

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Юров Федор Дмитриевич

Геолого-географические факторы устойчивости транспортных систем в криолитозоне при изменении климата и усилении техногенеза

1.6.8 – Гляциология и криология Земли

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

- Научный руководитель** – *Гребенец Валерий Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент*
- Официальные оппоненты** – *Каверин Дмитрий Александрович, доктор географических наук, старший научный сотрудник отдела почвоведения Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН*
- Дроздов Дмитрий Степанович, доктор геолого-минералогических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела мониторинга и информационно-геосистемного моделирования криолитозоны, заместитель директора Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН*
- Романенко Федор Александрович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова*

Защита диссертации состоится «14» марта 2024 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.4 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

Е-mail: dissovet.geogr.msu@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.4/2873>

Автореферат разослан «31» января 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук

Е.Ю. Матлахова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В России и за рубежом накоплен значительный опыт проектирования и строительства транспортных объектов в зоне распространения многолетней мерзлоты, однако, в последние десятилетия продолжает фиксироваться нарастание темпов деформаций транспортной инфраструктуры в северных регионах. Важно отметить, что поддержание в работоспособном состоянии автомобильных и железных дорог, трубопроводов, портовых и аэродромных комплексов критически необходимо для развития стратегически важных для нашей страны районов Арктики. До настоящего времени остаются слабо проработанными вопросы взаимного влияния транспортных объектов и природной среды, организации геотехнического мониторинга на протяженных линейных системах, прогноза поведения дорог и трубопроводов в условиях климатических изменений и нарастания техногенной нагрузки, региональной специфики поведения транспортных систем. Для корректной оценки и прогноза поведения объектов транспортной инфраструктуры необходимо учитывать, что в географических выделах различного масштаба влияние различных геолого-географических факторов может различаться кардинально. В свою очередь, объекты транспортной инфраструктуры имеют протяженность от сотен метров до сотен километров, что обуславливает различия в комплексах, возникающих на них проблем. В работе анализируется проявление сложного сочетания разномасштабности природных условий и транспортных объектов в проблемах устойчивости транспортных систем в различных регионах Арктики.

Цель исследований заключается в выявлении географических и геологических факторов и оценке их воздействия на устойчивость транспортной инфраструктуры в геосистемах различного масштаба на фоне изменения климата и нарастания техногенеза.

Основные задачи:

- 1) проанализировать имеющиеся исследования по проблематике поведения транспортных объектов в зоне распространения многолетней мерзлоты;
- 2) выбрать с учетом особенностей физико-географических условий и специфики освоения «опорные» регионы для исследования устойчивости транспортных объектов в криолитозоне;
- 3) на основе материалов полевых исследований и результатов численного моделирования температурных и физико-механических характеристик грунтов оснований провести сравнительный анализ воздействия региональных геолого-географических факторов на устойчивость транспортных систем и оценить вклад этих факторов в устойчивость транспортных объектов различного масштаба и назначения;
- 4) выполнить обзор методов геотехнического мониторинга на объектах транспортной инфраструктуры, выдвинуть предложения по оптимизации систем мониторинга устойчивости транспортных объектов;

Объектом исследования являются многолетнемерзлые основания транспортных объектов. **Предметом** исследования является устойчивость транспортной инфраструктуры при воздействии геолого-географических факторов с учетом региональных особенностей.

Фактический материал, личный вклад автора. При написании работы были использованы публикации научного и производственного характера, фондовые материалы, результаты полевых исследований автора, выполнявшихся на объектах транспортной инфраструктуры в криолитозоне в 2015-2022 гг., а также результаты численного моделирования характеристик мерзлых пород, выполненного автором. Автор принимал непосредственное участие в подготовке и проведении полевых работ, камеральной обработке и интерпретации полученных данных, подготовке материалов для докладов на конференциях и публикации в научных изданиях. Исследования состояния объектов транспортной инфраструктуры и причин их деформации проводились в Норильском и Воркутинском промышленных районах, в Нижнем Приобье (район городов Салехард и Лабытнанги), на Ванкорском нефтегазовом месторождении и архипелаге Шпицберген (г. Лонгйир).

Методология и методика. С методологической точки зрения работа основана на полимасштабном анализе природной среды и её влияния на техногенные объекты. Исследования базируется на выявленных в физической географии пространственно-временных закономерностях эволюции геосистем (в частности, мерзлых толщ) под воздействием климатических колебаний и техногенного воздействия. Для решения поставленных в работе задач проводились полевые обследования объектов транспортной инфраструктуры в криолитозоне, которые включали визуальные осмотры, исследования деформированности сооружений с применением геодезических методов, аэрофотосъемку при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), термометрические наблюдения. Камеральная обработка данных проводилась с использованием методов сравнения, численного моделирования, обработки результатов геодезических работ (нивелирования и лазерного сканирования), дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли (космических и аэрофотоснимков).

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) По данным, полученным в ходе полевых наблюдений и численного моделирования, впервые была продемонстрирована неоднородность воздействия основных групп природных факторов на объекты транспортной инфраструктуры в рамках Западного сектора Арктики;
- 2) На основе собственных полевых данных и прогнозов изменения климатических параметров выполнено численное моделирование и получен оригинальный прогноз температурных полей мерзлых грунтов и инженерно-геокриологических параметров (мощность активного слоя, относительная осадка при оттаивании, возрастание касательных сил морозного пучения) в опорных регионах к 2050 г.
- 3) Впервые проведен анализ региональной специфики поведения транспортной инфраструктуры в Западном секторе Арктики, выявлены характерные для различных и разномасштабных географических обстановок проблемы устойчивости транспортных объектов, которые также имеют значительные различия по протяженности.
- 4) Предложена оригинальная концепция организации мониторинга на транспортных объектах в криолитозоне на трех уровнях, обусловленных географической иерархией: глобальном, региональном, локальном и «точечном», которая может оптимизировать проведение мониторинговых работ на линейных системах большой

протяженности для корректной оценки состояния устойчивости и прогноза их поведения в условиях изменяющегося климата и техногенных воздействий.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в применении полимасштабного подхода в отношении природных явлений и процессов в Арктике и Субарктике и их влияния на разномасштабные объекты транспортной инфраструктуры. Полученные автором результаты представляют особую ценность для изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры в криолитозоне. Результаты показывают региональные различия во вкладе геолого-географических факторов в устойчивость транспортных объектов, позволяют объяснить механизмы формирования деформаций дорог и трубопроводов и разрабатывать методики исследования деформирующихся участков с учётом вызывающих их экзогенных (в первую очередь, криогенных) процессов. Предложена и отработана методика применения наземного лазерного сканирования в качестве метода мониторинга деформаций на автомобильных дорогах и взлетно-посадочных полосах (ВПП) аэродромов.

Основные защищаемые положения:

1) Деформации, возникающие на объектах транспортной инфраструктуры на региональном макроуровне, определяются пространственными различиями географических условий – климатических, мерзлотно-литологических, геоморфологических, гидрологических и гидрогеологических, и выражаются, во-первых, в увеличении глубины сезонного оттаивания грунтов на фоне разных трендов к потеплению климата и связанных с ним изменением сил морозного пучения, которые на Шпицбергене будут в 2-2,5 раза больше, чем в Западном секторе криолитозоны России; во-вторых, в разной степени активности в регионах опасных экзогенных процессов в зависимости от характера рельефа (равнинные, предгорные и горные территории).

2) На мезоуровне (локальном) линейные сооружения, отличающиеся непрерывностью и меньшей по сравнению с иными объектами вариативностью природных факторов территориального размещения, демонстрируют наибольшую зависимость от мерзлотно-литологических условий, численное моделирование которых показало, что в пределах одного региона к 2050 г. на фоне потепления климата снижение несущей способности свайных фундаментов может отличаться в 1,5-2 раза, осадка грунтов – в 2,5 раза.

3) На микроуровне отмечается решающее значение гидрологических и гидрогеологических условий, в том числе, техногенного подтопления, а также условий снегонакопления и характер снегоочистки на устойчивость отдельных участков авто- и железных дорог.

4) Для оптимизации и повышения достоверности прогноза устойчивости транспортных объектов необходимо осуществлять мониторинг объектов транспортной сети на трех пространственных иерархических уровнях: 1) региональный – выявление «неблагополучных» территорий, в том числе, с учетом региональных трендов изменения климатических параметров; 2) локальный – на «ключевых участках», выделенных исходя из типизации ландшафтно-мерзлотных условий; 3) «точечный» - на выявленных проблемных участках, в т.ч. в зонах развития опасных экзогенных процессов.

Степень достоверности полученных результатов обусловлена обширным фактическим материалом о состоянии транспортных систем в опорных регионах и развитии опасных криогенных процессов в зоне эксплуатации объектов. Достоверность предопределяется также единым подходом для оценки геолого-географических параметров, а также проверенной методикой численного моделирования температурных и инженерно-геокриологических характеристик грунтов.

Апробация. Полученные результаты были представлены на российских и международных научных конференциях в форме 23 устных и 13 стендовых докладов: ежегодная конференция Американского геофизического союза (AGU) 2019, 2020, 2021 гг.; международная конференция International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC) (2019 г. – Дельфт, Нидерланды, 2021 г. – Москва); 34th International Geographical Congress (Стамбул, Турция 2021 г.); международная конференция European Geosciences Union General Assembly (Вена, Австрия 2020 г.); международная конференция European Conference on Permafrost (EUCOP) (Пучсерда, Испания 2023 г.) международная конференция Landscape Science and Landscape Ecology: Considering Responses to Global Challenges (Москва, 2020 г.); международная конференция International Conference “Solving the puzzles from Cryosphere” (Пушино, 2019 г.); всероссийская конференция «Сергеевские чтения» (2018, 2019 гг.); 5-я и 6-я конференция Геокриологов России (Москва, 2018, 2022 гг.); Общероссийская научно-практическая конференция «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2017, 2018, 2019, 2021 гг.) и др.

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 22 научные работы, в том числе 4 в рецензируемых научных изданиях (1 на иностранном языке), рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.8 Гляциология и криология Земли, 17 статей в материалах всероссийских и международных конференций, 1 – в прочих изданиях. Постановка научных задач, полевые работы, обработка и интерпретация полученных данных, подготовка и предоставление их в печать проводились непосредственно соискателем или при его активном участии. Участие автора во всех опубликованных работах является значительным. При подготовке текста диссертации использован текст публикаций, выполненных автором лично (Юров, 2021, 2022) и в соавторстве (Юров, Гребенец, 2019; Iurov, Marchenko, 2021; Корнев и др., 2021), в которых, согласно Положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования. В публикациях (Юров, Гребенец, 2019; Iurov, Marchenko, 2021) личный вклад автора является определяющим, им подготовлен текст работы, графически материалы, проведено представление рукописи в редакцию и работа с рецензентами.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (134 наименования, в том числе 25 на иностранном языке). Материал работы изложен на 129 страницах машинописного текста, содержит 16 таблиц, 48 иллюстраций и 1 приложение.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.г.-м.н., доценту В.И. Гребенцу за всестороннюю помощь в проведении исследования и всевозможную поддержку при написании настоящей работы. Искренне признателен и.о. заведующего кафедрой криолитологии и гляциологии к.г.-м.н., доценту И.Д. Стрелецкой,

д.г.н., профессору В.В. Рогову, к.г.н. Ю.Б. Баду и другим сотрудникам кафедры криолитологии и гляциологии за полезные советы и рекомендации при написании работы; к.г.н. Н.А. Марченко и всему научному коллективу Факультета арктических технологий Университета Свальбарда (UNIS) за плодотворное сотрудничество, помощь в организации и проведении полевых работ на арх. Шпицберген; старшему научному сотруднику кафедры картографии и геоинформатики А.А. Сучилину за помощь в освоении картографических и геодезических методов исследований; сотрудникам Геокриологической службы республики Коми, сотрудникам Отдела геотехнического мониторинга ООО «РН-Ванкор»: С. Шпунтову, А. Матюхину, И. Вершинину.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 20-35-90009 «Особенности воздействия опасных криогенных процессов на транспортную инфраструктуру Арктического региона»

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ современного состояния исследований

В последние десятилетия в Арктическом регионе отмечаются высокие темпы климатических изменений, в первую очередь, отмечается значительное увеличение температуры наружного воздуха (Nelson et al., 2002; IPCC, 2014, Третий оценочный доклад..., 2022). Вслед за трансформацией климатических параметров происходит изменение характеристик мерзлых пород, являющихся чрезвычайно уязвимым компонентом природной среды северных районов (Мельников и др., 2007; Павлов, 2008; Дроздов, Дубровин, 2016; Romanovsky et al., 2017 и др.). Особо отмечается деградация мерзлоты в регионах Западного сектора Арктики (Васильев и др., 2020). В результате отепления снижаются прочностные характеристики мерзлых грунтов, что неизбежно приводит к возникновению деформаций зданий и сооружений и снижению их устойчивости (Гребенец, Ухова, 2008; Хрусталева и др., 2011). Большая протяженность и непрерывность объектов транспортной инфраструктуры, таких как дороги и трубопроводы, делают их особенно уязвимыми к воздействию различных экзогенных процессов, активизация которых также зачастую является следствием климатических изменений. Для районов с горным рельефом наибольшую угрозу для транспортных систем представляют оползневые явления и сход лавин (Подвербный, Филатов, 2012; Едигарян, Квашук, 2017; Айбулатов и др., 2021). На равнинных территориях высок риск деформирования дорог и трубопроводов в результате действия овражной и речной эрозии, а также специфических для криолитозоны криогенных процессов: термоэрозии (Губарьков и Лейбман, 2010; Godin, Fortier, 2012; Толманов и др., 2018 и др.), термоабразии (Григорьев и др., 2006; Кизяков и др., 2013; Günther et al., 2013; Belova et al., 2018; Маслаков, 2019), термокарста (Edwards et al., 2009; Кравцова и Родионова, 2016), пучения и осадки грунтов в активном слое и др.

Однако, помимо природных факторов, к снижению устойчивости транспортной инфраструктуры приводит и антропогенное воздействие, которое проявляется как в виде изменения характеристик мерзлых грунтов в результате отепления и уничтожения естественных покровов, выполняющих теплоизолирующие функции (Хрусталева и др., 2011; Анисимов, Жильцова, 2012; Анисимов, Стрелецкий., 2015 и др.), так и в виде трансформации рельефа в целом и комплекса геоморфологических процессов в частности. При этом важно отметить, что степень антропогенной трансформация рельефа в ряде регионов криолитозоны, например, в Норильском и Воркутинском промышленных

районах, чрезвычайно высока (Бредихин и др., 2020; Еременко и др., 2022). Важно отметить, что в процессе жизнедеятельности систем происходит постепенное усиление техногенеза за счет постоянного накопления антропогенных влияний на ландшафтно-мерзлотные условия: стадия изыскания и инженерной подготовки – период обустройства фундаментов (в том числе искусственных оснований) и возведения объектов – время эксплуатации сооружений с силовыми, динамическими и тепловыми воздействиями на многолетнемерзлые породы, что приводит к постоянному изменению глубин сезонного оттаивания и несущей способности мерзлых грунтов при длительных нагрузках, к возможной активизации опасных криогенных процессов (Хрусталева, 1971; Гребенец, Садовский 1993; Grebenets, 2008; Дроздов, Дубровин, 2016).

Особое место в проблеме устойчивости объектов транспортной инфраструктуры занимает вопрос мониторинга за состоянием объектов. В настоящее время на территории Российской Федерации существует достаточно обширная нормативная база, регламентирующая наблюдения за состоянием инженерных объектов. Согласно национальным требованиям (СП 25.13330.2020), геотехнический мониторинг необходимо проводить на всех стадиях функционирования объекта (от этапа изыскания до этапа эксплуатации) по трем основным направлениям: 1) контроль за температурным режимом грунтовых оснований; 2) измерение вертикального смещения конструкций; 3) наблюдения за гидрогеологическим режимом грунтовых оснований.

Однако, существующих требованиях к мониторингу состояния объектов инфраструктуры фактически исключается оценка динамики опасных экзогенных процессов на участке их потенциального развития. В настоящее время для этих целей возможно применение широкого спектра современных методов. С помощью дешифрирования космических снимков возможно эффективно отслеживать активизацию эрозионных и абразионных процессов, термокарста, склоновых процессов. Высокую эффективность показало также применение БПЛА (Григорьева, Панин, 2011; Мележ, 2013). Большим преимуществом аэрофотосъемки при помощи БПЛА является возможность применения на них лазерных сканеров, позволяющих получать цифровые модели рельефа (ЦМР) с высоким (порядка 10 см по высоте и 10-15 см в плане) разрешением, с помощью которых возможно оценить интенсивность и динамику экзогенных процессов. Опыт применения воздушного лазерного сканирования на объектах трубопроводного транспорта показал, что при помощи этих ЦМР возможен мониторинг за целым рядом процессов: оползнями, формированием карстовых, термокарстовых и карстово-суффозионных форм, абразией и эрозией берегов, морозным пучением (Долгополов и др., 2021). В рамках полевых работ на арх. Шпицберген была проведена апробация метода наземного лазерного сканирования как способа мониторинга деформаций покрытия автомобильных дорог и взлетно-посадочной полосы.

Деформации, возникающие на объектах транспортной инфраструктуры на региональном макроуровне, определяются пространственными различиями географических условий: климатических, мерзлотно-литологических, геоморфологических, гидрологических и гидрогеологических.

Глава 2. Основные типы транспортных объектов

В рамках работы проводилась оценка устойчивости наиболее распространенных типов объектов транспортной инфраструктуры: 1) автомобильные дороги, которые согласно современным нормативным документам (СП 34.13330.2012) подразделяются на пять категорий исходя из интенсивности движения (в единицах транспорта/сутки), 2) железные дороги, подразделяющиеся на четыре категории по степени грузонапряженности перевозок. 3) магистральные и промысловые трубопроводы, важной особенностью которых является наличие трех различных вариантов прокладки: подземного, наземного и надземного; 4) взлетно-посадочные полосы аэродромов.

Ключевыми свойствами линейных объектов является их непрерывность и большая протяженность. Исходя из масштаба и формы сооружений меняется набор разномасштабных факторов природной среды, которые играют ключевую роль в их устойчивости. Для каждого из объектов можно определить «постоянные» и «переменные» факторы исходя из его размеров и особенностей географической обстановки территории. Например, климатический фактор является постоянным, для пространственно локализованных объектов в одном регионе или расположенных линейных объектов широтного направления, так как основные климатические характеристики и тренды их изменения можно считать однородными на региональном уровне или мало изменяющимися по широте. Напротив, на устойчивость более протяженных дорог и трубопроводов субмеридианального простирания большое влияние оказывают различия в климатических условиях, характере рельефа и распространении многолетней мерзлоты (сплошная, прерывистая, островная).

Для компактных объектов (локальные дороги и внутренние трубопроводы месторождений, взлетно-посадочные полосы аэродромов) ключевым фактором является вариации мерзлотно-литологических свойств грунтов. Значительная часть объектов протяженностью в первые километры и менее расположены в пределах одной геоморфологической позиции, что нивелирует влияние макроформ рельефа на их устойчивость и усиливает роль гидрологического и гидрогеологического факторов. Хорошим примером таких объектов может служить взлетно-посадочная полоса аэропорта Свальбарда, расположенная на однородной по морфометрическим характеристикам поверхности морской террасы, что не оказывает существенного значения на внутренние мерзлотно-литологические свойства основания объекта.

На мезоуровне (локальном) линейные сооружения отличаются непрерывностью и меньшей по сравнению с иными инженерными объектами вариативностью территориального размещения, испытывают влияние пространственной неоднородности, в основном, мерзлотно-литологических условий.

Глава 3. Методика проведения исследований

Изучение влияния физико-географических условий на устойчивость объектов транспортной инфраструктуры на региональном уровне, проводились на территориях Западного сектора Арктики (рис. 1): на Ванкорском месторождении в 2016- 2017 гг.; в г. Воркута в 2018 г.; в Норильском промышленном районе в 2018, 2020 и 2021 гг.; на территории Нижнего Приобья (гг. Лабытнаги, Салехард, пос. Харп, ст. Обская и др.) в 2021 и 2022 гг.; на архипелаге Шпицберген в 2018-2019 гг. Эти работы включали описание ландшафтно-мерзлотных условий территории, фотофиксацию состояния объектов транспортной сети, направленные на выявление деформаций, и картографирование ареалов

развития опасных экзогенных процессов, в том числе, с применением БПЛА, геодезические измерения вертикальных смещений конструкций, а также (на архипелаге Шпицберген) применение наземного лазерного сканирования для обследования дорог и взлетно-посадочной полосы.



Рис. 1. Расположение регионов исследования (1 – г. Лонгйир; 2 – Воркутинский район; 3 – Нижнее Приобье; 4 – Ванкорское нефтегазовое месторождение; 5 – Норильский промышленный район)

Источником информации о климатических параметрах стали литературные данные и сведения о наблюдениях на метеорологических станциях в регионах исследования. Данные о литологическом составе, льдистости и других свойствах мерзлых пород в опорных регионах получены из фондовых материалов (ООО «РН-Ванкор», Геокриологическая служба Республики Коми, University center in Svalbard), литературных источников, а также при полевом описании геологических разрезов. Определение геоморфологической позиции объектов было получены в ходе полевых наблюдений и по данным из литературных источников (Бобов, Уваркин 1964; Хомичевская, 1967; Трофимов, Кашперюк, 1989; Дубиков, 1998; Еременко и др., 2021 и др.).

Для оценки реакции локальных и точечных объектов транспортной инфраструктуры на климатические изменения проводилось численное моделирование температурных полей мерзлых грунтов и инженерно-геокриологических параметров (мощность слоя сезонного оттаивания, осадка грунтов при оттаивании, изменение касательных сил морозного пучения и несущей способности типового свайного фундамента). Для расчета температуры грунта к 2050 г. применялась программ QFrost, в основе которой лежит уравнение теплопроводности с заданием начальных и граничных условий, включая условие Стефана. При моделировании были использованы характеристики грунтов из фондовых материалов (Отдела геотехнического мониторинга ООО «РН-Ванкор», материалы изысканий в аэропорту г. Лонгйир и др.) и литературных источников, а также некоторые теплофизические характеристики из свода Правил (СП 25.13330.2020). На основе полученных данных с учетом прогнозируемых изменений температуры воздуха и грунта к

2050 (Павлов, 2008; IPCC, 2014; NCCS, 2019 и др.) г. были рассчитаны изменения мощности слоя сезонного оттаивания, осадка оттаивающих грунтов и прирост касательных сил морозного пучения.

Глава 4. Физико-географические условия районов исследования.

Для опорных регионов было выделено четыре группы геолого-географических факторов, определяющих снижение устойчивости линейных транспортных систем в криолитозоне и возникновение деформаций на них:

Климатические. Фиксирующиеся в высокоширотных регионах тренды к изменению климатических параметров оказывают значительное влияние на стабильность объектов транспортной инфраструктуры. Рост среднегодовых температур воздуха приводит к отеплению мерзлых грунтовых оснований дорог, трубопроводов и ВПП аэродромов. Не менее негативное влияние на устойчивость объектов транспортной инфраструктуры оказывает изменение снежности зим. Увеличение мощности снежного покрова, вызванное ростом количества осадков в последние десятилетия, приводит к дополнительному отеплению грунтов вдоль дорожных насыпей за счет роста теплоизолирующей роли снежного покрова, что провоцирует развитие термокарста и осадок деградирующих мерзлых пород вдоль дорог, оползанию насыпей. Важно отметить, что в ряде регионов (например, в Норильске и Салехарде) период с максимальным количеством летних осадков смещается на август-сентябрь, когда фиксируется наибольшее сезонное оттаивание мерзлых пород, что способствует более активному проникновению тепла в мерзлую толщу. Несмотря на общую тенденцию к росту температуры наружного воздуха в Арктике, региональные тренды отличаются местами на порядок.

Мерзлотно-литологические. Литологический состав и криогенное строение мерзлых грунтовых оснований линейных транспортных систем во многом определяют поведение объектов при трансформации климатических условий и техногенной нагрузке. Ключевую роль здесь играет большая мерзлотно-фациальная изменчивость, провоцирующая неравномерность проявления пучения и осадки грунтов слоя сезонного оттаивания. Разница в льдистости и пучинистости грунтов приводит к формированию неравномерных деформаций дорожных покрытий, насыпей и трубопроводов уже через несколько циклов промерзания-оттаивания. В случае залегания в грунтовой толще полигонально-жильных льдов отмечается формирование специфичных волнообразных деформаций. Кроме того, мерзлотно-литологическое строение территории определяет интенсивность протекания и степень поражения территории экзогенными процессами, оказывающими деструктивное воздействие на объекты транспортной инфраструктуры. В регионах, где преобладают отложения с более грубым составом и меньшей льдистостью, практически отсутствуют волнообразные деформации.

Гидрологические и гидрогеологические. Полевые наблюдения в опорных регионах показали, что значительная часть деформаций на Шпицбергене и в других районах вызваны нарушением путей стока поверхностных (в первую очередь – вод весеннего снеготаяния) и грунтовых вод при строительстве и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры. В криолитозоне эта проблема обостряется за счет формирования в теле дорожных насыпей мерзлого противодиффузионного ядра за счет усиления промерзания при очистке в

зимний период дорожных покрытий от снега, выполняющего роль теплоизолятора, что препятствует естественному поверхностному и подземному стоку. В результате вдоль насыпей автомобильных и железных дорог наблюдаются многочисленные области техногенного подтопления, провоцирующего деградацию мерзлых грунтов и активизацию термокарста.

Геоморфологические. Рельеф территории является ключевым фактором при выборе площадок строительства инженерных объектов и трасс прокладки линейных объектов, а также инженерных решений при их проектировании. Особенности рельефа территории также определяют комплекс опасных экзогенных процессов, угрожающих линейным транспортным системам в криолитозоне. Для объектов транспортной инфраструктуры в горных и предгорных районах большую угрозу представляют склоновые (в том числе криогенные) процессы: оползни, солифлюкция, формирование каменных глетчеров техногенного происхождения, лавино- и селеобразование. Для равнинных территорий криолитозоны преобладающими деструктивными процессами являются термокарст, термоэрозия, морозное пучение и т.д. Важно отметить, что рельеф играет чрезвычайно важную роль не только на уровне региональных различий, связанных в большей степени с типом рельефа, но и на уровне локальной дифференциации экспозиции, крутизны и профиля склонов и т.д.

Для исследованных районов установлена разномасштабность влияния геолого-географических факторов (табл. 1) на устойчивость транспортной инфраструктуры, что и обусловило их выбор в качестве «опорных». Например, тренды климатических изменений на архипелаге Шпицберген на порядок выше, чем в Норильском промышленном районе (ПРСС, 2014). При этом многолетнемерзлые породы Шпицбергена имеют гораздо более низкие температуры (около $-3...-5^{\circ}\text{C}$) и однородное сплошное распространение, чем разительно отличаются от многолетней мерзлоты Воркуты, где распространена «слабая» прерывистая мерзлота, температура которой редко бывает ниже -1°C . Для каждого из регионов тот или иной физико-географический фактор оказывает более или менее значимое воздействие на объекты транспортной инфраструктуры. Вместе с тем отличается и специфика инженерного освоения регионов исследования и, следовательно, особенности самих объектов транспортной инфраструктуры. Например, на Ванкорском месторождении преобладают протяженные (длина трассы нефтепровода «Ванкор-Пурпе» превышает 500 км) и построенные с применением современных решений (таких как сезонные охлаждающие устройства) конструкции. В то же время на архипелаге Шпицберген наиболее крупным и технически совершенным транспортным объектом является взлетно-посадочная полоса 1990-х годов постройки с протяженностью 3 км. Разные по своему масштабу и устройству объекты, несомненно, показывают разную реакцию на воздействие природных факторов.

Разномасштабность, разнонаправленность и асинхронность природных и антропогенных воздействий усложняют разработку корректных прогнозов поведения транспортных систем в криолитозоне. Кроме того, неоднородно влияние указанных факторов на техногенные объекты различного назначения. Например, охлаждение мерзлого грунтового основания при похолодании климата является, несомненно, положительным изменением с точки зрения вмороженных свайных фундаментов трубопроводов наземного назначения. Однако, для дорог и ВВП аэродромов дополнительное охлаждение

является негативным явлением, которое приведет к усилению процессов морозобойного растрескивания и морозной деструкции материалов покрытия.

Таблица 1.
Краткая физико-географическая характеристика регионов исследования

	Арх. Шпицберген	Воркутинский район	Нижнее Приобье	Ванкорское месторождение	Норильски промышленный район
Характер рельефа	Горный, широкое распространен ие имеют ледниковые формы рельефа, характерны троговые долины и фьорды Абс. высота 50 – 500 м	Полого- волнистый равнинный рельеф Абс. высота 50- 180 м	Равнинный рельеф в центральной и восточной частях района, низкогорный в западной (в районе пос. Харп) Абс. высота 50- 150 м (до 500 м в районе Харпа)	Равнинный рельеф, высокая степень заозеренности территории Абс. высота 50- 150 м	Рельеф изменяется от равнинного вблизи р. Енисей до низкогорного у отрогов плато Путоран. Абс. высота 50- 150 м равнинной части, 300-500 м на отрогах Путорана (Норильское плато, Хараелах, Ламские горы)
Климатичес кие показатели	Среднегодовая температура наружного воздуха: -5,9° С Осадки: 192 мм/год Тренд: +0,1 ° С/год	Среднегодовая температура наружного воздуха: -6 ° С Осадки: 650 мм/год Тренд: +0,026 ° С/год	Среднегодовая температура наружного воздуха: -5.5 ° С Осадки: 540 мм/год Тренд: +0,1 ° С/год	Среднегодовая температура наружного воздуха: -8,1 ° С Осадки: 450- 500 мм/год Тренд: +0,04 ° С/год	Среднегодовая температура наружного воздуха: -9,8 ° С Осадки: 450 мм/год Тренд: +0,01 ° С/год
Строение верхней толщи горных пород	Сильнольдист ые глины морских террас, аллювиальные е отложения в присклоновых зонах, выходы меловых конгломератов и песчаников	Суглинистые и супесчаные четвертичные отложения гляциально- морского и аллювиального происхождения, линзы сильнольдистых озерных суглинков, фрагменты мощных голоценовых торфяников. Выходы дочетвертичных пород в бортах долины р. Воркута	Аллювиальные и аллювиально- морские отложения преимуществен но песчаного состава по берегам р. Обь, фрагменты суглинистых ледниковых отложений с большим количеством включений грубообломочн ого материала	Верхнеплейсто ценовые отложения представлены песками и супесями, имеющими аллювиальное и озерно- аллювиальное происхождение. Голоценовые отложения представлены преимуществен но суглинистыми и супесчаными отложениями	Аллювиальные отложения (от песчаного до суглинистого состава) на участках речных пойм; озерные и озерно-болотные суглинистые и сильно оторфованные – на водораздельных пространствах и поверхностях надпойменных террас
Геокриолог ические характерист ики	Сплошная мерзлота мощностью от 100 м в прибрежной	Прерывистая мерзлота мощностью от 40 до 130 м	Островная, прерывистая, заглубленная мерзлота мощностью до	Сплошная мерзлота мощностью до 400-450 м.	Сплошная мерзлота мощностью от 100-200 м в Норильской

	части до 500 м в горной части архипелага Мощность СТС до 1,5 м То -3...-5 °С Тренд +0,04 °С/год	Мощность СТС до 2 м То -0,5...-1,5 °С Тренд +0,018°С/год	100 м, распространены несдвигающиеся толщи реликтовой мерзлоты на глубинах 11-190 м Мощность СТС до 2 м То -1...-2 °С Тренд +0,04 °С/год	Мощность СТС до 1,5-2 м То -1...-3 °С Тренд +0,025 °С/год	долине до 450 м на г. Рудная, Хараелахе и Ламских горах Мощность СТС до 1,5-2 м То -1...-4 °С Тренд +0,005 °С/год
Ландшафты	Арктическая тундра	Южная тундра и лесотундра	Южная тундра и лесотундра	Типичные тундры, участки лесотундры в понижениях рельефа	Типичные тундры, участки лесотундры в понижениях рельефа

Глава 5. Географические особенности устойчивости линейных транспортных объектов в опорных регионах

Натурные исследования и обработка данных дистанционного зондирования Земли показали, что в выбранных для исследования регионах тот или иной фактор может играть более значимую или менее заметную роль в устойчивости транспортных систем. На архипелаге Шпицберген факторами, определяющими нарушения устойчивости транспортных объектов, являются широкое распространение сильнольдистых засоленных суглинистых отложений морских террас и крайне негативные для мерзлоты тренды климатических изменений (порядка 0,1° С/год). Также на архипелаге отмечаются многочисленные деформации дорожного покрытия, вызванные застоем талых снеговых и поверхностных вод вдоль насыпей дорог (сочетание природных и техногенных факторов), что обусловлено ошибками при проектировании водопропускных сооружений. Неравномерное увлажнение грунтов, обусловленное естественными условиями рельефа и затруднениями стока поверхностных вод под насыпью ВПП аэропорта Лонгйира, привело к появлению на полосе природно-техногенного бугра пучения, имеющего относительную высоту порядка 6 м (рис. 2). Его рост обусловлен подтягиванием влаги к переохлажденному мерзлоту ядру насыпи.

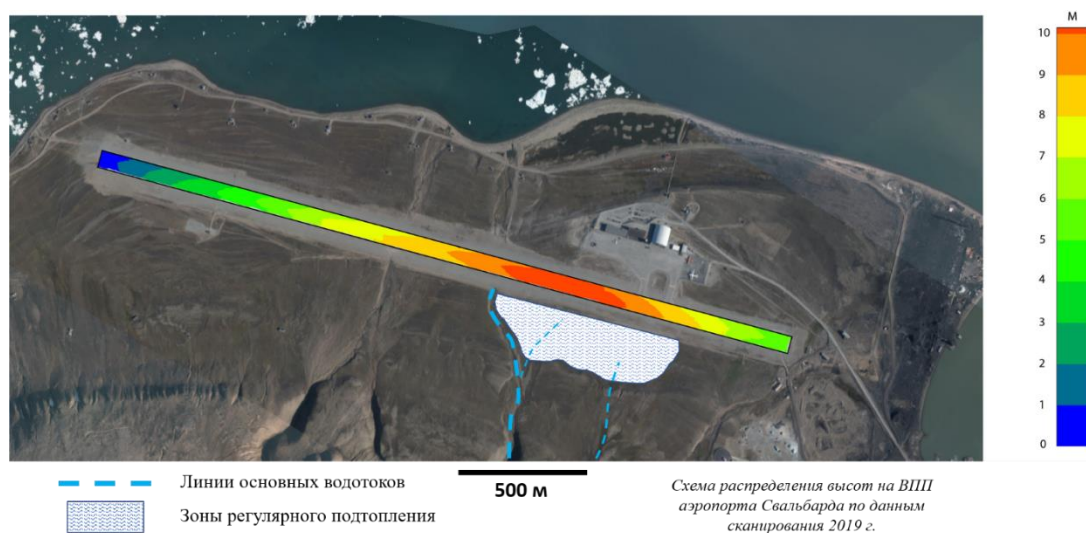


Рис. 2. Природно-техногенный бугор пучения на схеме распределения высот ВПП аэропорта Свальбарда

На территории Воркутинского промышленного района большинство деформаций на транспортных объектах вызваны отеплением высокотемпературных льдистых оторфованных суглинков, залегающих с поверхности. Высокая (местами порядка $-0,5^{\circ}\text{C}$) температура верхней толщи мерзлых грунтов (Каверин и др., 2014) обуславливает их деградацию и формирование просадок поверхности даже при условии относительно слабых трендов к потеплению. Для транспортной инфраструктуры Нижнего Приобья наибольшую опасность представляет распространения пылеватых песчаных и супесчаных отложений, подверженных активной термоэрозии, которая усиливается заметными трендами роста температуры воздуха. На Ванкорском месторождении и трассе магистрального нефтепровода «Ванкор-Пурпе» основной проблемой является морозное пучение и активизация опасных природных процессов (заболачивание, термоэрозия и т.д.) в результате «среднего» по темпам роста температуры наружного воздуха и изменения природной среды при строительстве и эксплуатации объектов. На территории Норильского промышленного района многочисленные неравномерные деформации дорог и трубопроводов связаны с деградацией льдистых отложений Вальковской свиты. Изменению устойчивости транспортных систем способствует техногенное перераспределение снежных отложений вдоль трасс (очистка полотна дорог и складирование мощных снегоотвалов рядом). Важно отметить, что деградационные тенденции проявляются в условиях относительно незначительных трендов к росту среднегодовой температуры наружного воздуха (не более $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$) и вызваны, в первую очередь, более теплыми зимами и, следовательно, недостаточным охлаждением мерзлых пород. Кроме того, в районе Норильска сказывается достаточно высокая расчлененность рельефа, способствующая развитию опасных для транспортной инфраструктуры склоновых процессов.

Для опорных регионов было проведено численное моделирование температурных и инженерно-геокриологических характеристик мерзлых грунтов. Расчет мощности СТС к 2050 г. показал, что наибольшим образом СТС изменится на арх. Шпицберген, где для моделирования были выбраны литологические и геокриологические характеристики,

свойственные для участков прибрежных морских террас: в таких грунтовых условиях изменение мощности активного слоя составит 17,2 % (т.е. СТС увеличится на 14,6 см). Большие относительные величины изменения СТС объясняются, в первую очередь, наиболее заметными (по сравнению с другими регионами) трендами к увеличению температур воздуха и грунта, а небольшое относительно других регионов абсолютное значение мощности СТС – низкими исходными температурами мерзлой толщи. Полученный результат, в целом, соотносится с существующими прогнозами об увеличении глубины слоя сезонного протаивания в районе г. Лонгйир на 1 м к 2100 г (НССА, 2018). Наименьшее изменение мощности СТС прогнозируется в Воркутинском промышленном районе, где к 2050 г. прирост активного слоя составляет всего 8,5-9 %. Такие незначительные изменения в глубине сезонного протаивания объясняются достаточно слабыми трендами к увеличению температур воздуха и грунта (всего +0,026° и +0,018° в год). Однако, в двух отличных друг от друга литологических условиях в пределах Воркутинского района изменения абсолютных величин мощности СТС произойдет достаточно неоднородно, прирост глубины активного слоя будет отличаться в 1,4 раза. Прогноз прироста касательных сил морозного пучения с учетом смоделированного изменения мощности СТС под действием трендов к потеплению климата был выполнен для типичной опоры надземного трубопровода, представляющей собой металлическую сваю круглого сечения с диаметром 320 мм. Расчеты показали (табл. 2), что в зависимости от увеличения мощности СТС и литологических условий прирост сил пучения может отличаться в 2-2,5 раза. Наименьшее увеличение сил пучения прогнозируется для суглинистых грунтов Воркутинского района (6,5 %), наибольшее – для сильнольдистых глин прибрежной части арх. Шпицберген (15,4%). Моделирование осадки оттаивающего грунта при увеличении СТС показало, что максимум негативных перемещений (2,7 см) характерен для оторфованных суглинков Воркутинского района (прирост СТС на 9%) и для сильнольдистых глин морских террас на архипелаге Шпицберген, где осадка грунтов (при увеличении СТС на 17%) составила 3,3 см. Данная модель соответствует натурным наблюдениям, которые фиксируют обширные просадки дорожного покрытия (7 и более см глубиной) в этих регионах. Ключевым моментом, который стоит отметить, является неравномерность осадок грунтов даже в пределах одного региона, что хорошо видно на примере двух разновидностей литокриогенных условий в районе Воркуты: в зависимости от влажности и плотности осадка суглинистых грунтов отличается практически в 2,5 раза. Для опор надземной части магистрального нефтепровода «Ванкор-Пурпе» было проведено численное моделирование снижения несущей способности вмерзших свай при отеплении мерзлой толщи при потеплении климата (табл.3). В результате отепления мерзлого основания на 1° С несущая способность свай снижается примерно на 30 % на участках (№№ 1 и 3) суглинистого грунта и на 19% - на участке с песчаной толщей (№ 2). Наиболее негативный прогноз характерен для участка №1, что можно объяснить отсутствием с поверхности торфяного горизонта, являющегося достаточно хорошим теплоизолятором. Именно поэтому на первом участке прогнозируется увеличение мощности СТС на 0,5...1 м в сравнении с 0,1...0,2 м на участке №3.

Таблица 2								
Прогноз увеличения касательных сил морозного пучения при увеличении мощности СТС в опорных регионах с 2019 по 2050 гг.								
№	Регион	Грунт в верхней части разреза	i (д.е)	ρ_{df} (т/м ³)	W_{tot} (д.е.)	Тренд изменения температуры	Относительное изменение	Прирост касательных сил

						воздуха/грунта (°C/год)	мощности СТС (%)	морозного пучения (%)
1	Воркута	Суглинок льдистый	н/д	1,9	0,37	+0,026 / +0,018	8,6	6,5
2		Суглинок оторфованн ый	н/д	1,77	0,22	+0,026 / +0,018	9	7
3	МНП «Ванкор- Пурпе»	Суглинок	0,21	1,54	0,35	+ 0,04 / + 0,025	9,4	7,4
4	Норильск	Суглинок	0,3	1,6	0,3	+0,05 / +0,02	10,3	6,6
5	Шпицберг ен	Глина	0,5	1,8	0,6	+0,1 / +0,04	17,2	15,4
i – льдистость мерзлого грунта ρ_{df} – плотность скелета грунта W_{tot} – суммарная влажность мерзлого грунта								

Таблица 3					
Результаты прогноза несущей способности свайного фундамента с 2017 по 2050 гг.					
№ участка	Расчетная несущая способность грунта на 2017 г. (кН)	Мощность СТС на 2017 г. (м)	Расчетная несущая способность грунта на 2050 г. (кН)	Расчетная мощность СТС на 2050 г. (м)	Уменьшение несущей способности грунта (%)
1	2290	2	1520	2,58	33,6
2	1910	0,3	1540	0,40	19,2
3	2510	0,4	1720	0,45	31,5

Устойчивость транспортной инфраструктуры снижается, во-первых, при увеличении глубины сезонного оттаивания грунтов на фоне разных по регионам трендов к потеплению климата и связанных с ним изменением прямых и касательных сил морозного пучения, которые на Шпицбергене будут в 2-2,5 раза больше, чем в Западном секторе криолитозоны России; во-вторых, в разной степени активности в регионах тех или иных опасных экзогенных процессов в зависимости от характера рельефа. Численное моделирование показало, что в пределах одного региона к 2050 г. на фоне потепления климата в зависимости от мерзлотно-литологических условий снижение несущей способности свайных фундаментов может отличаться в 1,5-2 раза, осадка грунтов – в 2,5 раза. Наиболее часто деформации проявляются на участках регулярного и значительного переобводнения поверхностными и грунтовыми водами, то есть максимально сказываются гидрологические и гидрогеологические условия, а также характер снегонакопления.

Исследования показали необходимость новых подходов к оценке влияния геолого-географических факторов на устойчивость транспортных систем; эти методы должны базироваться на разных уровнях мониторинга (анализа), обусловленных разным масштабом транспортных объектов, изменяющихся от первых сотен метров до сотен

километров. Такой подход основан на роли тех или иных геолого-географических факторов в геосистемах различного масштаба, что позволяет исключить из анализа факторы низкой вариативности и сосредоточиться на оценке факторов значимой вариативности. Можно выделить следующие три уровня:

1) Региональный, включающий в себя регулярные объезды объектов транспортной инфраструктуры с целью визуального контроля состояния конструкций, выделения «проблемных» участков, создание баз данных по оценке различных геолого-географических факторов на устойчивость сооружений. Важно отметить, что при выделении этих участков важно учитывать региональные тренды климатических изменений, способные в ближайшем будущем вызвать ухудшение мерзлотной обстановки и деформации объектов;

2) Локальный, в рамках которого проводятся детальные измерения и обследования на «ключевых» участках; локализация и детализация баз данных. Выделение таких участков исходя из типизации ландшафтно-мерзлотных условий позволит сократить количество детальных измерений за счет интерполяции данных, полученных на «ключевых» полигонах, на участки со сходными ландшафтно-мерзлотными условиями;

3) «Точечный», включающий детальные наблюдения с применением широкого спектра современных геокриологических и геодезических методов на наиболее ответственных частях транспортных систем (например, на мостовых переходах дорог и трубопроводов), в зонах развития опасных экзогенных процессов в непосредственной близости от объектов и выявленных ранее проблемных участках; прогноз возможных негативных изменений в многолетнемерзлых породах оснований путем детального моделирования.

Важным аспектом усовершенствования систем мониторинга является внедрение площадок для оценки динамики экзогенных процессов. В настоящее время регулярный и однородный по своим методикам мониторинг за экзогенными процессами не имеет широкого распространения. Однако, анализ проблем устойчивости транспортной инфраструктуры в «опорных» регионах показал высокую угрозу именно со стороны экзогенных процессов. Кроме того, для ряда объектов (например, малонагруженных дорог с грунтовым покрытием) мониторинг по «нормативным» направлениям практически не имеет смысла, так как вертикальные смещения в пределах нескольких сантиметров на подобных объектах нельзя назвать критичными. В то же время развитие термоэрозии, термокарста, морозобойного растрескивания в непосредственной близости от объектов, несомненно, может привести к серьезным повреждениям вплоть до полного разрушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что устойчивость объектов транспортной инфраструктуры в областях распространения многолетнемерзлых горных пород определяется природными факторами, которые можно объединить в четыре группы: климатические, геоморфологические, мерзлотно-литологические, гидрологические и гидрогеологические. Выявлены полимасштабные отношения между этими факторами и свойствами

устойчивости разноразмерных инженерных объектов. Современные обще глобальные климатические тренды имеют региональные различия, определяющие пространственные особенности воздействия на ландшафтно-мерзлотные условия транспортных систем, что снижает прочностные характеристики оснований, вызывает усиление касательных сил морозного пучения и неравномерные осадки грунтов в сезонно-талом слое способствует развитию деформаций. Геоморфологический и мерзлотно-литологический факторы определяют региональный комплекс опасных для транспортных объектов экзогенных (в том числе криогенных) процессов, а также во многом определяют выбор проектных решений и места размещения инфраструктуры.

Исследования на локальном и точечном уровнях проводились в пяти регионах Западного сектора Арктики, которые были выбраны исходя из заметных различий в физико-географических условиях, прежде всего, климатических, геоморфологических, мерзлотных. Эти исследования включали как полевые наблюдения, направленные на выявление геолого-географических причин возникновения уже существующих деформаций на различных типах транспортных объектов, так и численное моделирование температурных и инженерно-мерзлотных характеристик мерзлых грунтов, которое позволило оценить негативное влияние современных климатических изменений. Для географических условий, в которых расположены ключевые регионы, были выявлены основные проблемы устойчивости объектов транспортной инфраструктуры. В частности, для территорий архипелагов Западного сектора Арктики характерны крупные просадки дорожного покрытия в результате оттаивания сильнольдистых отложений морских террас и смещение конструкций под действием склоновых процессов. На равнинных территориях севера Европейской части России отмечаются вертикальные смещения конструкций дорог и трубопровод при деградации высокотемпературных суглинистых пород. На севере Западной Сибири – деформации пучения и осадки, стимулированные за счет нарушения естественных покровов, а также повреждение конструкций в результате термоэрозии пылеватых песчаных или супесчаных сильнольдистых отложений. Для предгорных территорий Севера Средней Сибири характерно повреждение дорог и трубопроводов в результате вытаивания ледяных включений в рыхлых отложениях и воздействия склоновых процессов.

Исследования показали, что на региональном уровне проблемы устойчивости объектов транспортной инфраструктуры определяются преимущественно климатическими (в первую очередь, спецификой трендов потепления климата) и геоморфологическими особенностями территории, определяющими степень активности тех или иных экзогенных процессов. На локальном уровне отмечается максимальный вклад мерзлотно-литологических особенностей в характер возникающих на объектах транспортной инфраструктуры деформаций. Расчеты показали, что в пределах одного региона в зависимости от состава снижение несущей способности мерзлых грунтов может отличаться в 1,5-2 раза, осадка грунтов – в 2,5 раза. На точечном уровне отмечается чрезвычайно высокий вклад в устойчивость инженерных объектов гидрологических и гидрогеологических условий, а также особенностей снегонакопления.

Многочисленные проблемы устойчивости инженерных объектов, выявленные в регионах исследования, а также возможное сохранение трендов к потеплению климата в ближайшем будущем указывают на необходимость проведения качественного

геотехнического мониторинга, создание корректных баз данных состояния объектов транспортной инфраструктуры и причин возникновения деформаций и разработки прогнозов поведения геосистем территорий с многолетней мерзлотой. Однако, большая протяженность объектов транспортной инфраструктуры накладывает серьезные ограничения на проведение геотехнического мониторинга «классическими» методами. Для оптимизации процесса мониторинга с сохранением детальности наблюдений и корректности полученных данных, необходимо внедрение современных (в том числе дистанционных) методов, а также усовершенствование самой системы мониторинговых работ в сторону сосредоточения на детальных исследованиях на проблемных участках и участках внутри репрезентативных для различных ландшафтно-мерзлотных комплексов участков. Примером такого решения может быть разделение мониторинга (анализа) на уровни, обусловленные масштабом геосистем: а) региональный, б) локальный, в) «точечный». Такой подход позволит осуществлять корректный анализ и, в дальнейшем, прогнозировать поведения объектов транспортной инфраструктуры с учетом неоднородности воздействия геолого-географических факторов в геосистемах различного масштаба.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.8:

1. *Гребенец В.И., Толманов В.А., Хайрединова А.Г., Юров Ф.Д.* Проблема размещения отходов в Арктических регионах России // Проблемы региональной экологии. — 2019. — № 3. — С. 63-67. (импакт-фактор РИНЦ: 0,212)
2. *Grebenets V.I., Tolmanov V.A., Iurov F.D., Groisman P.Y.* The problem of storage of solid waste in permafrost // Environmental Research Letters. — 2021. — Vol. 16, no. 10. — P. 105007. — DOI: 10.1088/1748-9326/ac2375 (SJR: 2,119)
3. *Гребенец В.И., Юров Ф.Д., Кизяков А.И., Зотова Л.И., Маслаков А.А., Толманов В.А., Стрелецкая И.Д.* Оценка воздействия опасных криогенных процессов на инженерные объекты в Арктике // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. — 2022. — № 3-4(115-116). — С. 87-102. — DOI: 10.22204/2410-4639-2022-115-116-03-04-87-102 (импакт-фактор РИНЦ: 0,194)
4. *Гребенец В.И., Кизяков А.И., Маслаков А.А., Сократов С.А., Стрелецкая И.Д., Толманов В.А., Юров Ф.Д.* Влияние опасных криогенных процессов на инфраструктуру городов в Арктике // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2022. — № 2. — С. 25-36. (SJR: 0,197)

Публикации в материалах конференций:

5. *Юров Ф.Д., Гребенец В.И.* Современная динамика инженерно-геокриологических условий на Ванкорском и Заполярном нефтегазовых месторождениях // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы докладов XIII Общероссийской конференции изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2017. — С. 239-248.
6. *Керимов А.Г., Гребенец В.И., Толманов В.А., Шикломанов Н.И., Юров Ф.Д., Губанов А.С.* Сезонное оттаивание и осадка грунтов по результатам полевых исследований в Норильском регионе (площадка R-32 CALM) // Сборник докладов расширенного

- заседания Научного Совета по криологии Земли РАН. — Т. 1. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2018. — С. 179-185.
7. **Юров Ф.Д., Гребенец В.И.** Динамика температурного поля грунтов на Ванкорском месторождении // Сборник докладов расширенного заседания Научного Совета по криологии Земли РАН. — Т. 2. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2018. — С. 128-133.
 8. **Гребенец В.И., Толманов В.А., Хайрединова А.Г., Юров Ф.Д.** Проблемы складирования твердых отходов в криолитозоне // СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ. Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. — Вып. 20. — М.: Российский университет дружбы народов, 2018. — С. 227-234.
 9. **Гребенец В.И., Толманов В.А., Юров Ф.Д., Гюнтер Ф.** Ландшафтно-мерзлотные особенности второй Каргинской террасы (левобережье низовьев Оби) // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2018. — С. 295-303.
 10. **Гребенец В.И., Рогов В.В., Юров Ф.Д.** Деструкция материалов строительных конструкций в арктических регионах России // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2018. — С. 738-747.
 11. **Юров Ф.Д., Гребенец В.И., Тополева А.Н.** Инженерно-геокриологические аспекты устойчивости дамб-накопителей промышленных отходов (Норильский район) // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2018. — С. 303-309.
 12. **Толманов В.А., Гребенец В.И., Юров Ф.Д.** Оценка негативного влияния криогенных процессов на инфраструктуру ЯНАО // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы Пятнадцатой Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2019. — С. 284-290.
 13. **Iurov F., Marchenko N.** Laser scanning as a tool for monitoring road deformations in Svalbard // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC — 2019. (SJR: 0,163)
 14. **Гребенец В.И., Толманов В.А., Юров Ф.Д., Хайрединова А.Г.** Роль геохимического состава сезонно-талого слоя в экологической обстановке на Таймыре // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии Сергеевские чтения. Геоэкологические аспекты реализации национального проекта «Экология». — Москва: Российский университет дружбы народов, 2020. — С. 180-187.
 15. **Юров Ф. Д.** Региональные особенности поведения транспортных систем в криолитозоне при изменении климата // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы Шестнадцатой Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2021. — С. 326-332.
 16. **Iurov F., Marchenko N.** The problem of the sustainability of Svalbard infrastructure under changes of climate and permafrost conditions // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC. — 2021. (SJR: 0,163)

17. *Пожарская А.Д., Юров Ф.Д., Гребенец В.И., Сучилин А.А.* Создание локальной ГИС для наблюдений за СТС Приуралья // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы Семнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2022. — С. 264-271.
18. *Юров Ф.Д.* Особенности организации мониторинга линейных транспортных систем в криолитозоне // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы Семнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2022. — С. 234-242.
19. *Корнев А.Д., Юров Ф.Д., Марченко Н.А.* Исследование деформаций дорожного покрытия в г. Лонгйир (архипелаг Шпицберген) при помощи лазерного сканирования // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы Семнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2022. — С. 243-251.
20. *Корнев А.Д., Юров Ф.Д., Марченко Н.А.* Деформации дорог Западного Шпицбергена при изменениях климата и геокриологических условий // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России Мониторинг в криолитозоне с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г. — М.: Добросвет, 2022. — С. 605-611.
21. *Юров Ф.Д., Гребенец В.И.* Оценка негативного влияния криогенных процессов на транспортную инфраструктуру Западного сектора Арктики // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России Мониторинг в криолитозоне с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г. — М.: Добросвет, 2022. — С. 633-639.

Прочие публикации:

22. *Юров Ф.Д., Гребенец В.И.* Несущая способность вечномёрзлых грунтов оснований объектов в нефтегазоносном Таз-Хетско-Енисейском регионе при потеплении климата // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. — 2019. — № 1 (102). — С. 74-81.