салехард, июнь 2007 г., 2007, Материалы, т.1, с. 176-178.
153. Антонов-Дружинин В.П., Перльштейн Г.З., Сергеев Д.О. Проблемы геоэкологического мониторинга при подземной разработке вечномёрзлых россыпей / *Сергеевские чтения. Опасные природные и техноприродные экзогенные процессы: закономерности развития, мониторинг и инженерная защита территорий*. Вып. 9, Москва, ГЕОС, 2007, с. 273-276.
154. Сергеев Д.О., Ухова Ю.А., Станиловская Ю.В., Романовский В.Е. Температурный режим многолетнемерзлых толщ и сезонноталого слоя в горах Северного Забайкалья (возобновление стационарных наблюдений) // *Криосфера Земли*, 2007, т. XI, № 2, с. 19-26.
155. Romanovsky, V. E., Sazonova, T. S., Balobaev, V. T., Shender, N. I., and D. O. Sergueev, Past and recent changes in permafrost and air temperatures in Eastern Siberia // *Global and Planetary Change*, 56: 399-413, 2007.
156. V. Romanovsky, S. Marchenko, D. Sergeev, D. Nicolsky, R. Daanen, State of permafrost in Alaska / *AAAS Conference*, Fairbanks, Alaska, October 2-4, Suppl., p. 57, 2006.
157. V. Romanovsky, S. Marchenko, C. Duguay, M. Zheleznyak, D. Sergeev, Monitoring and modeling of the Northern Eurasia permafrost dynamics / *AAAS Conference*, Fairbanks, Alaska, October 2-4, Suppl., p. 58, 2006.
158. V E Romanovsky, S S Marchenko, R Daanen, D Nikolsky, D O Sergeev, D A Walker, Soil climate and frost heave along the Permafrost/Ecological North American Arctic Transect // *Eos Trans. AGU*, 87(52), Fall Meet. Suppl., C44A-06, 2006.
159. Сергеев Д.О., Хименков А.Н. Рекомендуемые подходы к оценке относительной опасности геоэкологических процессов в связи с изменениями климата / *Труды Арктического Регионального Центра*, Том IV, Морские Исследования ДВО РАН в Арктике, Владивосток, Дальнаука, 2006, с.69-75.
160. V E Romanovsky, S S Marchenko, G Grosse, C R Duguay, M N Zheleznyak, D O Sergeev, Monitoring and Modeling of the Northern Eurasia Permafrost Dynamics // *Eos Trans. AGU*, 87(52), Fall Meet. Suppl., GC21B-04 INVITED, 2006.
161. V.E. Romanovsky, S.M. Marchenko, and D.O. Sergeev. Permafrost Temperature Reanalysis as a Valuable Tool in Paleo-Environmental Studies / *Global Environmental Change: Regional Challenges. An Earth System Science Partnership. Global Environmental Change. Open Science Conference*, 9-12 November 2006 Beijing, China.

162. В.Б.Лещинский, А.А.Михеев, Д.О.Сергеев, О.Н.Сергеев, Ю.П.Старцев, А.В.Явелов Разработка и апробация методики экологического сопровождения строительства магистральных газопроводов // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, 2006, № 3, с. 264-273.
163. Мерзляков В.П., Перльштейн Г.З., Сергеев Д.О., Хименков А.Н. Геоэкологическое значение динамики криолитозоны под влиянием климатических изменений / *Международная конференция «Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз её изменений» Материалы*, т.1, 2006, с.159-161.
164. Romanovsky V., Yoshikava K., Sergueev D., Shur Y. Permafrost Observatory near Gakona, Alaska. Local-Scale Features in Permafrost Distribution and Temperatures // *Eos Trans. AGU*, 86, Fall Meet. Suppl., 2005.
165. Perlshtein, G., Levashov, A., Sergueev, D.O. Analysis of the thermokarst's early stage with deterministic and probabilistic methods / *Terra Nostra – 2nd European Conference on Permafrost*, June 12-16, 2005, Potsdam, Germany. Programme and Abstracts, ISSN 0946-8978, p.p. 143-144.
166. Mikheev, A.A., Cherbunina, M.Y., Sergueev, D.O. The analysis of the active layer dynamics: comparison of CALM data with modeling results / *Terra Nostra – 2nd European Conference on Permafrost*, June 12-16, 2005, Potsdam, Germany. Programme and Abstracts, ISSN 0946-8978, p.p. 137-138.
167. Sergueev D.O, Outkina I. Periglacial phenomena as indicators of the past climate change in the East Siberia mountains / *Terra Nostra – 2nd European Conference on Permafrost*, June 12-16, 2005, Potsdam, Germany. Programme and Abstracts, ISSN 0946-8978, p.p. 23.
168. Перльштейн Г.З., Павлов А.В., Левашов А.В., Сергеев Д.О. Нетемпературные факторы теплообмена деятельного слоя с атмосферой / *Материалы Третьей конференции геокриологов России*, Москва, 1-3 июня 2005 г., МГУ, 2005, с. 86-91.
169. Перльштейн Г.З., Сергеев Д.О. О детерминистском и вероятностном подходах в количественных геокриологических исследованиях / *Тезисы Международной конференции «Приоритетные направления в изучении криосферы Земли»*, Пущино, 25-28 мая 2005 г., ISBN 5-201-14546-9, с.111.
170. Сергеев Д.О., Типенко Г.С., Романовский В.Е., Романовский Н.Н., Березовская С.Л. Влияние горного рельефа и вертикальной геокриологической поясности на эволюцию мощностей многолетнемерзлых толщ Южной Якутии // *Криосфера Земли*, 2005, т. IX, № 2, с. 33-42.
171. T. S. Sazonova, V. E. Romanovsky, J. E. Walsh, and D. O. Sergueev, Permafrost dynamics in 20th and 21st centuries along the East-Siberian Transect // *Journal of Geophysical Research*, V.109, DO1108, doi:10.1029/2003JD003680, 2004.

172. Romanovsky, V. E., Christensen, J. H., Sazonova, T. S., Stendel, M., Walsh, J. E., Kiilsholm, S. and D. O. Sergueev, The use of GCMs and a Regional Climate Model in circumpolar modelling of permafrost dynamics / *Proceedings of the Arctic Climate System Study Final Conference*, St.Petersburg, November 2003, 2004.
173. Сергеев Д.О., Типенко Г.С., Романовский Н.Н., Романовский В.Е. Динамика мощности мёрзлых толщ в горах под влиянием длиннопериодных колебаний климата (результаты численного моделирования для условий северной геокриологической зоны) // *Криосфера Земли*, Том VII, №2, 2003, с. 15-22.
174. M.Kasymkaya, D.Sergueev, N.Romanovskii, Permafrost depth evolution under influence of temperature oscillations (numerical modeling results) / *Proceedings of VIII International Conference on Permafrost*, Switzerland, June 2003.
175. Sergueev, D., Tipenko, G., Romanovsky, V., and Romanovskii N., Mountain permafrost thickness evolution under influence of long-term climate fluctuations (results of numerical simulation) / *Proceedings of VIII International Conference on Permafrost*, Switzerland, July 2003, vol.2, p.p.1017-1021.
176. Romanovsky, V. E., Sergueev, D. O. and T.E. Osterkamp, Temporal variations in the active layer and near surface permafrost temperatures at the long term observatories in Northern Alaska / *Proceedings of VIII International Conference on Permafrost*, Switzerland, July 2003, Phillips, M., Springman, S. and L. U. Arenson (eds), Swets & Zeitlinger, Lisse vol.2, p.p.989-994.
177. D.O. Sergueev, V.E. Romanovsky Comparative Analysis of Thermal and Moisture Trends in the Active Layer of Permafrost (North Slope, Alaska) / *Poster Abstracts Proceedings of the ARCSS All-Hands Workshop*, 20–23 February 2002, p.p.183.
178. D.O. Sergueev, V.E. Romanovsky, T.E. Osterkamp Local Variability of Temperature and Soil Moisture in the Active Layer of Permafrost (Ivotuk and Council, 1998–2001). *Poster Abstracts Proceedings of the ARCSS All-Hands Workshop*, 20–23 February 2002, p.p.184.
179. D. Sergueev, G. Tipenko, N. Romanovskii, V. Romanovsky, M. Kasymkaya, Impact of Mountain Topography and Altitudinal Zonation on Alpine Permafrost Evolution and Ground Water Hydrology // *EOS, Trans. AGU*, 83(47), 2002.
180. T. Sazonova, V. Romanovsky, D.O. Sergueev, G. Tipenko, The Comparison of East Siberian and Alaskan Transects in terms of Permafrost Dynamics (in the past, present and future) using Geographical Informational System // *EOS, Trans. AGU*, 83(47), Fall Meet. Suppl., Abstract B11D-06, 2002.

181. G.E. Yershova, D.O. Sergueev, S.I. Pokrovsky, V.E. Romanovsky, Temporal and spatial variability of microclimate and permafrost conditions in Fairbanks region, Alaska // *EOS, Trans. AGU*, 83(47), Abstract B12A-0776, 2002.
182. Sazonova, T.S., Romanovsky, V.E., Sergueev, D.O. and Tipenko, G.S., The Modeling of Active Layer Thickness and Permafrost Temperature Regime (past, present and future) within East-Siberian Transect, using GIS // *EOS, Trans. AGU*, 82 (47), Fall Meet. Suppl., 83(47), Abstract, F180, 2001.
183. Yavelov A., Movchan V., Obridco S., Sergeev D., Utkina I., Shchadrina T. Map of potential environmental damage due to oil spills in the permafrost region of Russia / PERMAFROST. Seventh International Conference. Program, Abstracts, Reports of the IPA. June 23-27, 1998 (pp. 212-213).