

На правах рукописи

**Войтенко Алина Сергеевна**

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ  
ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ  
МЕРОПРИЯТИЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ (НА ПРИМЕРЕ  
АРКТИЧЕСКОГО УЧАСТКА СЕВЕРНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ)**

Специальность: 25.00.36–Геоэкология

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого–  
минералогических наук

Москва 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН).

**Научный руководитель:**

**Сергеев Дмитрий  
Олегович**

к.г.-м.н., зав. лаб. геокриологии

**Официальные оппоненты:**

**Шестернев Дмитрий Михайлович**

д.т.н., зав. лаб. инженерной геокриологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова (Сибирское отделение Российской академии наук),

**Пендин Вадим Владимирович**

Д.г.-м.н., профессор, декан гидрологического факультета  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Российский Государственный Геологоразведочный Университет  
имени Серго Орджоникидзе,

**Ведущая организация:**

**Московский Государственный Университет  
имени М.В. Ломоносова (МГУ)**

Защита состоится «\_\_\_» марта 2018 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д002.048.01 при Институте Геоэкологии РАН им. Е.М. Сергеева по адресу: 101000, Москва, Уланский переулок, д. 13, стр. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института Геоэкологии РАН им. Сергеева по адресу: 101000, Москва, Уланский переулок, д. 13, стр. 2.

Просим вас принять участие в заседании совета по адресу: Москва, Николоямская улица, д. 51, стр. 1 или прислать отзыв (в 2-х экземплярах), заверенный печатью учреждения, на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 101000, Москва, Уланский переулок, д. 13, стр. 2, а/я 145, email: [dissert@geoenv.ru](mailto:dissert@geoenv.ru), факс +7 (495) 623-18-86.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д002.048.01 кандидат геолого–минералогических наук \_\_\_\_\_ Батрак Глеб Игоревич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования:** Распространение геокриологических явлений и активность геокриологических процессов не учитываются в практике экономических оценок и прогнозов. Геокриологические процессы приводят к экономическим расходам, затратам и убыткам, которые, в зависимости от ситуации, относятся в экономической классификации либо к эксплуатационным затратам и убыткам, связанным с запланированными и или форс-мажорными компенсирующими мероприятиями, либо – к капитальным затратам и убыткам, связанными с мероприятиями по организации плановой или внеплановой инженерной защиты. Величину этих затрат и эффективность защитных и компенсирующих мероприятий необходимо оценивать в условиях меняющегося климата и развивающихся геокриологических процессов.

В соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года» планируется построить свыше 20,7 тыс. км новых линий, существенная часть которых будет находиться на территории криолитозоны. Нагрузка на существующие линии возрастает, однако отсутствие оценок стоимости содержания новых и существующих объектов инфраструктуры в условиях меняющегося климата не позволяет всесторонне обосновать устойчивое развитие Арктического региона России.

**Степень разработанности:** Геокриология, как отдельное направление науки, накопила за прошедшее столетие своего развития значительный объем теоретических и прикладных работ, посвященных оценке хозяйственной и инженерной опасности явлений и процессов на территории криолитозоны. Региональные закономерности формирования температурного режима горных пород и геокриологических условий детально раскрыты в капитальных трудах советского периода (см., например, многотомную монографию «Геокриология СССР»). Однако сейчас ощущается недостаток актуальной информации о современном состоянии криолитозоны, которое меняется вместе с прикладываемой техногенной нагрузкой и региональными климатическими изменениями.

Практика инженерной защиты инфраструктуры от неблагоприятных инженерно-геологических процессов, в целом, отработана во второй половине XX века и предусматривает недопущение деформаций конструкций и фундаментов сооружений и опирается на материалы изысканий. Такой подход с успехом используется проектировщиками, но при этом невозможно учесть будущие климатические изменения, которые повлияют на инженерно-геокриологические условия за годы эксплуатации сооружения.

Экономическая прогнозная оценка последствий воздействия геокриологических процессов на инженерное сооружение рассматривается в настоящей работе впервые для участка Северной железной дороги. Подходы к экономической оценке геокриологических процессов берут начало из ГОСТа 54033-2010 «Экологический менеджмент. Оценка прошлого накопленного в местах дислокации организаций экологического ущерба. Общие положения», а также учитывают опыт исследований профессора (Л.Н. Хрусталёва, 2005). Исторический подход в оценке экологического ущерба послужил опорным пунктом для выработки подходов к оценке стоимости содержания транспортного объекта с учетом развития геокриологических процессов.

Деформации железнодорожного полотна при воздействии геокриологических процессов активно обследуют зарубежные ученые, в частности в Китае (Wei Ma и Tuo Chen, 2015). Труды зарубежных авторов нацелены на анализ механизмов возникновения деформаций с помощью моделирования, но авторы редко рассматривают эволюцию процессов и явлений на протяжении длительных сроков эксплуатации насыпей и вопросы их долговременной инженерной защиты. В России наиболее активно исследование проблематики устойчивости дорог в криолитозоне занимаются Кондратьев В.Г., Ашпиз Е.С., Дыдышко П.И. и другие исследователи.

**Объект исследования:** Участок территории, прилегающий к железной дороге на перегоне Песец-Хановой.

**Предмет исследования:** Оценка структуры экономической стоимости содержания транспортного объекта, зависящей от этапности развития геокриологических процессов.

**Цель:** Формирование основ междисциплинарного подхода к оценке экономических затрат и убытков, обусловленных развитием геокриологических процессов в меняющихся климатических условиях.

**Задачи:**

В соответствии с поставленной целью, в работе решались следующие задачи:

1. Применение методов мерзлотной съёмки для выявления пространственных и временных закономерностей формирования геокриологических условий.

2. Типизация и районирование геокриологических явлений, вызывающих неблагоприятные последствия для железнодорожного полотна.

3. Выявление вклада региональных климатических изменений в наблюдаемую динамику геокриологических процессов.

4. Уяснение роли техногенных нагрузок в наблюдаемой динамике геокриологических процессов.

5. Разработка методики сопоставления геоэкологической и экономической информации для оценки долговременных последствий нарушения железнодорожной насыпи.

6. Сопоставление стоимости инженерной защиты и текущих затрат при эксплуатации железнодорожного пути.

7. Выработка взаимообусловленных экономических и геотехнических рекомендаций для оптимизации эксплуатации транспортного объекта.

**Научная новизна:**

1. На основе полевых наблюдений, выполненных автором при участии в геокриологической съёмке, впервые показано для участка Северной железной дороги, что потепление климата приводит к латеральной перестройке

парагенезов геокриологических процессов в природных ландшафтах без нарушения сплошности мёрзлой толщи по вертикали.

2. Для участка Северной железной дороги впервые разработан подход к линейному (интервальному) районированию транспортных объектов, при котором учитывается не только ведущий процесс нарушения геометрии насыпи, но и динамика смены ведущих процессов в связи с климатическими изменениями.

3. Впервые проведено сопоставление пространственно привязанной геоэкологической информации о генезисе геокриологических процессов на участке Северной железной дороги, преобразующих природно-техногенные ландшафты, и экономической информации о ремонте участков железнодорожной насыпи. Это позволило выполнить сравнительную оценку стоимости инженерной защиты и стоимости ежегодного ремонта.

4. Впервые выработан приём подготовки рекомендаций по выбору типа и периода применения инженерной защиты насыпи участка Северной железной дороги, учитывающий климатический прогноз и историю развития геокриологических условий.

**Теоретическая значимость работы:** Взаимоувязка и комплексирование на геоэкологической основе инженерно-геологических, геокриологических и экономических методов исследования повышает качество и обоснованность районирования трассы оценки стоимости содержания линейных элементов транспортной инфраструктуры при сохранении ее надежности на фоне климатических изменений. Научная эффективность работы обусловлена законченностью цикла научного сопровождения, включающего постановку задач, теоретическое обоснование получения и анализа информации и завершено обоснованием рекомендаций и практических выводов геотехнического и экономического содержания.

**Практическая значимость работы:** Экономическая эффективность работы обусловлена качеством полученной информации, пригодной для непосредственного использования при экономическом планировании, а также

для обоснования показателей страхования от природных опасностей. Полученные выводы способствуют более глубокому пониманию закономерностей реакции геокриологических условий и процессов на изменения климата и техногенной нагрузки. Результаты исследования предназначены для выработки инженерно-геологических и экономических прогнозов развития природно-технических систем (ПТС) Севера и Арктики с целью обеспечения устойчивого развития этих регионов. Они пригодны также для совершенствования нормативных документов в области охраны окружающей среды и технических условий строительства и эксплуатации железнодорожных путей.

**Методология и методы исследования:** основываются на комплексе методов полевых геокриологических исследований и мерзлотной съёмки, в том числе метода ключевых участков, которые позволили обобщить для выбранной территории пространственно привязанные исторические и актуальные данные о генезисе и активности неблагоприятных экзогенных геологических процессов с учётом влияния прошлых и текущих климатических изменений для прогноза их развития и принятия оптимальных хозяйственных решений.

В инженерно-экономическом блоке исследования использовался подход к поддержке управленческих решений, включавший в себя соизмерения строительных затрат, эксплуатационных убытков и расходов на инженерно-защитные мероприятия с учетом их пространственно-временного распределения.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Эволюция природно-технических систем, состоящая в латеральной миграции ареалов геокриологических процессов при избирательном оттаивании толщи мёрзлых пород сверху на участках, прилегающих к насыпи железной дороги, влияет в долгосрочном аспекте на её устойчивость. В частности, процесс тепловой просадки поверхности постепенно затухает на минеральных

блоках-буграх с заглублённым положением кровли мерзлоты и активизируется на заторфованных блоках-буграх с небольшой глубиной сезонного оттаивания.

2. Линейное районирование трассы железной дороги, основанное на выделении типов прилегающей местности и диагностике ведущих природных и природно-техногенных геокриологических процессов, нарушающих инженерные сооружения на разных стадиях их жизненного цикла, позволяет выбрать эффективный вид инженерной защиты.

3. Системный подход к оценке ежегодных затрат, связанных с воздействием геокриологических процессов на инженерные сооружения, позволяет спрогнозировать и сравнить затраты на капитальное строительство защитных сооружений и затраты на ремонт конструкций железнодорожного полотна с учётом изменения величины и пространственного распределения очагов геокриологических процессов в ходе эволюции природно-технических систем.

**Исходные материалы и личный вклад автора:** Основой диссертации послужили материалы повторных геокриологических съёмок, выполненных при личном участии автора на Хановейском учебно-научном полигоне Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, результаты геотемпературного мониторинга по методике международной программы GTN-R, входящей в систему программ наземных наблюдений Всемирной метеорологической организации (WMO-GTOS), а также фондовые материалы геотехнических и инженерно-геологических обследований Северной железной дороги на линии Котлас-Воркута.

**Степень достоверности и апробация диссертации:** Основные результаты диссертационного исследования были представлены на научно-практических конференциях:

1. Международная конференция «Открытая Арктика», г. Москва, 20–21 ноября, 2014.

2. «День науки» в рамках Звенигородской инженерно-геологической практики геологического факультета МГУ, Москва, 21 января, 2015.



3. 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 (Москва, 24–25 марта 2016 г.)

4. XI Международная конференция по мерзлотоведению, Потсдам, Германия (ICOP –XI International Conference on permafrost, Potsdam, Germany, 20–24. June 2016).

5. Материалы конференции Папанинские чтения – СПб, 2017.

6. Пушинская конференция по мерзлотоведению «Криосфера Земли: прошлое, настоящее и будущее», Пушкино, 4–8. Июня, 2017.

По теме диссертации опубликованы шесть статей в рецензируемых журналах и сборниках, в т.ч. две статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК.

**Структура и объем работы:** Диссертация включает введение, четыре основные главы, заключение, список литературы - 106 наименований. Работа изложена на 143 страницах машинописного текста, который иллюстрирован 14 таблицами, 62 рисунком.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю к.г.-м.н. Д.О. Сергееву, а также к.г.-м.н. В.В. Севостьянову, к.г.-м.н. А.Н. Хименкову, к.т.н. В.П. Мерзлякову, к.т.н. М.Г. Мнушкину, к.г.н. С.К. Костовска, к.э.н. С.Г. Васину, к.г.-м.н. В.С. Исаеву, научному сотруднику ИГЭ РАН Е.М. Макарычевой, инженеру-исследователю ИГЭ РАН Н.А. Бесперстовой за ценные советы и замечания по диссертации, а также аспирантам геологического факультета МГУ Е.А. Гришакиной и О.В. Подчасову за бесценную помощь в обработке и осмыслении фактического материала.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, обусловленная недостатками современных подходов к комплексной экономической оценке последствий воздействия геокриологических процессов на инженерные структуры.

**В первой главе** рассмотрена история развития методов диагностики причин и предотвращения деформаций насыпи железных дорог на территории криолитозоны России, которую условно можно разделить на три этапа: первичного накопления знаний в первой половине XX века, интенсивного освоения протяжённых магистралей с обеспечением строительства геокриологическим прогнозом и защитными мероприятиями в 60-80 годы и развития железнодорожного строительства в XXI веке. Несмотря на успехи в организации геотехнического мониторинга остаются нерешёнными вопросы оценки динамики и стадий развития геокриологических процессов. Недостаточно развитым остается научное сопровождение изученной проблемой остается принятие решения по инженерной защите на железнодорожном полотне в условиях криолитозоны. Существует необходимость совершенствования методов, позволяющих оценить сумму ежегодных затрат и убытков от продолжающегося воздействия инженерно-геологических процессов на инженерные сооружения и другой антропогенной нагрузки в условиях меняющегося климата.

**Во второй главе** приведены основные сведения о географическом положении обследуемого участка, рельефе, приведены основные сведения о геологическом строении, дана геокриологическая характеристика, приведены сведения о климате, растительности, почвах.

Обследуемый участок Песец-Хановой расположен за полярным кругом (около 67,2°СШ и 63,6°ВД) на крайнем северо-востоке Республики Коми в Большеземельской тундре. В соответствии с административным делением участок обследования входит в состав Воркутинской области. По данным геолого-съёмочных работ исследуемый район характеризуется сплошным

развитием с поверхности четвертичных отложений, мощностью 50-60 м, залегающих на коренных породах пермского возраста. На вскрытую глубину четвертичные отложения представлены (сверху вниз) современными аллювиальными и покровными образованиями, толщей надморенных озерно-аллювиальных отложений и верхнеплейстоценовой мореной. Инженерно-геологические условия участка осложнены наличием многолетнемерзлых пород (ММП). В основании земляного полотна грунты залегают как в талом, так и в мерзлом состоянии. В пределах области выделяют подзоны сплошного и прерывистого распространения мерзлых пород.

Температура мерзлых пород изменяется от минус 5°С до минус 2°С. Наиболее низкие температуры зафиксированы на возвышенных водораздельных пространствах, перекрытых торфом или оторфованными суглинками.

Мощность сезонно-талого слоя (СТС) изменяется с севера на юг от 0,3 до 3,0 м, мощность сезонно-мерзлого слоя (СМС) — от 0,5 до 2,5 м. Максимальных значений глубина протаивания достигает на дренированных водораздельных поверхностях, на береговых валах рек и у подножий склонов, где высота кустарников составляет 1,0–1,5 м и более. Минимальные глубины протаивания (0,2–0,4 м) фиксируются на торфяниках и на участках, покрытых водонасыщенным мхом.

В гидрогеологическом отношении участок обследования в пределах вскрытого разреза на глубину до 5 метров характеризуется наличием надмерлотных вод, вскрытых на глубине 0,3–1,2 м.

На перегоне Песец-Хановой железная дорога проходит вдоль левого берега реки Воркуты по ее древним высоким террасам. Река Воркута течет с правой стороны в 1,0–1,5 км от пути.

В ландшафтном отношении участок представлен торфяно-бугристой тундрой с системой микропонижений и ложбинок, разделяющих караваеобразные бугры, скованные мерзлотой. Растительность представлена мхом, ягелем, ерниками. Понижения, ложбинки, по которым периодически

локально осуществляется поверхностный сток, заросли кустарником полярной ивы, карликовой березы и осокотравяной растительностью.

Климат субарктический. Среднегодовая температура воздуха по данным климатических наблюдений метеостанцией «Воркута» за период с 1937 по 2009 г.г. равна минус 5,8°C, средняя температура наиболее холодного месяца (январь) – минус 19,9°C, средняя температура воздуха наиболее теплого месяца (июль) – +12,5°C. Осадки распределяются по сезонам неравномерно: 60% их годовой суммы выпадает в виде дождя за короткий летне-осенний период.

Снежный покров начинает формироваться в конце сентября, устойчивый снежный покров - в середине октября. Разрушение снежного покрова происходит в начале июня, снеготаяние проходит достаточно интенсивно. По многолетним данным максимальная мощность снежного покрова достигает 1,2 м.

На изучаемой территории широко развиты криогенные процессы, криогенные и посткриогенные образования. Наиболее распространены термокарстовые и термоэрозионные формы рельефа, сформировавшиеся при многолетнем протаивании льдистых отложений, полигональный микрорельеф и связанные с ним полигонально-жильные льды, а также бугры пучения на заболоченных мёрзлых торфяниках.

Учёт современного состояния и тенденций развития климата и многолетней мерзлоты грунтов позволяет повысить качество проектирования транспортных инженерных сооружений. Для этого используется метод выделения элементов ПТС и идентификации набора процессов, воздействующих на насыпь железной дороги.

Среди рассмотренных геокриологических процессов наиболее значимым для развития деформаций земельного полотна насыпи является термокарст. Термокарст развивается, как по естественным причинам (климатические изменения), так и в результате продолжающихся антропогенных воздействий при эксплуатации железной дороги, приводящих к нарушениям растительности и режима водного стока.

**В третьей главе** проведено статичное районирование территории по геокриологическим условиям, служащее основой для последующей характеристики динамики инженерно-геологической ситуации. У ряда исследователей подчёркивается необходимость прямого наблюдения активности геокриологических процессов, оказывающих неблагоприятное воздействие на элементы инфраструктуры. Однако на практике ряды такого мониторинга слишком короткие, чтобы обеспечить возможность геокриологического прогноза. Основной гипотезой является возможность типизации геокриологических явлений по стадии их образования, что дает возможность идентификации современной и бывшей активности процессов, соотнесённых с этими явлениями. Данные были получены в ходе работ на Хановейском учебно-научном полигоне Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

При районировании были учтены актуальное состояние мерзлоты, известные тенденции изменения её состояния, сопоставленные с активностью геокриологических процессов, распределение ареалов геокриологических явлений и процессами. Были использованы: 1. Оригинальная термометрия грунтов и данные международного геокриологического мониторинга GTN-P 2. Анализ пространственного распределения явлений с выделением стадийности их развития 3. Геофизические методы 4. Результаты моделирования температурного режима грунтов. 5. Нивелирная съёмка просадок поверхности в нарушенных и естественных условиях.

Детально был рассмотрен термокарст, как наиболее распространённых геокриологических процесс. Интенсивность термокарста увеличивается с юга на север. В результате образуются озера, западины и другие отрицательные формы рельефа. В развитии термокарстовой западины может быть несколько этапов активизации и затухания просадок, однако, в общем случае, зрелое термокарстовое озеро демонстрирует затухающие во времени осадку грунта (из-за того, что продолжающееся оттаивание многолетнемёрзлого грунта замедляется благодаря растущему термическому сопротивлению грунтов

талика) и латеральное расширение озера с разрушением боковых мёрзлых массивов. Предполагается, что зарастающие осокой берега и талое дно озера, а также отмельный характер дна у его берегов являются признаками временного затухания термокарстового процесса (рис. 1а). Наоборот обрушающиеся крутые берега и близость мёрзлых грунтов под дном озера свидетельствуют об активизации термокарста (рис. 1б). Важным обстоятельством является независимость активности термокарста от размера существующей западины. Возможность расширения озера зависит только от наличия льдистых грунтов, а его глубина – от максимально возможной осадки грунта при его оттаивании.

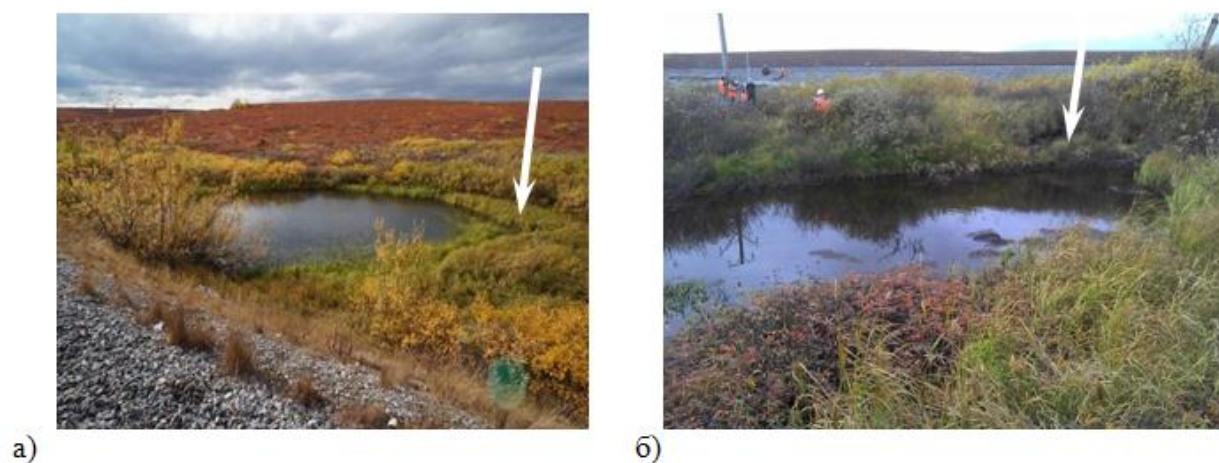


Рис. 1. Морфологические различия динамики развития термокарстовых озёр: а) замедление термокарстовой просадки, сопровождающееся зарастанием берегов (показано стрелкой); б) прогрессивное расширение озера, сопровождающееся отседанием грунта в береговой зоне (показано стрелкой).

На десятикилометровом перегоне станций Песец-Хановой развивающиеся термокарстовые озера (181 единица) встречаются чаще, чем озера «реликтового», затухающего термокарста (78 единиц).

На исследуемом полигоне нами были выделенные типы местности. Которые нам помогают оценить, при каких критериях (рельеф, растительность, режим увлажнения поверхности, глубина залегания вечной мерзлоты) вероятность появления термокарстовых озер выше или наоборот ниже. Одной из важных особенностей региона является заболоченность. Широко распространены в этой части трассы озерно-болотные равнины, на которых встречаются останцы полигональных торфяников.

В ходе районирования изучаемой территории были построены схемы ПТС, в которых железнодорожная насыпь находится в разных геокриологических условиях и подвергается воздействию различных процессов (рис. 2).

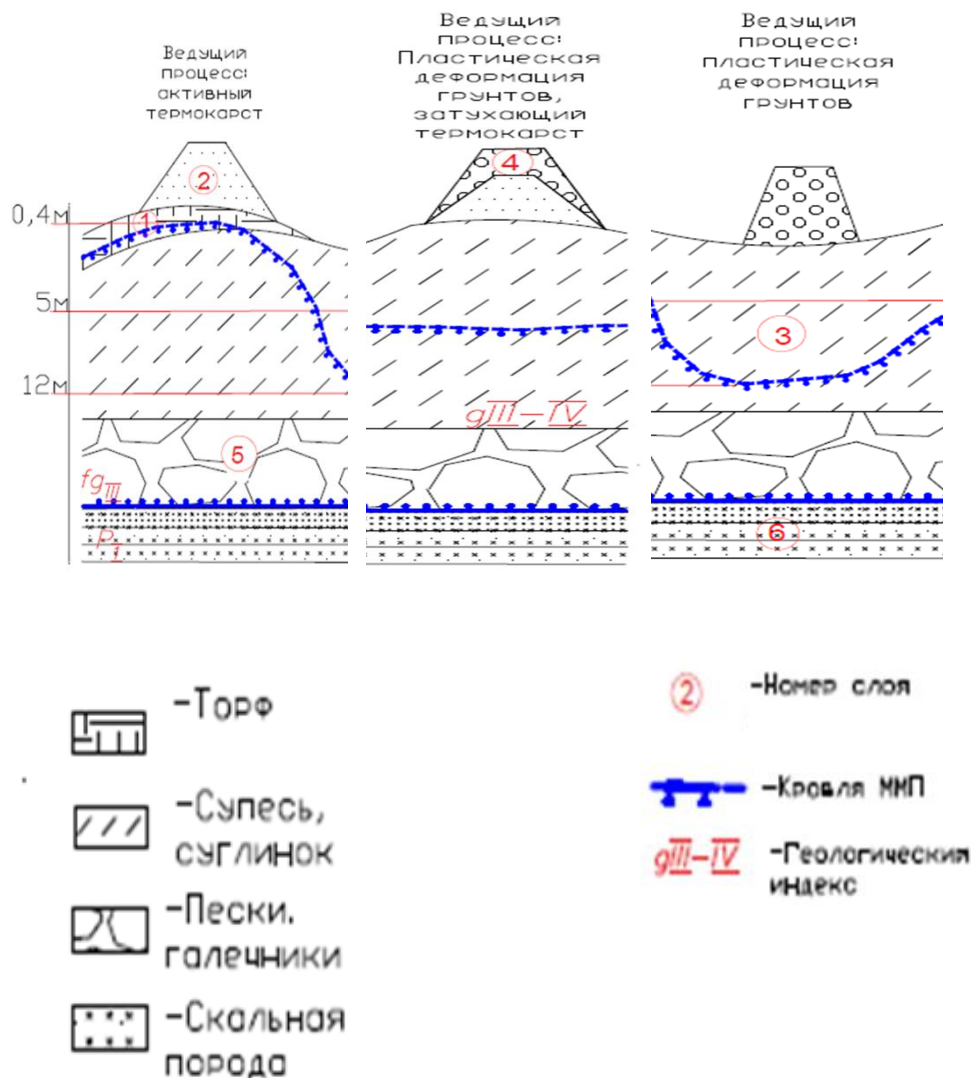


Рис. 2. Варианты природно-технических систем встреченные на участке исследования.

ММП на каждом из трёх типов ПТС залегают на разных характерных уровнях: 1. – 0,4 м; 2. – 5 м; 3. – 12 м. Основным геокриологическим процессом, изучаемым в данной работе, является термокарст. Воздействие термокарстового процесса условно разделено на три этапа:

1. «Восходящее» развитие;
2. «Затухающее» развитие;
3. Сохранение остаточного палеоявления.

На основе выделенных типов местности, распределения термокарстовых явлений и характера деформаций железнодорожной насыпи была составлена карта-схема линейного районирования трассы как природно-технической системы верхнего иерархического уровня (рис. 3). С помощью карты-схемы, было проанализированы участки с различными процессами, приводящими к образованию деформаций.



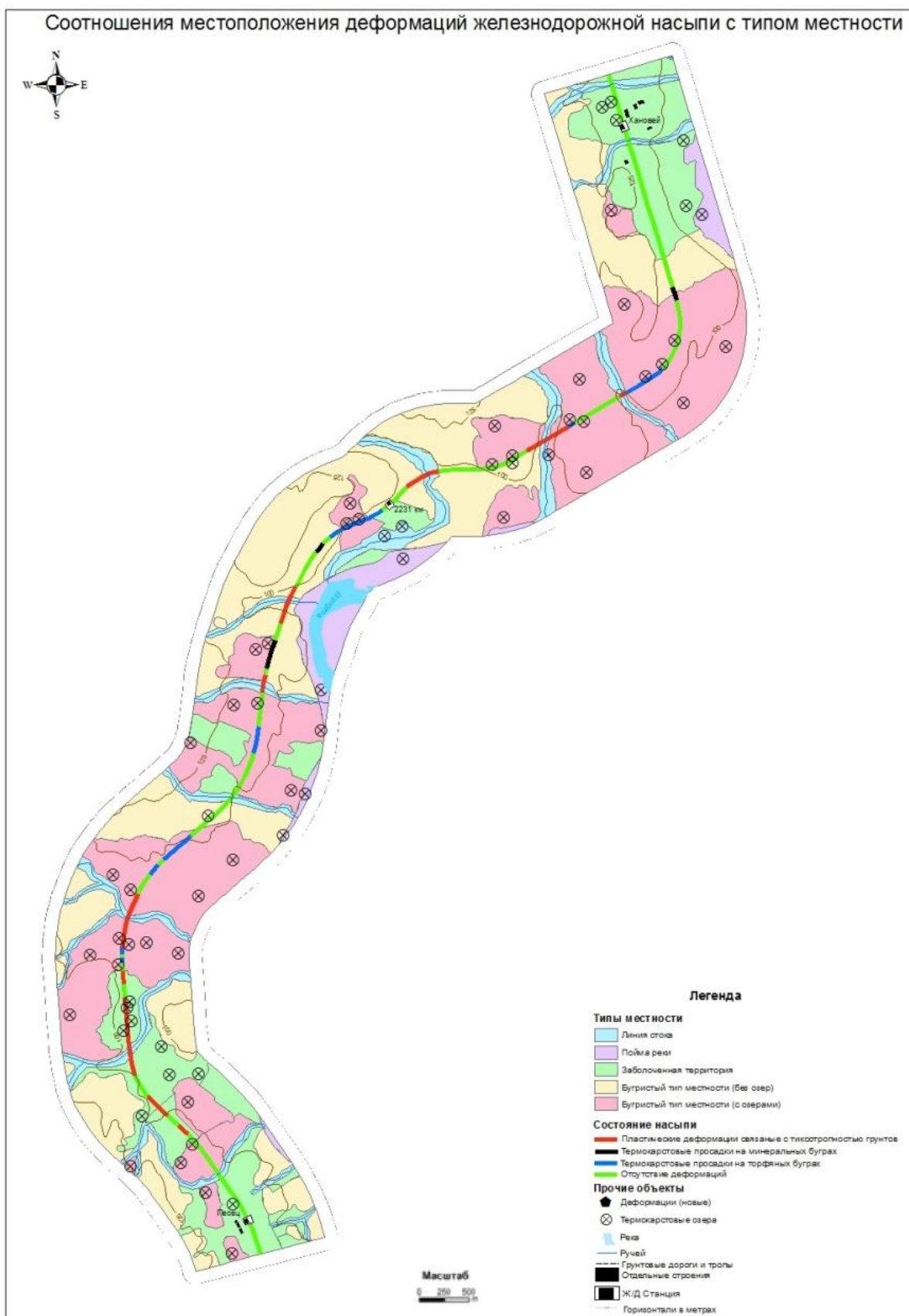


Рис. 3. Карта-схема деформационных участков, приуроченных к типизации местности.

На основе проведенной комплексной специализированной мерзлотной съемки было установлено, что изменения климата и продолжающаяся техногенная нагрузка привели к сохранению сплошного характера распространения многолетнемёрзлых пород, повышению их температуры и избирательном оттаивании толщи мёрзлых пород сверху. Это приводит к постепенному затуханию процесса тепловой просадки поверхности на участках «старого» термокарста и пространственному перемещению активных просадок от минеральных бугров к заторфованным участкам с небольшой глубиной сезонного оттаивания.

В результате анализа оригинальной карты-схемы типов местности, выделены ключевые участки деформаций насыпи, объяснена природа этих деформаций и их приуроченность к геокриологическим условиям.

**В четвертой главе** разработана методика сопоставления геоэкологической и экономической информации о последствиях нарушения железнодорожной насыпи, которая позволяет сопоставить стоимость инженерной защиты с текущей стоимостью эксплуатационных затрат. Для комплексной картины жизненного цикла насыпи, необходимо учитывать не только её текущее инженерное состояние, но и историю преобразования слагающего её материала и геометрии, а также историю её взаимодействия с прилегающим ландшафтом, растительность и обводнение которого меняются со временем.

Оценка содержания транспортного объекта складывается из капитальных затрат на новую инженерную защиту, эксплуатационных затрат на восстановление элементов транспортной инфраструктуры от продолжающегося воздействия инженерно–геологических процессов или расходов на инженерно–защитные мероприятия, нормативный срок использования которых сопоставлен с прогнозом активности инженерно–геологических процессов (рис. 4). Исторические данные необходимы для расчёта долговременных затрат, что повышает эффективность экономических оценок.



Рис. 4. Схема составных частей затрат на содержание транспортного объекта.

По фондовым данным инженерно-геологических обследований 1972 года, просадки развивались с начала эксплуатации дороги. Суммарная величина просадки на каждом из участков составляла 140-190 мм в год, но в отдельные годы увеличивалась до 230-250 мм (в 1953, 1959, 1966 и 1968 г.г.). По данным инженерных изысканий, для исправления просадок ежегодно на подъемку пути на один участок расходуется 70-90 м<sup>3</sup> балласта. Для предотвращения появления деформаций или же приостановки развития процессов рекомендуется использование инженерной защиты в виде термостабилизаторов и подбалластных матов.

Эксплуатационные затраты, связанные с подсыпкой гравия под рельсово-шпальную решётку составили **31 416 000 рублей** (на период с 1943-2015 г.) по приведённому курсу Центрального Банка России на 2017 год.

На участке исследований было обнаружено 11 деформаций, обусловленных термопросадками оттаивающих многолетнемёрзлых грунтов. На 550 погонных метров необходимо установить 275 термостабилизаторов. Оценка их стоимости составляет 16 472 500 руб. Так как срок эксплуатации термостабилизаторов составляет 15 лет, а эксплуатируется дорога 72 года (на период 2015 г.), необходимо было бы пять раз обновить системы защиты, что потребовало бы **82 362 500 руб.**

Если рассматривать деформации, возникшие только в результате выпора талого тиксотропного грунта (их количество составляет 16 единиц) то на 800 погонных метров железнодорожного полотна потребуется: 5 586 400 рублей. Необходимо 2 раза произвести замену матов, и общая цена на 72 года эксплуатации составила бы **16 759 200 руб.** (без учета логистики и земляных работ).

Расчеты показывают, что до сих пор с экономической точки зрения ежегодное подсыпание гравия выглядит оптимальным решением, но не стоит забывать о меняющемся климате, благодаря воздействию которого в дальнейшем эксплуатационные убытки могут существенно увеличиться за счёт роста числа просадок.

Для прогнозирования изменения геокриологических условий и активности геокриологических процессов, использовались данные фонового мониторинга температур ММП из базы данных GTN–P. Для этого были выбраны четыре скважины, соответствующие типам местности, выделенных на участке исследований между станциями Песец и Хановой, а именно: пойменный, заболоченный, минеральный бугристый и заторфованный бугристый типы местности. Температуры анализировались для глубин 5, и 10 м. На графиках были построены линейные тренды, экстраполяция которых позволяет оценить момент деградации ММП на заданной глубине. Данный подход не заменяет стандартного геокриологического прогноза, а выполнен лишь как иллюстрация его места в разработанном геоэкологическом подходе.

Данные геокриологического мониторинга демонстрируют разные тенденции реакции ММП на потепление и некоторое иссушение климата. Это обстоятельство подчёркивает необходимость дифференцированного подхода к обеспечению устойчивой эксплуатации железной дороги. Соединение геокриологического прогноза с экономическим планированием должно осуществляться отдельно для каждого типа ПТС (рис. 2). В частности, на торфяно–бугристых типах местности рекомендуется применение термостабилизаторов. Напротив, участки, где просадки связаны с

тиксотропным разжижением грунтов, рекомендуется обеспечить балластными матами. Важным обстоятельством является постепенная смена во времени участков с термокарстом на участки с пластическими деформациями талых грунтов, по мере растепления ММП. Похолодание климата не означает остановку термокарстовых процессов, поскольку в ряде случаев наблюдаемое развитие термокарста связано с подтоплением полотна.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

В результате исследования предложен новый методологический подход на стыке геокриологии, экономики и инженерно-технических наук, основанный на совмещении линейного геотехнического и природного территориального районировании трассы железной дороги. Такой подход даёт возможность интерпретации и прогноза развития геокриологических процессов за длительный период эксплуатации (десятки лет), возможность рационально и эффективно применять инженерную защиту на проблемных участках, соотнесённых с природными типами местности. Детально изученный участок Северной железной дороги представляется типичным для условий Большеземельской тундры, что позволяет тиражировать приобретённый опыт.

В диссертации приводится полная характеристика рассматриваемой территории, а именно климат, гидрология, грунты, растительный покров, залегание кровли мерзлоты, присущие местности. В ходе полевой работы были получены данные по залеганию многолетнемерзлых пород на разных участках осваиваемой территории с сопряжённым анализом, растительного покрова, гидрологических условий, геологического строения и распространения геокриологических явлений. С помощью методов экономического анализа проведена оценка убытков, понесенных за счет проведения ремонтных работ с начала эксплуатации железнодорожного полотна. На основании прогноза изменения температур воздуха были предложены эффективные и оптимальные инженерные решения по устранению деформаций железнодорожного полотна, связанных с действием криогенных процессов.

Полученные результаты могут быть применены при разработке нормативных документов, руководств, положений, инструкций и методик по эксплуатации железнодорожных путей.

**Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных трудах:**

1. **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.

2. **A.S. Voytenko & D.O. Sergeev.** Cumulative Economic Damages in Permafrost based on an Example of a linear infrastructure (Railway Khanovey - Pesets). In book of abstracts XI International conference on permafrost (20-24 June 2016), Potsdam, Germany, 1133.

3. **Войтенко А.С., Сергеев Д.О.** Технология проведения эволюционных эколого-экономических оценок на примере линейного объекта (железнодорожного полотна). В сб./ Серии «Социоестественная история. Генезис кризисов природы и общества в России», выпуск XI, природа и общество технологии обеспечения продовольственной и экологической безопасности. Москва. МГУ, ИГ РАН и ИВ РАН. 2016, с. 181-187

4. **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). Статья в журнале: «Арктика: экология и экономика», Номер 2. Москва, Институт проблем безопасности развития атомной энергетики РАН. 2017, с. 53-61

5. **Войтенко А.С., Орехов П.Т., Костовска С.К., Сергеев Д.О.** Морфометрические исследования тундровых ландшафтов Арктической зоны РФ (Остров Белый, Республика Коми: Хановей, Песец). Статья в журнале: «Проблемы региональной экологии», Номер 2. Москва, ООО Издательский дом «Камертон». 2017, с. 85-91

6. **Войтенко А.С.** Характеристика многолетней динамики природных условий и составляющих природно-технической системы в сфере обеспечения экологической безопасности в Арктической зоне. Материалы XXVII Международной междисциплинарной конференции «Проблемы социоестественных исследований» и Международной междисциплинарной молодежной школы «Стратегии экологической безопасности». Москва, МАКС Пресс, 2017, 27 с.

7. **Voytenko A.** Content and Dynamics of Maintenance Costs for the Railroad in Link with Geocryological Processes Dynamics / International Conference Earth's Cryosphere: Past, Present and Future. Pushchino, Russia, June 4-8, 2017, p. 59-61.