

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Научный руководитель:  
кандидат геолого-минералогических наук,  
доцент В. И. Гребенец

Москва – 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> ..	13
<b>ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ</b> .....	25
<b>ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	37
3.1. Полевые наблюдения .....	37
3.2. Численное моделирование .....	40
<b>ГЛАВА 4. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	47
4.1. Архипелаг Шпицберген.....	47
4.2. Воркутинский промышленный район.....	51
4.3. Приуральский район ЯНАО.....	60
4.4. Ванкорское месторождение .....	64
4.5. Норильский промышленный район .....	72
<b>ГЛАВА 5. ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ В ОПОРНЫХ РЕГИОНАХ</b> ....	80
5.1. Численное моделирование температурных и инженерно-геокриологических характеристик .....	80
5.2. Сравнительный анализ проблем устойчивости транспортных объектов в опорных регионах .....	85
5.3. Предлагаемая концепция организации мониторинга устойчивости транспортных объектов .....	104
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	107
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	114
Приложение. 1. Краткая физико-географическая характеристика регионов исследования .....	128

## **ВВЕДЕНИЕ**

**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.

**Объектом исследования** являются многолетнемерзлые основания транспортных систем.

**Предметом исследования** является устойчивость транспортной инфраструктуры при воздействии геолого-географических факторов с учетом региональных особенностей.

**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;

**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 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.

**Практическая значимость исследования.** 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 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.

Публикации 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., Сокатов С.А., Стрелецкая И.Д., Толмано 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. *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)
13. *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.
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.

**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. Бадю 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»

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ<sup>1</sup>

В настоящее время идет активное обсуждение проблемы устойчивости зданий и сооружений в зоне распространения многолетней мерзлоты. В первую очередь это обусловлено изменениями климатических параметров, которые фиксируются в последние десятилетия. При этом важно отметить, что наибольшая интенсивность негативных климатических трендов отмечается именно в высоких широтах. Арктический регион является «мировым лидером» в глобальном потеплении, а прогнозы говорят о сохранении трендов в ближайшем будущем (*Nelson et al., 2002; IPCC, 2014; NCCS, 2019*). Так, за период 1964-2014 гг. тренд роста среднегодовой температуры воздуха в Западной Сибири составил  $0,06^{\circ}$  С/год; на арх. Шпицберген тренд к увеличению среднегодовой температуры воздуха за период 1971-2017 гг. составил  $0,1^{\circ}$  С/год. Говоря об увеличении температур стоит отметить, что наибольшие тренды к потеплению наблюдаются в Арктическом регионе в зимние месяцы: происходит уменьшение продолжительности холодного периода. Например, на арх. Шпицберген тренд роста зимних температур за 1971-2017 гг. превышает аналогичный тренд для летних температур в 2-3 раза (в отдельных пунктах метеонаблюдений – в 5 раз!) (*NCCS, 2019*). При сохранении текущих тенденций к 2100 г. прогнозируется уменьшение продолжительности периода с отрицательными температурами на 96 дней. Аналогичные тенденции прослеживаются и в российском секторе Арктики: уменьшение холодного периода за последние 30 лет составило 5-6 дней в тундровой зоне и 15-17 дней – в зоне северной тайги (*Васильев и др., 2008*).

Многолетняя мерзлота является чрезвычайно уязвимым компонентом природной среды Арктики, которая меняет свои характеристики вслед за трансформацией климатических параметров (*Мельников и др., 2007; Павлов, 2008; Дроздов, Дубровин, 2016; Romanovsky et al., 2017 и др.*). Однако, отепление мерзлых пород происходит неравномерно, на этом процессе сказываются как региональные

---

<sup>1</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

**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 изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2022. — С. 234-242.

(например, увеличение температуры мерзлых грунтов в районе Воркуты составляет  $0,025^{\circ}$  C/год, на Шпицбергене – до  $0,04^{\circ}$  C/год (NCCS, 2019); в то время как рост температуры грунтов в Норильском районе всего лишь  $0,005^{\circ}$  C/год (Павлов, 2008)), так и локальные факторы (тренд к увеличению температуры суглинистых грунтов значительно ниже, чем аналогичный тренд для торфянистых грунтов:  $0,01^{\circ}$  C/год и  $0,08^{\circ}$  C/год соответственно) (Васильев и др., 2008; Каверин и др., 2019). Вопрос о современных изменениях температурных характеристик мерзлых грунтов, причинах этих изменений и прогнозах на ближайшее будущее остается дискуссионным. Так, в последнее время во многих пунктах криолитозоны фиксируется некоторое замедление темпов роста температуры мерзлоты, а на Ямале местами наблюдается уменьшение температуры грунтов (Украинцева и др., 2011). Существуют также и прогнозные модели, говорящие о похолодании в Арктических регионах в ближайшие 30 лет (Панин и др., 2015).

Линейные транспортные объекты можно назвать одним из наиболее уязвимых видов техногенных сооружений, что обусловлено их ключевыми особенностями: непрерывностью и большой протяженностью. Эти особенности, например, определяют высокие риски для транспортных коммуникаций от воздействия экзогенных процессов. Так, в районах с горным рельефом огромной проблемой для дорог и трубопроводов являются оползневые процессы и сход лавин. В последние годы отмечается активизация этих процессов на территории горных районов стран СНГ, что создает критическую ситуацию для железных и автомобильных дорог (Авакян, 2021). На территории России проявление экзогенных процессов, характерных для горных территорий, представляют значительную опасность для транспортных коридоров Восточной Сибири и Дальнего Востока (Подвербный, Филатов, 2012; Айбулатов и др., 2021). Это обусловлено сложными природными и инженерно-геологическими условиями территории: расчлененность рельефа, сейсмическая активность, распространение мерзлых пород (Едигарян, Квашук, 2017). Однако, оползневые процессы могут вызывать деформации и разрушения дорог и на равнинных территориях. Например, на территории республики Чувашия ежегодно отмечается деформация откосов насыпей и дорожных выемок, нарушение системы водоотвода, разрушение дорожного покрытия и выход оползневых масс на проезжую часть (Никитина и др., 2015). Значительный ущерб от оползневых

явлений для дорожной сети отмечается также и Воронежской области: 14 административных районов региона из 32 считаются «опасными» в отношении возникновения оползневых процессов (Тимофеев, 2020). При этом важно отметить, что исследования А.Н. Тимофеева показали, что изменение режима стока поверхностных и грунтовых вод в результате отсыпки дорожных насыпей зачастую приводит к дополнительной активизации оползневых явлений.

На территориях, покрытых рыхлым осадочным чехлом, высок риск повреждения транспортных объектов в результате действия овражной и речной эрозии. Для этих процессов характерны высокие скорости развития в особенности, при их стимулировании за счет удаления естественных почвенных и растительных покровов. Например, на одном из участков железной дороги Барнаул-Бийск отмечается средняя скорость прироста вершины оврагов, находящихся в опасной близости от дороги, составляет несколько метров в год. При таких темпах роста возможно разрушение насыпи дороги через 10-15 лет, а при наиболее негативных сценариях – через 2-3 года (Ревзон, Шварев, 2005).

В зоне распространения многолетней мерзлоты дополнительным и зачастую наиболее серьезным источником опасности для устойчивости линейных транспортных систем являются криогенные процессы. Для равнинных территорий криолитозоны (например, в пределах п-ова Ямал и Тазовский) одним из наиболее распространенных процессов является термоэрозия (Губарьков, Лейбман, 2010; Godin, Fortier, 2012; Толманов и др., 2018 и др.). Так, на полуострове Ямал густота овражно-балочной сети оценивается в 2-2,5 км/км<sup>2</sup> (Сидорчук, 2020), а овражные системы обладают высокой активностью за счет широкого распространения сильнольдистых пылеватых отложений, обладающих низкой устойчивостью к размыву. Высказываются предположения, что процесс термоэрозии активизируется из-за потепления климата и увеличения количества осадков (Kokelj, Jorgenson, 2013).

В прибрежных регионах криолитозоны особую опасность для населенных пунктов и промышленных объектов представляет термоабразия берегов, что особенно актуально в случае берегов, сложенных мерзлыми грунтами с высокой степенью льдистости (Григорьев и др., 2006; Кизяков и др., 2013; Günther et al., 2013). В Российской Арктике проблемы, вызванные действием термоабразии отмечаются

на западном побережье Ямала (*Belova et al., 2018*), на Чукотке (*Маслаков, 2019*) и в других прибрежных районах.

Особенно актуальным для изучения представляется процесс термокарста, развитие которого вследствие потепления климата и деградации мерзлой толщи отмечается на обширных территориях криолитозоны (*Edwards et al., 2009*). Стоит отметить, что тенденции изменения площади термокарстовых озер достаточно вариативны и определяются во многом региональными особенностями, связанными с локальными ландшафтными и климатическими условиями (*Кравцова, Родионова, 2016*). В районах сплошного распространения мерзлоты (особенно сложенной с поверхности высокольдистыми породами) отмечается увеличение площади термокарстовых озер, в то время как в областях островного и прерывистого распространения многолетней мерзлоты отмечается сокращение площади и количества озер термокарстового происхождения (*Jones et al., 2011*).

Кроме того, в последние 5 лет не утихают дискуссии относительно процесса формирования воронок газового выброса, вызвавших своим появлением интерес у широкой общественности. Такие явления (в силу своей непрогнозируемости и слабой изученности) несомненно представляют опасность для населенных пунктов и производственных площадок, например, на территории севера Западной Сибири (*Кизяков и др., 2015; Kizyakov et al. 2017*).

Изменение температурных характеристик мерзлых грунтов и увеличение мощности слоя сезонного протаивания негативно сказывается на состоянии и устойчивости антропогенных объектов в криолитозоне. Происходит снижение прочностных свойств мерзлых грунтов, несущей способности грунтовых оснований и замороженных фундаментов (*Хрусталева и др., 2011; Гребенец, Ухова, 2008*). В настоящее время это привело к потенциальному выходу показателя несущей способности замороженных фундаментов за пределы расчетных значений, заложенных при проектировании. Критическая ситуация сложилась для объектов, построенных до 1980-х гг., так как несущая способность свайных фундаментов рассчитывалась исходя из мощности и температуры мерзлоты с совершенно иными параметрами (*Хрусталева и др., 2011; Гребенец, Садовский, 1993*). Но в текущей ситуации рост мощности активного слоя повлек за собой рост касательных сил

морозного пучения, что чрезвычайно опасно для малонагруженных сооружений, таких как опоры трубопроводов надземного заложения. Такой способ постройки трубопроводов (в т.ч. магистральных и внутрипромысловых нефте- и газопроводов) является предпочтительным в криолитозоне (*Хрусталева, 1991; СП 36.13330.2012*) и применяется на Ямале, на трассе нефтепровода «Ванкор-Пурпе» и др. В результате негативных изменений мерзлотных условий ежегодной срезке из-за выпучивания только на территории Ямбургского месторождения подвергается 3-4 тысячи опор газопроводов различного назначения (*Второй оценочный доклад..., 2014*). Ситуация усложняется неравномерностью протекания процессов пучения и термокарстовой осадки, связанной с большой мерзлотно-фациальной изменчивостью в криолитозоне (*Попов, 1961*). Так, в результате неравномерной термокарстовой осадки на участке нефтепровода «Возей-Головные сооружения» в 1994 году произошла крупнейшая в мире (разлив около 160 тыс. тонн нефти) наземная авария (*Оберман, 2007*). Неравномерные осадки грунта при оттаивании многолетней мерзлоты стали причиной реконструкции газопровода «Васильково-Нарьян-Мар» уже через несколько лет после ввода в эксплуатацию, так как при проектировании не были учтены возможные изменения мерзлотных условий из-за климатических изменений (*Стрелецкий и др., 2012*). Прогнозу изменения мерзлотных и инженерно-геокриологических условий на урбанизированных территориях криолитозоны посвящен ряд работ (*Хрусталева и др., 2011; Анисимов, Жильцова, 2012; Анисимов, Стрелецкий., 2015 и др.*). Однако, вопрос воздействия криогенных процессов на антропогенные (в том числе, линейные) объекты остается нерешенным. Необходимо учесть региональных особенностей (климатических, криолитологических параметров), обновление нормативно-технической документации, учесть особенностей конструкции сооружений.

Проявление деструктивных криогенных процессов, приводящих к деформациям и разрушению дорожных конструкций наблюдается на территории России и вне зоны распространения многолетней мерзлоты. В респ. Чувашия отмечается активное воздействие процессов пучения и осадки грунтов в слое сезонного оттаивания на покрытие и насыпи автомобильных дорог. По данным Министерства транспорта и дорожного хозяйства Чувашской республики в 2015

году деформации, вызванные сезонным пучением и осадкой грунтов, были выявлены на площади более 49 тыс. м<sup>2</sup> (Никитина и др., 2015).

При анализе проблем устойчивости транспортных систем в Арктическом регионе чрезвычайно важно учитывать, что для ряда регионов характерна значительная трансформация природных компонентов в результате человеческой деятельности, что неизбежно привело к изменению их свойств. При этом заметной трансформации подверглись не только такие уязвимые составляющие как растительность или ландшафтная структура, но и рельеф. Так, исследования антропогенного изменения рельефа, выполнявшиеся коллективом под руководством А.В. Бредихина, показали, что порядка 18% территории Российской Арктики затронуты хозяйственным освоением, что привело к трансформации рельефа и комплекса естественных геоморфологических процессов на общей площади около 667 тыс. км<sup>2</sup> (Бредихин и др., 2020). Важно отметить, что масштабы антропогенного воздействия в Арктической зоне весьма неоднородны и имеют ярко выраженную тенденцию к уменьшению с запада на восток, а также зависят от направленности человеческой деятельности. Наибольшее прямое воздействие на рельеф и комплекс экзогенных процессов отмечается в районах с развитой горнодобывающей промышленностью, например, в Норильском и Воркутинском промышленном районах (Бредихин и др., 2020; Ерёмченко и др., 2021). Однако, даже в слабоосвоенных районах без развитой промышленности антропогенная трансформация рельефа происходит за счет косвенного воздействия, например, при прокладке транспортных объектов различного назначения. Подобная ситуация отмечается, например, в пределах респ. Саха, где результатом прокладки автомобильных дорог становится активизация комплекса криогенных и посткриогенных процессов (в том числе, заболачивания и подтопления), а также оползней, обвалов и осыпей (Бредихин и др., 2020). 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 (Хрусталеv, 1971; Гребенец, Садовский 1993; 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.

В различной степени полноты вопросы мониторинга затрагиваются в следующих документах (Юров, 2022):

- 1) ФЗ № 384 от 30 декабря 2009 г. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»;
- 2) Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 июня 2010 г. №1047-р) с утвержденным перечнем национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил) в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение ФЗ № 384;
- 3) Постановление Правительства РФ № 87 от 16 февраля 2008 г. «О составе проектной документации и требованиях к ее содержанию»;
- 4) В соответствии с требованием п. 15.2 СП 25.13330.2012 в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, геотехнический мониторинг необходимо проводить для всех видов зданий и сооружений, в том числе подземных коммуникаций;
- 5) СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения;
- 6) СТО Газпром 2-3.1-071-2006 «Регламент организации работ по геотехническому мониторингу объектов газового комплекса в криолитозоне»;
- 7) СТО Газпром 2-3.1-072-2006. «Регламент на проведение геотехнического мониторинга объектов ОАО «Газпром»»;

8) РСН 67-87 «Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза измерений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами».

9) РД-91.020.00-КТН-042-12 (Транснефть) «Инженерные изыскания для строительства магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов (МТ)»

Однако, большая часть этих документов не акцентирует внимание на специфике геотехнического мониторинга линейных транспортных объектов в криолитозоне, давая лишь общие рекомендации. При этом важно отметить, что проведение наблюдений на дорогах и трубопроводах значительно затруднено в силу большой протяженности самих объектов, а также труднодоступностью ряда их участков в регионах Крайнего Севера.

Согласно основному документу, регламентирующему проектирование и строительство зданий и сооружений в криолитозоне – СП 25.13330.2020, геотехнический мониторинг необходимо проводить на всех стадиях функционирования объекта (от этапа изыскания до этапа эксплуатации) по трем основным направлениям:

- 1) наблюдения за температурным режимом грунтовых оснований;
- 2) наблюдения за смещением конструкций;
- 3) наблюдения за гидрогеологическим режимом грунтовых оснований.

Мониторинг температурного режима мерзлых грунтовых оснований осуществляется путем регулярного измерения температур в термометрических скважинах, имеющих глубину не менее глубины заложения фундамента или глубины заложения фундамента плюс 5 м (в случае применения систем термостабилизации грунтов). Измерения температуры должны проводиться ежемесячно на этапе строительства объекта и два раза в год (в конце летнего периода и середине зимнего периода) – на этапе эксплуатации (СП 25.13330.2020).

Измерения температуры осуществляются при помощи: а) «заленивленных» ртутных термометров, собранных в «гирлянды» количеством не более 5 штук (стоит отметить, что в настоящее время данный метод используется уже достаточно редко

в силу широкой доступности более современных измерительных приборов, позволяющих упростить процесс измерения температур и снятия показаний); б) электрических датчиков с приборами для измерения температуры (термокос), принцип работы которых построен на измерении электрического сопротивления (ГОСТ 25358-2012; Юров, 2022).

Однако, стоит отметить, что применение этих методов мониторинга температурного режима грунтовых оснований, широко используемых на урбанизированных территориях и производственных площадках, имеет существенные ограничения для создания сетей мониторинга протяженных транспортных объектов. Для измерения температуры при помощи «стандартных» термокос необходимо осуществлять обход термометрических скважин с «выстаиванием» датчиков или термометров в скважине не менее 30-40 минут, что не позволяет оперативно и в необходимые сроки (то есть в конце летнего и середине зимнего периода) выполнить требуемые наблюдения силами сотрудников отделов и служб геотехнического мониторинга. Кроме того, мониторинг на трассах трубопроводов (например, магистрального нефтепровода Ванкор-Пурпе, имеющего протяженность более 500 км) сопряжен с существенными затратами, так как из-за отсутствия подъездных путей в летний период «заброска» сотрудников на отдаленные участки возможна только с применением вертолетов (Юров, 2022).

В последние десятилетия методы измерения температуры грунтов постоянно совершенствуются. Основным направлением модернизации является внедрение систем дистанционной передачи данных с датчиков, позволяющих оперативно собирать большие массивы данных без регулярных обходов или объездов скважин. Например, система автоматизированного мониторинга температурного режима мерзлых грунтовых оснований внедряется силами Научного центра изучения Арктики в г. Салехард (Filimonov et al., 2022). Внедряемая система позволяет осуществлять наблюдения за температурами грунтов в режиме «реального времени», данные с датчиков поступают на сервер каждые три часа. Еще одним достоинством этой системы можно назвать автоматизированное представление данных в виде графиков и трехмерных моделей температурного поля, что позволяет оперативно выявлять области изменения температуры грунтов и принимать решения

по стабилизации ситуации (*Filimonov et al., 2022*). Подобные системы могут успешно использоваться для термометрических наблюдений на дорогах и трубопроводах на урбанизированных территориях, однако, в силу использования GSM-сигнала для передачи данных, не применимы в случае территорий без устойчивого сигнала сотовой связи (*Юров, 2022*).

Основой мониторинга за смещением конструкций объектов являются нивелирные наблюдения по деформационным маркам, методика которых хорошо отработана на застроенных территориях в криолитозоне. Согласно СП 25.13330.2020 геодезические наблюдения проводятся не реже четырех раз в год в первые три года эксплуатации объекта и не реже двух раз в год в дальнейшем. Однако, в силу больших временных затрат на проведение нивелирования и необходимости закладки реперных точек в непосредственной близости от объекта мониторинга, наблюдения за вертикальными смещениями объектов транспортной инфраструктуры значительно затруднены. Кроме того, конструкционные особенности автомобильных и железных дорог не позволяют проводить нивелирные наблюдения за поведением дорожного полотна в целом. Подобные наблюдения применяются на ответственных участках транспортных коммуникаций: мостовых переходах дорог и трубопроводов, узловых участках, нефтеперекачивающих и компрессорных станциях и т.д. Но выполнение нивелирования на трассах дорог и трубопроводов длиной в десятки и сотни км не представляется возможным. Предусмотренные нормативными документами геодезические работы в случае линейных транспортных объектов в регионах Крайнего Севера зачастую имеют избыточную точность и сложность. Так, согласно проектной документации для участка напорного нефтепровода на Восточно-Мессояхском месторождении максимально допустимое значение вертикальных деформаций между соседними опорами составляет 100 мм, в то время как предусмотренные мониторинговые работы представляют собой нивелирование с погрешностью измерений 2 мм. Кроме того, достижение такой высокой точности измерений осложняется географическими факторами: сложностью обеспечить неподвижность штатива на участках заболачивания и распространения тиксотропных грунтов; невозможностью проведения работ цифровыми и оптическими приборами в условиях низких температур (менее  $-20^{\circ}\text{C}$ ), сильного ветра, метели – то есть явлений, типичных для

районов криолитозоны (*Елизаров, Курчатова, 2020*). В таких условиях высокую эффективность при оценке смещения конструкций магистральных нефтепроводов показало применение глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS). Внедрение этого метода позволяет при сохранении достаточно точности измерений снизить затраты на мониторинговые работы, а также уменьшить зависимость от погодных условий и освещенности (*Юров, 2022*).

Для обеспечения устойчивости и предотвращения деформаций линейных транспортных систем необходимо осуществлять мониторинг динамики опасных экзогенных процессов на участке их потенциального развития. Для этих целей в настоящее время активно применяются методы дистанционного зондирования Земли. Например, дешифрирование космических снимков активно применяется для оценки динамики эрозионных и абразионных процессов. На участке железной дороги Туапсе-Адлер для этих целей используются снимки QuickBird и GeoEye, имеющие пространственное разрешение 0,6 и 0,5 м в пикселе соответственно. С их помощью проводится отслеживание изменения динамики отложения обломочного материала в устьевых частях рек, пересекающих трассу железной дороги, и динамики защитных насыпных пляжей. Кроме того, снимки с подобным разрешением позволяют выявить нарушения насыпи железной дороги, возникающие в результате её оползания (*Железнов и др., 2010*). Высокую эффективность дешифрирование снимков с разрешением выше 1 м показывает также и в мониторинге оврагообразования вдоль трасс линейных объектов (*Ревзон, Шварев, 2005*). В зоне распространения многолетней мерзлоты обработка разновременных космических снимков показывает высокую пригодность для оценки динамики термокарстовых озер (*Брыксина и др., 2007; Кравцова, Родионова, 2016; Юров, 2022*).

Однако, применение данных космической съемки в случае северных регионов имеет ряд серьезных ограничений: орбита пролета спутников зачастую не захватывает территории севернее полярного круга, а климатические условия (облачность и продолжительное залегание снежного покрова) сокращают и без того малое количество снимков на эту территорию, пригодных для детального изучения. Эти недостатки, свойственные космическим снимкам, устраняются применением

аэрофотосъемки, подавляющая часть которой в настоящее время выполняется при помощи беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Применение БЛА показало высокую эффективность при мониторинге склоновых процессов, в особенности оползней (Григорьева, Панин, 2011; Мележ, 2013), но также может быть применено для контроля термэрозии (рис. 1.1), термоабразии и других криогенных процессов (Юров, 2022).

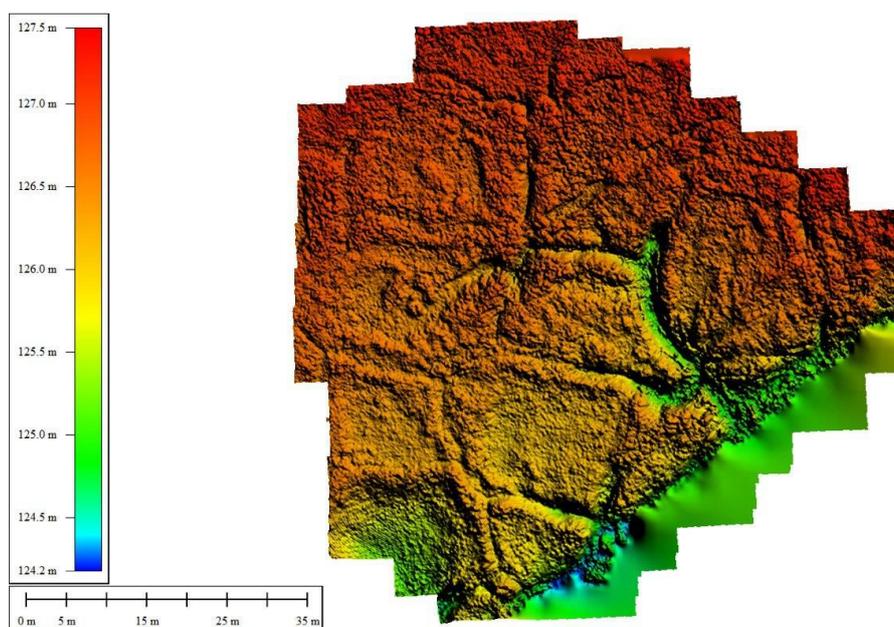


Рисунок 1.1. Эрозионная сеть, заложенная по полигонально-жильным льдам рядом с трассой «Обская-Бованенково» на цифровой модели местности, построенной по данным съемки с БЛА

Большим преимуществом аэрофотосъемки при помощи БЛА 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. 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).

## ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Линейные транспортные объекты, проблемы устойчивости которых были рассмотрены в работе, системы включают в себя:

*1) Автомобильные дороги.* В свою очередь они подразделяются в зависимости от условий проезда по ним (согласно Единому Государственному реестру автомобильных дорог) на автомагистрали (категория 1А), скоростные автомобильные дороги (категория 1Б) и обычные автомобильные дороги (категории 1В, II, III, IV и V). Для каждой из категорий характерны определенные конструктивные особенности, кроме того, каждой из них соответствуют различные значения интенсивности движения, рассчитываемая в единицах транспорта в сутки (табл. 2.1) (СП 34.13330.2012).

Категория автодороги	Интенсивность движения (ед./сутки)
1А	Более 14000
1Б	Более 14000
1В	Более 14000
II	Более 6000
III	От 2000 до 6000
IV	От 200 до 2000
V	Менее 200

При рассмотрении дорожного полотна в плане (рис.2.1) выделяют следующие части (СП 34.13330.2012): рабочий слой (т.е. верхнюю часть земляного полотна, непосредственно дорожное покрытие и обочины дорог), тело насыпи (включая откосные части), основание насыпи, основание выемки, откосные части выемки, устройства для поверхностного водоотвода, устройства для понижения уровня или отвода грунтовых вод.

*2) Железные дороги.* Железные дороги подразделяются на категории по степени грузонапряженности перевозок (табл. 2.2). Если рассматривать строение железной дороги в плане (рис. 2.2), можно выделить следующие элементы: рельсошпальную сетку, балластную призму и земляное полотно.

Важной частью конструкции дорожного полотна (как автомобильных, так и железных дорог) являются водопропускные сооружения, призванные обеспечить сток поверхностных вод. Такие сооружения могут быть представлены тремя типами: водопропускными трубами, мостами малых отверстий и фильтрующими насыпями. Водопропускные сооружения необходимо устраивать во всех естественных понижениях рельефа, но не реже, чем через каждые 300-500 м дороги.

Таблица 2.2.	
Классификация железных дорог (по СП 34.13330.2012)	
Категория дороги	Грузонапряженность перевозок (млн т*км в год)
I	От 30 до 50
II	От 15 до 30
III	От 8 до 15
IV	Менее 8

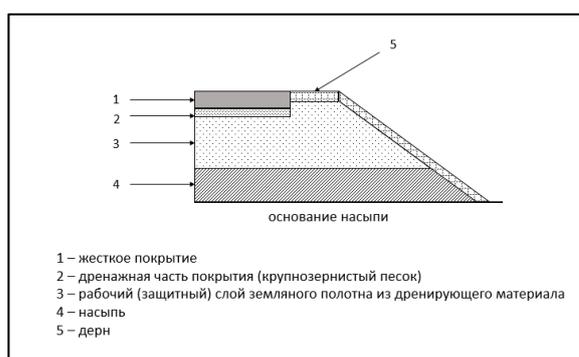


Рис. 2.1. Пример конструкции автомобильной дороги

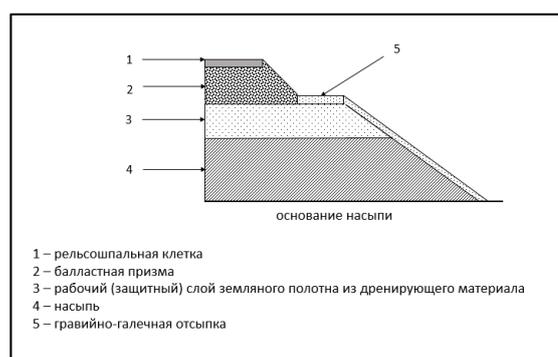


Рис. 2.2. Пример конструкции железной дороги

**3) Магистральные и промысловые трубопроводы.** Нефте- и газопроводы делятся на два типа: магистральные и промысловые. Строительство магистральных трубопроводов регламентируется СП 36.13330.2012. Согласно СП трубопроводы подразделяются на классы по диаметру (для нефтепроводов) или рабочему давлению (для газопроводов) (табл.2.3).

Строительство и проектирование промысловых нефте- и газопроводов регламентируется СП 284.1325800.2016. Классификация промысловых трубопроводов производится по тем же признакам, что и магистральных (табл.2.4). Способы прокладки промысловых трубопроводов аналогичны таковым у магистральных нефте- и газопроводов (СП 284.1325800.2016).

Таблица 2.3. Классификация магистральных трубопроводов			
Магистральные газопроводы		Магистральные нефтепроводы	
Класс	Рабочее давление (МПа)	Класс	Диаметр трубопровода (мм)
I	От 2,5 до 10	I	От 1000 до 1200
II	От 1,2 до 2,5	II	От 500 до 1000
		III	От 300 до 500
		IV	Менее 300

Таблица 2.4. Классификация промысловых трубопроводов			
Газопроводы		Нефтепроводы	
Класс	Рабочее давление (МПа)	Класс	Диаметр трубопровода (мм)
I	От 20 до 32	I	Более 600
II	От 10 до 20	II	От 300 до 600
III	От 2,5 до 10	III	Менее 300
IV	Менее 2,5		

Прокладка трубопроводов возможна тремя способами:

1) подземный, когда труба укладывается в траншею, глубина которой обеспечивает заложение трубы на глубину не менее 0,8 м до ее верха (Хрусталеv, 1991). При прокладке трассы трубопровода в песчаных и глинистых грунтах труба укладывается непосредственно на дно траншеи, предварительно покрывается битумным лаком; в скальных и крупнообломочных грунтах, которые могут повредить изоляционное покрытие трубы, под трубой на дне траншеи формируется десятисантиметровая подсыпка из песка, далее труба засыпается песком так, чтобы кровля песчаной отсыпки располагалась на 20 см выше верха трубы. После формирования защитной оболочки из песчаного грунта, осуществляется засыпка траншеи скальным или крупнообломочным грунтом. К преимуществам подземного способа прокладки относят высокую надежность конструкции при внешнем ударном воздействии, технологичность строительства; к недостаткам – сложность мониторинга состояния трубопровода, ремонта, а также большой объем земляных работ при строительстве (Хрусталеv, 1991). Данный метод прокладки является предпочтительным по требованиям СП (СП 36.13330.2012);

2) наземный, когда трубопровод укладывается непосредственно на поверхность земли в защитную обваловку из грунта. Такой метод применяется на ограниченных

участках, для которых свойственны резко пересеченный рельеф или сильная заболоченность. Основное преимущество наземного способа прокладки – меньшие объемы земляных работ и отсутствие необходимости в анкерных конструкциях (Хрусталеv, 1991);

3) надземный, когда труба укладывается на металлические или железобетонные опоры высотой не менее 0,5 м над уровнем земли. В зависимости от высоты опор для них может использоваться как заглубленные (свайные и столбчатые), так поверхностные (грунтовые призмы, железобетонные короба и т.д.) фундаменты (Хрусталеv, 1991);

В зависимости от числа нитей ширина трассы трубопровода может составлять 6 м (одна нить), 12 м (две нити), 18 м (три нити) или 30 м (четыре нити) (Хрусталеv, 1991).

Участки нефте- и газопроводов разделяются по температуре транспортируемого продукта на горячие (температура положительная в течение всего года), теплые (положительное значение имеет только среднегодовая температура) и холодные (с отрицательной среднегодовой температурой транспортируемого продукта). Все нефтепроводы относятся к горячему типу, так как для обеспечения необходимой текучести нефти она должна иметь положительные (часто до 40° С) температуры. Газопроводы практически на всей протяженности относятся к холодному или теплому типу, исключение составляют только короткие участки после компрессорных станций, классифицируемые как горячие (в результате сжатия газа на компрессорных станциях его температура может достигать 50...60° С) (Хрусталеv, 1999).

**4) Взлетно-посадочные полосы аэродромов.** Данный тип транспортных объектов формально не является линейным, однако, близок к линейным объектам по особенностям поведения в условиях многолетней мерзлоты и комплексу угрожающих устойчивости экзогенных процессов.

Строительство взлетно-посадочных полос (определенных прямоугольных участков сухопутного аэродрома, подготовленных для взлета и посадки воздушных судов) на территории РФ регламентируется СП 121.13330.2019. Согласно СП, все взлетно-

посадочные полосы (ВПП) подразделяются на классы, имеющие буквенные обозначения от А до Е исходя из их длины (табл. 2.5) и ширины (табл. 2.6).

Таблица.2.5 Классификация ВПП по длине						
Показатель	Класс ВПП					
	А	Б	В	Г	Д	Е
Минимальная длина ВПП в стандартных условиях, м	3200	2600	1800	1300	1000	500

Таблица.2.6 Классификация ВПП по ширине	
Класс ВПП	Ширина (м)
А	60
Б	45
В	42
Г	35
Д	28
Е	21

В крупных современных аэропортах в настоящее время не используются грунтовые ВПП, что обусловлено требованиями к безопасности (из-за возможности попадания обломочного материала в элемент двигателей самолетов) и значительным весом применяемых летательных аппаратов, повсеместно распространены два основных типа искусственных покрытий (*СП 121.13330.2019*):

- **жесткие** (цементобетонные; армобетонные; железобетонные; а также покрытия из цементного бетона, перекрытые асфальтобетоном)
- **нежесткие** (из асфальтобетона; прочных каменных материалов подобранного зернового состава, обработанных органическими вяжущими; из щебеночных и гравийных материалов, грунтов и местных материалов, обработанных неорганическими или органическими вяжущими; сборных металлических элементов).

Искусственные покрытия ВПП конструктивно состоят из 2 элементов (*СП 121.13330.2019*):

1. Непосредственно **покрытие** (верхний слой), воспринимающее нагрузки от колес ВС, воздействия природных факторов (переменного температурно-влажностного режима, многократного замораживания и оттаивания, влияния

солнечной радиации, ветровой эрозии), тепловые и механические воздействия газоздушных струй авиационных двигателей и механизмов, предназначенных для эксплуатации аэродрома, а также воздействие антигололедных химических средств.

2. **Искусственное основание** (нижние слой), которое обеспечивает совместно с верхним слоем передачу нагрузок на грунтовое основание, которые помимо несущей функции могут выполнять также дренирующие, противозаиливающие, термоизолирующие, противопучинные, гидроизолирующие и другие функции.

При строительстве ВПП большое внимание уделяется выдерживанию уклонов покрытия, которые, с одной стороны, способствуют удалению с поверхности ВПП талых и дождевых вод во избежание потери сцепления колес шасси самолетов с полосой; с другой – не должны превышать допустимые пределы во избежание смещения воздушного судна по полосе и скатывания за ее пределы (табл 2.7, 2.8). Кроме того, продольные уклоны покрытия на концевых участках ВПП должны иметь строго одно (восходящее или нисходящее) направление, а уклон сопряжения искусственного покрытия с грунтовой частью аэродром должен составлять 1:5. Сток талых и поверхностных вод с покрытия ВПП обеспечивается за счет симметричного двухскатного поперечного профиля полосы, однако, в исключительных случаях допускается строительство полос с односкатным профилем с должным технико-экономическим обоснованием (СП 121.13330.2019).

В ходе эксплуатации ВПП должен осуществляться постоянный контроль неровности покрытия. СП предполагает разделение неровностей на два типа:

- 1) **микронеровности**, представляющие собой отклонение поверхности полосы от прямой на отрезке в 3 м. Выявление таких деформаций требуется производить при помощи замеров просвета между трехметровой рейкой и покрытием ВПП, отклонение не должно превышать 3 см;
- 2) **мезонеровности**, представляющие собой отклонение поверхности от прямой на отрезках в 5, 10 и 20 м. Мониторинг мезонеровностей требуется проводить при помощи нивелирной съемки с соответствующим шагом.

Таблица.2.7				
Вид уклона	Максимально допустимое значение уклона элементов с искусственным покрытием для аэродромов классов:			
	А, Б, В	Г	Д	Е
Продольный уклон участков ВПП:				
а) среднего	0,0125	0,015	0,015	0,020
б) конечного	0,008	0,015	0,015	0,015
Поперечный уклон ВПП	0,015	0,015	0,020	0,020
Продольный уклон РД:				
а) магистральных и соединительных	0,015	0,025	0,025	0,030
б) вспомогательных	0,020	0,030	0,030	0,030
Поперечный уклон РД	0,015	0,020	0,020	0,020
Продольный и поперечный уклоны перронов, МС и площадок специального назначения	0,010	0,010	0,010	0,020
Продольный уклон укрепляемых участков, примыкающих к торцам ВПП	0,008	0,015	0,015	-
Поперечный уклон укрепляемых участков, примыкающих к торцам ВПП	0,015	0,015	0,020	-
Поперечный уклон укрепляемых отмопок ВПП, перронов, МС и площадок специального назначения, обочин РД (вне пределов летной полосы)	0,025	0,030	0,030	0,030
Средний продольный уклон ВПП	0,010	0,010	0,010	0,017

### **Специфика строительства транспортных объектов в криолитозоне**

Прокладка трасс автомобильных и железных дорог в криолитозоне приводит к существенным нарушениям условий теплообмена поверхности в результате удаления естественных покровов, изменения водопроницаемости и отражающей способности поверхности, изменений условий стока поверхностных и грунтовых вод, а также условий и характера накопления снежного покрова в зимний период. Изменения условий теплообмена приводят к трансформации мерзлотных условий, что может повлечь за собой деформации дорожного полотна и прилегающей территории.

Таблица. 2.8			
Вид уклона	Максимально допускаемое значение уклона грунтовых элементов для аэродромов классов:		
	А, Б, В	Г, Д	Е
Продольный уклон участка ВПП:			
а) среднего			
б) конечного нисходящего	0,020	0,025	0,030
в) конечного восходящего	0,020	0,025	0,025
	0,008	0,015	0,015
Поперечный уклон ВПП (при односкатном и двухскатном поперечных профилях)	0,020	0,025	0,025
Продольный уклон участков спланированной части ЛП:			
а) среднего	0,020	0,025	0,030
б) конечного нисходящего	0,020	0,025	0,025
в) конечного восходящего	0,008	0,015	0,015
Поперечный уклон спланированной части ЛП	0,025	0,030	0,030
Продольный и поперечный уклоны РД	0,020	0,025	0,030
Продольный уклон групповых МС	0,020	0,020	0,025
Поперечный уклон групповых МС	0,015	0,015	0,020
Поперечный уклон грунтовых обочин:			
а) ИВПП, перронов и групповых МС	0,025	0,025	0,025
б) РД и площадок специального назначения	0,030	0,030	0,030

При прокладке дорог в условиях криолитозоны основным показателем, определяющим способы обеспечения устойчивости дорожного полотна, является просадочность грунтового основания. Согласно методической рекомендации Росавтодора (ОДМ 218.2.086-2019), по показателю максимально возможной относительной осадки оттаивания ( $\delta_i$ ) выделяют 4 категории грунтов (табл.2.9): непросадочные (I), малопросадочные (II), просадочные (III), сильнопросадочные (IV).

Наибольшее отепление мерзлых грунтов дорогами наблюдается на откосах насыпей, что обусловлено, в первую очередь, накоплением на них снега. Под дорожным полотном обычно наблюдается обратная ситуация: в результате очистки дорожного покрытия и ж/д путей от снега промерзание насыпи и грунтового основания под ней усиливается.

Таблица 2.9.		
Дорожно-мерзлотная классификация многолетнемерзлых грунтов		
Категория грунта	Максимально возможная относительная осадка при оттаивании ( $\delta_i$ )	Основные виды и состояния грунтов основания земляного полотна
Непросадочный	Менее 0,03	Скальные породы, песчаные и крупнообломочные грунты без ледяных включений; твердые и полутвердые грунты
Малопросадочный	От 0,03 до 0,1	Песчаные и крупнообломочные грунты с глинистым заполнителем и прослоями и линзами льда с суммарной толщиной более 0,1 м на 1 м грунта; глинистые грунты от тугопластичных до текучепластичных
Просадочный	От 0,1 до 0,4	Песчаные и крупнообломочные грунты при наличии в них отдельных прослоев и линз льда с суммарной толщиной до 0,4 м на 1 м грунта; текучепластичные и текучие глинистые и торфяные грунты
Сильнопросадочный	Более 0,4	Глинистые и торфяные грунты текучие; любые виды грунтов с суммарной толщиной ледяных включений более 0,4 м на 1 м грунта

Большой проблемой для трасс автомобильных и железных дорог в криолитозоне является эффективное обеспечение пропуска поверхностных вод под земляным полотном. Усиленное охлаждение грунтов насыпи и основания под очищаемыми в зимний период дорожными покрытиями и ж/д путями приводит к формированию мерзлого ядра в насыпи, которое препятствует фильтрации поверхностных и грунтовых вод. В результате происходит отепление обводненных грунтов вдоль насыпей, деградация и осадка грунтов, активизация процессов термокарста, что влечет за собой деформации дорожного полотна. В качестве водопропускных сооружений на участках грунтов I и II категории наиболее широко используются водопропускные трубы (обычно металлические гофрированные трубы диаметром 2-3 м).

Помимо изменений физико-механических свойств мерзлых грунтов в результате изменения температур и формирования просадок дорожного полотна при оттаивании грунтового основания, угрозу для дорог в криолитозоне представляют опасные экзогенные (в первую очередь, криогенные) процессы, способные вызвать деформации или разрушение объектов. Основные процессы, представляющие опасность для автомобильных и железных дорог: термокарст, термоэрозия, морозное пучение, наеледобразование, склоновые криогенные процессы.

СП рекомендует использовать подземный способ прокладки трубопроводов в качестве основного, однако в условиях существования многолетнемерзлых грунтов данный способ возможно применять только ограничено. Это обусловлено, в первую очередь, тепловым воздействием теплых и горячих трубопроводов, которые создают вокруг себя большие ореолы оттаивания. Оттаивание мерзлого грунта приводит к осадке и, следовательно, проседанию и деформациям труб. Кроме того, в случае отепления и оттаивания грунта вокруг трубы может происходить осадка грунта с поверхности, скоплению воды в образовавшихся понижениях и активизации процесса термокарста. Таким образом, применение подземного способа прокладки практически не применимо при строительстве нефтепроводов в I и II типах местности. Однако, минимизировать или предотвратить отепление мерзлых грунтов за счет теплового воздействия транспортируемого продукта возможно при использовании охлаждающих устройств (жидкостных или парожидкостных сезонных охлаждающих устройств (СОУ)) и термоизоляции труб. Подземная прокладка холодных трубопроводов, наоборот, создает вокруг трубы ореол замораживания грунта, что может быть опасно в условиях несливающейся мерзлой толщи (III и IV типы местности). В результате искусственного замораживания исходно талого грунта за счет действия холодного трубопровода начинается процесс выпучивания трубы нормальными силами морозного пучения, что также может привести к деформациям труб и авариям на трассе трубопровода (СП 36.13330.2012; Хрусталеv, 1999).

Наземная прокладка трубопроводов (в том числе и горячих) применяется в условиях криолитозоны шире, чем подземный способ прокладки, в особенности для

внутрипромысловых нефтепроводов. Обеспечение устойчивости таких трубопроводов производится за счет закладки теплоизоляционных материалов в основании обваловки, а также применения СОУ (для горячих участков трубопроводов). Помимо прямого теплового воздействия трубы, на грунтовые основания наземных трубопроводов оказывается и косвенное тепловое воздействие, возникающее в результате нарушения естественных условий теплообмена на поверхности и скопления снега вдоль труб или их обваловок. Наземный способ прокладки в условиях криолитозоны требует тщательного подхода к организации водопропускных сооружений вдоль трасс трубопровода. Это связано с тем, что охлаждающее влияние холодных газопроводов или систем термостабилизации на нефтепроводах приводит к формированию под трассой трубопровода мерзлого барьера для стока грунтовых вод, а сама обваловка трубы препятствует стоку поверхностных вод, что может приводить к заболачиванию и активизации процесса термокарста (Хрусталева, 1999).

Ключевыми особенностями линейных элементов транспортной инфраструктуры являются их непрерывность и большая протяженность. Исходя из масштаба сооружений меняется набор факторов природной среды, которые играют ключевую роль в их устойчивости. Для каждого из объектов можно определить «постоянные» и «вариативные» факторы исходя из его длины и особенностей географической обстановки территории. Например, климатический фактор в большинстве случаев является постоянным, так как основные климатические характеристики и тренды их изменения можно считать однородными на региональном уровне. Исключением здесь являются наиболее протяженные (в сотни и тысячи км) дороги и трубопроводы, преимущественно субмеридианального простирания.

Для наименее протяженных объектов (локальные дороги и трубопроводы, взлетно-посадочные полосы аэродромов) ключевым фактором является мерзлотно-литологический. Значительная часть объектов протяженностью в первые километры и менее расположены в пределах одной геоморфологической позиции, что нивелирует влияние рельефа на их устойчивость. Кроме того, отмечается значительная роль гидрологического и гидрогеологического факторов, что

обусловлено прохождением локальных водосборных понижений и путей стока поверхностных и грунтовых вод. Ярким примером объекта малой протяженности может служить взлетно-посадочная полоса аэропорта Свальбарда. Она расположена на достаточно однородной поверхности морской террасы, что исключает преобладающее воздействие геоморфологических условий, при этом на передний план выходят другие факторы.

## ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 3.1. Полевые наблюдения<sup>2</sup>

1) Во рамках работы в отделе геотехнического мониторинга ООО «РН-Ванкор» на Ванкорском месторождении в летние сезоны 2016 и 2017 гг. производились термометрические наблюдения. Для измерений температур грунтов в термометрических скважинах (глубина которых варьируется от 9 до 20 м) под объектами месторождения и вдоль трассы МНП «Ванкор-Пурпе» использовались многозонные цифровые датчики температур (шаг между датчики составляет 0,5 или 1 м в зависимости от модели) производства ООО НПО «Фундаментстройаркос», «Фундаментпроект» и ОАО НПП «Эталон». Измерения температуры в толщах многолетнемерзлых грунтов. Для мониторинга температурных полей на территории месторождения используются термометрические скважины (ТС) глубиной от 9 до 20 метров с установленными в них многозонными цифровыми датчиками температур (МЦДТ) производства ОАО НПП «Эталон» и ООО НПО «Фундаментстройаркос». Помимо термометрических наблюдений проводился мониторинг деформаций объектов месторождения и трассы МНП. В программу мониторинга входит визуальное обследование объектов и проведение нивелирной съемки по деформационным маркам. Для нивелирной съемки использовался цифровой нивелир Trimble DINI 0,3 и инварные рейки SOKKIA высотой 1, 2 и 3 м с BAR-кодом.

2) В августе 2018 г. проводились полевые наблюдения в г. Воркута, в ходе которых при содействии Геокриологической службы республики Коми были собраны данные о деформациях зданий, сооружений и объектов инфраструктуры. Визуальные наблюдения и фотофиксация деформаций проводились в ходе 6 маршрутов по городу Воркута и посёлкам Воргашор и Комсомольский. Маршрутные исследования включали отрисовку выявленных проблем на схемах

---

<sup>2</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

*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 изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2022. — С. 234-242.

микрорайонов, измерения основных морфометрических характеристик деформаций дорожного покрытия и подсыпок и т.д.

3) В сентябре 2018, 2020, 2021 и 2022 гг. были выполнены полевые наблюдения деформаций зданий, сооружений и объектов инфраструктуры в Норильском промышленном районе (г. Норильск, г. Дудинка). Большое внимание в ходе этих исследований уделялось обследованию автомобильных дорог Норильск-Талнах и Норильск-Дудинка. Важной составляющей полевых работ на территории Норильского района стали измерения по методике программы Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) на стандартной площадке 100 на 100 м рядом с Талнахом. Эти исследования включали в себя не только измерение мощности слоя сезонного протаивания, но и геодезические работы, направленные на оценку вертикальных деформаций поверхности в результате сезонного пучения и осадки. До 2021 г. геодезические наблюдения (тахеометрическая съемка) выполнялись относительно первой точки площадки, однако, в 2021 г. была произведена привязка геодезических измерений к условно «жесткой» точке – фундаменту опоры ЛЭП, вертикальные смещения которой минимальны. Повторные измерения в 2022 г. показали, что выполнявшиеся ранее измерения относительно первой точки площадки в целом коррелируют с измерениями, привязанными к «жесткой» точки, следовательно, более ранние измерения также можно считать корректными и достаточно точными для оценки вертикальных смещений поверхности грунта на площадке. В 2020 году полевые исследования выполнялись также на важной составляющей транспортной инфраструктуры - площадках хранения нефтепродуктов в Дудинке, Норильске, Талнахе и Кайеркане. Целью этих работ была оценка состояния резервуаров, бетонных отмосток, предотвращающих фильтрацию нефтепродуктов в грунтовую толщу, подъездных путей и т.д. Помимо визуальных наблюдений, эти исследования включали работу с материалами аэрофотосъемки (цифровыми моделями рельефа и ортофотопланами) с целью выявления крупных просадок отмостки и обваловки резервуаров, деформаций дорожного покрытия. Результатом работ стало составление серии планов и написание подробного отчета.

4) В июле 2021 и 2022 гг. проводились полевые исследования на территории Приуральского района ЯНАО (г. Лабытнанги, пос. Аксарка, пос. Обская, пос. Харп,

южная часть железной дороги Обская-Бованенково), включавшие в себя, в том числе, обследования объектов транспортной инфраструктуры на предмет деформированности, а также изучение зон антропогенного воздействия вдоль трасс линейных систем. В ходе обследований проводилось картирование выявленных деформаций, замер их размеров. Для обобщения полученных результатов были составлены карты распространения деформаций, например, для территории центральных микрорайонов г. Лабытанги. Вдоль южной части трассы дороги «Обская-Бованенково» выполнялись подробные ландшафтно-мерзлотные исследования на нескольких участках, которые включали измерения мощности слоя сезонного протаивания, температурные замеры в толще слоя сезонного протаивания и на поверхности, описания растительных ассоциаций, закладка шурфов и закопшек с их описанием. В 2022 году исследования были дополнены аэрофотосъемкой на трех ключевых участках, направленной на изучение криогенных процессов вблизи объектов транспортной инфраструктуры. Для аэрофотосъемки применялся БЛА DJI Mavic Mini, координаты «твердых» точек были получены при помощи GNSS-приемника Leica GS08. По материалам аэрофотосъемки в программном пакете Agisoft Metashape были построены цифровые модели местности и ортофотопланы.

5) В 2018-2019 гг. (в мае и сентябре) были проведены детальные обследования состояния автомобильных дорог и взлетно-посадочной полосы в г. Лонгйир на арх. Шпицберген. В ходе исследований проводилась апробация наземного лазерного сканирования как метода мониторинга устойчивости и степени деформированности транспортных систем в условиях криолитозоны. Для проведения сканирования использовался лазерный сканер RIEGL VZ-1000. Данный прибор имеет высокую точность измерений (порядка 5-8 мм) и позволяет осуществлять съемку поверхности на расстоянии до 800 м. Однако, эффективная для наших задач дистанция съемки значительно ниже: малоэффективно использование сканов с дистанцией сканирование более 400 м. При этом важно отметить, что сканирование выполняется достаточно быстро, время съемки с одной точки составляет от 5 до 15 минут (это зависит от заданных настроек сканирования). Такие характеристики прибора позволяют существенно сократить время на проведение обследования объектов с большой площадью и протяженностью (Юров, 2022).

Для обработки данных сканирования было использовано программное обеспечение RISCANPro и CloudCompare. Это программное обеспечение предоставляет широкий спектр инструментов для работы с облаками точек. Наиболее простым инструментом является окраска по высоте, этот инструмент позволяет определить макрорельеф поверхности исследуемого объекта (неровности размерами в первые метры), однако, не позволяет анализировать более мелкие неровности. Для отражения микрорельефа поверхности исследуемых объектов наиболее удачным представляется метод построения профилей. При этом средняя частота расположения точек (7-10 точек на 1 метр поверхности) позволяет отследить неровности размером от первых сантиметров. При регулярном мониторинге объектов на предмет возникновения деформаций перспективным представляется автоматизированное сравнение разновременных сканов. Эта процедура возможна в обеих программах и позволяет отследить появление неровностей размером от 1 см. Еще одним методом выявления деформаций на поверхностях исследуемых объектов может служить расчет параметра геометрической неровности поверхности. В зависимости от параметров расчета данный метод позволяет выявить неровности размером от нескольких миллиметров до десятков сантиметров (Юров, 2022).

### 3.2. Численное моделирование<sup>3</sup>

*Моделирование теплового поля грунтов.* Для решения этой задачи использовалась программа QFrost, являющаяся аналогом относительно устаревших «Тепло» и HEAT. 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 25.13330.2012, 2012). На основе полученных данных с учетом прогнозируемых изменений температуры воздуха и грунта к 2050 (Павлов, 2008; IPCC, 2014; NCCS,

---

<sup>3</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

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.

2019 и др.) г. были рассчитаны изменения мощности слоя сезонного оттаивания, осадка оттаивающих грунтов и приrost касательных сил морозного пучения.

Первым этапом моделирования является создание литологической колонки с теплофизическими и температурными характеристиками грунтов (рис. 3.2.1), для которых осуществляются расчеты.

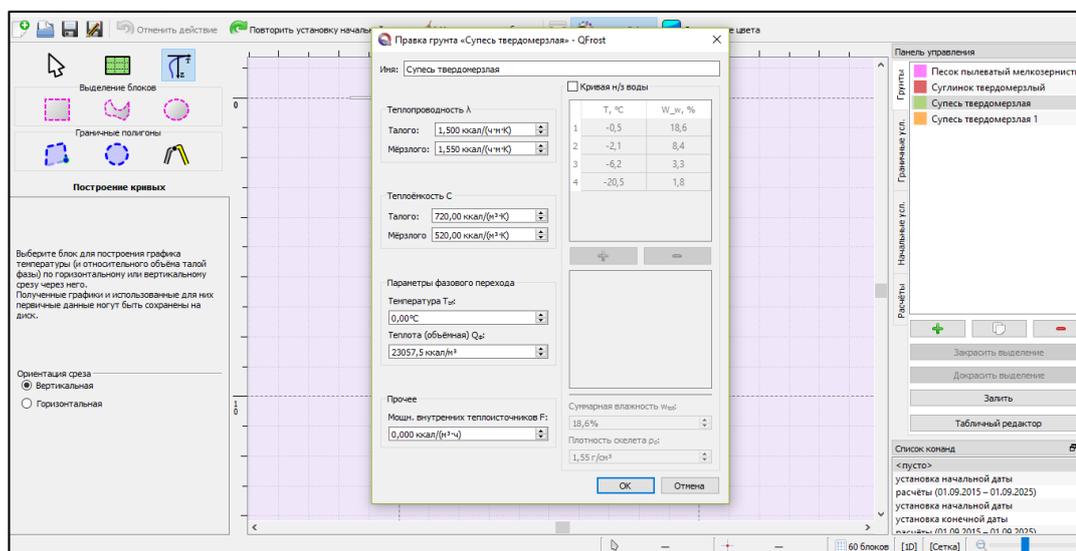


Рис.3.2.1. Создание литологической колонки грунтов на расчетном поле программы QFrost

Следующим шагом является определение граничных условий для выбранного участка (рис 3.2.2). В качестве граничных условий третьего рода применяются данные с метеостанций, расположенных в непосредственной близости от пунктов, для которых осуществляется моделирование теплового поля грунтов. Кроме того, на данном этапе задаются тренды изменения температур наружного воздуха, которые учитываются при расчете теплового поля к заданному сроку.

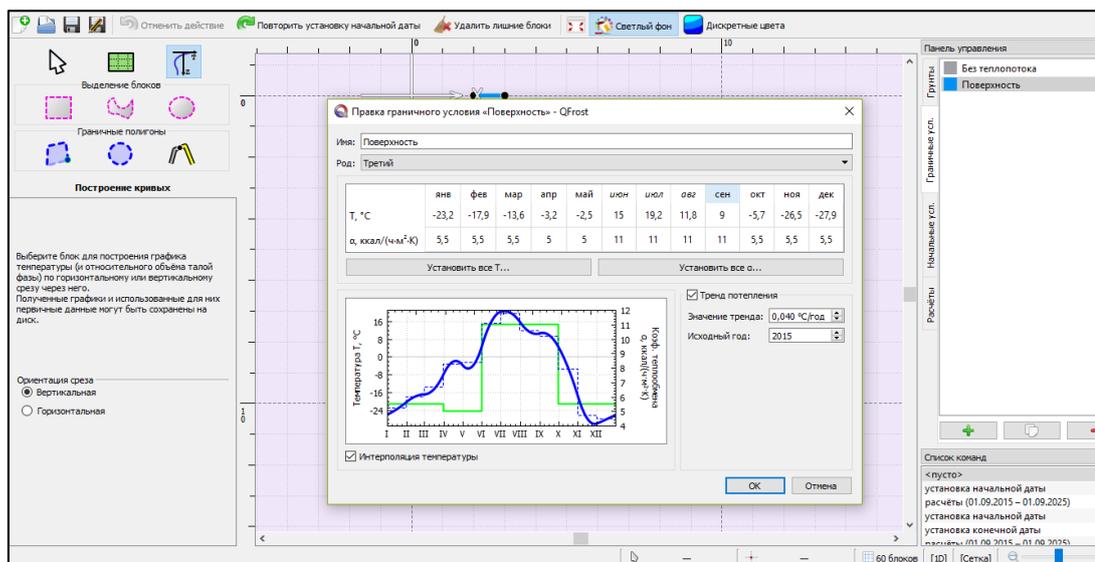


Рис.3.2.2. Создание граничных условий и трендов климата на расчетном поле программы QFrost

На следующем этапе проводится отладка модели: проводится расчет теплового поля грунтов на заданный период без учета трендов к изменению температур наружного воздуха, что позволяет оценить правильность заданных в модель данных и граничных условий. В случае корректной работы модели проводится численное моделирование температурного поля грунта с учетом трендов изменения климата. Результатом расчетов становится колонка распределения температур в грунтах на заданную дату и соответствующий ей график распределения температур.

**Расчет изменения несущей способности.** Для наземной части магистрального нефтепровода «Ванкор-Пурпе» проводились расчеты изменения несущей способности вмороженного свайного фундамента. С учётом прогнозов изменения температур воздуха и грунтов были произведены расчеты несущей способности вмороженных фундаментов к 2050 г. для различных ландшафтных и литологических условий. Температурные характеристики и мощность слоя сезонного оттаивания (СТС) моделировались при помощи программы QFrost с учётом трендов к увеличению температур воздуха, предложенных А.В. Павловым (Павлов, 2008). Для расчетов изменения несущей способности вмороженных свайных фундаментов использовалась методика, предложенная в СП 25.13330.2012 (формула 3.1).

$$F_u = \gamma_t \gamma_c (RA + \sum R_{af,i} A_{af,i}) \quad (3.1)$$

где  $\gamma_t$  - температурный коэффициент, учитывающий изменения температуры грунтов основания из-за случайных изменений температуры наружного воздуха;

$\gamma_c$  - коэффициент условий работы основания;

$A$  - площадь подошвы столбчатого фундамента или площадь опирания сваи на грунт, м<sup>2</sup>;

$R_{af,i}$  - расчетное сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу по боковой поверхности смерзания сваи в пределах  $i$ -го слоя грунта, кПа;

$A_{af,i}$  - площадь поверхности смерзания  $i$ -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи, м<sup>2</sup>;

$n$  - число выделенных при расчете слоев мерзлого грунта.

**Расчет осадки оттаивающего грунта.** Осадка оттаивающего грунта осуществляется под действием двух составляющих: плавление льда и, следовательно, уменьшения объема, а также за счет уплотнения грунтов под действием вышележащих горизонтов (Цытович, 1973). Используя расчетные значения мощности СТС, полученные с учетом трендов к изменению температур воздуха в опорных регионах, можно провести численное моделирование осадки грунтовых оснований для различных литологических условий в опорных регионах.

Для расчета относительной осадки ( $\delta$ ) песчаных грунтов используется формула 3.2, предложенная М.Ф. Киселевым (Дубиков, 1991).

$$\delta = (\rho_{d, th} - \rho_{d, f}) / \rho_{d, th} \quad (3.2)$$

где  $\rho_{d, th}$  – плотность скелета талого грунта (г/см<sup>3</sup>);

$\rho_{d, f}$  – плотность скелета мерзлого грунта (г/см<sup>3</sup>);

Для вычисления относительной осадки глинистого грунта используется формула 3.3 (Шевченко, Волхов, 2004)

$$\delta = 1 - \rho_{d,f} \left( (1/\rho_s) + (1/\rho_w)(W_p + k_d I_p) \right) \quad (3.3)$$

где,  $\rho_s$  – плотность частиц грунта (г/см<sup>3</sup>);

$\rho_w$  – плотность воды (г/см<sup>3</sup>);

$W_p$  – влажность на границе раскатывания (%);

$I_p$  – число пластичности (д.е.)

$k_d$  – коэффициент, учитывающий неполное закрытие пор в оттаявшем грунте (определяется по табл.3.1) (Шевченко, Волхов, 2004)

После получения значения относительной осадки может быть вычислено абсолютные значения осадки грунта с учетом смоделированной мощности СТС.

Таблица 3.1				
Значения коэффициента, учитывающего неполную степень закрытия пор ( $k_d$ )				
Число пластичности $I_p$	Коэффициент $k_d$ при уплотняющем давлении (МПа)			
	0,15	0,2	0,3	0,5
Менее 0,03	1,45	1,30	1,10	0,8
0,03...0,05	1,20	1,10	0,95	0,70
0,05...0,07	1,10	1	0,85	0,65
0,07...0,09	1	0,90	0,80	0,55
0,09...0,13	0,90	0,80	0,70	0,50
0,13...0,17	0,80	0,70	0,60	0,40
0,17...0,21	0,70	0,6	0,50	0,35
0,21...0,26	0,65	0,55	0,45	0,30
0,26...0,32	0,60	0,50	0,35	0,25
Более 0,32	0,50	0,40	0,30	0,20

**Расчет мощности СТС.** Для вычисления мощности СТС ( $d_{th}$ ) к 2050 году применялась методика, предложенная в СП 25.13330.2012 (формула 3.4)

$$d_{th} = ( (2\lambda_{th} (T_{th,c} - T_{bf}) t_{th,c}) / q_1 + (Q / 2q_1)^2 )^{0,5} - Q / 2q_1 \quad (3.4)$$

где

$$Q = (0,25 - t_{th,c} / t_i) (T_o - T_{bf}) k_m (\lambda_f C_f t_{th,c})^{0,5} \quad (3.5)$$

$$Q = L_v + (t_{th,c} / t_2 - 0,1) (C_{th} (T_{th,c} - T_{bf}) - C_f (T_0 - T_{bf})) \quad (3.6)$$

$T_{bf}$  – температура начала замерзания грунта ( $^{\circ}C$ )

$t_{th,c}$  – расчетный период положительных температур (ч)

$T_{bf}$  – расчетная температура поверхности грунта в летний период ( $^{\circ}C$ )

$t_1 = \text{const} = 3600$  (ч)

$t_2 = \text{const} = 7500$  (ч)

$T_0$  – расчетная среднегодовая температура мерзлого грунта ( $^{\circ}C$ )

$L_v$  – теплота таяния (замерзания) грунта Дж /  $m^3$

#### *Расчет касательных сил морозного пучения*

Касательные силы морозного пучения, действующие на боковые поверхности фундамента в СТС вычисляется по формуле 3.7 (СП 25.13330.2012).

$$F_{\text{кас.}} = \tau_{\text{fh}} A_{\text{fh}} \quad (3.7)$$

где

$\tau_{\text{fh}}$  – расчетная удельная касательная сила пучения (кПа)

$A_{\text{fh}}$  - площадь боковой поверхности смерзания фундамента в пределах расчетной глубины сезонного промерзания-оттаивания грунтов ( $m^2$ ).

Изменение касательных сил морозного пучения рассчитывалось для «модельной» опоры надземного трубопровода, представляющей собой металлическую трубу с диаметром 320 мм. Такой выбор был сделан исходя из широкого применения такого типа опор при строительстве надземных трубопроводов различного назначения как в Российской Арктике, так и за рубежом. Для расчетов были использованы данные о мерзлотно-литологических условиях «ключевых» регионов, которые были взяты из литературных публикаций и фондовых материалов организаций. Были выбраны колонки, которые можно считать типичными и наиболее распространенными для района исследований.

Моделирование изменения температурных полей и расчет мощности СТС, осадки и касательных сил пучения проводилось к 2050 году, так как на данный срок существует большое количество прогнозов изменения температуры воздуха и мерзлых пород как глобального (IPCC, 2014), так и регионального масштаба (Павлов, 2008; NCCS, 2019).

## ГЛАВА 4. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для детального исследования были выбраны пять регионов Западного сектора Арктики (рис. 4.1). Эти регионы отличаются по своим климатическим характеристикам, характеру рельефа, мощности и температурам мерзлоты, составу рыхлых отложений, преобладающим растительным сообществам и т.д. Такой выбор регионов позволил определить специфику поведения объектов транспортной инфраструктуры в различных географических обстановках.

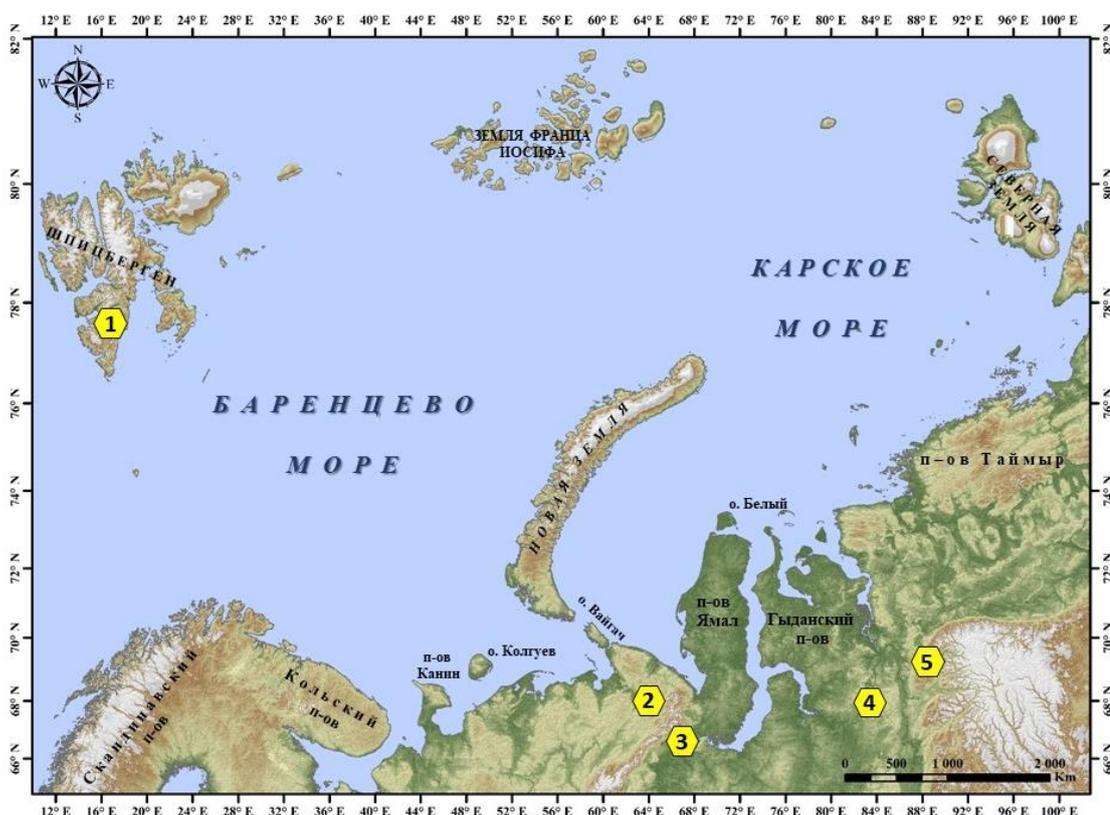


Рис. 4.1. Расположение регионов детального исследования (1 – г. Лонгйир; 2 – Воркутинский район; 3 – Нижнее Приобье; 4 – Ванкорское нефтегазовое месторождение; 5 – Норильский промышленный район)

### 4.1. Архипелаг Шпицберген

Шпицберген – крупный архипелаг, расположенный в Северном Ледовитом океане между 10° и 32° в.д. и 76° и 80° с.ш. Полевые исследования на архипелаге проводились в крупнейшем населенном пункте и административном центре – городе Лонгйирбьюене, расположенном на крупнейшем из островов – Западном Шпицбергене.

## ***Орогидрография***

Рельеф (рис.4.1.1) Западного Шпицбергена типично горный, высотные отметки превышают 1500 м. На острове широко развиты денудационные поверхности склонов и водоразделов и флювиальные формы рельефа: долины временных и постоянных водотоков с пойменными и надпойменными террасами, на склонах встречаются овраги. Широкое распространение покровных и горно-долинных ледников обуславливает большое количество ледниковых форм рельефа на всей площади архипелага. Для прибрежной части, где, в частности, расположен г. Лонгйир, характерны комплексы морских абразионно-аккумулятивных террас, высота которых достигает 120 м. Также для побережья Шпицбергена характерно наличие глубоких и протяженных фьордов, которые представляют из себя затопленные ледниковые долины. В северной части о. Западный Шпицберген существует группа потухших четвертичных вулканов с присущими им вулканическими формами рельефа (*Дубиков, 1998*).

Лонгйир расположен в месте впадения р. Логйирэльва в залив Адвентфьорден. Ширина долины по бровкам здесь составляет порядка 1,5 км, а днище долины имеет ширину от 400 до 600 м. Абсолютная высота, на которой расположена большая часть города составляет от 10 до 50 м, в редких случаях – до 100 м. Сама долина представляет собой типичную троговую долину с крутыми бортами и U-образным профилем. Она была выработана ледником, который к настоящему времени отступил выше по долине и распался на две составляющие – ледники Лонгйирбреен и Ларсбреен, которые являются важнейшей составляющей в питании р. Лонгйирэльва.

## ***Климат***

Архипелаг лежит в арктической зоне, но климат сильно сглажен влиянием моря и, в особенности, Гольфстрима. В пределах архипелага отмечается некоторое нарастание континентальности при движении с юго-запада на северо-восток. Среднегодовая температура воздуха в Лонгйире (метеонаблюдения проводятся в аэропорту) составляет  $-5,9^{\circ}\text{C}$ . Лето на архипелаге холодное и короткое (в году в среднем 241 день с отрицательными температурами), среднемесячная температура июля составляет  $+6,5^{\circ}\text{C}$ , абсолютный максимум температур:  $+21,3^{\circ}\text{C}$ . Зима

продолжительная, но достаточно мягкая из-за тепляющего влияния Гольфстрима, среднемесячная температура января составляет  $-14,6^{\circ}\text{C}$ , а абсолютный минимум:  $-46,3^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовое количество осадков не велико и составляет 192 мм/год (NCCS, 2019).



*Рис.3.1.1. Типичный рельеф в районе г. Лонгйир  
(фотография автора, октябрь 2018 г.)*

Существующие исследования говорят о значительном росте температур воздуха, например, по данным ACIA (ACIA, 2004) рост среднегодовых температур в регионе за 1954-2003 гг. превышает  $3^{\circ}\text{C}$ . О сильном повышении температур воздуха на Шпицберген говорится и в докладе IPCC, так, за период 1986-2005 гг. рост температур оценивается в  $3^{\circ}\dots 4^{\circ}\text{C}$ , а прогноз повышения температур в будущем (к 2081-2100 гг.) может достигнуть  $8^{\circ}\dots 9^{\circ}\text{C}$  (IPCC, 2014). В будущем прогнозируется сохранение трендов к потеплению, например, ряд авторов прогнозирует повышение среднегодовых показателей температур за период 1990-2050 гг. на  $1,16^{\circ}\text{--}2,5^{\circ}\text{C}$  (Nelson et al., 2002). О значительном росте температур воздуха свидетельствуют и данные NCCS, опубликованные в отчете 2018 г. Проведенные расчеты (с использованием модели CCLM, в основе которой лежит наиболее негативный климатический сценарий RCP8.5) этих климатических параметров к 2071-2100 гг. показали, что среднегодовая температура воздуха в г. Лонгйир может увеличиться на  $6,5^{\circ}\text{C}$  (то есть среднегодовая температура воздуха приобретет положительные

значения), а количество дней с отрицательными температурами уменьшится на 96 дней (NCCS, 2019).

### ***Верхняя толща горных пород***

О. Западный Шпицберген не имеет сплошного чехла рыхлых отложений, широко развиты выходы на поверхность скальных пород. Наиболее древние толщи представлены докембрийскими гнейсами, встречаются дислоцированные позднепротерозойские терригенные и карбонатные породы. Палеозойские отложения представлены терригенными и карбонатными породами вулканогенно-осадочного и осадочного происхождения. Мезозойские толщи на архипелаге угленосные (меловые конгломераты, песчаники, глинистые сланцы). Также прослой угля встречаются в палеогеновых толщах, представленных песчаниками и сланцами. Чехол четвертичных отложений прерывистый, его мощность не превышает нескольких десятков метров в долинах рек и краевых зонах ледников, а на междуречных пространствах мощность четвертичных отложений часто не превышает 1 м (Дубиков, 1998).

### ***Геокриологические условия***

В пределах территории архипелага, не занятой современным оледенением, вечная мерзлота имеет сплошное распространение. Талики (как сквозные, так и несквозные) встречаются только под руслами рек и крупными озёрами, а также в местах молодых тектонических разломов, развивающихся и в настоящее время. Доля мерзлых пород от всей площади архипелага оценивается в 40 %. Кроме того, на шельфе вдоль побережья архипелага существует мерзлая зона шириной 40-50 км.

Мощность мерзлой субэвральской толщи на Шпицбергене демонстрирует явную широтную зональность и высотную поясность. Мерзлая толща варьируется от первых десятков метров (на участках современной лавины) до 500 м на наиболее возвышенных участках водораздельных плато и горных хребтов с абсолютными отметками высот 1000-1500 м. На прибрежных террасах средние значения мощности многолетней мерзлоты составляют порядка 100-150 м. Мерзлота, примыкающая к побережью, имеет двухъярусное строение: нижний ярус представлен охлажденными породами с криопэгами, а с поверхности залегают мерзлые породы (Дубиков, 1998).

Лонгйир расположен в прибрежной части Западного Шпицбергена, где вечная мерзлота имеет наибольшие температуры (*Romanovsky, Smith, 2010*) и наименьшую мощность на архипелаге: мощность мерзлоты в прибрежных долинах составляет около 100 м (*Liestøl, 1977*). Температуры мерзлых грунтов в районе Лонгйирбьюена варьируются от  $-5^{\circ}\text{C}$  на удалении 500 м от побережья) до  $-2^{\circ}\dots-3^{\circ}\text{C}$  (у береговой линии) и зависят, в первую очередь, от удаленности от береговой линии.

Рост температур воздуха в полярных широтах оказывает заметное влияние на состояние мерзлых грунтов. Увеличение температуры мерзлоты фиксируется в последние 20 лет во многих северных регионах: на Аляске, в Канаде, Российской Арктике и, в том числе, на архипелаге Шпицберген (*Romanovsky et al., 2017*). По данным измерений в районе г. Лонгйир повышение температуры мерзлых грунтов на глубине нулевых годовых колебаний с 2008-2009 гг. по 2016-2017 гг. составило от  $0,4^{\circ}$  до  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Темпы роста температур на глубине 10 м для разных площадок составляют от  $0,06^{\circ}\text{C}$  до  $0,15^{\circ}\text{C}$  в год (*NCCS, 2019*). Моделирование температурных полей мерзлоты к 2071-2100 гг. с использованием сценариев RCP8.5 показывает, что к концу столетия температуры мерзлоты на глубинах 5 и 10 м могут приблизиться к  $0^{\circ}\text{C}$ . Помимо роста температур мерзлоты, под влиянием изменений климата происходит увеличение мощности активного слоя. По данным моделирования по сценарию RCP4.5 в районе Лонгйира мощность активного слоя к концу века может увеличиться на 1 м (с 1,5 до 2,5 м) (*NCCS, 2019*).

Криогенные текстуры рыхлых отложений на о. Западный Шпицберген достаточно вариативны и зависят от грансостава мерзлых пород. Тонкодисперсные грунты пойменных и солифлюкционных отложений имеют сетчато-слоистую тонкошлировую или атакситовую криотекстуры (приурочена к кровле мерзлой толщи). Глины и илы, слагающие морские террасы обычно имеют сетчатую криогенную текстуру и льдистость до 0,5 (влажность таких грунтов составляет от 50 до 80%). Грубообломочные отложения, приуроченные к горным склонам, имеют массивную криотекстуру и малую степень льдистости (*Дубиков, 1998*).

#### **4.2. Воркутинский промышленный район**

Центром Воркутинского промышленного района является город Воркута, расположенный на Русской равнине в 150 км от Полярного круга на берегу р. Воркута

(приток р. Уса). Территория относится к западному склону Полярного Урала. В геокриологическом плане Воркутинский пром. район является частью Мало-Большеземельского геокриологического региона, ограниченного с севера побережьем Печорского моря, с юга – широтным коленом р. Печора, с востока – Уральским хребтом, а с запада – Тиманским кряжем (*Казначеева и др., 1988*).

### ***Орогидрография***

Большеземельская тундра имеет полого-волнистый равнинный рельеф со средними абсолютными высотами 50-180 м. Абсолютные высоты территории Печорского угольного бассейна (к которому относится Воркутинский район) не превышают 250 м (*Бобов, Уваркин, 1964*). Преобладающими типами рельефа являются аккумулятивный ледово-морской, морской и озерно-аллювиальный типы, в то время как в прилегающей к Уральскому хребту части региона встречаются денудационные и денудационно-аккумулятивные равнины. В пределах Мало-Большеземельского геокриологического региона выделяют три основных уровня аккумуляции, которые имеют различный возраст формирования: верхний уровень, сформировавшийся в среднем плейстоцене (Роговско-Вашуткинское время) и имеющий высоты 120 м и более; средний, формирование которого происходило в начале позднего плейстоцена (Казанцевское время), а абсолютные высоты имеют значения 60-120 м; нижний уровень, сформировавшийся в конце позднего плейстоцена и голоцене, с абсолютными высотами менее 60 м (к нижнему уровню аккумуляции относятся комплексы морских террас, занимающие северную часть региона). Расчлененность водораздельных пространств достигает 80-100 м на участках, сложенных роговскими суглинками, а на участках низких морских террас и внутренних заболоченных впадин не превышает 10-20 м (*Казначеева и др., 1988*).

Реки, дренирующие Воркутинский район, можно разделить на две группы: в первую группу входят реки, непосредственно впадающие в Северный Ледовитый океан; во вторую – реки, относящиеся к бассейну р. Усы и текущие преимущественно в южном направлении (в том числе и р. Воркута). Водоразделом для этих двух групп рек служит т.н. Большеземельский «хребет», расположенный в непосредственной близости к северу от г. Воркута. Большеземельский «хребет» представляет из себя комплекс холмов и мелких гряд с абсолютными высотами до

240-250 м. Большинство орографических структур второго порядка на территории района имеют т.н. уральское или пайхойское простирание (Бобов, Уваркин, 1964). К этим структурам относятся, в частности, гряда Чернышева и поднятие Чернова, которые представляют из себя слабо выраженные возвышенности (относительная высота не превышает 60-70 м) и являются пологими антиклинальными структурами с элементами горста. В ядрах этих возвышенностей вскрываются девонские и каменноугольные породы (Бобов, Уваркин, 1964). В рельефе равнинной части Печорского бассейна большую роль играют третьего порядка, представленные грядами («мусюрами») и отдельными холмами («мыльками») (Варсанофьева, 1960).

В Воркутинском промышленном районе преобладают реки, относящиеся к «ножной» гидрографической системе (т.е. относящиеся к бассейну р. Уса и р. Печора). Наиболее крупные реки - р. Уса и её притоки (Воркута, Большая Роговая, Адзьва, Большая Сыня и др.). Морфология долин рек во многом обусловлена геологическим строением территории: в местах выхода коренных пород близко к поверхности долины рек достаточно узки (рис.4.2.1), встречаются пороги и перекаты (характерно для рек Кара, Воркута, Силова-Яха, Аяч-Яга, Сыр-Яга, Адзьва и др.); на участках более глубокого залегания коренных пород речные долины расширяются (до 2 км и более) и имеют выраженное террасирование. Такие долины имеют корытообразный профиль, русла сильно меандрируют, в днищах долин наблюдается большое количество пойменных и старичных озёр. В долинах крупных рек региона выделяют 4 надпойменные террасы, имеющие тенденцию к увеличению высот вниз по течению реки (Бобов, Уваркин, 1964; Казначеева и др., 1988). Глубина вреза доли крупнейших речных долин в регионе не превышает 50 м (Еременко и др., 2021).

Для территории Воркутинского района характерна значительная заозеренность и заболоченность. Это обусловлено высокой влажностью и преимущественно равнинным характером рельефа (Казначеева и др., 1988). Озера Воркутинского района можно разделить на 3 группы по генезису, форме и размеру котловин (Бобов, Уваркин, 1964):

1. Наиболее крупные озера в котловинах (Падимейские, Харбей-Ты, Эрата-Ты, Вашуткины и др.). Их диаметр может превышать 10 км, глубина – 50 м. Некоторые исследователи относят Вашуткины озёра к реликтовым лагунам,

сформировавшимся в результате четвертичной трансгрессии моря (Коницев, Тумель, 1989);

2. Термокарстовые озёра, которые являются наиболее распространёнными на территориях с многолетнемерзлыми грунтами. Размеры таких озёр не велики (диаметр редко превышает 1 км, диаметр основной массы термокарстовых озёр составляет первые сотни метров), а глубина не превышает 2 м. Наиболее крупные представители этой группы озёр: Сеттей-Хасырей, Кывтан-Хасырей, Номья-хасырей;

3. Старичные и пойменные озёра в долинах крупных рек. Котловины этих озёр имеют размеры, схожие с размерами термокарстовых озёр, но большую глубину (до 5 м).



*Рис.4.2.1. Вид на р. Воркута со стороны шахты «Воркутинская»  
(фотография автора, август 2018 г.)*

### ***Климат***

В климатическом отношении Воркутинский район относится к Атлантико-Арктической области (Алисов, 1947), климат которой формируется преимущественно под воздействием Исландского циклона и Арктического антициклона. При этом влияние этих областей неравномерно в течение года: в зимний период (с октября по апрель) преобладает влияние Исландского минимума;

в летний период – Арктического антициклона. Такое распределение влияния барических областей обуславливает преобладание зимой западного и юго-западного воздушных течений, приносящих относительно теплый и влажный воздух. В результате зимы в регионе преимущественно облачные, с большим количеством осадков и периодическим повышением температур воздуха (вплоть до оттепелей). В летний период над территорией Воркутинского бассейна преобладают холодные и сухие арктические воздушные массы. Близость Исландского минимума и Арктического максимума обуславливают частую смену направлений ветра и, соответственно, частую смену погоды в течение года (Мухин и др., 1964).

Среднегодовые значения в пределах Большеземельской тундры колеблются от  $-2^{\circ}$  до  $-7^{\circ}$  С, а в г. Воркута среднегодовые температуры составляют  $-6^{\circ}$  С (СП 131.13330.2012) Зима в регионе продолжительная (до 8 месяцев), наиболее холодный месяц – февраль (среднемесячные температуры от  $-18^{\circ}$  С до  $-22^{\circ}$  С) (Мухин и др., 1964). По данным, обобщённым в СП 131.13330.2012, среднемесячная температура февраля в г. Воркута составляет  $-20,6^{\circ}$  С,  $-52^{\circ}$  С – минимальная температура воздуха в зимний период. Продолжительность летнего периода колеблется от 4 до 5 месяцев, значения температуры воздуха в летнее время достаточно низкие ( $12^{\circ}$ ... $14^{\circ}$  С) (Мухин и др., 1964), абсолютный максимум летних температур в г. Воркута составляет  $31^{\circ}$  С, среднемесячная температура наиболее теплого месяца (июль)  $12,4^{\circ}$  С (СП 131.13330.2012).

Количество осадков, выпадающих в равнинной части региона, доходит до 550 мм/год, в предгорных районах выпадет до 650 мм/год, при этом до 50% годовых осадков приходится на период с июня по сентябрь (Казначеева и др., 1988). По данным СП 131.13330.2012 в г. Воркута за период с ноября по март выпадет 178 мм осадков, а за период с апреля по октябрь – 370 мм осадков (т.е. около 68% годового количества осадков приходится на теплый период года). Осадки имеют преимущественно длительный, малоинтенсивный характер: число дней с интенсивностью осадков более 5 мм/сутки не превышает 20% от числа дождливых дней теплого периода года (Мухин и др., 1964). Формирование устойчивого снежного покрова происходит к середине октября, полное стаивание снега – к концу мая или началу июня (Казначеева и др., 1988). Наиболее интенсивные снегопады

наблюдаются в первые месяцы холодного периода (октябрь-ноябрь), максимальные величины мощности снежного покрова (0,6-0,8 м) достигаются к марту-апрелю. Распределение мощности снежного покрова по местности происходит неравномерно и зависит от рельефа и характера растительности; наименьшая мощность снега (0,1-0,2 м) наблюдается на возвышенных участках тундры и торфяных буграх, наибольшая (до 4 м и более) – в ложбинах и западинах с зарослями высоких кустарников и на крутых подветренных склонах (*Мухин и др., 1964*). Важно отметить, что в населенных и промышленных пунктах Воркутинского района отмечается более ранний (на 20-25 дней) сход снежного покрова (*Хрусталеv, 1971*). Данное явление объясняется характером антропогенной деятельности в регионе: загрязнение угольной пылью и золой территорий, прилегающих к населенным пунктам, производственным площадкам и железным дорогам, приводит к изменению теплофизических свойств снега и заметному уменьшению альбедо поверхности. Наибольший эффект от такого загрязнения наблюдается в период весеннего снеготаяния, когда угольная пыль сосредотачивается на поверхности в результате схода снежного покрова, в результате чего отражающая способность снега падает в 2-3 раза (*Горбачева, 1984*).

### ***Строение верхней толщи горных пород***

Для территорий Печорского угольного бассейна, на которых существуют многолетнемерзлые породы, в частности для Воркутинского района, характерно наличие чехла четвертичных отложений (около 80-90% площади) преимущественно суглинистого состава. Мощность четвертичных отложений в пределах региона колеблется от 2-3 до 200 м, состав и строение отличаются большим разнообразием и сложностью. Для восточной части Печорского бассейна, в пределах которой четвертичные отложения имеют относительно малую мощность, характерной особенностью является следующая закономерность строения толщи четвертичных отложений: верхняя и нижняя часть разреза представлены более грубозернистыми рыхлыми породами по сравнению с срединной частью разреза. В основании четвертичной толщи ( $Q_2^1$ ) залегают супесчано-суглинистые отложения, обогащенные песком, гравием, галькой и валунами, мощностью порядка 2,5 м (в депрессиях погребенного рельефа мощность увеличивается). Крупнозернистый

материал иногда является преобладающим и залегает непосредственно на кровле дочетвертичных пород. Генезис этой части разреза является спорным: в большинстве случаев данные отложения интерпретируются как донная морена, но, по мнению А.И. Попова (*Попов, 1961*), эти отложения являются прибрежно-трансгрессионной фацией осадков северного моря. По данным исследований А. И. Блохина, пески и глины с редкой галькой и фаунистическими остатками, залегающие в депрессиях дочетвертичных пород, имеют морское происхождение, а рассматриваемый горизонт четвертичных отложений сформировался в результате переработки морских осадков и части коренных пород под действием рек, ледника и его талых вод (*Бобов, 1964*).

В средней части разреза ( $Q_2^{2-3}$ ) залегают серые валунные суглинки и супеси с прослоями песков и галечников с валунами, мощность этого комплекса составляет обычно 40-50 м. В этой части разреза встречаются прослой глины (в т.ч. ленточных) и линзы торфа. Для среднечетвертичных отложений региона характерна сортированность, хорошо выраженная слоистость и ритмичность. Слои в средней части разреза имеют небольшую мощность (обычно не более 5 м) и частую сменяемость, нередко наблюдается несогласное залегание, свидетельствующее о перерывах в накоплении отложений. Отмечается частая деформированность слоев, ленточные глины перемяты в мелкие складки (*Жесткова, 1961*). Генезис среднечетвертичных отложений обычно определяется как ледниковый, слоистость этой части толщи объясняется одновременным накоплением моренного и песчано-галечного флювиогляциального материала (*Конищев, Тумель, 1989*). В пользу этой гипотезы говорит тесная зависимость минерального состава четвертичных отложений от состава подстилающих коренных пород (*Бобов, 1964*). По мнению А.И. Попова, сероцветная толща этой части разреза имеет гляциально-морской генезис, а слоистость обусловлена локальными изменениями условий осадконакопления в результате колебаний уровня морского шельфа (*Попов, 1961*).

Толща сероцветных слоистых суглинков и супесей перекрыта отложениями ( $Q_3$ ), обогащенными кластическим материалом и содержащими достаточно большое количество валунов. Для этой части толщи характерны более крупнозернистые рыхлые породы, слоистость аналогична подстилающим породам, мощность этой

толщи в среднем составляет 10 м и менее (в разрезе на берегу р. Сейда в районе Воргашорского месторождения мощность этой части толщи составляет 2,6 м).

### *Геокриологические характеристики*

В пределах Мало-Большеземельского геокриологического региона мерзлотные условия достаточно разнообразны, характер распространения многолетнемерзлых пород изменяется от сплошного на севере до редкоостровного – на юге. Основная часть Воркутинского промышленного района находится на границе участков прерывистого и массивно-островного распространения многолетней мерзлоты, пос. Хальмер-Ю – в зоне сплошного распространения мерзлоты (*Казначеева и др., 1988*).

Мощность толщи многолетнемерзлых пород в районе пос. Хальмер-Ю достигает 200 м, но распределение как мощности мерзлых пород, так и таликов достаточно неравномерно. В северной части Хальмерюского месторождения мощность многолетнемерзлых пород сильно колеблется, что обусловлено тектонической нарушенностью пород и отепляющим влиянием подземных вод. На участках с мощностью чехла четвертичных отложений в десятки метров и большей тектонической однородностью наблюдается большая однородность простираения мерзлой толщи (*Мухин, 1964*). Неоднородны и температурные характеристики мерзлых пород в районе Хальмерьюского угольного месторождения: наиболее низкие температуры фиксируются на участках торфяников и участках пятнистого микрорельефа ( $-2,8^{\circ}$  и  $-3,2^{\circ}$  на глубине 10 м соответственно) (*Мухин, 1964*). На междуречных пространствах и пологих склонах, занятых кочковато-ерниковой тундрой, наблюдаются значительно более высокие температуры многолетней мерзлоты. Значения температур на таких участках колеблются на глубине 10-13 м от  $-0,2^{\circ}$  до  $-1,5^{\circ}$  С. Такие различия в температурах мерзлых грунтов объясняются особенностями рельефа и растительности, от которых напрямую зависит мощность снежного покрова в зимний период. Наиболее низкие температуры грунтов ( $-1,5^{\circ}$  С и ниже) наблюдаются на возвышенных участках с высотой кустарникового яруса около 0,2-0,3 м; наиболее высокие ( $-0,5^{\circ}$  С и выше) – на пониженных участках с высокими кустарниками. На участках ложбин стока, для которых характерны более грубозернистые четвертичные отложения (супесчаные гравелистые и пески) и

большое снегонакопление, температуры верхней толщи многолетнемерзлых пород близки к  $0^{\circ}\text{C}$  (Мухин, 1964).

Для г. Воркута и окрестностей характерно массивно-островное распространение многолетней мерзлоты. Несквозные талики приурочены к понижениям с шириной 10-30 м (на таких участках кровля многолетнемерзлых пород залегает на глубине от 10 до 20 м и более (Мухин, 1964)), сквозные – к долинам рек и понижениям с шириной более 30 м. С поверхности мерзлые породы залегают на беслесных междуречных пространствах, на участках озерно-болотных и озерно-аллювиальных отложений, на участках с плоско-бугристым рельефом и полигональными торфяниками (Казначеева и др., 1988). На таких участках глубина залегания кровли многолетней мерзлоты колеблется от 0,3 до 2 м. По данным исследований в рамках программы CALM на площадке R-2 (расположена в 13 км к северу от г. Воркута) мощность слоя сезонного протаивания в 2015 г. составила 89 см (среднее значение по площадке). Важно отметить, что за период наблюдений глубина оттаивания увеличивается: в 1999 году среднее значение по площадке составило 64 см, то есть прирост протаивания составил 39% (Каверин и др., 2017). Мощность мерзлой толщи колеблется от 40 до 130 м, наибольшая мощность мерзлоты (132,5 м) была зафиксирована на западной окраине Воркуты в районе шахты «Капитальная». При этом важно отметить, что мощность многолетней мерзлоты в пределах Воркутинской мульды достаточно неравномерна: наибольшие значения достигаются в восточной части мульды, в то время как в западной части значения мощности мерзлой толщи обычно колеблются в пределах 40-50 м. Эти различия объясняются особенностями строения четвертичных отложений: западное крыло Воркутинской мульды представлено более грубыми рыхлыми отложениями с меньшей мощностью, которые подстилаются водоупорными коренными породами; восточное крыло – более мощным чехлом четвертичных суглинистых грунтов. Температуры мерзлых пород на глубине нулевых годовых колебаний в районе г. Воркута значительно выше, чем аналогичные температуры в районе пос. Хальмер-Ю. На участках торфяников фиксируются температуры от  $-1,3$  до  $-1,5^{\circ}\text{C}$ , на участках развития пятен-медальонов – от  $-1,2^{\circ}$  до  $-1,3^{\circ}\text{C}$ . На участках с более развитой растительностью (например, с густыми зарослями ерника) мерзлота

высокотемпературная, температуры на уровне нулевых годовых колебаний не опускаются ниже  $-0,8^{\circ}\text{C}$ , а обычно близка к  $0^{\circ}\text{C}$  (Мухин, 1964).

### ***Растительность и ландшафтная структура***

Воркутинский район расположен в Воркутинском округе полосы южных тундр (Александрова, Юрковская, 1989). Наиболее распространенным ландшафтным комплексом являются ивняково-крупноерниковые травяно-кустарничково-зеленомошные тундры, занимающие порядка 30% территории. Еще порядка 15% территории Воркутинского геоботанического округа занято кустарничково-зеленомошно-лишайниковыми крупноерниковыми тундрами, тяготеющими к легким по составу грунтам. На заболоченных участках отмечается сочетание пушицево-осоково-сфагновых ассоциаций и травяно-кустарничково-сфагновых ерниковых тундр. На наиболее «теплых» участках (таликовых зонах) произрастают березовые криволесья и березово-еловые редколесья (Александрова, Юрковская, 1989). Лесная растительность и редколесья широко развиты в долинах крупных рек, в том числе – на песчаных надпойменных террасах (Лавриенко, 2013). Преобладающим типом почвы в районе г. Воркута в естественных условиях являются минеральные мерзлотные почвы (Мажитова, 2008), которые занимают порядка 20% территории Большеземельской тундры (Каверин и др., 2017).

### **4.3. Приуральский район ЯНАО**

#### ***Орогидрография***

Район исследований расположен на левобережье р. Обь, на стыке Усть-Обской низменности и Южно-Ямальской (Щучьинской) возвышенности и входит во внешнюю орографическую зону Западно-Сибирской равнины. В силу близости Уральских гор западная часть территории имеет большие высоты и расчлененность, чем восточная, занимающая речные террасы р. Обь (большая часть района лежит в пределах второй Каргинской террасы) (Трофимов, Кашиперюк, 1989). Такое расположение района обуславливает значительную неоднородность высотных отметок и характера рельефа: в восточной части (в районе г. Лабытнанги) абсолютные высоты составляют 50-100 м, а рельеф представляет собой слаборасчлененную равнину, сложенную аллювиальными и аллювиально-морскими позднелейстоценовыми отложениями, преимущественно песчаного состава; при

движении на запад по мере приближения к Полярному Уралу происходит увеличение абсолютных высот вплоть до 300-400 м в районе пос. Харп, а также отмечается заметное увеличение расчлененности, что обусловлено выходом на поверхность магматических и метаморфических пород палеозойского возраста (Ерёменко и др., 2021). Для правобережья р. Обь, где расположены г. Салехард, пос. Аксарка и пос. Горнокнязевск характерна несколько большая абсолютная высота (до 145 м) и значительно большая в сравнении с левобережьем вертикальная расчлененность рельефа, достигающая 50-100 м, которая обусловлена развитой эрозионной сетью (Ерёменко и др., 2021). Для района исследований характерно широкое распространение практически горизонтальных, часто заболоченных, поверхностей с углами наклона 0,5-1,5° (Трофимов, Кашиперюк, 1989). Характерной особенностью территории является широкое распространение термокарстовых озер и озерно-хасырейных пространств.

### ***Климат***

Климат территории умеренно-холодный со значительным количеством осадков в течение года. Средняя температура июля 14,7° С, средняя температура января -23,3° С. Абсолютный минимум температуры -54° С, абсолютный максимум +31° С. Согласно Кеппен и Гейгера, этот климат классифицируется как Dfb (холодный континентальный климат с теплым летом без выраженного сухого сезона). Средняя годовая температура составляет -5,5° С. По данным IPCC (Vautard et al., 2021) на территории северной части ЯНАО отмечается устойчивый тренд к увеличению среднегодовой температуры наружного воздуха, за период 1981-2020 гг. зафиксирован рост температуры на 0,4-0,6° С в десятилетие.

Среднее количество осадков в год составляет 543 мм. При этом мощность снежного покрова на тундровых пространствах не велика и в среднем составляет 20-40 см. Снег распределяется крайне неравномерно по площади за счет метелевого переноса и уплотнения: наименьшая высота отмечается на возвышенных участках рельефа, наибольшая – в днищах долин и оврагах. На залесенных участках снег имеет значительно меньшую плотность и распределен равномернее за счет меньшего ветрового воздействия, средняя мощность снежного покрова здесь

составляет 40-80 см. Протяженность периода с устойчивым снежным покровом составляет 200-260 дней (Баулин, Данилова, 1998).

### *Геокриологические характеристики*

Юго-западная часть Приуральского района ЯНАО относится к Усть-Обской области Континентальной геокриологической провинции Западной Сибири. Эта территория находится на границе зон сплошного и прерывистого распространения многолетней мерзлоты, в силу чего имеет достаточно неоднородные геокриологические условия, во многом зависящие от геоморфологической позиции (Васильчук, 1989). Характерной особенностью мерзлых толщ региона является распространение реликтовой мерзлоты, залегающей на глубинах 110-190 м. Современная мерзлота в южной части региона имеет мощности от 25 до 80 м, наибольшие мерзлые толщи фиксируются на наиболее возвышенных участках с мохово-кустарниковой растительностью (Васильчук, 1989). При движении к северу мощность современной мерзлоты возрастает до 300 м (Баулин, Данилова, 1998).

Льдистость мерзлых пород в верхней части разреза также достаточно сильно дифференцирована: песчаные и песчано-торфяные отложения преимущественно слабольдистые; глинистые и глинисто-торфяные – льдистые и сильнольдистые (Баулин, Данилова, 1998). Наибольшая льдистость характерна для суглинистых пород, перекрытых торфяниками мощность более 2 м, в таких условиях объемная льдистость пород достигает 30-40%, криотекстуры преимущественно слоистые. В отдельных случаях в озерно-болотных и болотных отложениях, представленных торфом и оторфованными суглинками с атакситовой криотекстурой льдистость может достигать 80-90% (Баулин, Данилова, 1998). Наименьшая льдистость характерна для пород песчано-супесчаного состава с массивной криотекстурой (Васильчук, 1989).

Мощность слоя сезонного оттаивания измерялась в ходе полевых работ, проводившихся сотрудниками и студентами кафедры криолитологии и гляциологии в июле 2022 года. Измерения, проводившиеся по стандартам программы CALM (Циркумпольный мониторинг активного слоя) показали, что в типичных для региона ландшафтно-мерзлотных условиях мощность слоя сезонного оттаивания в среднем (по данным измерений в 121 точке) составила 75,1 см. Наибольшая глубина

протаивания (93 см) отмечается на участках пятнисто-медальонной достаточно хорошо дренированной тундры, наименьшая – на возвышенных участках с мелкобугристой тундрой с мощным мохово-торфяным покровом (63 см).

Температуры мерзлоты на уровне нулевых годовых колебаний также весьма мозаичны. Наиболее холодная мерзлота фиксируется под мощными торфяниками на относительно возвышенных участках, где температуры могут опускаться до значений  $-3^{\circ}\text{C}$ . Однако, на территориях, занятых типичной и южной тундрой значения температуры мерзлых пород на уровне нулевых годовых колебаний в среднем составляет около  $-1...-1,5^{\circ}\text{C}$ , а на участках лесотундры редко опускается ниже  $-0,5^{\circ}\text{C}$  (Баулин, Данилова, 1998).

### ***Растительность и ландшафтная структура***

Южная часть Приуральского района лежит на стыке Нижнеобской ландшафтной провинции лесотундровой страны и Ямальской провинции тундровой страны. (Гвоздецкий, Михайлов, 1978). Исследования, проводившиеся в 2016-2022 гг. (Гребенец и др., 2018) на левобережье р. Обь показали значительную мозаичность ландшафтной структуры территории, занятой участками березово-лиственничных криволесий и редиин (на таликовых зонах) и типичными и южно-тундровыми ландшафтами. Склоны южной экспозиции занимает южная кустарниково-кустарничковая бугорковатая тундра на оторфованных тундровых почвах на супесчаном субстрате. На ровных и слабонаклонных участках, а также в ложбинах стока отмечаются типичные тундровые растительные ассоциации, среди которых можно выделить ряд ПТК (Гребенец и др., 2018):

- 1) кустарниково-моховая растительная ассоциация на тундрово-торфяных почвах на относительно дренируемых поверхностях;
- 2) осоково-пушицево-моховая растительная ассоциация на обводненных тундрово-торфяных почвах в пределах небольших относительно выровненных депрессий на местах вытаивания маломощных повторно-жильных льдов, приуроченных к современным торфяникам;
- 3) ровные и слабонаклонные участки, где прослеживаются возвышенные кочкообразные поверхности с кустарничково-моховой растительной

ассоциацией, имеются отдельные небольшие (до 5 – 8 м) понижения с осоково-моховой растительной ассоциацией.

#### **4.4. Ванкорское месторождение**

Ванкорское нефтегазовое месторождение расположено в северо-западной части Красноярского края на территории Туруханского района (130 км к северо-западу от г. Игарка).

##### ***Орогидрография***

Территория месторождения лежит на Западно-Сибирской плите, которая имеет форму амфитеатра, понижающегося в сторону Северного Ледовитого океана. Отметки высот в северной части плиты составляют 100 м и менее (*Трофимов, Кашперюк, 1989*).

Рельеф Западно-Сибирской плиты представляет из себя участки плато, возвышенностей, наклонных равнин и низменностей. Распределение этих форм по территории плиты позволяет выделить две основные орографические зоны: внешнюю (относительно возвышенные участки, окаймляющие плиту полукольцом, открытым на север) и внутреннюю (занимает наиболее низкие участки плиты, то есть ее центральную и северную части) Территория Ванкорского месторождения относится к внутренней орографической зоне. Для нее характерны абсолютные высоты от 0 до 150-200 м (в редких случаях чуть более). Рельеф зоны представляет из себя чередование низменных равнин с высотами 50-100 м и возвышенностей с преимущественно субширотной ориентацией. Для данной территории характерны небольшие величины относительных высот. В пределах Западно-Сибирской плиты вертикальная расчлененность рельефа варьируется от 5 до 150 м, но для большей части равнинных участков этот показатель в среднем составляет около 10 м (*Трофимов, Кашперюк, 1989*). На территории региона широко развиты (порядка 40% территории) типы рельефа, свойственные для древних водораздельных равнин: Салехардской и Казанцевской. Такие пространства представляют из себя холмистый или холмисто-увалистый рельеф. Значительно линейное расчленение территории долинами рек, балками и оврагами, кроме того, велика степень заозеренности территории.

Речная сеть на территории Ванкорского месторождения и вдоль трассы магистрального нефтепровода (МНП) «Ванкор-Пурпе» относится к бассейну Карского моря (реки непосредственно на территории группы месторождений относятся к бассейну р. Енисей, трасса МНП также пересекает бассейны рек Пур и Таз). Реки в этом регионе имеют типичный равнинный характер: русла широкие, разбивающиеся на протоки, сильно меандрирующие (рис.4.3.1); скорости течения потока низкие, что обусловлено малой величиной падения реки; долины имеют корытообразный профиль; широко распространены старицы и слепые протоки (Шмелев, 1967). В стоке рек наибольшую долю (до 80%) имеет снеговое питание, в то время как доля грунтового питания крайне мала (до 10% от общего стока). Такая особенность формирования речного стока обусловлена наличием многолетнемерзлых грунтов, водоупорные свойства которых препятствуют фильтрации поверхностных вод и осадков в грунтовую толщу. Большой вклад снегового питания в формирование стока рек обуславливает ярко выраженное весеннее половодье, когда уровень воды в реках поднимается на 7-12 м (Ларин, 2011), и практически полное пересыхание малых рек в период летней межени и промерзание до дна в зимний период (Кеммерих и др., 1967).



Рис.4.3.1. Меандрирование реки рядом с трассой нефтепровода «Ванкор-Пурпе»  
(фотография автора, август 2018 г.)

Плоский равнинный рельеф территории, малые значения испаряемости в совокупности с широким распространением многолетнемерзлых пород формируют

переувлажненность территории и, следовательно, высокую степень заозеренности. Наиболее типичными для данной территории являются неглубокие (с глубинами не более 5 м) озера с площадью до 1 км<sup>2</sup> (Шмелев, 1967), но встречаются также и достаточно крупные постоянно существующие озера, и малые сезонные озера, возникающие в термокарстовых понижениях (Ларин, 2011; Кеммерих, 1966).

### ***Климат***

Территория северо-восточной части Западно-Сибирской плиты расположена в зоне влияния Атлантических и Арктических воздушных масс, при этом важно учитывать, что Атлантические воздушные массы значительно трансформируются в результате прохождения над материком и, в особенности, над Уральскими горами, и их воздействие достаточно ослабляется. Открытость территории с севера обуславливает господство над территорией холодных и сухих воздушных масс, проникающих со стороны Северного Ледовитого океана. На протяжении большей части года (преимущественно в теплый период) над территорией господствует циклонический режим, возникающий в результате прогрева поверхности, но в зимний период распространяется действие западных отрогов Азиатского антициклона. По Б.П. Алисову территория Енисейского севера находится в субарктическом климатическом поясе на стыке Атлантико-Арктической и Атлантико-Континентальной областей (Алисов, 1956).

Среднегодовые температуры воздуха для г. Игарка (ближайшая к Ванкорскому месторождению метеостанция с длинным рядом наблюдений) составляют  $-8,1^{\circ}\text{C}$  (СП 131.13330.2012). Холодный период длится с октября по середину мая (230-240 суток), наиболее холодный месяц – январь, среднемесячные температуры января составляют  $-28,3^{\circ}\text{C}$ , а абсолютный минимум температур равняется  $-57^{\circ}\text{C}$ . Средние температуры июля составляют  $+15,4^{\circ}\text{C}$ , а абсолютный максимум температур –  $+34^{\circ}\text{C}$ . Осадки распределяются неравномерно в течение года, из среднегодовых 450-500 мм осадков в летний период (апрель-октябрь) выпадает 65-70% (порядка 330 мм) и лишь 30% осадков приходится на период с ноября по март. Такое распределение осадков в течение года обусловлено преобладанием в летний период циклонического режима, рост количества осадков наблюдается с начала мая и достигает максимума к августу-сентябрю. Снежный

покров начинает формироваться с конца сентября и сходит в конце мая-начале июня. Максимальная мощность снежного покрова за зимний период в среднем составляет 65 см, но распределение снега неравномерно и сильно зависит от рельефа и растительного покрова. На залесенных участках (лес на данной территории приурочен, в первую очередь, к понижениям рельефа и долинам водотоков) мощность снежного покрова достигает 120-150 см, в то время как на открытых участках и вершинах положительных форм рельефа не превышает 30 см. Наибольшее количество снега (до 200 см) откладывается на склонах северной экспозиции, что обусловлено особенностями ветрового режима территории (Орлова, 1962; Галахов, 1964; СП 131.13330.2012).

Трасса МНП «Ванкор-Пурпе» имеет протяженность 543 км и проходит в юго-западном направлении от территории Ванкорского комплекса месторождений. Высокая протяженность магистрального нефтепровода обуславливает некоторые отличия в физико-географических (в первую очередь климатических и геокриологических) условиях в южной части МНП. Для южной части МНП характерны следующие климатические условия (по данным для пос. Тарко-Сале, расположенного в 50 км к северо-востоку от конечного пункта МНП): среднегодовая температура воздуха равна  $6^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{июля}} = +16,4^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{января}} = -25,2^{\circ}\text{C}$ ; абсолютный минимум температур составляет  $-55^{\circ}\text{C}$ , абсолютный максимум температур:  $+36^{\circ}\text{C}$ ; среднегодовое количество осадков, как и на территории Ванкорского месторождения, равняется 500 мм, распределение осадков в течение года аналогично распределению на территории месторождения (СП 131.13330.2012).

### ***Строение верхней толщи горных пород***

Верхняя часть толщи горных пород на исследуемой территории представлена массивным чехлом четвертичных отложений, их мощность достигает 100 м и более (Шевелева, 1967(a)). Относительно истории развития Западной Сибири в четвертичное время нет единой точки зрения. Наиболее распространено предположение, что в среднем плейстоцене северная часть Западной Сибири была занята морским бассейном. Мнения о том, насколько далеко на территорию современной Западной Сибири заходило море, так же разнятся: по мнению А.И. Попова, морской бассейн простирался вплоть до  $60^{\circ}$  с.ш. (Попов, 1957), в то время

как некоторые другие ученые считают, что границы бассейна находились не южнее 63-64° с.ш. (Шполянская, 1981). Одновременно с океанической трансгрессией существовало и покровное оледенение, центры которого располагались на Урале и в Средней Сибири. Но ледниковый покров занимал лишь часть Енисейско-Тазовского междуречья. Отсутствие обширного ледникового покрова на территории Западной Сибири отчасти доказывается очень слабым развитием или практически полным отсутствием на водоразделах покровных суглинков (Попов, 1957). Кроме того, в период максимального оледенения отмечаются озерные трансгрессии по долинам Енисея и Оби, вызванные потоками талых ледниковых вод. Из всего этого можно предположить, что развитие мерзлых толщ к северу от 60° с.ш. в этот период было невозможно (Шполянская, 1981). В казанцевскую эпоху, сменившую эпоху оледенения, наблюдалась регрессия моря, общее потепление климата и его смещение в сторону континентальности. Именно в конце этой эпохи могло начаться промерзание освободившейся от моря и ледниковых покровов поверхности. Регрессия моря продолжилась в Зырянскую эпоху – эпоху значительного похолодания, когда суша почти достигла своих современных границ. Таким образом, можно предположить, что промерзание пород всей современной поверхности северной части Западной Сибири началось примерно 50 тыс. лет назад (Шполянская, 1981).

Отложения нижнего плейстоцена в пределах исследуемой территории не выходят на дневную поверхность, представлены песками и галечниками со слоями валунно-галечных отложений, предположительно представляющими из себя перемытые моренные отложения нижнеплейстоценового оледенения (Шевелева, 1967 (а)). По Н.А. Шполянской в среднем плейстоцене территория была занята морским бассейном. Отложения среднего плейстоцена представлены преимущественно глинами и суглинками, темно-серыми супесями, содержащими валуны и гальку, и остатки глубоководной арктической фауны. Верхняя часть среднеплейстоценовых отложений содержит фауну, свидетельствующую об опреснении и обмелении бассейна. В казанцевскую эпоху территория Ванкорского месторождения постепенно выходит на поверхность в результате регрессии морского бассейна и становится водораздельным пространством. Верхнеплейстоценовые отложения, вскрытые в скважинах на территории

Ванкорского месторождения представлены песками и супесями, имеющими аллювиальное и озерно-аллювиальное происхождение. Голоценовые отложения представлены преимущественно суглинистыми и супесчаными грунтами делювиального генезиса.

### *Геокриологические характеристики*

В геокриологическом плане Ванкорское месторождение относится к Таз-Хетско-Енисейской геокриологической области, входящей в Северную зону Континентального региона. Для этой территории характерно сплошное распространение многолетнемерзлых пород, а талики формируются только под крупными озерами и реками. Подошва слоя многолетней мерзлоты лежит на глубине 400-450 м, но в долинах крупных рек мощность многолетней мерзлоты может уменьшаться до 280-300 м (*Васильчук, Кудряшов, 1989*). Поверхностные отложения представлены суглинками и супесями, торфом и песком в долинах рек, средняя глубина слоя сезонного протаивания составляет 0,5 м, температура на уровне нулевых годовых колебаний от  $-1^{\circ}$  до  $-1,5^{\circ}$  С, хотя на некоторых участках междуречных пространств наблюдаются более низкие температуры грунта (порядка  $-4^{\circ}$  С). Температуры в грунтах постепенно повышаются с глубиной и достигают  $0^{\circ}$  на глубине около 400 м. Для суглинистых и глинистых пород на этой территории характерна сетчатая криогенная текстура и сильнольдистые верхние горизонты с уменьшением льдистости по глубине, иногда с 65% до 18% на глубине порядка 10 м. На территории Ванкорского месторождения активны различные криогенные процессы. Почти повсеместно развиты термоэрозия и солифлюкция, интенсивно идет образование полигонально-жильных массивов, термокарст и морозное пучение (*Юров, Гребенец, 2019*).

Трасса МНП «Ванкор-Пурпе» пересекает, помимо Таз-хетско-Енисейской, еще две геокриологические области: Тазовскую и Надым-Пуровскую. Для южной части Тазовской геокриологической области, которую пересекает трасса нефтепровода, сплошное распространение многолетнемерзлых пород характерно только для участков торфяников, безлесых участков, бугров и гряд. Сквозные талики наблюдаются не только под руслами крупных рек, но и под озёрами с глубиной более 0,8 м и диаметром более 200 м. Несквозные талики формируются на участках, где

мощность снежного покрова превышает 0,6-0,8 м. Мощность мерзлой толщи варьируется от 300-400 м на лишенных леса участках, до 10-50 м на залесенных территориях, кроме того, на залесенных участках кровля многолетней мерзлоты может опускаться до глубин 5-20 м. В пределах промерзающих хасыреев и в долинах крупных рек возможно формирование двухслойной толщи мерзлых пород. Под хасыреями верхний горизонт мерзлой толщи доходит до глубин 5-10 м, а кровля нижнего залегает на глубинах 10-20 м. В речных долинах ситуация несколько отличается: верхний горизонт мерзлых пород имеет большую мощность и опускается до глубин 10-20 м (реже до 50 м), а кровля нижнего горизонта фиксируется на глубинах от 70 до 90 м (*Мельников и др., 1983*). Верхняя часть мерзлой толщи представлена преимущественно суглинками и супесями с линзовидно-слоистой, слоистой или слоисто-сетчатой криотекстурой. С глубиной происходит разреживание ледяных шлиров и трансформация криотекстуры в слоистую и неполносетчатую редкошлировую (в редких случаях – массивную). Температуры грунтов варьируются от 0 до -3° С. Мощность СТС на территории Тазовской геокриологической в среднем составляет 0,6...1,5 м, но на участках с супесчаными и песчаными грунтами в пределах хорошо дренированных водоразделов может достигать 2,5 м. На участках таликов наблюдается сезонное промерзание грунтов на глубины от 0,5...1 м (для участков суглинистых грунтов) до 1,5...2 м (на участках с песчаным составом грунтов) (*Сухов и др., 1989*).

В пределах Надым-Пуровской геокриологической области (на которую приходится южная часть трассы МНП) геокриологические условия отличаются еще большей мозаичностью. В северной части области (зона лесотундры) мерзлота имеет прерывистый характер распространения, мощности многолетней мерзлоты достигает 250-300 м, талики занимают около 25% площади. Сквозные талики формируются под руслами рек и ручьёв и озёрами, под мелкими термокарстовыми озёрами отмечаются несквозные талики с мощностью от 10 до 85 м, а на участках с песчаным составом верхней толщи грунтов фиксируется опускание кровли мерзлой толщи до глубины 3-10 м. При движении на юг происходит увеличение площади таликов (до 90% в южной части области) и уменьшение мощности мерзлой толщи до 50 м и менее. Мерзлота приобретает островной характер распространения, мерзлые толщи залегают только под участками торфяников и безлесыми водораздельными

пространствами, где занимает от 50% до 90% площади. Сквозные талики наблюдаются даже под малыми водотоками. Температуры мерзлых грунтов незначительно ниже 0° С, мощности слоев сезонного промерзания/протаивания составляют 1...1,5 м на участках распространения суглинистых и супесчаных грунтов и 1,5...4 м на песках (*Горальчук и др., 1989*).

### ***Растительность и ландшафтная структура***

Ванкорское и месторождение расположено в пограничной зоне тундр и лесотундры. Тундровая зона на этой территории представлена кустарниковой растительностью (карликовые березы и ивы), сплошным зеленомоховым покровом и достаточно густой осоковой порослью. На болотистых участках развита сфагновая растительность, а на пойменных участках рек – густая злаково-разнотравная растительность. Высота кустарниковой растительности достигает 1 м. При движении к югу появляются участки древесной растительности, приуроченные, в первую очередь, к понижениям рельефа и речным долинам. Древесная растительность представлена темнохвойными (ель сибирская, пихта сибирская) и лиственничными редколесьями (*Ревердатто и др., 1967*).

Для Ванкорского месторождения преобладают местности холмисто-увалистого типа с лесотундровой растительностью со сплошным распространением многолетнемерзлых пород с различной степенью льдистости. Для речных долин характерно меньшее ландшафтное разнообразие, чем на плакорных участках, здесь развиты березово-лиственничные редколесья, чередующиеся с заболоченными участками и кустарниковыми тундрами (*Мельников и др., 1989*). Различия в строении многолетнемерзлых пород и ландшафтных особенностях позволяют выделить несколько основных типов природно-территориальных комплексов (ПТК):

I) Ровные, холмистые и западинно-бугристые поверхности, относительно хорошо дренированные, с березово-лиственничными кустарниково-лишайниковыми редианами, сложенные преимущественно суглинистыми и супесчаными отложениями.

II) Полого-холмистые и западинно-бугристые, относительно дренированные участки, сложенные преимущественно суглинистыми и супесчаными отложениями.

Такие участки покрыты редкостойными лесами березово-лиственничного состава с кустарничково-мохово-лишайниковой растительностью, чередующимися с участками типичных и южных тундр. К таким участкам часто приурочены заболоченные ложбины стока.

III) Плоские кочковатые и бугристо-западинные террасы озер с кустарничково-мохово-лишайниковой растительностью со сфагновыми болотами, сложенными торфами.

IV) Плоская кочковатая и бугристо-западинная надпойменная терраса реки Лодочная покрытая кустарниками и кустарничково-травяно-моховой растительностью, с участками торфяников и болот, сложенная суглинистыми и супесчаными отложениями и торфами.

V) Надпойменная терраса реки Большая Хета, представляющая из себя плоскую поверхность, осложненную старичными озерами, сложенную тальми песчаными и супесчаными грунтами. Ее покрывают участки смешанного леса, кустарника и травяно-моховой растительности.

#### **4.5. Норильский промышленный район**

Норильский промышленный район (НПР) расположен в северо-западной части Красноярского края, к югу от п-ова Таймыр. Центром НПР является г. Норильск, лежащий в 300 км к северу от северного полярного круга. Помимо Норильска в НПР включают микрорайоны Талнах, Оганер и Кайеркан, а также г. Дудинка и пос. Алыкель (аэропорт г. Норильск); ряд поселков (Медвежий ручей, Заполярный, Валёк и др.), которые в настоящее время выселены и, как правило, подвержены разрушению инфраструктуры.

#### ***Орогидрография***

В орографическом отношении территория НПР относится к пограничной зоне между Приенисейской равниной и плато Путорана. Западная часть НПР лежит в пределах Приенисейской равнины, которая представляет из себя слабо наклоненную к северо-западу низменность, для которой характерны средние абсолютные высоты около 100 м (*Демидюк, Кондратьева, 1989*). Абсолютные высоты поверхности постепенно увеличиваются к востоку от долины Енисея, где составляют в среднем

50 м, до 80-120 м (в случае отдельных возвышенностей-останцов могут достигать 200 м). Эта территория осложнена валами: Дудинским, Боганидским и др. Прослеживаются также высокие (III-IV) террасы р Енисей (*Хомичевская, 1967(a)*). Северо-западная часть плато Путорана, отроги которой (Норильское плато, Хараелах, Ламские горы) выходят к г. Норильск и образуют уступ высотой 300-500 м. Для плато Путорана характерны высоты поверхности до 1200-1600 м и высокая степень расчлененности рельефа: перепады высот до 600-1000 м. Трапповое происхождение плато обуславливает характерные черты рельефа поверхности: долины имеют крутые борта и ступенчатые днища; окраины горных долин заняты достаточно глубокими озёрами (глубиной до 200 м) с преимущественно широтным простираем (*Хомичевская, 1967(a)*).

Реки описываемой территории относятся к бассейнам рек Пясино и Енисей, наиболее крупные реки: Норильская, Пясино, Амбарная, Хараеллах, Дудинка. В годовом стоке рек преобладает снеговая составляющая (55-60% годового стока), что обуславливает ярко выраженный весенний паводок, когда уровень воды в реках поднимается до 3,5...4 м. Роль грунтового питания в годовом стоке рек незначительна, что связано с широким распространением многолетней мерзлоты и гористым характером местности восточной части региона. На многих участках небольших рек (Ергелах, Амбарная и др.) формируются обширные речные наледи (*Алексеев, 2002*), которые в отдельные годы не протаивают за теплый период. Территория сильно заозерена, причем важно отметить, что озера восточной и западной частей региона имеют разный генезис котловин и морфометрические характеристики. В равнинной части широко распространены озёра термокарстового происхождения, которые обычно имеют незначительные размеры и глубину не более 2-3 м. В восточной части региона озёра в основном занимают речные долины, имеют ярко выраженную вытянутую форму и большую глубину. Глубина наиболее крупных озер превышает 150 м (наиболее глубокое – оз. Лама с измеренной глубиной 254 м) (*Демидюк, Кондратьева, 1989*).

### ***Климат***

Общие закономерности циркуляции атмосферы в Норильском промышленном районе соответствуют таковым в районе Ванкорского

нефтегазового месторождения, эти пункты находятся в пределах одного климатического региона. Однако, при сравнении данных районов четко прослеживается влияние широтной зональности климата и высотной поясности, так как Норильский промышленный район расположен севернее и, отчасти, в гористой местности. Среднегодовые температуры воздуха в Норильске составляют  $-9,8^{\circ}\text{C}$  (что на  $1,7^{\circ}\text{C}$  ниже, чем в г. Игарка, расположенном в непосредственной близости от Ванкорской группы месторождений). Абсолютный минимум температур в Норильске составил  $-64,7^{\circ}\text{C}$ , среднемесячная температура января:  $-27,6^{\circ}\text{C}$ . Максимальные температуры воздуха наблюдаются в июле-августе, абсолютный максимум:  $+32^{\circ}\text{C}$ ; среднемесячная температура июля:  $+13,4^{\circ}\text{C}$  (*Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах, 1977*). Более северное расположение и большие абсолютные высоты обуславливают контрастность переходов зима-лето и лето-зима по сравнению с более южными районами.

Распределение снежного покрова на территории НПР во многом определяется характером рельефа, в первую очередь, его сильной расчлененностью. Явно проявляются различия в снегонакоплении между возвышенной частью Норильского плато (на примере рудника Медвежий ручей) и участками у подножья Норильского плато: максимальная мощность снежного покрова на возвышенном участке достигает 70-80 см (а средние значения не превышают 45 см), в то время как у подножий склонов Норильского плато снежный покров достигает мощности в 2,5 м (*Хомичевская, 1967(б)*).

В пределах равнинных участков наблюдается сильная дифференциация мощности снежного покрова в зависимости от ландшафтных условий, в особенности характера растительности. Так, на залесенных участках толщина снега достигает 200 см; на участках редколесий – 150 см; в кустарниковой тундре – до 70 см; а на участках с типичной тундровой растительностью (занимающей, как правило, возвышенные участки местности) мощность снежного покрова обычно не превышает 20 см (*Хомичевская, 1967(б)*).

### ***Строение верхней толщи горных пород***

Строение верхней толщи горных пород в районе Норильска во многом схоже со строением четвертичной толщи в районе Игарки и Ванкорского комплекса

месторождений. Нижне- и среднечетвертичные отложения на территории НПР представлены песками, валунными суглинками, глинами, алевролитами, галькой и гравием талагайкинского, лебедского и тобольского горизонтов, а также бахтинского надгоризонта (*Демидюк, Кондратьева, 1989*).

Верхнеплейстоценовые отложения на территории НПР подразделяются на четыре горизонта:

1) Казанцевский, представленный в низовьях Енисея песчаными отложениями морского генезиса. Моллюсковая фауна, обнаруженная в этих отложениях, свидетельствует об их формировании в условиях относительно теплого мелководного морского бассейна (*Тумель, 1988*);

2) Зырянский, представленный отложениями морского (в низовьях Енисея) и ледникового (в районе г. Норильск) генезиса. Формирование данных отложений происходило в период с 71 по 40 тыс. лет назад в условиях прибрежно-морского участка ледникового бассейна и развития горно-долинного оледенения горных систем (*Тумель, 1988*);

3) Каргинский, сложенный пачками серых и желто-бурых сильно пылеватых суглинков и супесей с линзами песков, сформировавшихся в условиях умеренно-холодного климата в период между 40 и 27 тыс. лет назад. Данный горизонт, мощность которого варьируется от 5 до 35 м) богат органическими (растительными и животными) остатками (*Тумель, 1988*);

4) Сартанский, соответствующий Сартанскому криохрону (около 27-10 тыс. лет назад). В этот период времени на территории НПР в результате перекрытия долины реки ледовым языком ледника плато Путорана сформировалось Вальковское пресноводное озеро. Постепенное разрушение ледовой плотины привело к спуску Вальковского озера по долине р. Пясино в Северный Ледовитый океан. В результате постепенной регрессии Вальковского водоема сформировалось семь озерно-аллювиальных террас, наиболее крупная из которых сложена ленточными глинами. С поверхности глины перекрыты суглинисто-глинистыми отложениями в центральной части террасы и песчаными, гравелисто-песчаными и супесчано-суглинистыми грунтами – в краевой части, примыкающей к горным системам. В

предгорных частях НПП (т.н. «старый город», мкрн. Талнах) встречаются отложения ледникового генезиса, включающие погребенные глетчерные льды.

Современный комплекс отложений имеет мощность 5...10 м и представлен рыхлыми породами разнообразного генезиса: аллювиальными (от песчаного до суглинистого состава) – на участках речных пойм; озерными и озерно-болотными (преимущественно суглинисто-илистого состава и сильно оторфованные) – на водораздельных пространствах и поверхностях надпойменных террас; делювиально-элювиальными – в горных и предгорных частях района (*Шевелева, 1967(a)*).

### ***Геокриологические характеристики***

Территория НПП имеет весьма пеструю в геокриологическом плане структуру, хотя для всего района характерно сплошное распространение многолетней мерзлоты. Формирование природных таликов обусловлено гидрологическими и геологическими причинами. Максимальная площадь таликов наблюдается в пределах Норильской долины, где их доля от общей площади составляет около 30%. Талики приурочены, в первую очередь, к водотокам: р. Норильская, р. Квадратная, р. Наледной, р. Щучьей, низовьям ручьев Медвежий и Угольный (*Шевелева, 1967(б)*).

Мощность многолетнемерзлых пород в пределах НПП варьируется согласно высотной поясности: минимальные мощности (70-100 м) мерзлоты наблюдаются в долинах и межгорных котловинах, максимальные (300 м и более) – на вершинах горных систем. Повышение абсолютной высоты поверхности на 100 м соответствует увеличению мощности многолетнемерзлых пород на 40-60 м. Максимальная мощность мерзлых толщ отмечается на г. Рудная, где подошва мерзлоты фиксируется на глубине около 450 м. Значительные мощности мерзлых пород отмечаются также на Хараелахе и в Ламских горах, в вершинной части которых подошва мерзлой толщи опускается до глубин порядка 400 м. Мощность многолетней мерзлоты в Норильской долине и в районе Талнаха в среднем составляет 100-200 м (*Шевелева, 1967(б)*).

Температурные характеристики мерзлых грунтов на территории НПР также достаточно мозаичны. Наиболее холодные мерзлые грунты приурочены к вершинным частям горных систем, где значения температур могут составлять  $-7\dots-8^{\circ}\text{C}$ . Как и мощность мерзлой толщи, температурные характеристики мерзлоты изменяются при изменении абсолютной высоты поверхности. У подножий горных систем фиксируются уже более высокие температуры мерзлых грунтов: порядка  $-5^{\circ}\text{C}$ . Наиболее теплая мерзлота приурочена к пониженным частям долин и межгорных котловин, где рядом с водоемами мерзлые грунты имеют температуру  $-2\dots-3^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, градиент изменения температуры мерзлых грунтов с высотой составляет  $0,5\dots0,7^{\circ}\text{C}$  на 100 м (*Шевелева, 1967(б)*).

Широкий спектр различных по генезису и составу отложений в пределах Норильской долины обуславливает неоднородность криогенного строения верхней толщи мерзлых пород. Для глинистых грунтов (имеющих сетчатую и косослоистую криотекстуру) характерна высокая степень льдонасыщенности (от 25 до 80%), в верхних горизонтах суммарная мощность ледяных включений превышает мощность грунтовых прослоев. С глубиной происходит постепенное уменьшение льдонасыщенности, на глубинах 14-17 м происходит полное исчезновение ледяных включений. Для аллювиальных суглинков характерна слоистая или сетчатая криотекстура и льдистость от 50 % до 70 %. Пески аллювиального происхождения отличаются меньшей льдистостью и массивной криогенной текстурой. Наибольшей льдистостью (до 90%) в пределах Норильской долины обладают торфы. Мощности СТС в рыхлых отложениях колеблются от 0,3-0,8 м для торфов до 1 и 1,2 м для суглинков и песков соответственно. В горных и предгорных районах мощность СТС принимает значения от 0,3-1 м в вершинных частях до 2 и более метров в предгорьях (*Шевелева, 1967(б); Демидюк, 1989(б)*).

В регионе достаточно широко распространены пластовые залежи подземного льда. Например, в районе мкрн. Талнах пластовые льды встречаются на каргинско-сартанской озерно-аллювиальной равнине, имеют мощность 10-15 м и выражены с поверхности буграми, имеющими преимущественно северо-восточную ориентировку (т.е. совпадающими с направлением тектонической трещиноватости) (*Демидюк, 1989(а)*). Наличие пластовых, полигонально-жильных и сегрегационно-

инъекционных льдов привело к формированию западинно-грядового (местами – западинно-бугристого) рельефа на Вальковской террасе, где в настоящее время очень широко развит термокарст.

В пределах Норильского района отмечается действие ряда криогенных процессов. Широко распространен термокарст (рис.4.4.1); бугры пучения, в том числе с ледяным ядром (рис.4.4.2); пятна-медальоны (рис.4.4.3); склоновые криогенные процессы.



*Рис. 4.4.1. Термокарстовое озеро в районе турбазы «Голубые озёра», НПП (фотография Задорожной Н., июль 2015)*



*Рис. 4.4.2.А Вершина бугра пучения в районе санатория «Валёк», НПП (фотография Тополевой А., июль 2015)*



*Рис. 4.4.2.Б Ледяное ядро в теле бугра пучения в районе санатория «Валёк», НПП (фотография Тополевой А., июль 2015)*



*Рис. 4.4.3. Пятна-медальоны в районе мкрн. Талнах (фотография автора, сентябрь 2015 г.)*

## ГЛАВА 5. ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ В ОПОРНЫХ РЕГИОНАХ

### 5.1. Численное моделирование температурных и инженерно-геокриологических характеристик<sup>4</sup>

В целях оценки устойчивости транспортных объектов в период эксплуатации в условиях изменяющихся климатических параметров было проведено численное моделирование температурных характеристик мерзлых грунтов в основаниях объектов, их инженерно-геокриологических параметров.

Для Ванкорского месторождения при помощи программы QFrost была рассчитана динамика температурного поля мерзлого грунта при повышении температуры приземного воздуха. Полученные результаты показали, что применяемые меры по термостабилизации грунтов эффективны и предотвращают отепление верхней толщи мерзлых грунтов, что позволяет обеспечить устойчивость объектов в ходе периода эксплуатации (*Юров, Гребенец, 2018*).

Для типичных геокриологических характеристик в опорных регионах было рассчитано изменение мощности СТС – важного для устойчивости транспортных объектов параметра мерзлой толщи – к 2050 г. Для расчета использовались тренды роста температуры приземного воздуха и температуры мерзлоты на уровне нулевых годовых колебаний, предложенные NCCS (для арх. Шпицберген), IPCC и А.В. Павловым (*Павлов, 2008*). Исходные данные и полученные результаты представлены в таблице 5.1.

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

---

<sup>4</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

*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.

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 прогнозом NCCS об увеличении глубины слоя сезонного протаивания в районе г. Лонгйир на 1 м к 2100 г. (NCCS, 2019). Наименьшее изменение мощности СТС отмечается в Воркутинском промышленном районе, где прогнозируемый 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 произошло достаточно неоднородно, прирост глубины активного слоя отличается в 1,4 раза.

Таблица 5.1								
Прогнозное изменение мощности СТС в опорных регионах под воздействием увеличения температур наружного воздуха и грунта с 2019 по 2050 г.								
№	Регион	Грунт в верхней части разреза	$T_0$ (°C)	$\rho_{df}$ (т/м <sup>3</sup> )	$W_{tot}$ (д.е.)	Тренд изменения температуры воздуха/грунта (°C/год)	Относительное изменение мощности СТС (%)	Изменение мощности СТС (см)
1	Воркута	Суглинок льдистый	-1	1,9	0,37	+0,026 / +0,018	8,6	14
2		Суглинок оторфованный	-1	1,77	0,22	+0,026 / +0,018	9	19
3	МНП «Ванкор-Пурпе»	Суглинок	-1,5	1,54	0,35	+ 0,04 / + 0,025	9,4	16
4	Норильск	Суглинок	-3,2	1,6	0,3	+0,05 / +0,02	10,3	19
5	Шпицберген	Глина	-3,5	1,8	0,6	+0,1 / +0,04	17,2	14,6
$T_0$ – температура мерзлых пород на уровне нулевых годовых колебаний температур $\rho_{df}$ – плотность скелета грунта $W_{tot}$ – суммарная влажность мерзлого грунта								

Исходя из рассчитанных изменений мощности активного слоя мерзлых грунтов, был проведен расчет осадки грунтов при оттаивании, как одной из наиболее распространенных причин деформации объектов транспортной инфраструктуры, в особенности, дорожного покрытия. Результаты расчета представлены в таблице 5.2.

Моделирование осадки оттаивающего грунта при увеличении показало, что сильнее всего осядет оторфованный суглинок из Воркутинского района (где увеличение мощности СТС на 9% повлекло за собой осадку грунта на 2,7 см) и сильнольдистые глины морских террас на архипелаге Шпицберген, где осадка грунта при увеличении СТС составила 3,3 см. Данная модель соответствует натурным наблюдениям, так, в Воркуте на бул. Пищевиков наблюдаются обширные просадки дорожного покрытия, в основании которого лежат сильнольдистые озерные суглинки. Аналогичные просадки дорожного покрытия были зафиксированы при проведении лазерного сканирования в г. Лонгйир, где отмечаются сильные (7 и более см глубиной) просадки дорожного покрытия в местах подтопления дорожной насыпи. Ключевым моментом, который стоит отметить, является неравномерность осадок грунтов даже в пределах одного региона, что хорошо видно на примере двух типов грунтов в районе Воркуты, где осадка двух различных по влажности и плотности суглинистых грунтов отличается практически в 2,5 раза.

Прогноз осадки грунта при увеличении мощности СТС в опорных регионах с 2019 по 2050 г.								
№	Регион	Грунт в верхней части разреза	i (д.е)	$\rho_{df}$ (т/м <sup>3</sup> )	$W_{tot}$ (д.е.)	Тренд изменения температуры воздуха/грунта (°С/год)	Относительное изменение мощности СТС (%)	Осадку грунта при оттаивании (см)
1	Воркута	Суглинок льдистый	н/д	1,9	0,37	+0,026 / +0,018	8,6	1,1
2		Суглинок оторфованный	н/д	1,77	0,22	+0,026 / +0,018	9	2,7
3	МНП «Ванкор-Пурпе»	Суглинок	0,21	1,54	0,35	+ 0,04 / + 0,025	9,4	1,31
4	Норильск	Суглинок	0,3	1,6	0,3	+0,05 / +0,02	10,3	1,5
5	Шпицберген	Глина	0,5	1,8	0,6	+0,1 / +0,04	17,2	3,3
i – льдистость мерзлого грунта $\rho_{df}$ – плотность скелета грунта $W_{tot}$ – суммарная влажность мерзлого грунта								

Неравномерность осадок грунтов при оттаивании является одной из ключевых проблем на линейных объектах в криолитозоне. В связи с большой мерзлотно-фациальной изменчивостью в криолитозоне, отмеченной еще А.И. Поповым (Попов,

1967), на относительно малых расстояниях (иногда 1-2 м) и при весьма различной мощности (от нескольких см до метров), т.е. большом мерзотно-литологическом разнообразии, глубины сезонного оттаивания могут отличаться в 1,5-2 раза, что безусловно будет проводить к неравномерной осадке при формировании СТС и весьма различным проявлениям пучения при его промерзании. Таким образом, неравномерность величин осадок и пучения приводит к быстрому деформированию дорожного полотна и трубопроводных систем.

Также, с учетом смоделированного изменения мощности СТС под действием трендов к потеплению климата, был выполнен расчет увеличения касательных сил морозного пучения на модельную опору надземного трубопровода, представляющую из себя металлическую сваю круглого сечения с диаметром 320 мм (табл.5.3).

Таблица 5.3								
Прогноз увеличения касательных сил морозного пучения при увеличении мощности СТС в опорных регионах с 2019 по 2050 г.								
№	Регион	Грунт в верхней части разреза	i (д.е)	$\rho_{df}$ (т/м <sup>3</sup> )	$W_{tot}$ (д.е.)	Тренд изменения температуры воздуха/грунта (°С/год)	Относительное изменение мощности СТС (%)	Прирост касательных сил морозного пучения (%)
1	Воркута	Суглинок льдистый	н/д	1,9	0,37	+0,026 / +0,018	8,6	6,5
2		Суглинок оторфованный	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	Шпицберген	Глина	0,5	1,8	0,6	+0,1 / +0,04	17,2	15,4
i – льдистость мерзлого грунта $\rho_{df}$ – плотность скелета грунта $W_{tot}$ – суммарная влажность мерзлого грунта								

Для вмороженных свайных фундаментов опор надземной части МНП «Ванкор-Пурпе» было проведено численное моделирование снижения несущей способности вмороженных свай при оттаивании мерзлой толщи при потеплении климата (табл.5.4). Для расчета было выбрано два участка с суглинистым грунтом (1 и 3) и участок с песчаной толщей (2).

В результате отепления мерзлого основания на 1° С несущая способность свай снизилась примерно на 30 % на участках суглинистого грунта и на 19% - на участке с песчаной толщей. Наиболее негативный прогноз наблюдается для участка №1, что можно объяснить отсутствием с поверхности торфяного горизонта, являющегося достаточно хорошим теплоизолятором. Именно поэтому на первом участке наблюдается значительное увеличение мощности СТС (на 0,5...1 м против 0,1...0,2 м на участках с торфяным горизонтом) (Юров, Гребенец, 2019). Расчеты снижения несущей способности также говорят о неравномерности изменений геокриологических характеристик в пределах одного региона, что может представлять большую опасность для линейных объектов транспортной инфраструктуры.

Результаты прогноза несущей способности свайного фундамента с 2017 по 2050 г.					
№ 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

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.

## 5.2. Сравнительный анализ проблем устойчивости транспортных объектов в опорных регионах<sup>5</sup>

Полевые наблюдения и анализ литературных публикаций позволили определить основные причины деформаций линейных объектов и комплекс опасных экзогенных процессов, угрожающих транспортной инфраструктуре, в выбранных опорных регионах.

Архипелаг Шпицберген является «лидером» по скорости потепления среди выбранных нами районов, тренд к увеличению температуры воздуха в Лонгйире за последние 30 лет составил  $0,101^{\circ}\text{C}$  в год (NCCS, 2019), а к 2080-2100 рядом моделей (IPCC, 2014; NCCS, 2019) прогнозируется увеличение среднегодовой температуры воздуха на  $3...4^{\circ}\text{C}$ . Вслед за изменением атмосферных параметров происходит и рост температуры мерзлоты на уровне нулевых годовых колебаний, текущий тренд отепления составляет  $0,04^{\circ}\text{C}$  в год. Однако, на Шпицбергене для мерзлоты характерны очень низкие температуры (от  $-2,6^{\circ}$  до  $-5,2^{\circ}\text{C}$  по данным измерений на стационарах в непосредственной близости от г. Лонгйир), поэтому уровень деформированности линейных систем в настоящее время относительно не высок (Юров, 2021).

Транспортные объекты в г. Лонгйир представлены автомобильными дорогами и взлетно-посадочной полосой аэропорта Свальбарда. Для отсыпки дорожных насыпей используется порода из отвалов угольной промышленности, показывающая приемлемую устойчивость к размыву и низкую пучинистость.

Численное моделирование основных инженерно-геокриологических параметров мерзлых грунтов к 2050 г., выполнявшееся на основе прогнозов NCCS,

---

<sup>5</sup>При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

*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)

*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.

*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 изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2022. — С. 243-251.

показало, что существующие тренды климатических изменений представляют значительную угрозу для объектов инфраструктуры на Шпицбергене. Среднее расчетное значение увеличения мощности активного слоя в типичных для Лонгйира литологических условиях составило 15-17 см. В относительных показателях прирост мощности активного слоя составит 17-20 %. Полученный результат, в целом, соотносится с прогнозом NCCS об увеличении глубины активного слоя в районе г. Лонгйир на 1 м к 2100 г. (NCCS, 2019), а также с другими расчетными моделями (Instanes, 2016). Изменение мощности активного слоя в сторону увеличения и рост температуры мерзлых грунтов негативно скажется на несущей способности вмороженных свайных фундаментов, широко применяемых на Шпицбергене. Это обусловлено снижением прочности смерзания мерзлого грунта с поверхностью свай, происходящим при увеличении температуры, и уменьшением поверхности смерзания. Кроме того, за счет увеличения активного слоя произойдет увеличение касательных сил морозного пучения, воздействующих на свайные фундаменты.

Наши расчеты показали, что касательные силы морозного пучения в среднем вырастут на 15-17 % за счет увеличения мощности активного слоя. Такой ощутимый прирост сил пучения может негативно сказаться на устойчивости относительно легких жилых зданий, построенных из дерева (которые составляют значительную часть жилого фонда Лонгйира). В совокупности с уменьшением сил смерзания свайных фундаментов из-за роста температур и уменьшения поверхности смерзания, это может привести к развитию неравномерных деформаций пучения и повреждению зданий. Однако, наибольшую опасность развитие пучения представляет для малонагруженных объектов: дорог и трубопроводов. Для линейных объектов ключевой проблемой является неравномерность развития процесса пучения по протяженности сооружения. Эта неравномерность обусловлена большой мерзлотно-фациальной изменчивостью.

Обследование основных автомобильных дорог на территории Лонгйира при помощи лазерного сканирования выявило многочисленные деформации, вызванные неравномерной осадкой грунтов при оттаивании. Однако, помимо возникновения неравномерных осадок мерзлых грунтов при оттаивании (вызванных в том числе климатическими изменениями), значительную роль играет техногенное

воздействие. Нами был зафиксирован ряд просадок обочин дорог и дорожного покрытия, причиной которых стало антропогенное подтопление (рис. 5.1). Глубина данных просадок составляет в среднем 7-20 см (рис. 5.3). Подтопление возникает в результате недостаточной проработки водопропускных сооружений под насыпями дорог. Водопропускные трубы (рис. 5.1) расположены несколько выше уровня земной поверхности, что препятствует полному стоку вод весеннего снеготаяния. Кроме того, через водопропускные трубы проложены инженерные коммуникации, которые препятствуют стоку воды и способствуют формированию засоров из минеральных частиц и льда. Застой воды вдоль насыпей дорог приводит к отеплению мерзлых грунтов в основании насыпей и может стать причиной активизации процесса термокарста. Обследование дорожного полотна при помощи лазерного сканирования (*Iurov, Marchenko, 2019*) показало, что в местах подтопления формируются очаги осадки дорожного покрытия и грунта на обочинах (*Корнев и др., 2022*).

Другим примером активизации опасного криогенного процесса в результате человеческой деятельности может служить формирование сети морозобойных трещин на поверхности взлетной полосы аэропорта Лонгйира (*Iurov, Marchenko, 2021*). Сеть морозобойных трещин (рис. 5.4, 5.5) была выявлена в результате визуального обследования и лазерного сканирования поверхности взлетной полосы. Обнаруженные полигоны имеют преимущественно четырехугольную форму с размером сторон порядка 7-12 м. Причиной их формирования стало, вероятно, переохлаждение грунтового основания взлетной полосы в зимний период, вызванное очисткой поверхности от снега. Возрастают амплитуды изменения температур грунтов в течение года, что приводит к активизации процесса морозобойного растрескивания (*Watanabe et al., 2013*).



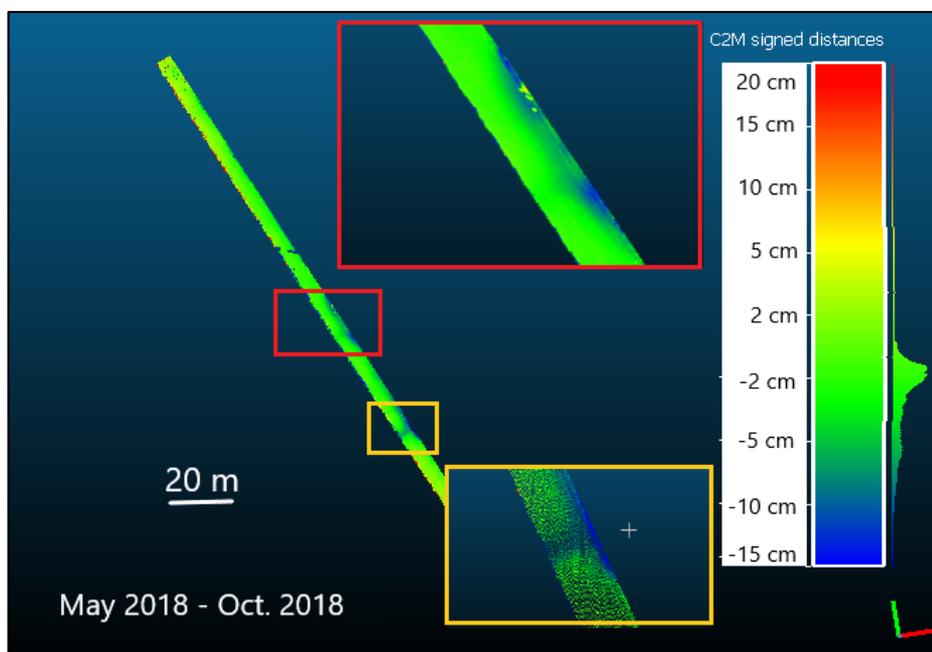
*Рис. 5.1 Подтопление вдоль насыпей дорог на Шпицбергене, вызванное недостаточной проработанностью водопропускных сооружений (фотографии автора, май 2018 г.)*



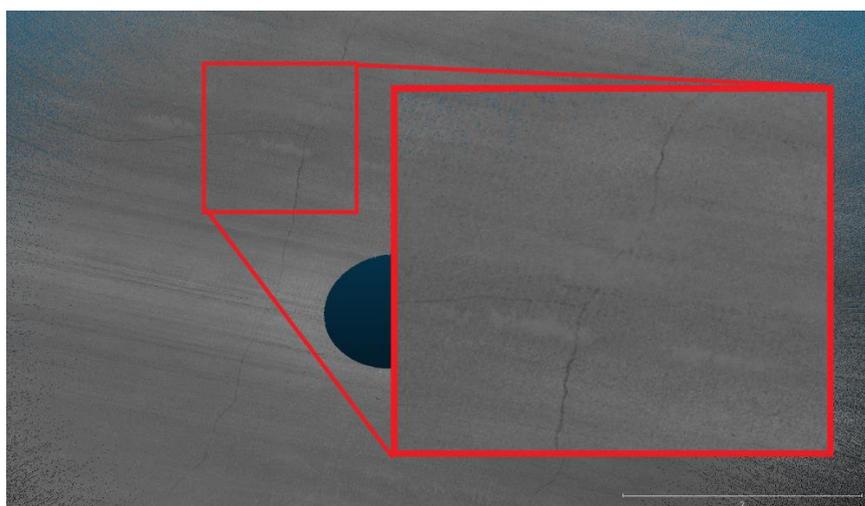
*Рис. 5.2. Водопропускная труба, совмещенная с пропуском санитарно-технических коммуникаций под насыпью дороги в г. Лонгйир (фотография автора, май 2018 г.)*

ВПП аэродрома Свальбарда также испытывает на себе негативное влияние антропогенного подтопления. В ходе лазерного сканирования на поверхности полосы было выявлено крупное поднятие в юго-западной части, высота которого относительно краев полосы достигает 6 м (рис. 5.6.). В результате этой деформации произошло изменение поперечного профиля поверхности ВПП. Формирование этого повышения произошло на участке полосы, вдоль которого происходит регулярное подтопление в период весеннего снеготаяния, вызванное недостаточной пропускной способностью гидротехнических сооружений, обеспечивающих пропуск двух водотоков под насыпью. О повышенном увлажнении этой зоны свидетельствует, в частности, широкое распространение на ней влаголюбивой растительности (пушицы). В результате интенсивного промерзания очищаемой от

снега полосы, в насыпи происходит накопление льда за счет миграции влаги к фронту промерзания, что приводит к росту специфического природно-техногенного бугра пучения.



*Рис.5.3. Осадки дорожного покрытия и грунта на обочине дороги, вызванные подтоплением вдоль насыпи, зафиксированные при сравнении разновременных сессий сканирования*



*Рис. 5.4. Морозобойные трещины, выявленные в результате лазерного сканирования*



Рис. 5.5. Морозобойные трещины на поверхности ВПП (фотография автора)

Горный характер местности на Шпицбергене обуславливает активное действие склоновых процессов. Существующие тренды изменений климата могут привести к их активизации, что представляет угрозу для инфраструктуры. Увеличение температуры верхних горизонтов мерзлых пород и мощности активного слоя является провоцирующим фактором для формирования криогенных оползней и солифлюкции (рис 5.7).

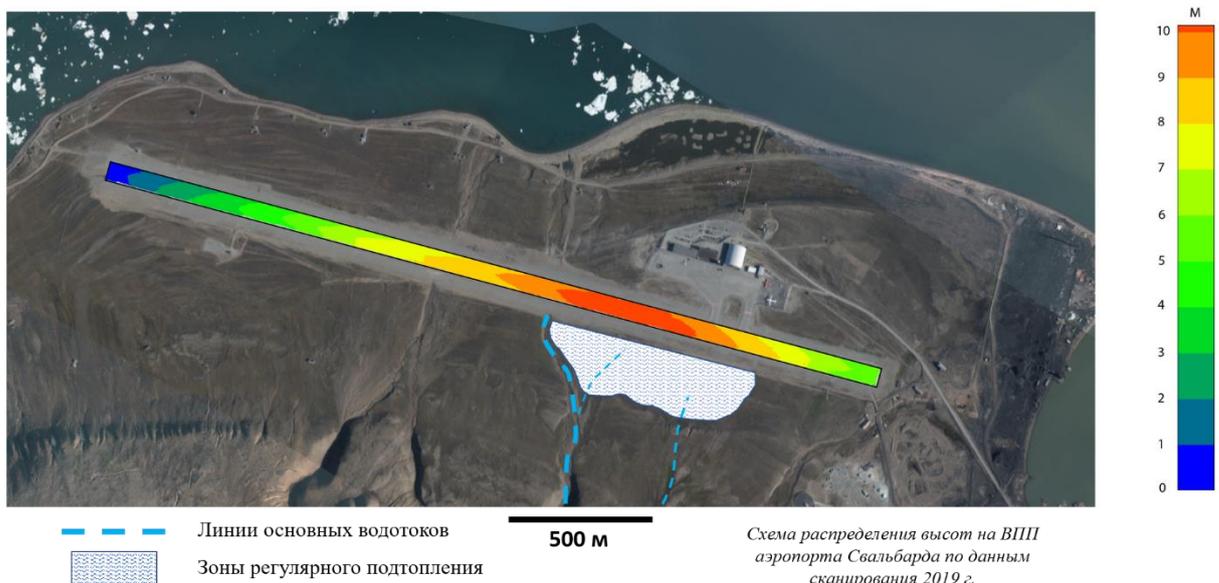


Рис. 5.6. Крупная деформация поверхности ВПП аэропорта Свальбарда, выявленная по результатам лазерного сканирования в октябре 2019 г. (подложка – аэрофотоснимок [toposvalbard.no](http://toposvalbard.no))

Активизация этих процессов связана с уменьшением прочности мерзлых грунтов при повышении температуры, ростом их пластичности. Помимо непосредственно склоновых процессов на Шпицбергене отмечается нарастание лавинной активности. Так, в декабре 2015 года произошел сход крупной лавины, которая разрушила 11 домов. Более 20 человек пострадали (*Indreiten, Svarstad, 2016*). Следующая лавина сошла на территорию города 21 февраля 2017 года на территорию, были разрушены два здания. Однако, в настоящее время должной инженерной защиты объектов инфраструктуры в окрестностях города от воздействия лавин не существует.

Все населенные пункты архипелага имеют прибрежное расположение, что делает их особенно уязвимыми к активизации термоабразии, темпы которой значительно выросли в начале 21 века: по данным P. Zagorski (*Zagorski et al., 2015*) скорость отступления берегов на всех стационарах за период 1991-2011 гг. выше, чем за 1960-1990 гг. Активизация данного процесса во многом обусловлена снижением ледовитости моря в зимний период, что также является следствием повышения зимних температур и сокращения зимнего периода. Процесс термоабразии представляет большую угрозу как для портовой инфраструктуры (которая является во многом залогом нормального существования поселков на архипелаге), так и для ряда дорог, проходящих вдоль береговой линии (рис 5.8).



Рис. 5.7. «Пьяные» сваи на склоне в г. Лонгйир – результат действия солифлюкции (фотография автора)



*Рис. 5.8. Разрушение берега в результате действия процесса термоабразии, г. Лонгйир (фотография автора)*

В последние годы на Шпицбергене произошла активизация эрозионных процессов (*Jaskólski et al., 2017*). Это обусловлено ростом стока с ледников, площадь и объемы которых заметно сокращаются в последние годы. Эта тенденция также связана с современными трендами к потеплению климата. Развитие эрозии мерзлых пород может представлять существенную опасность для объектов инфраструктуры региона, в частности, для мостовых переходов линейных объектов через водотоки.

На территории Воркутинского района, где тренды к изменению температур воздуха и мерзлых грунтов не велики относительно Шпицбергена и территории Ванкорского месторождения (увеличение температур на  $0,026^{\circ}$  и  $0,018^{\circ}$  С для воздуха и грунта, соответственно), отмечается максимальный уровень деформированности объектов линейной инфраструктуры. На территории города фиксируются обширные осадки грунтов под дорожным покрытием, вызванные деградацией высокотемпературных сильнольдистых суглинистых отложений (наиболее обширные деформации дорожного покрытия наблюдаются на бульваре Пищевиков (рис.5.9 А, Б)). Помимо деформаций дорожного покрытия, наблюдаются просадки опор надземных трубопроводов (на бул. Пищевиков (рис.5.10 А, Б) и в районе шахты Воркутинская (рис.5.11)), вызванные резким снижением несущей способности оттаивающего грунта (*Юров, 2021*).



*Рис.5.9. Просадки дорожного покрытия на бул. Пищевиков, г Воркута (фотографии автора, август 2018 г.)*

Практически на всей территории города отмечаются деформации дорожного покрытия, вызванные отеплением грунтовых оснований дорог за счет теплового воздействия санитарно-технических коммуникаций подземного заложения (рис.5.12).

Как видно, на территории г. Воркута наблюдаются массовые деформации транспортных объектов, а также зданий и сооружений, что не соотносится с достаточно слабыми трендами к потеплению климата в природных условиях. Это можно объяснить тем, что на территории города ключевым фактором изменения как микроклиматических, так и геокриологических характеристик является антропогенное воздействие.



*Рис.5.10. Просадка опоры надземного трубопровода на бул. Пищевиков (фотографии автора, август 2018 г.)*



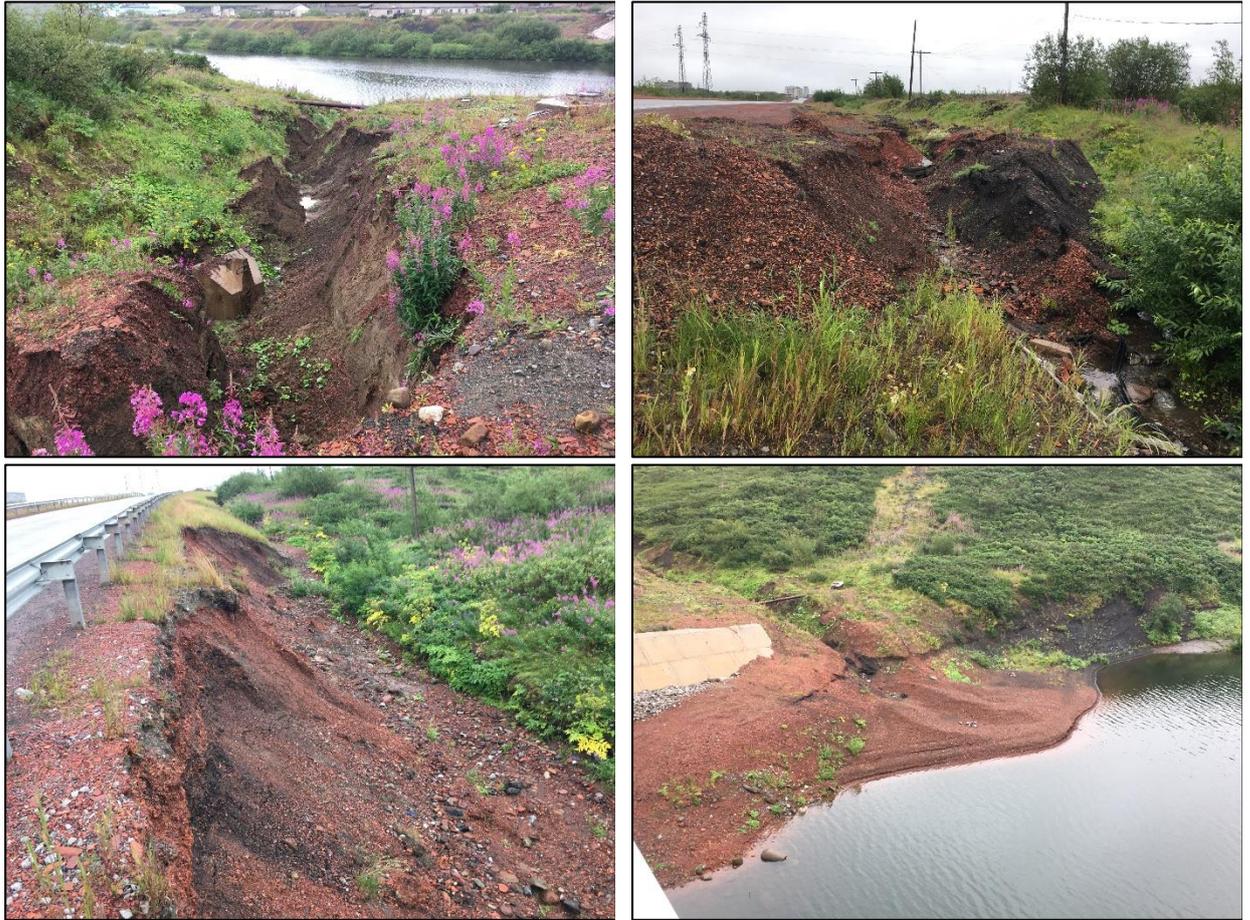
*Рис.5.11. Просадка опоры трубопровода в районе шахты Воркутинская (фотография автора, август 2018 г.)*



*Рис.5.12. Просадка грунта вокруг коллектора санитарно-технических коммуникаций. (фотография автора, август 2018 г.)*

Деградация высокотемпературных мерзлых грунтов в г. Воркута обусловлена изменением естественных условий теплообмена атмосфера-поверхность (удаление растительных покровов, в первую очередь, мохового; перераспределение снега и формирование снегоотвалов при снегоочистке и т.д.) и формированием «острова тепла» на территории города (Юров, 2021).

Еще одной проблемой транспортной инфраструктуры на территории Воркутинского района является использование в качестве материала для насыпей автомобильных дорог перегоревшей породы из отвалов. Подробные исследования антропогенного рельефа на территории Воркутинского района (Еременко и др., 2021) показывают, что подобный материал, состоящий преимущественно из дресвы и щебня, применяется в большинстве техногенных подсыпок и является наиболее распространенным типом антропогенных отложений. Этот материал показал себя крайне неустойчивым к размыву, например, рядом с мостом через р. Воркута у шахты «Воркутинская» размыв сложенной перегоревшей породой насыпи привел к формированию мощного эрозионного вреза (рис.5.13. А, Б), размыву обочины дороги (рис. 5.13.В) и выносу материала насыпи в р. Воркута (рис.5.13.Г). К таким результатам, помимо неподходящего для формирования насыпи материала, привели и нарушения при строительстве: откос насыпи не задернован и не укреплен георешетками.



*Рис. 5.13. Формирование эрозионного вреза в насыпи дороги к шахте «Воркутинская» (фотографии автора, август 2018 г.)*

Полевые исследования состояния линейных техногенных систем ЯНАО выявили значительное влияние на стабильность этих объектов не только принятых инженерно-технических решений, но, главным образом, активизации опасных криогенных процессов. Термоэрозия, термокарст, морозное пучение в сезонно-талом слое являются основными причинами деформирования надземных трубопроводов (Толманов и др., 2019).

Сложный характер носят нарушения в состоянии авто- и железных дорог: наблюдаются многочисленные волнообразные деформации (рис 5.14, 5.15) дорожных покрытий, вызванные неравномерным пучением и осадкой в слое сезонного оттаивания. Кроме того, на автомобильных дорогах региона были отмечены многочисленные (рис 5.16) морозобойные трещины, возникающие в результате переохладения тела дорожной насыпи в зимнее время. Еще одной существенной проблемой является оползание частей дорожного полотна по краям дороги в местах скопления воды вдоль насыпей, обусловленных нарушением

естественных путей стока поверхностных и грунтовых вод при строительстве дорожных насыпей. Наиболее критичная обстановка отмечается на участках мостовых переходов через реки и ручьи на дорогах местного значения: отсутствие систем термостабилизации в совокупности с термоэрозией по неустойчивым к размыву пылеватым грунтам приводит к деформациям и разрушению таких конструкций (рис. 5.17).



*Рис. 5.14 Волнообразные деформации на дороге Лабитнанги-станция Обская (фотография автора)*



*Рис. 5.15 Волнообразные деформации на железной дороге Обская-Бованенково в районе р. Щучья (фотография автора)*

Анализ устойчивости транспортных объектов Ванкорской группы месторождений и МНП «Ванкор-Пурпе» показал, что, не смотря на достаточно высокие тренды к увеличению температур воздуха и мерзлого грунта (тренды к потеплению имеют большие значения только на арх. Шпицберген), линейные объекты месторождения находятся в стабильном состоянии и не испытывают сильных деформаций.



*Рис. 5.16 Растрескивание дорожного покрытия на дороге Салехард-Аксарка (фотография автора)*



*Рис. 5.17 Аварийный мостовой переход через р. Харбей (фотография В.А. Федина)*

Вдоль трассы МНП, внутрипромысловых трубопроводов и дорог наблюдаются действие экзогенных процессов, представляющих опасность для техногенных объектов: термокарст (рис.5.18), морозное пучение (рис.5.19), морозобойное растрескивание, заболачивание, подтопление опор трубопровода (рис.5.20), эрозионные процессы (рис.5.21) и т.д. Максимальное развитие заболачивания и подтопления отмечается на участке надземной прокладки МНП «Ванкор-Пурпе». Воздействием эрозионных процессов затронут газопровод «Сузун-Ванкор», сооруженный наземным способом, где защитная обваловка трубы во многих местах полностью размыта (Юров, 2021).



*Рис. 5.18. Термокарстовые озера вдоль трассы МНП (фотография автора, июль 2017 г.)*



*Рис. 5.19. Бугор пучения рядом с трассой МНП (фотографии Зенкова Е.)*



*Рис. 5.20. Подтопление опорной конструкции МНП (фотография автора, сентябрь 2017 г.)*

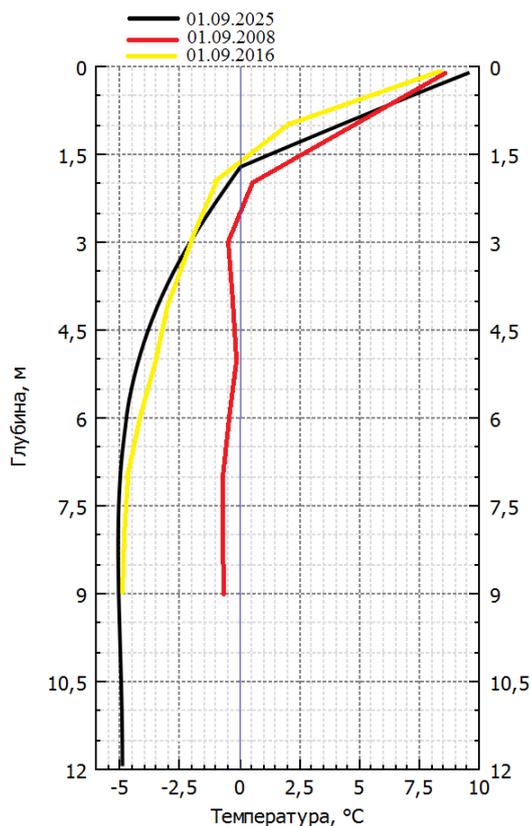


*Рис. 5.21. Развитие эрозии в непосредственной близости от опор МНП (фотография автора, июль 2017 г.)*

Но тренды к повышению температур воздуха и отеплению мерзлой толщи, фиксирующиеся на данной территории в настоящее время ( $0,04^\circ$  и  $0,025^\circ$  С для воздуха и грунта соответственно) и прогнозируемые в дальнейшем не оказывают негативного воздействия на устойчивость транспортных систем. Это связано, в первую очередь, с активным применением систем термостабилизации грунтов не только на площадках, но и вдоль трасс трубопроводов (Юров, 2021). Численное моделирование температурного поля грунта с учетом трендов к увеличению температур воздуха и использования СОУ показало, что отепление грунтового основания опор надземного трубопровода происходить не будет (рис. 5.22).

Однако, визуальное обследование трассы МНП выявило плохое состояние СОУ (рис.5.23) (происходит выпучивание термостабилизаторов, их коррозия, разрыв защитных гильз, на некоторых СОУ отсутствуют защитные колпачки и т.д.). Было проведено численное моделирование несущей способности вмороженного свайного фундамента (такой тип фундамента используется на участках надземной прокладки МНП «Ванкор-Пурпе»), которое показало, что в случае прекращения работы систем термостабилизации современные тренды к увеличению температур воздуха и грунтов могут привести к колоссальным потерям несущей способности (порядка 30%) в ближайшие 30 лет (Юров, Гребенец, 2019; Юров, 2021).

В Норильском промышленном районе, где фиксируются наименьшие тренды к увеличению температур воздуха и грунта ( $0,01^\circ$  и  $0,005^\circ$  С соответственно), на транспортные объекты действует целый комплекс опасных процессов. Большая расчлененность рельефа предрасполагает к развитию целого комплекса склоновых (в том числе криогенных) процессов. Один из них – формирование на склонах г. Рудная техногенного каменного глетчера (ТКГ), материалом для которого послужили отвалы рудника «Медвежий ручей». Движение ТКГ вниз по склону (рис. 5.24) привело к разрушению водовода, автомобильной дороги (Гребенец и др, 2019).



*Рис.5.22. Графики распределения температуры грунта к 2025 г. по данным численного моделирования температурного поля*



*Рис.5.23. Выпучивание COY и разрыв защитных гильз термостабилизаторов на трассе МНП (фотография автора, сентябрь 2017 г.)*

Грунтовые дороги и откосы насыпей крупных автодорог подвергаются разрушению процессом солифлюкции. В условиях горного рельефа (Талнахский район, рудник Медвежий ручей) происходит сход лавин, которые негативно влияют на дорожные системы. Особенную опасность представляют сходящие в конце весеннего периода (в апреле-мае) водо-ледово-снежные лавины. Для защиты автомобильных дорог под наиболее крупными и активными лавинными очагами производится строительство противолавинных дамб (рис.5.25) (Юров, 2021).

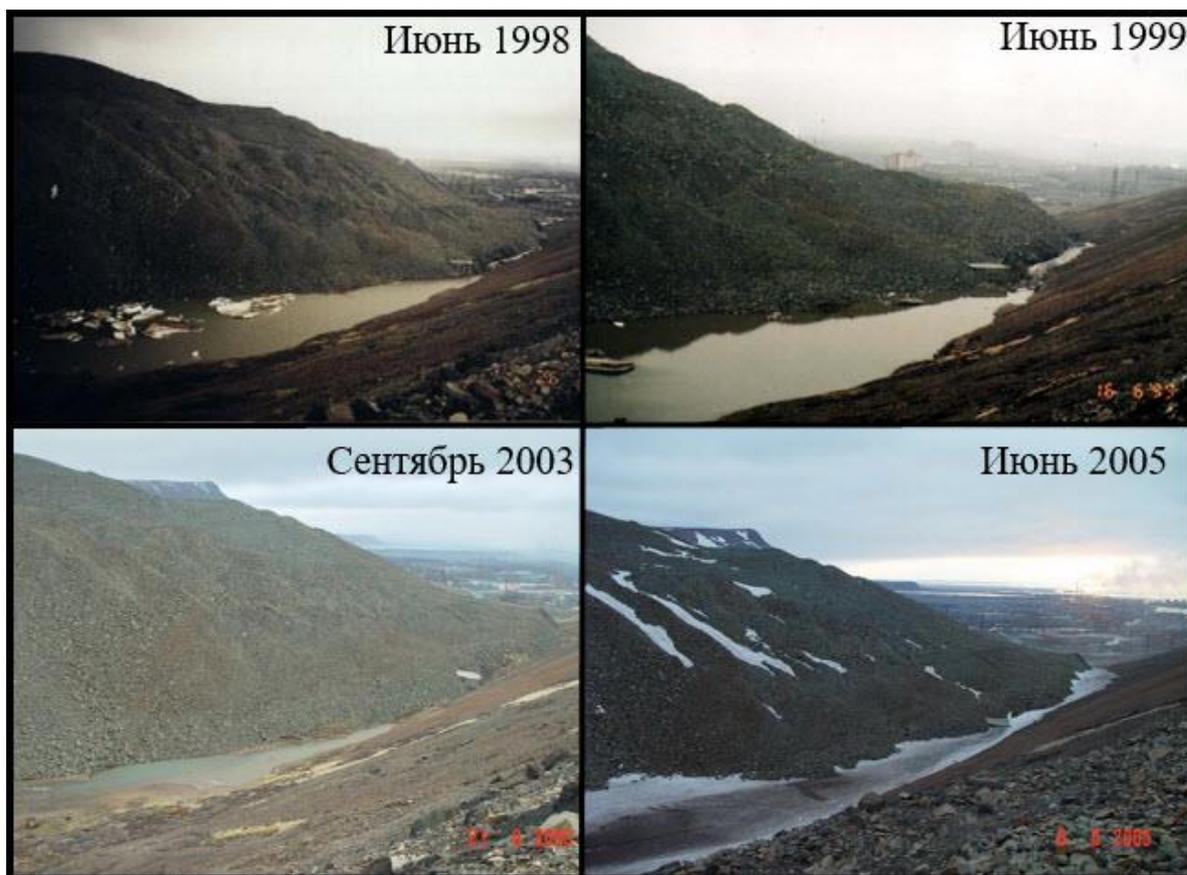


Рис. 5.24. Смещение языка каменного глетчера вниз по склону горы Рудная (фотографии В.И. Гребенца)

В силу суровости климата НПр (в первую очередь, низких зимних температур) объекты транспортной инфраструктуры подвергаются воздействию морозобойного растрескивания (рис.5.25) и морозной деструкции материалов (Гребенец и др., 2018; Grebenets et al., 2019). Эти процессы можно назвать отчасти техногенно стимулированными, так как необходимое для их развития переохлаждение поверхности дорожного покрытия достигается в результате постоянной снегоуборки в зимний период (Юров, 2021).

Отмечается широкое развитие термокарста по сильнольдистым отложениям (таким как аллювиальные глины или суглинки) и при вытаивании пластовых льдов. Деформации, возникающие в результате действия этих процессов, могут проявляться как в виде непосредственной просадки дорожного покрытия (рис.5.27), так и откосов дорожных насыпей. Наиболее широко распространены на Вальковской равнине и трассе «Норильск-Дудинка», представляют опасность для транспортных объектов на территории Норильского района (Юров, 2021).



*Рис.5.25 Лавинный очаг в районе Талнаха, перекрытый лавинозащитной дамбой  
(фотография Губанова А., июль 2015 г.)*



*Рис.5.26. Образование морозобойной трещины на дорожном полотне в  
районе пос. Купец (фотография Толманова В., сентябрь 2017 г.)*



*Рис.5.27. Волнообразные просадки дороги к санаторию «Валёк» при вытаивании ледяных тел в грунтовом основании (фотография Толманова В., сентябрь 2018 г)*

Еще одним негативным криогенным явлением, представляющим угрозу для линейных объектов в Норильском районе, является наледеобразование. Формирование на дорогах наледей часто происходит в результате прорывов водоводов, выполненных рядом с дорогами подземным способом. Однако, наледи могут иметь природно-техногенный характер. Так, в Кайеркане и Талнахе образование природно-техногенных наледей отмечается на дорогах, проложенных по склонам. В результате очистки дорожного покрытия от снега под дорожным полотном формируется мерзлотный барьер для дренирования грунтовых вод вниз по склону, что приводит к образованию наледи непосредственно над дорогой. Крупнейшая в НПР (длиной до 120 – 150 м) наледь такого типа образуется каждую зиму на трассе, связывающей мкрн. Талнах с рудниками «Октябрьский» и «Таймырский» (рис.5.28).



*Рис.5.28. Формирование природно-техногенной наледи (фотография В.И. Гребенца)*

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 макроуровне проблемы устойчивости объектов транспортной инфраструктуры определяются пространственными различиями географических условий: климатических, геоморфологических, мерзлотно-литологических. Эти различия выражаются в

различной реакции мерзлых пород на неоднородные по регионам тренды климатических изменений, например, увеличение глубины сезонного оттаивания грунтов на и связанное с ним изменение сил морозного пучения на Шпицбергене будут в 2-2,5 раза больше, чем в Западном секторе криолитозоны России. Кроме того, региональные геоморфологические условия определяют разную степень активности в регионах опасных экзогенных процессов.

На локальном уровне (мезоуровне) на передний план выходят мерзлотно-литологические условия. Это обусловлено непрерывностью и большой протяженностью объектов транспортной инфраструктуры, которые делают их особенно уязвимыми к изменчивости параметров мерзлых грунтов. Численное моделирование показало, что в пределах одного региона к 2050 г. на фоне потепления климата снижение несущей способности свайных фундаментов в различных грунтовых условиях может отличаться в 1,5-2 раза, осадка грунтов – в 2,5 раза. На микроуровне выявлено ключевое значение в устойчивости транспортных объектов гидрологических и гидрогеологических условий, а также особенностей снегоотложения и искусственного перераспределения снега. Например, устойчивость отдельных участков автомобильных дорог на архипелаге Шпицберген нарушается, в первую очередь, за счет техногенного подтопления вдоль насыпей дорог.

### **5.3. Предлагаемая концепция организации мониторинга устойчивости транспортных объектов<sup>6</sup>**

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

---

<sup>6</sup>При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

*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 изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2022. — С. 234-242.

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.

**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. Важно учитывать, что применение систем охлаждения грунтов для поддержания температур в пределах проектных значений в случае протяженных объектов весьма затруднительно. В настоящее время сезонные охлаждающие устройства широко применяются на нефте- и газопроводах надземного заложения в криолитозоне России и зарубежных стран (например, на трассе Трансаляскинского нефтепровода), что обусловлено их конструктивными особенностями – возможностью установки термосвай рядом со свайными опорами или внутри полых металлических свай. Однако, на автомобильных и железных дорогах внедрение систем термостабилизации затруднительно из-за сплошности грунтового основания под насыпями дорог – искусственное охлаждение таких объемов грунта чрезвычайно дорого и трудоемко. В исследуемых регионах в случае дорожных систем термосвай применяются на относительно коротких участках мостовых переходов. Решением этой проблемы может служить внедрение «проветриваемых» насыпей по аналогии с Тибетской железной дорогой, однако, такие конструктивные решения также весьма дороги и не применимы на дорогах местного значения из экономических соображений.

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, формированию трещин отседания на дорожном покрытии.

**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 неоднородных деформаций дорожных покрытий, насыпей и трубопроводов уже через несколько циклов промерзания-оттаивания. Кроме того, мерзлотно-литологическое строение территории определяет комплекс опасных экзогенных процессов, оказывающих деструктивное воздействие на объекты транспортной инфраструктуры. Например, пылеватые породы севера Западной Сибири показывают очень низкую устойчивость к размыву, что приводит к широкому развитию процесса термоэрозии вблизи трасс транспортных объектов, а высокая льдистость вальковских суглинков является одной из главных причин возникновения массовых деформаций на участке автодороги Норильск-Талнах.

**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 объектов транспортной инфраструктуры. В криолитозоне эта проблема обостряется за счет формирования в теле дорожных насыпей мерзлого противифльтрационного ядра за счет усиления промерзания при очистке в зимний период дорожных покрытий от снега, выполняющего роль теплоизолятора. В результате вдоль насыпей автомобильных и железных дорог наблюдаются многочисленные области техногенного подтопления, провоцирующего деградацию мерзлых грунтов и активизацию термокарста. Именно техногенное подтопление вдоль дорожных насыпей можно считать основной причиной деформаций дорожного покрытия в г. Лонгйир. Кроме того, избыточное увлажнение за счет затруднения стока при строительстве насыпи ВПП аэропорта

Свальбарда привело к формированию бугра пучения с относительной высотой более 6 м в пределах полосы.

**Геоморфологические.** Рельеф территории является ключевым фактором при выборе площадок строительства инженерных объектов и трасс прокладки линейных объектов, а также выборе 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.

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. 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.

**Антропогенное воздействие.** Исследования установили, что значительное число деформаций на объектах транспортной инфраструктуры вызваны антропогенным воздействием: нарушением условий теплообмена между мерзлыми породами и атмосферой за счет удаления снежного и растительного покровов; изменением путей стока поверхностных и грунтовых вод; ошибками при проектировании объектов; нарушениями при строительстве и эксплуатации и др.

Важно отметить, что комбинация географических и геологических условий региона определяет конструктивные решения (например, типы прокладки трубопроводов), применяемые при строительстве объектов транспортной инфраструктуры. В свою очередь различные конструктивные решения оказывают различное влияние на мерзлые грунтовые основания и другие компоненты природной среды, приводит к активизации нетипичных для естественных условий. Например, на поверхности автомобильных дорог с твердым покрытием и ВПП в Западном секторе Арктики отмечается активное развитие морозобойного растрескивания, активизированного за счет зимнего переохлаждения грунтовых оснований.

В выбранных для исследования регионах воздействие различных геолого-географических факторов на устойчивость транспортных объектов имеет различный вклад. На архипелаге Шпицберген факторами, определяющими нарушения устойчивости транспортных объектов, являются широкое распространение сильнольдистых засоленных суглинистых отложений морских террас и крайне негативные тренды климатических изменений (порядка  $0,1^{\circ}$  C/год). Также на архипелаге отмечаются многочисленные деформации дорожного покрытия, вызванные застоем талых снеговых и поверхностных вод вдоль насыпей дорог, что обусловлено ошибками при проектировании водопропускных сооружений. На территории Воркутинского промышленного района большинство деформаций на транспортных объектах вызваны отеплением высокотемпературных льдистых

оторфованных суглинков, залегающих с поверхности. Высокая (порядка  $-0,5^{\circ}\text{C}$ ) температура верхней толщи мерзлых грунтов 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 отложений, подверженных активной термоэрозии, которая усиливается заметными трендами роста температуры воздуха. На территории Норильского промышленного района многочисленные деформации дорог и трубопроводов связаны с деградацией льдистых вальковских суглинков. Важно отметить, что деградационные тенденции проявляются в условиях очень слабых трендов к росту среднегодовой температуры наружного воздуха (не более  $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$  и вызваны, в первую очередь, отеплением зимнего периода и, следовательно, недостаточным охлаждением мерзлых пород. Кроме того, в районе Норильска сказывается достаточно высокая расчлененность рельефа, способствующая развитию опасных для транспортной инфраструктуры склоновых процессов. 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.

Выполненное численное моделирование показало, что при сохранении существующих трендов к росту температур наружного воздуха в высокоширотных регионах изменение инженерно-геокриологических характеристик мерзлых грунтов в различных по своим физико-географическим и литологическим условиям регионах будет происходить неравномерно. Увеличение мощности СТС к 2050 году происходит с наибольшей интенсивностью в низкотемпературных глинистых отложениях побережий Шпицбергена (отмечается рост СТС на 17-20%, что соответствует 15,4 см), но максимальные абсолютные значения нарастания глубины СТС (на 19 см к 2050 г.) прогнозируются в оторфованных суглинках Воркутинского района и на участках озерно-аллювиальных террас Норильской долины. Наиболее значительные осадки грунта в результате оттаивания отмечаются в сильнольдистых глинистых грунтах (в Лонгйире и Воркуте). При этом важно отметить, что минимальные расчетные значения осадки также фиксируются на территории

Воркуты, что еще раз подтверждает тезис об опасности неравномерного протекания процессов пучения и осадки.

Сделать общие достоверные выводы о ранжировании вклада перечисленных факторов в устойчивость объектов транспортной инфраструктуры не представляется возможным. Это обусловлено разномасштабностью, разнонаправленностью и асинхронностью природных и антропогенных воздействий, что дополнительно усложняется региональными особенностями. Кроме того, 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 надземного назначения. Однако, для дорог и ВВП аэродромов дополнительное охлаждение является негативным явлением, которое приведет к усилению процессов морозобойного растрескивания и морозной деструкции материалов покрытия.

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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Авакян А.А.* Изученность распространения и развития опасных экзогенных процессов и явлений и их воздействия на транспортные коммуникации горных стран (на примере Южного Кавказа и Центральной Азии). — Ереван: Гитутюн, 2021. — 148 с.
2. *Айбулатов Д.Н., Глазовская Т.Г., Гребенец В.И., Деркачева А.А., Сократов С.А., Толманов В.А., Турчанинова А.С., Хисматуллин Т.И., Школьный Д.И., Шныпарков А.Л.* Развитие транспортных сетей Сибири и Дальнего Востока с учётом опасных природных процессов и явлений. — М.: Перо, 2021. — 200 с.
3. *Александрова В.Д., Юрковская Т.К.* Геоботаническое районирование нечерноземья Европейской части РСФСР. — Л.: Наука, 1989. — 63 с.
4. *Алексеев В.Р.* Наледи плато Путорана. — Иркутск.: Изд-во института географии СО РАН, 2002. — 101 с.
5. *Алисов Б.П.* Климатические области и районы СССР. — М.: Географгиз, 1947. — 212 с.
6. *Алисов Б.П.* Климат СССР. — М.: Изд-во МГУ, 1956. — 547 с.
7. *Анисимов О.А., Жильцова Е.Л.* Об оценках изменений климата 20 и начала 21 веков по данным наблюдений на территории России // Метеорология и гидрология. — 2012. — С. 1-19.
8. *Анисимов О. А., Стрелецкий Д. А.* Геокриологические риски при таянии многолетнемерзлых грунтов // Арктика XXI век. Естественные науки. — 2015. — №.2(3). — С. 60-74.
9. *Балдина Е. А., Константинов П. И., Грищенко М. Ю, Варенцов М. И.* Исследование городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном тепловом диапазоне // Земля из космоса — наиболее эффективные решения. — 2015. — Спец. вып. — С. 38-42.
10. *Баулин В.В., Данилова Н.С.* Западная Сибирь // В кн.: Основы геокриологии. Региональная и историческая геокриология Мира / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: Изд-во МГУ, 1998. — С. 252-271.
11. *Бобов Н.Г., Уваркин Ю.Т.* Географическое положение и рельеф // В кн.: Геокриологические условия Печорского угольного бассейна / Под ред. Бобова Н.Г. и Братцева Л.А. — М.: «Наука», 1964. — С. 15-20.

12. *Бобов Н.Г.* Четвертичные отложения // В кн.: Геокриологические условия Печорского угольного бассейна / Под ред. Бобова Н.Г. и Братцева Л.А. — М.: «Наука», 1964. — С. 48-63.
13. *Бредихин А.В., Еременко Е.А., Харченко С.В., Беляев Ю.Р., Романенко Ф.А., Болысов С.И., Фузеина Ю.Н.* Районирование Российской Арктики по типам антропогенного освоения и сопутствующей трансформации рельефа на основе кластерного анализа // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2020. — №1. — С. 42-56.
14. *Брыксина Н.А., Евтюшкин А.В., Полищук Ю.М.* Изучение динамики изменений термокарстовых форм рельефа с использованием космических снимков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2007. — Т. 4. — №. 2. — С. 123-128.
15. *Варсанофьева В.А.* О геоморфологическом районировании территории Коми АССР // Известия. Коми филиала Всесоюзного географического общества. — 1960. — Вып. 6. — С. 1-28.
16. *Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В., Облогов Г.Е., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Стрелецкая И.Д., Стрелецкий Д.А., Устинова Е.В., Широкок Р.С.* Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в Западном секторе Российской Арктики // Криосфера Земли — 2020. — Т. 24. — № 2. — С. 15-30
17. *Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г.* Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата // Криосфера Земли. — 2008. — Т. 12. — №2. — С. 10-18.
18. *Васильчук Ю.К.* Усть-Обская область. // В кн.: Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: «Недра», 1989. — С. 276-278.
19. *Васильчук Ю.К., Кудряшов В.Г.* Таз-Хетско-Енисейская область // В кн.: Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: «Недра», 1989. — С. 260–264.
20. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М.: Росгидромет, 2014. — 93 с.

21. *Галахов Н.Н.* Климат // В кн. Природные условия и естественные ресурсы СССР. Средняя Сибирь / Под ред. И.П. Герасимова. — М.: «Наука», 1964. — С. 83-119.
22. *Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И.* Физическая география СССР. Азиатская часть. Издание третье, исправленное и дополненное. — М.: Мысль, 1978. — 512 с.
23. *Горальчук М.Н., Чекрыгина С.Н., Андрианов В.Н., Крицук Л.Н.* Надым-Пуровская область // В кн.: Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: Недра, 1989. — С. 290-297.
24. *Горбачева, В.М.* Город в Заполярье и окружающая среда. — Л.: Стройиздат, 1984. — 99 с.
25. ГОСТ 25358-2012 - Межгосударственный стандарт. Грунты. Метод полевого определения температуры. — М.: Стандартинформ, 2013.
26. *Гребенец В.И., Садовский А.В.* Потепление климата и тепловой режим оснований северного города // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1993. — №5. — С. 27-30.
27. *Гребенец В.И., Толманов В.А., Гюнтер Ф., Юров Ф.Д.* Ландшафтно-мерзлотные особенности второй Каргинской террасы (левобережье низовьев Оби) // Инженерные изыскания в строительстве: материалы докладов XIV Общероссийской конференции изыскательских организаций, Москва, 11-14 декабря 2018 года. — М.: Геомаркетинг, 2018. — С. 295-303.
28. *Гребенец В.И., Ухова Ю.А.* Снижение геотехнической надежности при ухудшении мерзлотных условий оснований (на примере Норильского промышленного района) // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2008. — №5. — С. 24-29.
29. *Гребенец В.И., Юров Ф. Д., Толманов В. А., Хайрединова А. Г.* Формирование техногенных каменных глетчеров из отвалов породы в горнодобывающих районах // Эколого-экономический баланс природопользования в горнодобывающих регионах: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. XXI Сергеевские чтения, Пермь, 2-4 апреля 2019 года. — Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2019. — Т. 21. — С. 394-400.

30. *Григорьева О.В., Панин А.В.* Аэрокосмический мониторинг в обеспечении безопасности функционирования железной дороги // Транспорт Российской Федерации. — 2011. — №3(34). — С. 32-36.
31. *Григорьев М.Н., Разумов С.О., Куницкий В.В., Спектор В.Б.* Динамика берегов Восточных Арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // Криосфера Земли. — 2006. — Т. X. — №4. — С. 74-94.
32. *Губарьков А.А., Лейбман М.О.* Чёткообразные русловые формы в долинах малых рек на Центральном Ямале - результат парагенеза криогенных и гидрологических процессов // Криосфера Земли. — 2010. — Т. 14. №1. — С. 41-49.
33. *Демидюк Л.М.* Состав и криогенное строение пород // В кн.: Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: Недра, 1989. — С. 176-180. (а).
34. *Демидюк Л.М.* Сезонное промерзание и оттаивание пород // В кн.: Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: Недра, 1989. — С. 180-181. (б).
35. *Демидюк Л.М.* Криогенные процессы и образования // В кн.: Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: Недра, 1989. — С. 181-183. (в).
36. *Демидюк Л.М., Кондратьева К.А.* Условия формирования сезонно- и многолетнемерзлых пород // В кн.: Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: Недра, 1989. — С. 164-170.
37. *Долгополов Д.В., Баборыкин М.Ю., Мелкий В.А.* Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования Земли // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2021. — Т. 4. — №1. — С. 25-32.
38. *Дроздов Д.С., Дубровин В.А.* Геоэкологические проблемы нефтегазового недропользования в российской Арктике // Криосфера земли. — 2016. — Т. 20. — №. 4. — С. 16-27.
39. *Дубиков Г.И.* Шпицберген // В кн.: Основы геокриологии. Региональная и историческая геокриология Мира / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: Изд-во МГУ, 1998. — С. 182-195.

40. *Едигарян А.Р., Квашук С.В.* Стратегия ликвидации барьерных мест с опасными геологическими процессами на сети железных дорог Приамурья // *Успехи современного естествознания.* — 2017. — №12. — С. 146-151.
41. *Елизаров А.С., Курчатова А.Н.* Мониторинг надземных трубопроводов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем // *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий).* — 2020. — Т. 25. — №. 1. — С. 28-42.
42. *Еременко Е.А., Фузеина Ю.Н., Ворошилов Е.В., Власов М.В., Бредихин А.В.* Антропогенная трансформация рельефа Воркутинского промышленного района // *Вестник Московского университета. Серия 5. География.* — 2021. — №1. — С. 3-15.
43. *Железнов М.М., Василейский А.С., Макаров А.Ю.* Мониторинг потенциально опасных воздействий на железнодорожную инфраструктуру с использованием космических систем ДЗЗ // *Вестник ВНИИЖТ.* — 2010. — № 6. — С. 16-19.
44. *Жесткова Т.Н.* Некоторый опыт полевого исследования криогенных текстур четвертичных отложений Воркутинского района // *Труды института мерзлотоведения АН СССР.* — 1961. — Т. 16.
45. *Каверин Д.А., Пастухов А.В., Мажитов Г.Г.* Температурный режим тундровых почв и подстилающих многолетнемерзлых пород (Европейский Северо-Восток России) // *Криосфера Земли* — 2014. — Т. XVIII. — № 3. — С. 23-32.
46. *Каверин Д.А., Пастухов А.В., Новаковский А.Б.* Динамика глубины сезонного протаивания тундровых мерзлотных почв (на примере площадки циркумполярного мониторинга деятельного слоя в Европейской России) // *Криосфера Земли.* — 2017. — Т. XXI. — № 6. — С. 35-44.
47. *Каверин Д.А., Пастухов А.В., Новаковский А.Б., Биязи К., Маруцак М., Елсаков В.В.* Влияние ландшафтных и климатических факторов на глубину сезонного протаивания в почвах бугристых торфяников (на примере площадки CALM R52) // *Криосфера Земли.* — 2019. — Т. XXIII. — №2. — С. 62-71. —DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(62-71).
48. *Казначеева И.А., Суходольский С.Е., Горбачева В.М., Оберман Н.Г., Овчинников О.П.* Мало-Большеземельский регион // В кн.: *Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Ершова Э.Д.* — М.: Недра, 1988. — С. 275-301.

49. *Кеммерих А.О.* Полярный Урал. — М.: Физкультура и спорт, 1966. — 112 с.
50. *Кеммерих А.О., Куприянова Е.Н., Албул С.П., Малик Л.К.* Воды // В кн.: Природные условия и естественные ресурсы СССР. Западная Сибирь / Отв. редактор Рихтер Г.Д. — М.: Изд-во Академии наук СССР, 1967. — С. 100-154.
51. *Кизяков А.И., Зимин М.В., Лейбман М.О., Правикова Н.В.* Мониторинг скорости термоденудации и термоабразии на западном побережье острова Колгуев с использованием материалов космической съемки высокого разрешения // Криосфера Земли. — 2013. — Т. 17. — №4. — С. 36-47.
52. *Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Лейбман М.О., Зимин М.В., Хомутов А.В.* Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // Криосфера Земли. — 2015. Т.19. — №2. — С. 15-25.
53. *Конищев В.Н., Тумель Н.В.* Мало-Большеземельский район // В кн.: Региональная криолитология / Под ред. Попова А.И. — М.: Изд-во МГУ, 1989. — С. 24-48.
54. *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 изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2022. — С. 243-251.
55. *Кравцова В.И., Родионова Т.В.* Исследование динамики площади и количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам //Криосфера Земли. — 2016. — Т. 20. — №. 1. — С. 81-89.
56. *Лавриенко И.А.* Геоботаническое районирование Большеземельской тундры и прилегающих территорий // Геоботаническое картографирование. — 2013. — С. 74-92.
57. *Ларин С.И.* Физико-географические условия качества поверхностных вод Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. — 2011. — №12. — С. 70-77.

58. *Мажитова Г.Г.* Температурные режимы почв в зоне несплошной многолетней мерзлоты Европейского Северо-Востока России // Почвоведение. — 2008. — №1. — С. 54-67.
59. *Маслаков А.А.* Динамика берегов Берингова моря в районе поселка Лорино (Чукотский автономный округ) // Криосфера Земли. 2019. — Т. 23. — №1. — С. 28-40 — DOI:10.21782/KZ1560-7496-2019-1(28-39).
60. *Мележ А.А.* Применение космоаэроматериалов для выявления участков магистральных трубопроводов, подверженных опасным инженерно-геологическим процессам // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2013. — № 2-1. — С. 127-129.
61. *Мельников Е.С., Горальчук М.И., Крицук Л.Н.* Геокриологические условия Западно-Сибирской газоносной провинции. — Новосибирск: Наука, 1983. — 199 с.
62. *Мельников Е.С., Москаленко Н.Г., Тагунова Л.Н., Войцеховская И.В., Укоаинцева Н.Г., Чекрыгина С.Н.* Ландшафты // В кн.: Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: Недра, 1989. — С. 45-47.
63. *Мельников В.П., Павлов А.В., Малкова Г.В.* Геокриологические последствия современных изменений глобального климата // География и природные ресурсы. — 2007. — №3. — С. 19-27.
64. *Мухин Н.И., Петракова В.М., Шевченко Э.Я.* Климатические условия // В кн.: Геокриологические условия Печорского угольного бассейна / Под ред. Бобова Н.Г. и Братцева Л.А. — М.: Наука, 1964. — С. 20-29.
65. *Мухин Н.И.* Распространение и температура мерзлых пород // В кн.: Геокриологические условия Печорского угольного бассейна / Под ред. Бобова Н.Г. и Братцева Л.А. — М.: Наука, 1964. — С. 119-142.
66. *Никитина О.В., Никонорова И.В., Петров Н.Ф.* Анализ влияния опасных экзогенных процессов на функционирование автомобильных дорог чувашской республике // Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире (Геориск-2015): материалы IX Международной научно-практической конференции. Научный Совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Москва, 12-14 октября 2015 года. — М.: Изд-во института географии и водной безопасности, 2015. — С. 327-332

67. *Оберман Н.Г.* Глобальное потепление и изменения криолитозоны Печоро-Уральского региона // Разведка и охрана недр. — 2007. — № 4. — С. 63-68.
68. ОДМ 218.2.086-2019. Методические рекомендации по геокриологическому прогнозированию устойчивости дорожных сооружений при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог. — М.: Федеральное дорожное агентство (РОСАВТОДОР), 2019. — 125 с.
69. *Павлов А.В.* Тренды современных изменений температуры почвы на Севере России // Криосфера Земли. — 2008. — Т. XII. — №3. — С. 22-27.
70. *Панин Г.Н., Выручалкина Т.Ю., Соломонова И.В.* Климатические изменения в Арктике, Северной Атлантике, районе Каспия и их взаимосвязь // Фундаментальная и прикладная климатология. — 2015. — Т. 1. — С. 183-210.
71. *Подвербный В.А., Филатов Е.В.* Проектирование защитных сооружений на Восточно-Сибирской железной дороге // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2012. — №1. — С. 236-243.
72. *Попов А.И.* Палеогеография плейстоцена Большеземельской тундры // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 1961. — №6. — С. 41-47.
73. *Попов А.И.* История вечной мерзлоты в СССР в четвертичный период // В кн.: А.И. Попов. Избранные труды и о нем. — М.: Научный мир, 2013. — С. 213-227.
74. *Ревердатто В.В., Куминова А.В., Соболев Л.Н.* Растительность // В кн.: Природные условия и естественные ресурсы СССР. Западная Сибирь / Отв. редактор Рихтер Г.Д. — М.: Изд-во Академии наук СССР, 1967. — С. 195-224.
75. *Ревзон А.Л., Шварев С.В.* ГИС-технологии в системе предупреждения аварий на железных дорогах в условиях интенсивной эрозионной опасности // Экология и промышленность России. — 2005. — С. 27-31.
76. *Розенбаум Г.Э., Шполянская Н.А.* Позднекайнозойская история криолитозоны Арктики и тенденции ее будущего развития. — М.: Научный мир, 2000. — 104 с.
77. Свод правил СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85\* (с Изменением N 1). — М.: Аналитик, 2012. — 93 с.

78. Свод правил СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85\* (с Изменением N 1) — М.: Аналитик, 2012. — 112 с.
79. Свод правил СП 284.1325800.2016 Трубопроводы промышленные для нефти и газа. Правила проектирования и производства работ. — М.: Стандартинформ, 2017. — 206 с.
80. Свод правил СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. — М.: Аналитик, 2012. — 117 с.
81. Свод правил СП 131.13330.2012 Строительная климатология. — М.: Аналитик, 2012. — 109 с.
82. Свод правил СП 131.13330.2012 Аэродромы. — М.: Стандартинформ, 2019. — 94 с.
83. *Сидорчук А.Ю.* Оценка овражного потенциала территории на примере центрального Ямала // География и природные ресурсы. — 2020. — №2. — С. 109-118.
84. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах / Под ред. Велли Ю.Я., Докучаева В.И., Федорова Н.Ф. — Л.: Стройиздат. Ленинградское отделение, 1977. — 652 с.
85. *Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И.* Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. — 2012. — №1. — С. 22-32.
86. *Сухов А.Г., Кузнецова И.Л., Лахтина О.В., Дроздов Д.С., Чекрыгина С.Н.* Тазовская область // В кн.: Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: Недра, 1989. — С. 236-247.
87. *Тимофеев А.Н.* Роль грунтовых дорог в формировании оползневых процессов (на примере Воронежской области) // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. — 2020. — №1. — С. 65-74.
88. *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.

89. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. — СПб.: Научно-технологические технологии, 2022. — 124 с.
90. Трофимов В.Т., Баулин В.В., Васильчук Ю.К. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты // В кн.: Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: Недра, 1989. — С. 159-162
91. Трофимов В.Т., Кашиперюк П.И. Орография // В кн.: Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: Недра, 1989. — С. 38-40.
92. Тумель Н.В. Криолитологические исследования на учебной практике. — М.: Изд-во МГУ, 1988. — 99 с.
93. Украинцева Н.Г., Дроздов Д.С., Попов К.А., Гравис А.Г., Матышак Г.В. Ландшафтная индикация локальной изменчивости свойств многолетнемерзлых пород (Уренгойское месторождение, Западная Сибирь) // Криосфера Земли. — 2011. — Т. XV. — №4. — С. 37-40.
94. Хомичевская Л.С. Орография // В кн. Геокриологические условия Енисейского севера / Под ред. Н.С. Данилова. — М.: Наука, 1967. — С. 7-8. (а).
95. Хомичевская Л.С. Климат // В кн. Геокриологические условия Енисейского севера / Под ред. Н.С. Данилова. — М.: Наука, 1967. — С. 8-14. (б).
96. Хрусталева Л.Н. Температурный режим вечномёрзлых грунтов на застроенной территории. — М.: Наука, 1971. — 167 с.
97. Хрусталева Л.Н. Инженерные сооружения и способы обеспечения их устойчивости на многолетнемерзлых породах // В кн.: Инженерная геокриология. Справочное пособие / Под ред. Ершова Э.Д. — М.: Недра, 1991. — С. 71-134.
98. Хрусталева Л.Н., Пармузин С.Ю., Емельянова Л.В. Надежность северной инфраструктуры в условиях изменения климата // Материалы IV конференции геокриологов России, Москва, 7-9 июня 2011 года. — М.: Изд-во МГУ, 2011 — Т.1. — С. 179-184.
99. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. — М.: Высшая школа, 1979 — 448 с.
100. Шварева Ю.О. Климат // В кн.: Природные условия и естественные ресурсы СССР. Западная Сибирь / Отв. редактор Рихтер Г.Д. — М.: Изд-во Академии наук СССР, 1967. — С. 70-94.

101. *Шевелева Н.С.* Геологическое строение // В кн. Геокриологические условия Енисейского севера / Под ред. Н.С. Данилова. — М.: Наука, 1967. — С.14-21. (а).
102. *Шевелева Н.С.* Многолетнемерзлые горные породы // В кн. Геокриологические условия Енисейского севера / Под ред. Н.С. Данилова. — М.: Наука, 1967. — С. 30-77. (б).
103. *Шмелев Л.М.* Географическое положение и орогидрография // В кн.: Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности / Отв. Редактор Баранов И.Я. — М.: Наука, 1967. — С. 8-9.
104. *Шполянская Н.А.* Мерзлая зона литосферы Западной Сибири и тенденции ее развития. — М.: Изд-во МГУ, 1981. — 167 с.
105. *Юров Ф.Д., Гребенец В.И.* Прогноз развития опасных криогенных процессов на территории Ванкорского месторождения при потеплении климата // Междисциплинарные научные исследования в целях освоения горных и арктических территорий: сборник тезисов, Сочи, 24-29 сентября 2018 года. — М.: Изд-во ИГРАН, 2018.
106. *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.
107. *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 изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2022. — С. 234-242.
108. *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.
109. ACIA, Impacts of a warming Arctic: Arctic climate impact assessment. Cambridge University Press, 2004. — 140 p.

110. *Belova N., Shabanova N., Ogorodov S., Baranskaya A., Novikova A., Aleksyutina D.* Coastal Erosion at Kharasavey Gas Condensate Field, Western Yamal Peninsula // Society of Petroleum Engineers - SPE Russian Petroleum Technology Conference 2018, RPTC 2018. — 2018. — DOI:10.2118/191727-18rptc-ms.
111. *Drozdov D.S., Dubrovin V.A.* Environmental problems of oil and gas exploration and development in the Russian Arctic // Earth's cryosphere. — 2016. — Vol. XX. — №4. — P. 14-25.
112. *Edwards M., Walter K., Grosse G., Plug L., Slater L., Valdes P.* Arctic thermokarst lakes and the carbon cycle // Science. 2009. — №17. — P. 16-18.
113. *Filimonov M., Kamnev Ya., Shein A., Vaganova N.* Modeling the Temperature Field in Frozen Soil under Buildings in the City of Salekhard Taking into Account Temperature Monitoring // Land, 2022. — №11(7). — 1102 p. — DOI: 10.3390/land11071102
114. *Grebenets V., Rogov V., Iurov F.* Cryogenic weathering (destruction) of construction material in the arctic cities // International Conference “Solving the puzzles from Cryosphere”. — Moscow. 2019. — P. 164-166.
115. *Godin E., Fortier D.* Fine Scale Spatio-Temporal Monitoring of Multiple Thermo-Erosion Gullies Development on Bylot Island, Eastern Canadian Archipelago // Proceedings, Tenth International Conference on Permafrost. — 2012. — P. 125-130. — DOI:10.13140/2.1.3827.6803
116. *Günther F., Overduin P.P., Sandakov A.V, Grosse G., Grigoriev M.N.* Short-and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region // Biogeosciences Discussions. — 2013. — Vol. 10. — Issue 6. — P. 4297-4318.
117. *Indreiten M., Svarstad C.* The Longyearbyen fatal avalanche accident 19th December 2015, Svalbard – lessons learned from avalanche rescue inside a settlement // Proceedings of the International Snow Science Workshop. — 2016.
118. *Instanes A.* Incorporating climate warming scenarios in coastal permafrost engineering design – Case studies from Svalbard and northwest Russia // Cold region science and technology. — 2016. — Issue 131. — P. 76-87.
119. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. — IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. — 151 p.

120. *Iurov F., Marcheno N.* Laser scanning as a tool for monitoring road deformations in Svalbard // Proceedings of 25<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 2019). — 2019.
121. *Iurov F., Marcheno N.* The problem of the sustainability of Svalbard infrastructure under changes of climate and permafrost conditions // Proceedings of 26<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 2021). — 2021.
122. *Jaskólski M.W., Pawłowski L., Strzelecki M.C.* Assessment of geohazards and coastal change in abandoned Arctic town, Pyramiden, Svalbard. Cryosphere reactions against the background of environmental changes in contrasting high-Arctic conditions in Svalbard // Poznań Polar Reports. — 2017. — Vol. 2. — P. 51-64.
123. *Jones B.M., Grosse G., Arp C.D., Jones M.C., Walter Anthony K.M., Romanovsky V. E.* Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, Alaska // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. — 2011. — Vol. 116. — Issue G2.
124. *Kizyakov A., Zimin M., Sonyushkin A., Dvornikov Y., Khomutov A., Leibman M.* Comparison of Gas Emission Crater Geomorphodynamics on Yamal and Gydan Peninsulas (Russia), Based on Repeat Very-High-Resolution Stereopairs // Remote Sensing. — 2017. — Vol. 9. — No 10. — DOI: 10.2118/191727-18rptc-ms.
125. *Kokelj S.V., Jorgenson M.T.* Advances in Thermokarst research // Permafrost and periglacial processes. — 2013. — Vol. 24. — Issue 2. — P. 108-119.
126. *Liestøl O.* Pingos, spings, and permafrost in Spitsbergen // Norsk Polarinstitutt Skrifter, 1977. — 141 p.
127. NCCS 2019. Climate in Svalbard 2100 – a knowledge base for climate adaptation // Hanssen-Bauer I, Isdal H., Mayer S., Sandø A., Sorteberg A. (ed.). Oslo: The Norwegian Centre for climate services. — 2019.
128. *Nelson F. E., Anisimov O. A., Shiklomanov N. I.* Climate Change and Hazard Zonation in the Circum-Arctic Permafrost Regions // Natural Hazards July 2002. — 2002 — Vol. 26. — Issue 3. — P. 203–225.
129. *Romanovsky V., Isaksen K., Drozdov D., Anisimov O., Instanes A., Leibman M., McGuire A., Shiklomanov N., Smith S., Walker D.* Changing permafrost and its impacts

- // Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo. Norway. — 2017. — P. 65-102.
130. *Romanovsky V.E., Smith S.L., Christiansen H.H.* Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007-2009: a synthesis // *Permafrost and Periglacial Processes*. — 2010. — Issue 21. — P. 106-116.
131. *Tolmanov V.A., Grebenets V.I., Kurbatov A.S.* Investigations of the thermoerosion process on the Tazovskiy peninsula, North of Siberia // 5th European Conference on Permafrost (EUCOP 2018), Chamonix-Mont Blanc, France, 23th June - 1st July 2018. — 2018. — P. 213-214.
132. *Vautard R., Von Schuckmann K., Zaehle S., Zhang X., Zickfeld K.* IPCC Technical Summary. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. — 2021. — P. 33-144. — DOI:10.1017/9781009157896.002.
133. *Watanabe T., Matsuoka N., Christiansen H.H.* Ice- and Soil-Wedge Dynamics in the Kapp Linné Area, Svalbard, Investigated by Two- and Three-Dimensional GPR and Ground Thermal and Acceleration Regimes // *Permafrost and Periglac. Process*. — 2013. — Issue 24. — P. 39-55.
134. *Zagorski P., Rodzik J., Moskalik M., Strzelecki M., Lim M., Błaszczuk M., Promińska A., Kruszewski G., Styszyńska A., Malczewski A.* Multidecadal (1960–2011) shoreline changes in Isbjørnhamna (Hornsund, Svalbard) // *Polish Polar Research*. — 2015. — Vol. 36. No 4. — P. 369-390.

Приложение. 1.

Краткая физико-географическая характеристика регионов исследования

	Арх. Шпицберген	Воркутинский район	Нижнее Приобье	Ванкорское месторождение	Норильски промышленный район
Характер рельефа	Горный, широкое распространение 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)
Климатические показатели	Среднегодовая температура: -5,9° С Осадки: 192 мм/год Тренд: +0,1 ° С/год	Среднегодовая температура: -6 ° С Осадки: 650 мм/год Тренд: +0,026 ° С/год	Среднегодовая температура: -5.5 ° С Осадки: 540 мм/год Тренд: +0,1 ° С/год	Среднегодовая температура: -8,1 ° С Осадки: 450-500 мм/год Тренд: +0,04 ° С/год	Среднегодовая температура: -9,8 ° С Осадки: 450 мм/год Тренд: +0,01 ° С/год
Строение верхней толщи горных пород	Сильнольдистые глины морских террас, коллювиальные отложения в присклоновых зонах, выходы меловых конгломератов и песчаников	Суглинистые и супесчаные четвертичные отложения гляциально-морского и аллювиального происхождения, линзы сильнольдистых озерных суглинков. Выходы дочетвертичных пород в бортах долины р. Воркута	Аллювиальные и аллювиально-морские отложения преимущественно песчаного состава по берегам р. Обь, фрагменты суглинистых ледниковых отложений с большим количеством включений	Верхнеплейстоценовые отложения представлены песками и супесями, имеющими аллювиальное и озерно-аллювиальное происхождение. Голоценовые отложения представлены преимущественно 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

			грубообломочного материала		поверхностях надпойменных террас
Геокриологические характеристики	Сплошная мерзлота мощностью от 100 м в прибрежной части до 500 м в горной части архипелага Мощность СТС до 1,5 м То -3...-5 °С Тренд +0,04 °С/год	Островная мерзлота мощностью от 40 до 130 м Мощность СТС до 2 м То -0,5...-1,5 °С Тренд 0,018	Островная мерзлота мощностью до 100 м, распространены несливающиеся толщи с реликтовой мерзлотой на глубинах 11-190 м Мощность СТС до 2 м То -1...-2 °С Тренд +0,04 °С/год	Сплошная мерзлота мощностью до 400-450 м. Мощность СТС до 1,5-2 м То -1...-3 °С Тренд +0,025 °С/год	Сплошная мерзлота мощностью от 100-200 м в Норильской 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