

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора геолого-минералогических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук.

**Официальные оппоненты:**

**Алексеев Сергей Владимирович**, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией гидрогеологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земной коры СО РАН, г. Иркутск.

**Лейбман Марина Оскаровна**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник НИЛ Криогенных процессов, образований и криотрасологии, ИКЗ Тюм НЦ СО РАН, Институт Криосферы Земли, г. Тюмень.

**Осадчая Галина Григорьевна**, доктор географических наук, профессор кафедры химии, химических технологий, экологии и техносферной безопасности, Технологического факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск.

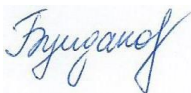
Защита диссертации состоится 30 сентября 2025 г. в 14 ч. на заседании диссертационного совета 24.1.054.01 (Д 002.048.02) на базе ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук» (ИГЭ РАН) по адресу: 109004, г. Москва, ул. Николоямская, д.51.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИГЭ РАН по адресу: 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2 и на интернет-сайте: <https://geoenv.ru>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные подписью и печатью учреждения, просим направлять по адресу: 101000, г. Москва, Уланский переулок, д. 13, стр. 2., а/я 145.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.г.н.



Е.В. Булдакова

## **Актуальность работы**

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, 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.

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 (Основы геокриологии, 2008; Réwé, 1993; Зотова, Тумель, 1999; Геокриологические опасности, 2000; Тумель, Зотова, 2017; Nelson et al, 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.

## **Цель работы**

Выработка методологических основ анализа геокриологических опасностей для подготовки адаптационных решений в условиях меняющегося климата и техногенной нагрузки.

## **Основные задачи**

1. Определить содержание понятия геокриологической опасности.
2. Охарактеризовать источники, виды и географию геокриологических опасностей.
3. Проанализировать связи геокриологических опасностей с состоянием и динамикой геокриологических условий и другими природными и техногенными факторами.
4. Усовершенствовать подходы и требования к геокриологическому прогнозу, районированию и мониторингу как инструментам оценки опасности.
5. Обобщить и проанализировать авторский опыт анализа геокриологических опасностей по разрезу толщи многолетнемёрзлых пород и по площади территорий с природными и нарушенными техногенезом ландшафтами.
6. Разработать процедуру оценки геокриологических опасностей.
7. Разработать методологические основы научного сопровождения адаптации хозяйственной деятельности к изменениям климата и геокриологических условий на основе процедуры анализа геокриологических опасностей.

## **Ключевые объекты**

Природно-технические системы объектов железнодорожного и трубопроводного транспорта, а также объектов гражданского и гидротехнического строительства Северо-Востока Европейской части России (район г. Воркуты), Центральной и Южной Якутии, Северного Забайкалья, а также Центральной Аляски.

## **Фактический материал и личный вклад автора**

В диссертации изложены результаты тридцатипятилетних научных исследований, проводившихся под руководством соискателя при его непосредственном участии 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 многолетнемёрзлых пород на внешние воздействия”, “Углеродородные 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».

### **Методы исследований**

Для решения поставленных задач применялись подходы и методы исторической, динамической и региональной геокриологии, которые были использованы комплексно для обоснования районирования территорий 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 расчёта температурной динамики горных пород обеспечило возможность количественной оценки и прогноза геокриологических опасностей.

### **Научная новизна**

Впервые анализ геокриологических опасностей представлен в виде процедуры, опирающейся на современные методические достижения геокриологического мониторинга, геокриологического прогноза и геокриологического районирования.

Структурированы объём и содержание понятия «геокриологическая опасность», отличающиеся, с одной стороны, разделением актуальных и прогнозируемых опасностей, и, с другой стороны, разделением пространственных и временных аспектов их анализа.

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

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.

Выработана новая система оценки состояния и динамики вечной мерзлоты, основанная на временных событийных показателях коренной перестройки режима теплообмена и пригодная для обоснования приоритетов адаптационных решений.

### **Практическая значимость**

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.

### **Защищаемые 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 событиями (экстремальные погодные события, пожары, наводнения и т.п.), так и с техногенными событиями (нарушения условий теплообмена).

### **Апробация**

Апробация результатов осуществлена в рамках хозяйственных работ с дочерними подразделениями компаний Газпром, Транснефть и АЛРОСА в 2006-2019 г.г.

Результаты авторских исследований и основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 59 международных и всероссийских научных форумах, конгрессах, совещаниях, конференциях Российской Академии Наук, Американского геофизического союза (AGU), Международной ассоциации мерзловедения (IPA), Международной ассоциации инженерной геологии (IAEG), Московского государственного университета (МГУ) и др.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликованы 178 работ, включая разделы в 9 монографиях и 36 статей в журналах из перечня ВАК. Исследования выполнялись в соавторстве со специалистами ИГЭ РАН,



МГУ, ИЗК СО РАН, ИКЗ СО РАН, которые не имеют возражений против защиты данной работы.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения (273 страницы текста, 106 рисунков, 11 таблиц; список используемой литературы включает 133 источника).

### **Благодарности**

Автор благодарен академику В.И.Осипову за внимание к работе, ценные советы и конструктивные замечания. За постоянную поддержку и методическую помощь автор признателен своей жене И.А.Уткиной, коллективу Института геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН, В.П.Мерзлякову, А.Н.Хименкову, Г.С.Типенко и 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, В.С.Исаеву, 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 об учителях и наставниках – 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Понятие геокриологической опасности.**

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.

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

Приведённый в работе обзор подходов к определению содержания и структуры понятий, сопряжённых с тематикой описания, анализа, оценки и прогноза геокриологических опасностей рассматривает достижения школы геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова (В.А.Кудрявцев, Н.Н.Романовский, Л.Н.Хрусталёв, Л.С.Гарагуля, С.Н.Булдович и др.); географического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова (Л.И.Зотовой, Н.В.Тумель, В.И.Соломатина и др.), Федерального агентства США по управлению страной в чрезвычайных ситуациях, международных и национальных исследовательских групп оценки геологического риска (Австрия, Италия, Канада).

В понятие "геокриологическая опасность" обычно включают:

- 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.

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. Выделение ПТС осуществляется на базе мерзлотной съёмки, а её элементы характеризуются мониторинговыми наблюдениями и прогнозными расчётами температурного режима и, по возможности, расчётами активности криогенных процессов.

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 (термокарст, термоэрозия, термосуффозия, криогенное пучение, криогенное трещинообразование, термоабразия, криогенные склоновые процессы, наледообразование).

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.

Кажущаяся хаотичность территориальной приуроченности хозяйственных проблем, связанных с развитием геокриологических процессов, обусловлена 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).

Методы оценки опасностей комбинируются в соответствии со стадиями исследования (рис. 1). Первой стадией оценки является идентификация, т.е. доказательство, что опасность существует (даже если она не проявлена) и имеет геологические границы. На этом этапе преимущественно используется мерзлотная съёмка и данные комплексного мониторинга (геотехнического, геокриологического, экологического).

Второй стадией оценки опасностей является качественная и количественная характеристика их степени (отдельно для каждого криогенного процесса), которая выполняется преимущественно на основе специального районирования природно-технических систем и комплексного мониторинга.

На третьей стадии оценки характеризуется динамика опасности и осуществляется геокриологический прогноз каждой из составляющих природно-технической системы, верифицируемый по данным мониторинга. Основой прогноза служит моделирование температурного поля грунтового массива и сопряжённый с ним прогноз напряжённо-деформированного состояния грунта и технических конструкций.

Для идентификации геокриологической опасности достаточно установления любого из фактов:

- 1) смены состояния многолетнемёрзлых грунтов (ММГ);
- 2) активности геокриологических процессов, в т.ч. при неизменных геокриологических условиях.
- 3) наличия предпосылок и возможностей изменения геокриологических условий в будущем в результате техногенных нарушений и/или климатических и гидрологических условий (например, высокая льдистость отложений).



Рисунок 1. Схема процедуры оценки геокриологической опасности.

Для идентификации геокриологических опасностей необходима организация мониторинговых наблюдений за состоянием и динамикой многолетней мерзлоты грунтов, связанная со структурой понятия «геокриологическая опасность» (рис. 2). Мониторинговые

данные используются при постановке и решении задач геокриологического прогноза.

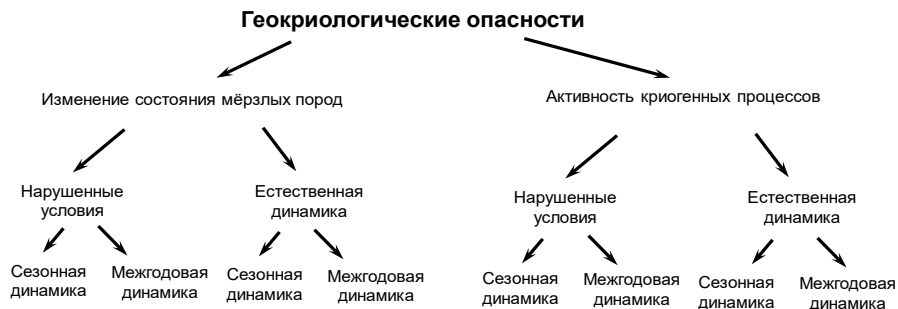


Рисунок 2. Структура понятия геокриологической опасности.

В качестве опасных процессов рассмотрены термокарст (включая его составляющие – термическую осадку, затопление, разрушение берегов, консолидацию грунта, и др.), термоэрозия, термическая суффозия, термоабразия, криогенное пучение, напорные процессы, оползни, сели, лавины, пластические деформации ледогрунтового слоя (включая каменные глетчеры и курумы), солифлюкция, наледообразование, криогенное растрескивание.

*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 комплексного выполнения районирования, мониторинга и геокриологического прогноза.*

## Глава 2. Характеристика геокриологических опасностей.

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

Рассмотрены подходы к выбору показателей состояния и динамики геокриологических условий. Показатели разделены на: прямые и производные, прямые и косвенные, ключевые и вспомогательные, общие и специальные (привязанные к специальным задачам), временные и пространственные. Показатели отражают:

- Мгновенное состояние (статистика пространственного осреднения с оценкой ошибки наблюдений);
- Состояние режима (статистика пространственного осреднения сезонной изменчивости с оценкой ошибки наблюдений);
- Динамика состояния и/или режима (статистика временного осреднения – тренды среднего, и тренды аномальных значений);
- Признак активности процессов или изменения состояния (режима) – индикаторы.

Анализ современного методического арсенала исследований показывает, что наряду с их высоким уровнем общепризнанных подходов существуют и недостатки в оценке состояния и динамики геокриологических условий. Современные подходы оказываются контекстными, а их результаты трудно сопоставимыми.

Для преодоления этого, в лаборатории геокриологии 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. Опыт участия в реализации задач численного моделирования температурного режима показал, что анализ получаемых результатов наиболее эффективно организовывать для *соответствующей точки интенсивных исследований*, используя

графические представления фрагментов матриц, каждая строка которых содержит значения температуры горных пород на заданный момент времени по глубинам неравномерной сети (обычно от поверхности до глубины 400 м). Суточное разрешение прогноза позволяет отследить как сезонную, так и многолетнюю геокриологическую динамику.

Важной составляющей описания 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*, поскольку она определяет возможность искусственного охлаждения многолетнемерзлых пород и коренную перестройку режима подземных вод. Полезно ориентироваться не только на территориально обобщённые показатели температурного режима горных пород, поскольку проявления геокриологических опасностей всегда локальны. Для характеристики текущего состояния многолетней мерзлоты следует совместно рассматривать статические и динамические показатели отдельных ландшафтов, выделяемых на выбранном масштабе картирования. На самом деле, классики мерзлотоведения с самого начала понимали единство статики и динамики в характеристике многолетней мерзлоты (Сумгин, 1934; Кудрявцев, 1983).

Для выяснения того, какой же ландшафт является наиболее уязвимым («слабым звеном») в современных условиях теплообмена, необходимо вначале разделить ландшафты на группы по механизму теплообмена в грунте. Это позволяет отдельно рассмотреть условия кондуктивного теплообмена и перенос тепла, связанный с воздушной или водной конвекцией и/или в условиях развития диффузионных процессов при переменном засолении порового пространства. Одновременно необходимо разделять грунтовые толщи по льдистости



верхних горизонтов. Также 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 раздельного рассмотрения условий теплообмена над жилой и вне её без уточнения геометрического положения и даже морфометрических показателей жильных тел.

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 может 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.

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, а 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 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 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.

Перечисленные показатели являются необходимыми и достаточными для характеристики состояния геокриологических условий на заданный год, а также для характеристики динамики этих условий и степени геокриологической опасности в любом интервале внутри выбранного периода прогнозирования.

Пример типовой легенды специальной геокриологической карты, основанной на предложенных показателях, представлен на рисунке 3.

*Главным научным выводом второй главы является критериальная основа выбора показателей состояния и динамики вечной мерзлоты применительно к характеристикам 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.

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). Таким же образом поступают с результатами геокриологического прогноза, используя детерминированные расчёты температурного режима горных пород.

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 раза). В этих условиях для оценки распределения характеристик грунтовых массивов могут быть рекомендованы стохастические методы.

При обработке результатов изысканий и всех измерений для различных ландшафтов необходимо помнить, что они принадлежат к статистически разнородным совокупностям. Одним из ключевых вопросов методологии геокриологических прогнозов и вообще количественных исследований криолитозоны следует признать соотношение вероятностных и детерминированных подходов к анализу природных и природно-техногенных процессов.

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 направленно воздействуют на инженерные сооружения.

Сами по себе процессы являются сложным объектом наблюдения, поскольку развиваются относительно медленно и часто не имеют однозначных свидетельств своей активности, формируя при совместном протекании полигенетические явления.

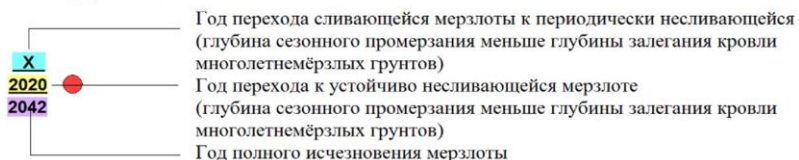
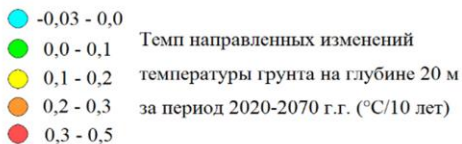
**I. Точки прогнозных геокриологических расчётов и их номера**



**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**



Год перехода сливающейся мерзлоты к периодически несливающейся (глубина сезонного промерзания меньше глубины залегания кровли многолетнемёрзлых грунтов)  
 Год перехода к устойчиво несливающейся мерзлоте (глубина сезонного промерзания меньше глубины залегания кровли многолетнемёрзлых грунтов)  
 Год полного исчезновения мерзлоты

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

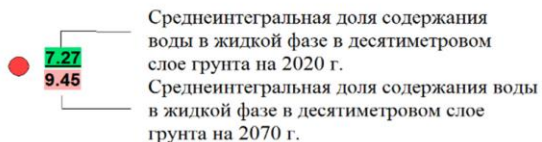


Рисунок 3. Макет условных обозначений карты-схемы прогнозируемых геокриологических опасностей (масштаб 1:5 000 000).

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. Например, сформировалось понимание, что геокриологические условия являются одним из важнейших факторов, определяющих подготовленность склонового материала к смещению (Haeberli, 1992). В криолитозоне приходится учитывать специфику протекания склоновых процессов, связанную, в ряду прочих причин, с высокой динамичностью условий смещения. Например, рыхлый слой четвертичных отложений имеет длительную историю формирования и преобразований, но в криолитозоне на склонах смещается только часть его, подверженная сезонному оттаиванию, динамика которого год от года иногда существенно отличается.

Отдельным направлением развития геокриологического прогноза является совершенствование алгоритмов учёта воздушной и водной конвекции в поровом пространстве грунта.

Оценка природных опасностей возможна только при комплексном использовании методов натуральных наблюдений, ведении специализированного мониторинга, сопоставления и анализа получаемой информации и моделировании экзогенных геологических процессов с учётом прогнозных сценариев трансформации многолетней мерзлоты грунтов.

При организации геокриологического прогноза важен учёт временного масштаба исследования при разновременных внешних воздействиях. Постепенные изменения значений характеристик состояния мерзлоты («тренды») приводят к закономерной эволюции геокриологических условий, которые уже вполне 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 по сценарию.

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 освещённой роль кратковременных аномальных климатических событий в развитии геокриологических процессов (аномально тёплые или влажные сезоны и т.п.).

В геокриологическом прогнозе важен также и учёт геокриологической истории развития территории, по которой 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 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 и формирующие опасность, связанную с распространённостью полигонально-жильных льдов.

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 по повторно-жильным льдам на разных участках первой надпойменной террасы реки Чара. Стадийность развития термокарстовых форм меняет опасность на протяжении развития процесса при неизменной площади поражённости термокарстовыми явлениями (рис. 4).

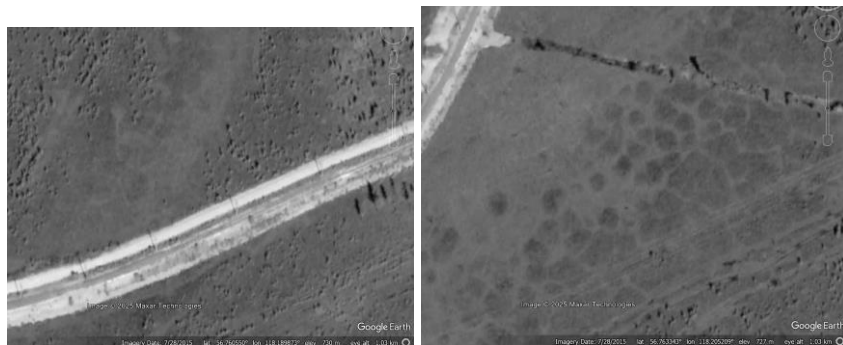


Рисунок 4. Стадийность термокарстовых явлений на повторно-жильных льдах: слева – старт процесса к северу от железнодорожной линии; справа – затухание процесса к востоку от насыпи железной дороги.

На первой стадии опасность максимальна; появляются полигональные просадки поверхности, проявляющиеся и в деформациях полотна автодороги и железнодорожной насыпи. Постепенно часть ледяной жилы вытаивает и на место льда сползает супесчаный материал из межполигональных блоков, промерзающий во временные похолодания климата. Микрорельеф выравнивается и опасность уменьшается: несмотря на потенциал просадки при вытаивании оставшегося льда, последний оказывается относительно защищённым, благодаря мёрзлому высокольдистому переходному слою (рис. 5). Опасность может со временем возрастать при морозобойном растрескивании и формировании новой жилки. Однако при техногенном воздействии или при потеплении климата жила может продолжить протаивать и цикл термоденудации повторится снова.



Рисунок 5. 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).

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. Картирование курумов позволит формировать разные геокриологические прогнозы для задернованных и каменистых ландшафтов. 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. Таким образом, районирование помогает сформировать требования к геокриологическому прогнозу.

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. 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. Региональная система мониторинга призвана фиксировать характеристики фоновых природных процессов, приводящих в условиях данного типа землепользования к изменениям свойств ландшафтов. Локальная система геэкологического мониторинга реализуется в рамках производственного экологического или геотехнического мониторинга. Она должна фиксировать локальные характеристики криогенных процессов, прежде всего, техногенного происхождения.

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 систем, оказывающихся в существенно неравновесных термодинамических условиях. Полученный вывод позволяет более обоснованно формировать требования к сценарию будущего изменения граничных условий модели в зависимости от практических потребностей.

Учёт истории развития вечной мерзлоты также необходим в процедуре оценки опасностей, поскольку именно история влияет на распределение льда в грунтовой толще и должна учитываться при задании начального распределения температур при моделировании.

*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 одновременных 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

Обобщаемый автором опыт анализа геокриологических опасностей позволяет разделить значимость учёта оценки опасностей по разрезу горных пород и по площади исследуемой территории. Такое условное разделение сопряжено с различием методов определения зоны влияния сооружения на поверхности и в массиве грунтов. 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 многолетнемерзлых пород.

Вечная мерзлота оттаивает или формируется не только с поверхности. Частичные фазовые переходы могут происходить на значительных глубинах, особенно если породы засолены. Соответственно, геокриологический прогноз должен строиться с учётом свойств глубоких горизонтов и процессов развития таликов в условиях высокой фациальной неоднородности массива.

Оценка геокриологических опасностей находится в зависимости от детальности описания многолетнемёрзлых пород по глубине т.е. от глубинности исследований. Чем более длительные периоды изменения климата нам нужно учитывать при построении моделей теплообмена, тем глубже многолетнемерзлые породы испытывают эти влияния, и глубина мерзлотных исследований должна это учитывать.

Подошва многолетнемёрзлых толщ также может менять свою конфигурацию при закачке промстоков на глубину, при тепловом воздействии от газодобывающих скважин или при нарушении условий оттока внутриземного тепла через поверхность при формировании термокарстовых озёр.

Приведённые примеры показывают отдельные аспекты анализа геокриологических опасностей в массиве многолетнемёрзлых пород. Так, фациальные особенности озёрно-ледниковых отложений Гакконы (Юго-Восточная Аляска), приводят к сложному объёмному оттаиванию мёрзлого массива в результате климатического потепления. Другим опытом оценки геокриологических опасностей в массиве многолетнемёрзлых пород (ММП) послужили работы, выполненные в содружестве с Виллойской научно-исследовательской мерзлотной станцией Института мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН (Перльштейн, Типенко, Сергеев, 2006). Рассмотрена опасность прогрессирующего развития фильтрации в обход гидротехнических сооружений. Было обнаружено, что развитие талика происходит не только по нормали от линии водосбросного канала, но и по направлению фильтрации. На динамику развития оттаивания также оказывают воздействие изменения уровня и температуры воды в водохранилище.

В качестве ещё одного примера рассмотрены опасности, связанные с одновременным присутствием в грунтовых 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, изучена недостаточно. Яркой иллюстрацией этого утверждения является отсутствие удовлетворительного подтверждения многочисленных гипотез,

объясняющих природу формирования воронок Ямальского типа (Sergeev et al., 2016).

Разобширение кровли 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. Спустя годы и десятилетия эксплуатации, когда ореол растепления под зданием «дотягивается» до кровли ММП, развивается просадка фундамента, приводящая к выводу сооружения из эксплуатации. 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.

Динамика геокриологических условий по разрезу массива многолетнемёрзлых пород при моделировании их температурного режима во взаимодействии с речным стоком (на примере водосбора в верховьях р.Лены) также была прослежена. Анализ многолетних тенденций изменения среднемесячных значений климатических и гидрологических характеристик гидропоста Чульман в посёлке Чульман, за период с 1936 по 2005 гг., показал, что режимы атмосферных осадков и речного стока имеют сонаправленный многолетний тренд для зимних и летних месяцев, и разнонаправленный – в июне и сентябре-октябре, когда при постепенном росте атмосферных осадков объёмы речного стока год от года уменьшаются.

Региональная оценка геокриологических опасностей сталкивается с задачей отдельного описания состояния и динамики геокриологических условий для условно ненарушенных (природных) и нарушенных техногенезом территорий. Для характеристики природной динамики многолетней мерзлоты используются методы геокриологического мониторинга, разработанные как на отечественных геокриологических полигонах, так и в рамках

международных программ геокриологических наблюдений (Мельников и др., 2021; Biskaborn et al., 2019).

Наши наблюдения показали, что межгодовые колебания среднегодовой температуры воздуха имеют региональный характер, несмотря на значительные микроклиматические различия ландшафтов (рис. 4).

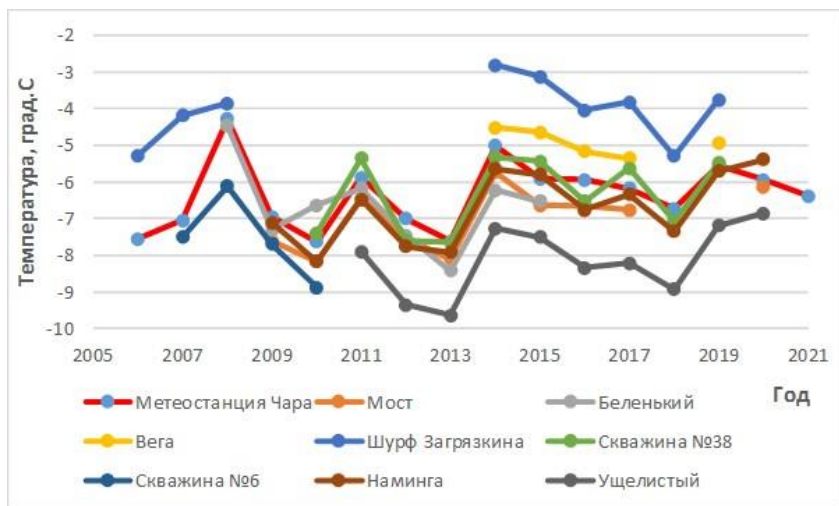


Рисунок 6. Изменения среднегодовых температур воздуха в разных микроклиматических условиях Чарской котловины и хребта Удокан (Северное Забайкалье).

В разных горных вертикальных поясах температура воздуха меняется синхронно, несмотря на локальную изменчивость микроклимата ландшафтов от 700 до 1700 м над уровнем моря. Однако короткопериодные тренды термического состояния мерзлоты на близко расположенных ландшафтах могут быть противоположны ходу климатических изменений и различаться по знаку. Это ставит под сомнение эффективность формальных статистических обобщений точечных данных о региональном состоянии вечной мерзлоты (рис. 7-8), поскольку обусловлено различными свойствами пород, а также историей и механизмами теплообмена.

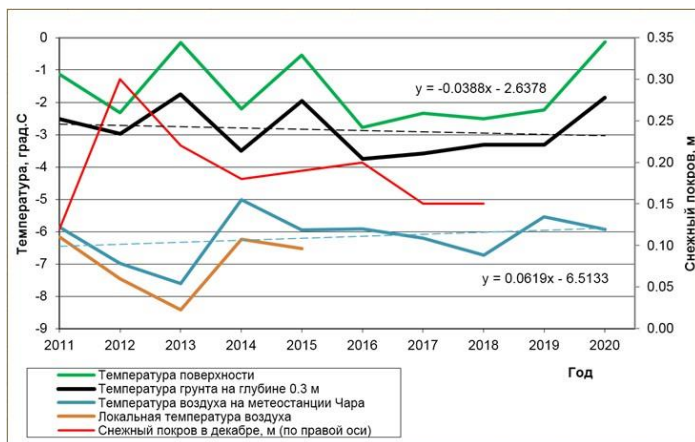


Рисунок 7. Изменения температуры грунта на надпойменной террасе, в сравнении с температурами воздуха, поверхности и толщины снежного покрова (участок Бельный, Чарская котловина, Северное Забайкалье).

Приведённые примеры показывают, что региональная оценка геокриологических опасностей на условно ненарушенных территориях должна учитывать региональные закономерности засоления и газосодержания мёрзлых толщ, режима водного стока и, конечно, распределение льда в отложениях.

На нарушенных антропогенезом территориях при составлении геокриологических прогнозов необходимо учитывать особенности преобладающей техногенной нагрузки. Это можно осуществить на основе современных представлений о природно-технических системах и зонах влияния на территории криолитозоны (Голодковская и Елисеев, 1989; Хименков и др., 2011).



Рисунок 8. Изменения температуры грунта в куруме, в сравнении с температурами воздуха (участок Шурф Загрязкина, хребет Удокан, Северное Забайкалье).

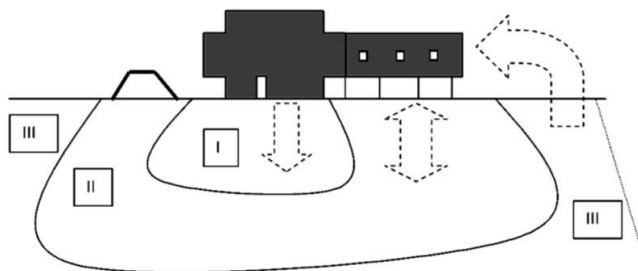


Рисунок 9. Зоны взаимодействия сооружений с геологической средой (пояснения в тексте).

В зоне I непосредственное воздействие сооружения доминирует и определяет интенсивность негативных процессов, являющихся реакцией на изменение геокриологических условий (рис. 9). Таковы здания с тепловыделением, водохранилища, газо- и нефтедобывающие скважины. Для характеристики таких процессов достаточно «простого» геотехнического мониторинга, по данным которого

калибруются и верифицируются геотемпературные и геомеханические модели.

В зоне II интенсивность негативных процессов зависят как от природных факторов, так и от антропогенных воздействий. Таковы здания, возведённые с сохранением мёрзлого состояния грунтов т.е. с минимизированным воздействием и элементы инфраструктуры, меняющие условия теплообмена через поверхность, по сравнению с природными ландшафтами (насыпи, здания с вентилируемыми подпольями). Здесь геотехнический мониторинг необходимо дополнять расширенным геокриологическим мониторингом, предусматривающим наблюдения как в окрестности сооружений, так и за пределами территории землеотвода. Моделирование должно основываться на сценариях изменения климата и техногенной нагрузки.

В зоне III природные опасности доминируют и значение фонового геокриологического мониторинга в пределах ненарушенных ландшафтов возрастает.

*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 многолетнемерзлых пород.*

## Глава 5. Адаптация хозяйственной деятельности на основе анализа геокриологических опасностей.

Информация о геокриологических опасностях служит одной из основ принятия проектных и хозяйственных решений в условиях меняющегося климата и переменной техногенной нагрузки. Потребителей оценки геокриологических опасностей и геокриологического прогноза можно разделить на четыре условные 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) отдельные 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 прогноза к административно-территориальному делению соответствующей степени детальности, для второй категории — к инженерно-климатическому районированию, для третьей и четвертой категорий — к природно-территориальному делению (ландшафтному или водно-бассейновому районированию) и т.д. При этом каждая единица выбранного типа территориального деления будет охарактеризована собственным комплексом существующих и потенциальных геокриологических опасностей, различных для разных видов хозяйственной деятельности.

Экономический ущерб, возникающий при строительстве и эксплуатации конкретных объектов на территории распространения многолетнемёрзлых пород, может быть обусловлен спецификой геокриологических опасностей, проявляющимися в областях распространения вечной мерзлоты. К таким опасностям относятся: землетрясения, заболачивание и подтопление, опустынивание, дефляция, наводнения, сели, лавины, оползни, карст.

На предпроектных стадиях освоения территории невозможно осуществить достоверную оценку уязвимости объектов, а значит и оценить риск. Обычно применяемые методы оценки геокриологических опасностей на этапе выбора площадки для инвестиций не учитывают обилия неопределённостей, связанных с пространственным распределением подземного льда, характера грядущих климатических изменений, возможных проектных решений и их практической реализации. 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 условия жизни населения). В работе приведён пример создания оценочной карты опасности нефтяных разливов на территории криолитозоны на объектах транспортной инфраструктуры компании «Транснефть».

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. Примерами высокой эффективности такой деятельности являются такие объекты, как Аляскинский нефтепровод и объекты Надымгаздобычи. Особенное значение в условиях климатического потепления приобретает геокриологический прогноз, который рекомендуется выполнять совместно с экономическим прогнозом. Примером реализации этого направления являются работы научной школы Л.Н.Хрусталёва.

До сих пор абсолютное большинство известных случаев деформаций зданий на территории криолитозоны связано не столько с климатическими изменениями, сколько с нарушениями правил эксплуатации и ошибками при проектировании. При проектировании, однако, следует иметь в виду, что в ходе климатических изменений в период эксплуатации прочность мёрзлых грунтов будет существенно меняться по сравнению с нормативными показателями, рассчитанными для момента строительства.

На стадии проектирования и строительства объектов также рекомендуется активно использовать методики, в которых характеристика и оценка опасности геокриологических процессов сопоставлены существующей инженерной и нормативно-методической практике. В качестве примера приведена методика экологического сопровождения строительства и эксплуатации магистральных трубопроводов (Логунова, Сергеев, 2014; Лещинский и др., 2006).

Стадия эксплуатации объектов и общехозяйственное использование территории являются наиболее сложными для оценки геокриологических опасностей. За срок более 3-5 лет геокриологические условия могут значительно меняться, приводя объекты в непроектное состояние. С этим борются, фактически (а иногда интуитивно) назначая повышенные коэффициенты запаса прочности, что приводит к удорожанию строительства. Рекомендуется 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 качестве примера рассмотрен опыт прогноза эксплуатации жилого дома в г. Якутске с применением теплового насоса.

Послеэксплуатационная рекультивация и учёт накопленного ущерба требуют специальных подходов в оценке геокриологических опасностей, но также активно используют данные геокриологического прогноза. Иногда работы по рекультивации территории существенно нарушают условия теплообмена через поверхность, о чём свидетельствует опыт ВНИИГАЗ. Исследования, выполненные ИГЭ РАН в 2010 году позволили получить опыт таких оценок.

Территориальные и отраслевые программы адаптации являются полезным инструментом оптимизации управления на территориях с холодным климатом и промерзанием грунтов. 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 субарктических регионов России.

На участках территории криолитозоны, проявляющих повышенную чувствительность (уязвимость) при превышении порогового потепления 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 превысит указанный порог 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 будут необходимы.

Основой для выработки критериев необходимости адаптации служит фоновый (региональный) геокриологический прогноз на срок 30-50 лет. Прогноз должен обновляться каждые 5 лет с использованием уточнённых сценарных и мониторинговых данных. Результаты прогноза отображаются на карте-схеме прогнозных геокриологических опасностей масштаба 1:5 000 000 и используются для определения временных и территориальных приоритетов адаптационной деятельности, а также в качестве входных параметров в локальных прогнозных моделях объектового уровня.

При составлении адаптационных программ разного уровня определяется ключевая адаптационная технология, разработка и внедрение которой обуславливает успех адаптационных мероприятий. Пример соотношения адаптационных мероприятий и применяемых технологий приведён в Таблице 1.

Таблица 1

## Содержание адаптационных программ (пример)

<b>Основное содержание последовательности адаптационных мероприятий</b>	<b>Основная адаптационная технология</b>
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 организаций (предприятий), ответственных за подготовку совместных программ адаптации для приоритетных территорий.	Районирование территории по основным элементам инфраструктуры и применяемым технологиям природопользования, 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; разрабатывается планы локальных защитных или компенсирующих мероприятий; уточняются программы геотехнического и экологического мониторинга.	Разработка типовых трёхмерных термомеханических моделей устойчивости инженерных сооружений, необходимых для сравнительной оценки эффективности различных защитных и/или компенсирующих мероприятий.

*Главным научным результатом пятой главы является развитие адапционного 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**

В данном исследовании автором сделана попытка объединения подходов и методов общего (классического) и инженерного мерзловедения для анализа и оценки геокриологических опасностей. Традиционно эти два направления развиваются достаточно обособленно друг от друга.

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.

Основными научными достижениями работы являются:

1. Раскрытие содержания понятия геокриологической опасности как современной или прогнозируемой инженерно-геологической ситуации, 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 водно-физических 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.

### **Основные работы, опубликованные по теме диссертации**

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК*

1. Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Жданев 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](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=68814).
  3. 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.
  4. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Кулаков А.П., Романов А.В. — Особенности организации инженерно-геокриологического мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территориях распространения многолетнемерзлых пород // Арктика и Антарктика. — 2023. — № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.4.68814 EDN: ICMZSC URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=68814](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=68814)
  5. 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 ноябрь2023). (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 November2023)).

6. Кулаков А.П., Сергеев Д.О. Развитие экзогенных геологических процессов и явлений на автомобильной дороге “Удокан–Наминга” (Северное Забайкалье) // Геозкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2023. №4. с. 53-62. DOI: 10.31857/S0869780923040057
7. 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
8. 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. Шейн 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
9. 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).

10. 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
11. 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.
12. 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
13. 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
14. 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.
15. 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.
  16. 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
  17. Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В., Перльштейн 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).
  18. 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.
  19. 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.
  20. Сергеев Д.О., Чеснокова И.В. Проблемы оценки устойчивого развития территории в криолитозоне // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 2014, № 2, с. 127-130.

21. 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 // Геозкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2013, № 3, с.264-271.
22. 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 наледеобразования горных водосборов бассейна реки Лена // Криосфера Земли, 2009, Том XIII, № 3, с. 29–35.
23. 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.
24. 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.
25. 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.

*Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования*

26. 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>

27. 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
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. 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>.
30. 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>
31. 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>.
32. 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 Etzelmüller, 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>.
33. 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.
  34. 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.