1.6.21. Геоэкология

Научная статья

УДК 551.34:504.062.2

ДЕГРАДАЦИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ И РИСКИ ДЛЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Макаханюк Жанна Сергеевна, кандидат географических наук, Российский государственный социальный университет, Россия, Москва, zhanna.makakhaniuk@inbox.ru

Аннотация. В статье рассматриваются геоэкологические предпосылки развития деформаций инфраструктурных объектов в Арктической зоне при изменении состояния многолетнемерзлых грунтов. Цель исследования заключается в систематизации факторов риска, связанных с температурным режимом грунтов, их льдистостью, литологическим составом и техногенной нагрузкой. Рассмотрены возможности использования радиолокационной интерферометрии, термометрических наблюдений и сценарного моделирования. Предложена типология геокриологических условий, различающихся потенциальной интенсивностью осадок. Сопоставлены сценарные вероятности накопленной деформации более 50 мм при различных климатических условиях. Показано, что вероятности превышения единого расчётного порога нельзя непосредственно интерпретировать как вероятности нарушения индивидуальных допустимых деформаций разных инженерных сооружений. Дополнительно разграничены скорость вертикального смещения и накопленная за определённый период осадка. Сделан вывод о необходимости комплексного мониторинга состояния грунтов и инженерных конструкций с учётом конкретных геокриологических условий и нормативных требований.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота; геоэкологический риск; Арктическая зона; радиолокационная интерферометрия; осадка грунтов;

инфраструктурная устойчивость.

Original article

PERMAFROST DEGRADATION AND RISKS TO ARCTIC INFRASTRUCTURE

Makakhaniuk Zhanna Sergeevna, Candidate of Geographical Sciences, Russian State Social University, Moscow, Russia, zhanna.makakhaniuk@inbox.ru

Abstract. This article examines the geoecological prerequisites for the development of deformations of infrastructure facilities in the Arctic zone due to changes in the state of permafrost soils. The objective of the study is to systematize risk factors associated with soil temperature, ice content, lithological composition, and anthropogenic load. The possibilities of using radar interferometry, thermometric observations, and scenario modeling are considered. A typology of geocryological conditions with different potential settlement intensity is proposed. Scenario probabilities of accumulated deformation greater than 50 mm under various climatic conditions are compared. It is shown that the probabilities of exceeding a single design threshold cannot be directly interpreted as the probabilities of violating individual permissible deformations of various engineering structures. Additionally, a distinction is made between the rate of vertical displacement and the settlement accumulated over a certain period. A conclusion is drawn regarding the need for comprehensive monitoring of the state of soils and engineering structures, taking into account specific geocryological conditions and regulatory requirements.

Keywords: permafrost; geoecological risk; Russian Arctic; radar interferometry; ground subsidence; infrastructure resilience.

Введение. Масштабное хозяйственное освоение приполярных территорий существенно изменило роль Арктики. Регион, ранее отличавшийся ограниченной хозяйственной доступностью, стал зоной интенсивной добычи

природных ресурсов и промышленного развития. Важной особенностью данной территории является широкое распространение многолетнемерзлых пород, в которых лед выступает породообразующим компонентом и влияет на литогенез и геоэкологические характеристики криосферы [1], [2]. Уникальные физико-химические свойства водяного льда, заключающиеся в аномальном расширении при кристаллизации и минимальной температуре фазовых переходов, предопределяют крайнюю термодинамическую нестабильность мерзлых геосистем. Техногенные воздействия и климатические изменения нарушают динамическое равновесие в системе «лед–вода–температура» и могут приводить к развитию необратимых разрушительных процессов [3-5]. Понимание механизмов изменения криолитозоны является необходимым условием разработки стратегии экологически рационального природопользования в полярных регионах.

Прогнозируемые климатические сдвиги выступают мощным катализатором деградационных процессов в криосфере, существенно модифицируя физико-географическую среду Арктики. Реакция мерзлотной толщи на повышение температур носит дифференцированный характер и напрямую зависит от ее первоначального термического состояния, льдонасыщенности и литологического состава вмещающих пород. В зонах распространения холодной непрерывной мерзлоты потепление проявляется преимущественно в увеличении мощности сезонно-талого слоя, что само по себе способно дестабилизировать верхние горизонты литосферы и изменить гидрологический режим территорий. Более выраженные изменения наблюдаются в теплых прерывистых и островных мерзлых породах, где формирование сквозных таликов приводит к утрате льда в структуре пород и последующему просадочному уплотнению грунтов с образованием термокарстовых впадин.

Особую тревогу вызывает эволюция приморских ландшафтов и акваторий. Увеличение продолжительности безледного периода и подъем уровня Мирового

океана многократно усиливают энергию термоабразии. Береговая линия, сложенная сильнольдистыми отложениями, отступает колоссальными темпами, затопляя шельфовые зоны и уничтожая наземные экосистемы [6]. Подобная трансформация не только меняет физико-географический облик полярных регионов, но и создает предпосылки для высвобождения законсервированных в мерзлоте загрязняющих веществ. Токсичные компоненты и тяжелые металлы, ранее законсервированные в мерзлоте, начинают мигрировать с надмерзлотными водами и накапливаться в устьевых зонах рек и зонах конвергенции арктических течений, что формирует долгосрочные угрозы для биоресурсов Северного Ледовитого океана.

Концентрация хозяйственных объектов в пределах криолитозоны создает зоны повышенного геоэкологического и технического риска. Пространственный анализ распределения инфраструктурных сетей и поселений свидетельствует, что значительная их часть расположена на территориях с высокой потенциальной опасностью просадок. К числу наиболее уязвимых регионов относятся нефтегазодобывающие комплексы севера Западной Сибири, транспортные артерии, пересекающие районы вечной мерзлоты, а также крупные индустриальные центры, такие как Норильск, Воркута и Якутск. Ошибки, допущенные при проектировании и эксплуатации в период интенсивного промышленного освоения, когда преобладал подход, основанный на преодолении природных ограничений, сегодня приводят к системным проблемам и значительным затратам на поддержание объектов в рабочем состоянии [7].

Механическое нарушение почвенно-растительного покрова или изменение гидрологического режима может быстро привести к развитию комплекса разрушительных процессов. Увеличение притока тепла к поверхности грунта провоцирует протаивание подземных льдов, что неминуемо ведет к развитию термокарста и термоэрозии. Фундаменты сооружений теряют несущую способность, здания деформируются, а дорожные покрытия разрушаются, что

приводит к формированию участков сильно нарушенного техногенного рельефа. Ситуация многократно осложняется при авариях на линейных объектах. Разливы нагретых нефтепродуктов, возможные на таких магистралях, как нефтепровод «Заполярье – Пурпе», оказывают интенсивное тепловое воздействие на мерзлый массив. Локализация подобных аварий в условиях Крайнего Севера крайне затруднена, а тепловое воздействие вызывает значительные деформации грунтового основания, повышая вероятность повторных разрывов и дальнейшей деградации мерзлых грунтов [8].

Преодоление указанных рисков требует отказа от унифицированных подходов к строительству в пользу геоэкологически адаптированных технологий. Необходим баланс экономических и экологических требований, предполагающий заблаговременное регулирование теплового режима грунтов. Применение свайных фундаментов с вентилируемыми подпольными пространствами, термостабилизирующих устройств и специфических теплоизоляционных экранов позволяет сохранить мерзлое состояние оснований. Наряду с этим, критически важна организация поверхностного стока для предотвращения заболачивания и минимизация площади техногенного воздействия, включая полный отказ от гусеничного транспорта вне дорог [9]. Только строжайшая регламентация землепользования, основанная на глубоком мерзлотно-фациальном анализе, и обязательная рекультивация нарушенных ландшафтов способны обеспечить устойчивое функционирование инфраструктуры в условиях динамично меняющейся криосферы.

Обзор литературы. Как отмечалось выше, устойчивость арктических геосистем в значительной степени определяется состоянием многолетнемерзлых пород и динамическим равновесием в системе «лед–вода–температура». Техногенные и климатические воздействия нарушают это равновесие и способствуют развитию термокарста и термоэрозии [10], [11]. Любое внешнее вмешательство, будь то техногенная нагрузка или климатические флуктуации, неизбежно нарушает этот хрупкий паритет, запуская цепь необратимых

деструктивных последствий, таких как термокарст и термоэрозия.

Масштабное вовлечение околополюсных пространств в орбиту хозяйственного освоения изменило статус региона. Исторически сложившаяся концентрация народнохозяйственных объектов в пределах криолитозоны сформировала зоны колоссального геоэкологического и технического риска. Пространственный анализ, проведенный F.E. Nelson и соавторами, свидетельствует, что значительная часть существующей инфраструктуры, включая нефтегазодобывающие комплексы Надым-Пур-Тазовского района, городские агломерации Норильска и Якутска, а также транспортные артерии, расположена на территориях с высокой потенциальной опасностью просадок. Ошибки, допущенные при проектировании в период индустриальной экспансии, когда доминировал подход силового преодоления природных барьеров, сегодня оборачиваются системными кризисами [12-14]. Экономическая целесообразность таких проектов оказывается под вопросом: капиталоемкость освоения арктических ресурсов, по оценкам Н.В. Чухаревой, многократно превышает затраты на добычу в традиционных районах, а риски техногенных катастроф требуют колоссальных превентивных вложений [15].

Особую тревогу вызывает эксплуатация линейных сооружений в условиях криолитозоны. Транспортировка высокотемпературных сред, характерная для таких магистралей, как нефтепровод «Заполярье – Пурпе», оказывает катастрофическое тепловое воздействие на мерзлый массив. Аварийные разливы нефти, нагретой до 60 °С, вызывают мгновенное протаивание подземных льдов, что ведет к потере несущей способности грунтового основания и формированию замкнутого круга техногенной деградации [16]. Таким образом, необходим переход к технологиям, учитывающим геоэкологические условия территории и баланс экономических и экологических требований. Одним из основных условий безопасной эксплуатации является заблаговременная стабилизация теплового режима грунтов.

Организация и методология исследования. В качестве ключевых

объектов исследования выбраны территории активного хозяйственного освоения: промышленные узлы Ямало-Ненецкого автономного округа (включая коридор магистрального нефтепровода «Заполярье – Пурпе») и урбанизированная территория Норильского промышленного района. Выбор этих территорий обусловлен высокой концентрацией инфраструктурных объектов на сильнольдистых грунтах и наличием интенсивных источников техногенного теплового воздействия.

Для анализа геоэкологических предпосылок деформаций инфраструктуры Арктической зоны рассматриваются данные дистанционного зондирования, температурного мониторинга мерзлых грунтов и опубликованные оценки развития криогенных процессов. Метод PS-InSAR используется как инструмент определения относительных смещений устойчивых радиолокационных отражателей вдоль линии визирования спутника. Преобразование таких смещений в вертикальную составляющую требует обоснования геометрии наблюдения и допущения о направлении деформации. Прогнозные вероятности осадки рассматриваются в контексте климатических сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Для интеграции разнородных данных в единую систему координат разработана методика построения матриц геоэкологического риска. В отличие от классического индекса осадки F.E. Nelson, разработанная авторами модель включает коэффициент техногенной тепловой нагрузки (K_{tech}), учитывающий как фоновое потепление климата, так и локальное тепловое воздействие промышленных объектов и потенциальных аварийных разливов.

Количественная оценка неопределенности прогнозов осуществлялась с применением метода Монте-Карло. Вариабельность климатических моделей CMIP6 и погрешность интерферометрических измерений, связанная с атмосферными задержками и фазовым шумом, были описаны с помощью вероятностных распределений. Это позволило перейти от детерминированных карт просадок к картам вероятности превышения критических деформаций для фундаментов зданий и осевых линий трубопроводов [17]. ГИС-моделирование

выполнялось в среде ArcGIS Pro с использованием растровых моделей цифрового рельефа и векторных слоев инженерных сетей.

Результаты проведения исследования и их обсуждение. Анализ интерферометрических данных выявил выраженную пространственную неоднородность деформаций земной поверхности. При сопоставлении геодезических наблюдений и прогнозов необходимо разграничивать скорость вертикального смещения, выражаемую в миллиметрах в год, и накопленную деформацию за определённый период. В Норильском промышленном районе максимальные скорости просадки (до 42 мм/год) зафиксированы в районах расположения шламохранилищ и старых промышленных площадок, сложенных пылеватыми суглинками с высоким содержанием льда. В коридоре нефтепровода «Заполярье – Пурпе» зоны интенсивной осадки (15-25 мм/год) приурочены преимущественно к участкам пересечения водотоков и местам расположения линейных насосных станций, где тепловое воздействие на грунты максимально. Пространственное сопоставление участков повышенной температуры мерзлых грунтов и зон отрицательных вертикальных смещений позволяет обсуждать возможную связь теплового режима с развитием осадок.

Для систематизации полученных данных и прогнозирования поведения оснований сооружений была разработана матрица геоэкологического риска (Таблица 1). Матрица учитывает литолого-фациальный состав и объемную льдистость пород, а также суммарное климатическое и техногенное тепловое воздействие.

Таблица 1 - Матрица геоэкологического риска деградации оснований инфраструктурных объектов

Литологический состав и льдистость грунтов	Фоновый климатический режим (без техногенеза)	Умеренная техногенная нагрузка (нагрев до +2...+4 °С)	Критическая техногенная нагрузка (аварийный нагрев > +10 °С)
Скальные и крупнообломочные (льдистость < 10%)	Риск низкий. Осадка < 5 мм/год.	Риск низкий. Осадка 5-10 мм/год.	Риск умеренный. Локальная осадка до 20 мм/год.
Песчаные и супесчаные (льдистость 10-30%)	Риск умеренный. Осадка 10-20 мм/год.	Риск высокий. Осадка 20-40 мм/год.	Риск критический. Развитие термокарста, осадка > 50 мм/год.
Глинистые и пылеватые, сильнольдистые (льдистость > 40%)	Риск высокий. Осадка 20-35 мм/год.	Риск критический. Осадка 40-80 мм/год.	Риск катастрофический. Полная потеря несущей способности, осадка > 100 мм/год.

Источник: разработано автором.

Наиболее уязвимыми объектами являются сооружения, возведенные на пылевато-глинистых отложениях четвертичного возраста даже при фоновом потеплении. Применение свайных фундаментов с вентилируемыми подпольями, о которых писал В.И. Соломатин, снижает риски, однако их эффективность падает при превышении проектных температурных режимов.

Зоны критического риска для линейных и точечных объектов показаны на концептуальной карте-схеме (Рисунок 1).

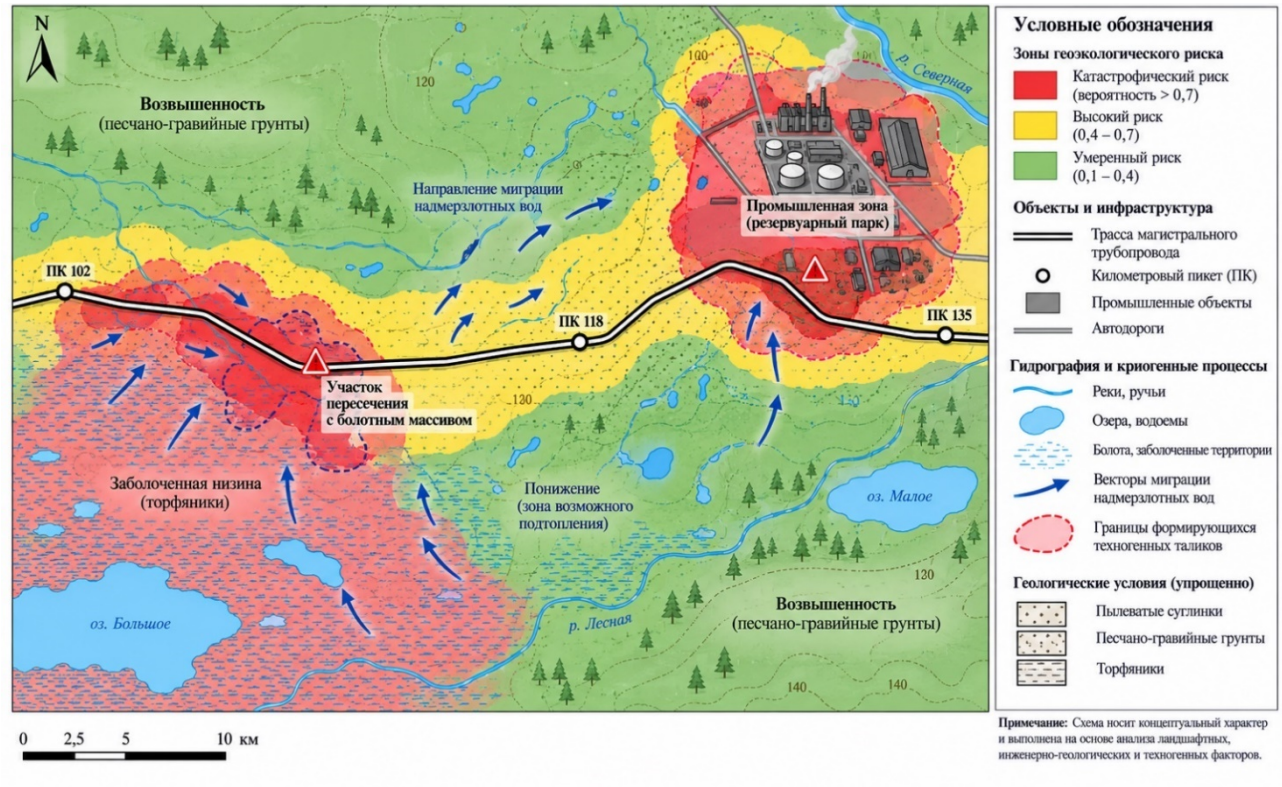


Рисунок 1 - Концептуальная схема зонирования геоэкологического риска на примере фрагмента коридора магистрального трубопровода и прилегающей промышленной зоны (источник: разработано автором)

В таблице 2 приведены сценарные вероятности накопленной осадки более 50 мм. Для промышленных резервуаров соответствующий показатель при SSP5-8.5 составляет 82 %. Вместе с тем указанный результат нельзя непосредственно интерпретировать как вероятность превышения предельной деформации 60 мм, поскольку речь идёт о разных пороговых событиях. Для определения вероятности нарушения конкретного допустимого предела необходимо рассчитать распределение осадки относительно соответствующего значения.

Таблица 2 - Сценарная вероятность накопленной осадки более 50 мм и сравнительные деформационные ограничения инфраструктурных объектов

Объект / Сценарий CMIP6	Вероятность осадки > 50 мм (SSP2-4.5)	Вероятность осадки > 50 мм (SSP5-8.5)	Критическая деформация для объекта (по СНиП)
Участок МН «Заполярье-Пурпе» (суглинки)	34%	68%	40 мм (риск разрыва)
Жилой фонд Норильска (свайные фундаменты)	12%	29%	80 мм (риск нарушения геометрии)
Промышленные резервуары (Норильск)	45%	82%	60 мм (риск разгерметизации)

Источник: разработано автором.

Анализ данных Таблицы 2 показывает, что при реализации пессимистичного сценария SSP5-8.5 вероятность превышения допустимых деформаций фундаментов промышленных резервуаров составляет более 80 %. Это создает прямую угрозу техногенных аварий, аналогичных тем, что описаны в работах по оценке рисков на магистральных трубопроводах.

Важным аспектом обсуждения является учет неопределенности прогнозов. Разброс значений в ансамбле климатических моделей CMIP6 для арктического региона достигает 20-30%, что формирует широкие доверительные интервалы (Рисунок 2).

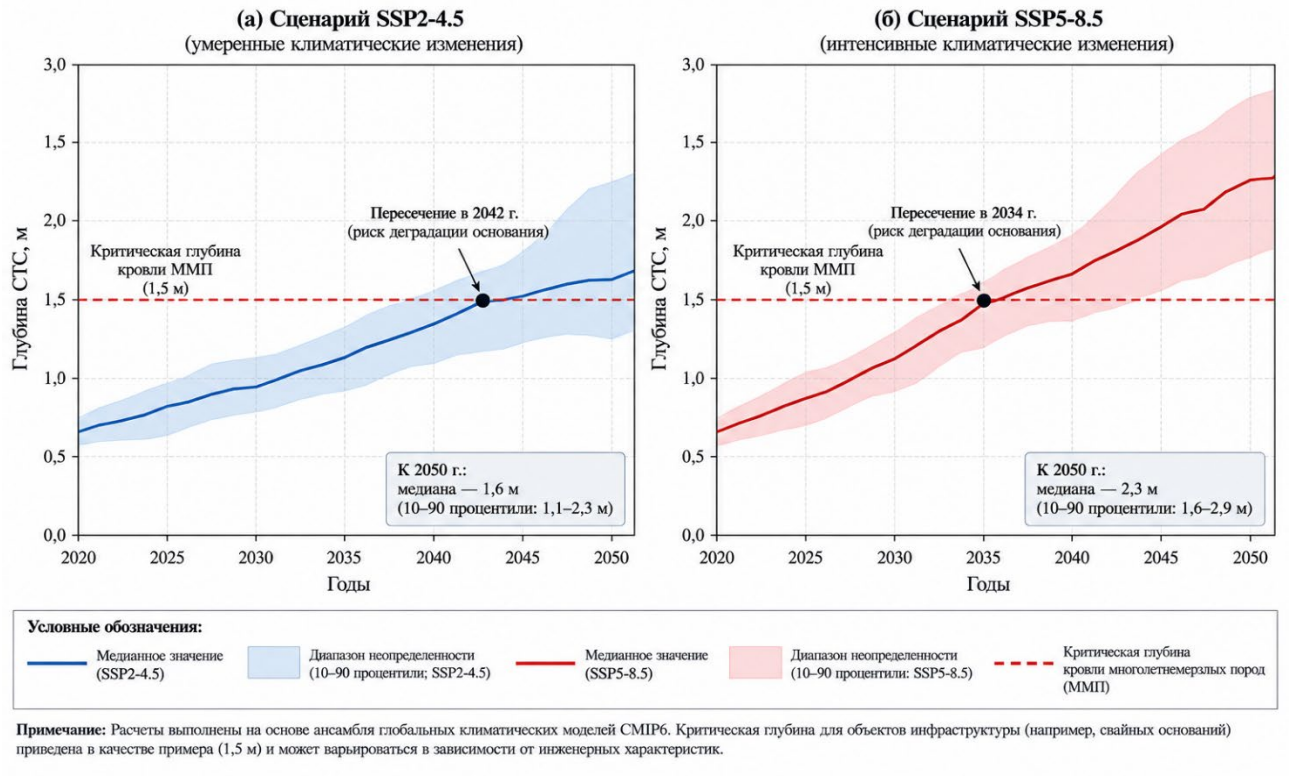


Рисунок 2 - Графики прогнозируемого увеличения мощности сезонно-талого слоя (СТС) с учетом неопределенности климатических моделей (источник: рассчитано автором)

Интерпретация Рисунка 2 показывает, что для объектов, фундаменты которых опираются на кровлю мерзлоты на глубине 2,5 м, критический порог по сценарию SSP5-8.5 может быть достигнут уже к 2038 году. Это означает, что традиционные методы стабилизации грунтов, рассчитанные на исторические климатические нормы, могут перестать соответствовать изменившимся климатическим условиям.

Полученные результаты подтверждают тезис о том, что механическое нарушение почвенно-растительного покрова или изменение гидрологического режима в условиях меняющегося климата мгновенно инициирует каскад деструктивных явлений. Ситуация многократно осложняется при авариях на линейных объектах. Разливы высокотемпературных нефтепродуктов оказывают катастрофическое тепловое воздействие на мерзлый массив, вызывая глубокие деформации грунтового основания. В таких условиях локализация аварии затруднена, а тепловое загрязнение создает предпосылки для повторных

разрывов.

Преодоление указанных рисков требует отказа от унифицированных подходов к строительству в пользу геоэкологически адаптированных технологий. Принцип паритета экономических и экологических требований диктует необходимость превентивной стабилизации теплообмена. Применение термостабилизирующих устройств, специфических теплоизоляционных экранов и организация поверхностного стока для предотвращения заболачивания позволяют сохранить мерзлое состояние оснований. Наряду с этим, критически важна минимизация площади техногенного воздействия, включая строгий регламент движения вне дорог. Только регламентация землепользования, основанная на глубоком мерзлотно-фациальном анализе и непрерывном интерферометрическом мониторинге, способна обеспечить устойчивое функционирование инфраструктуры в условиях динамично меняющейся криосферы [19].

Выводы. Проведенный анализ геоэкологических рисков наглядно демонстрирует, что традиционная парадигма силового преодоления природных барьеров в криолитозоне окончательно исчерпала себя. Переход к устойчивому освоению арктических территорий требует императивного соблюдения паритета между экономическими выгодами и экологическими ограничениями, при котором инженерные решения больше не могут рассматриваться изолированно от термодинамической нестабильности мерзлых геосистем. Фундаментальным условием безопасной эксплуатации становится сохранение динамического равновесия в триаде «лед-вода-температура», где любое техногенное вмешательство должно быть строго сбалансировано компенсационными мерами. Проектная документация для арктических объектов должна формироваться на основе превентивного картирования зон уязвимости, учитывающего не только литолого-фациальный состав пород, но и прогнозные сценарии климатических изменений.

В практической плоскости это означает приоритетное внедрение

технологий, направленных на жесткую регламентацию теплообмена между атмосферой и литосферой. Инженерные решения должны гарантировать, что мощность сезонно-талого слоя не достигнет кровли залегающих подземных льдов, способных при оттаивании вызвать катастрофические просадки. Достигается это не только классическим возведением сооружений на свайных опорах с вентилируемыми подпольными пространствами, но и использованием современных теплоизоляционных экранов, а также насыпных подушек из крупнообломочного грунта. Критически важным аспектом выступает грамотная организация поверхностного стока. Предотвращение заболачивания и исключение образования техногенных водоемов на площадках строительства позволяет купировать развитие термокарстовых процессов на самых ранних стадиях, сохраняя несущую способность грунтового основания.

Особого внимания требуют линейные сооружения, транспортирующие высокотемпературные среды. Опыт эксплуатации таких магистралей, как нефтепровод «Заполярье – Пурпе», выявляет тяжелые последствия аварийных разливов нагретой нефти. Тепловое воздействие продукта на мерзлый массив инициирует мгновенное протаивание подземных льдов, что формирует локальные просадочные деформации и, как следствие, провоцирует повторные разрывы труб. В связи с этим геоэкологическое проектирование трасс должно опираться на данные радиолокационной интерферометрии и наземной термометрии для выделения участков с максимальной степенью риска. Локализация потенциальных аварий и создание дублирующих систем сбора продукта на участках пересечения водотоков и сильнольдистых грунтов являются обязательным условием промышленной и экологической безопасности.

Наряду с инженерными инновациями, не менее строгие ограничения должны накладываться на режим природопользования в период эксплуатации. Абсолютный запрет на движение гусеничной и тяжелой колесной техники вне оборудованных дорог выступает базовым требованием для сохранения хрупкого

почвенно-растительного покрова. Механическое нарушение мохово-лишайникового слоя служит триггером для необратимой термоэрозии, превращающей тундровые ландшафты в техногенные бедленды. Принцип максимальной компактности застройки и минимизации площади техногенного воздействия должен доминировать при планировании новых промышленных узлов, что позволит сократить суммарную площадь территорий, подверженных антропогенному тепловому и механическому влиянию.

Наконец, в условиях прогрессирующих климатических сдвигов статичные нормативы уступают место адаптивному управлению рисками. Геоэкологический мониторинг оснований инфраструктурных объектов должен перейти от эпизодических замеров к режиму непрерывного отслеживания деформаций земной поверхности и температурных полей. Интеграция данных космической интерферометрии и стационарных термометрических скважин в единые геоинформационные модели позволит заблаговременно выявлять критические тренды. Обратная связь между результатами мониторинга и проектными решениями обеспечит возможность своевременной корректировки эксплуатационных нагрузок и проведения точечных стабилизирующих мероприятий, что в конечном итоге сохранит целостность арктической инфраструктуры и минимизирует ущерб для уязвимых полярных экосистем.

Список литературы

1. Streletskiy D. A., Clemens S., Lanckman J.-P., Shiklomanov N. I. The Costs of Arctic Infrastructure Damages Due to Permafrost Degradation // Environmental Research Letters. 2023. Vol. 18. No. 1. Art. 015006. DOI: 10.1088/1748-9326/acab18.
2. Порфирьев Б. Н., Елисеев Д. О. Интегральный подход к экономической оценке последствий деградации многолетней мерзлоты для устойчивости основных фондов в российской Арктике // Проблемы прогнозирования. 2023. № 2. С. 30–43. DOI: 10.47711/0868-6351-197-30-43.
3. Wang Z., Xiao M., Liew M., Jensen A., Farquharson L., Romanovsky V., Nicolsky D. et al. Arctic Geohazard Mapping Tools for Civil Infrastructure Planning: A

Systematic Review // Cold Regions Science and Technology. 2023. Vol. 214. Art. 103969. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103969.

4. Брушков А. В., Алексеев А. Г., Бадина С. В., Дроздов Д. С., Дубровин В. А. и др. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 742–756.

5. Landers K., Streletskiy D. (Un)frozen Foundations: A Study of Permafrost Construction Practices in Russia, Alaska, and Canada // Ambio. 2023. Vol. 52. No. 7. P. 1170–1183. DOI: 10.1007/s13280-023-01866-9.

6. Порфирьев Б. Н., Елисеев Д. О. Сценарная оценка ожидаемого ущерба от деградации многолетней мерзлоты: региональный и отраслевой аспекты // Проблемы прогнозирования. 2023. № 5 (200). С. 124–135. DOI: 10.47711/0868-6351-200-124-135.

7. Филимонов А. А., Строкова Л. А. Обоснование применения глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга деформаций подземных трубопроводов в криолитозоне // Вестник Пермского университета. Геология. 2024. Т. 23. № 1. С. 46–56. DOI: 10.17072/psu.geol.23.1.46.

8. Scheer J., Tomaškovičová S., Ingeman-Nielsen T. Thaw Settlement Susceptibility Mapping for Roads on Permafrost — Towards Climate-Resilient and Cost-Efficient Infrastructure in the Arctic // Cold Regions Science and Technology. 2024. Vol. 220. Art. 104136. DOI: 10.1016/j.coldregions.2024.104136.

9. Sadeghi Chorsi T., Meyer F. J., Dixon T. H. Toward Long-Term Monitoring of Regional Permafrost Thaw with Satellite Interferometric Synthetic Aperture Radar // The Cryosphere. 2024. Vol. 18. P. 3723–3740. DOI: 10.5194/tc-18-3723-2024.

10. Котов П. И., Прямицкий А. В., Кунчулия Г. М. Динамика температурного режима многолетнемерзлых грунтов в глубоких скважинах центральной части города Норильска // Криосфера Земли. 2025. Т. 29. № 1. С. 3–13. DOI: 10.15372/KZ20250101.

11. Lanis A. L., Usov D. A., Nagaev E. I., Pushkarev V. E. Геотехническая модель

системы «насыпь – основание» в условиях деградации многолетнемерзлых грунтов в ЯНАО // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2025. № 2. С. 8–18. DOI: 10.46973/0201-727X_2025_2_8.

12. Streletskiy D. A., Maslakov A., Grosse G., Shiklomanov N. I., Farquharson L., Zwieback S. et al. Thawing Permafrost Is Subsiding in the Northern Hemisphere — Review and Perspectives // Environmental Research Letters. 2025. Vol. 20. No. 1. Art. 013006. DOI: 10.1088/1748-9326/ada2ff.

13. Demidov N. E., Anisimov O. A., Anisimov M. A., Borisik A. L. et al. Conception and First Results of the Russian National System of Background Permafrost Monitoring // Advances in Polar Science. 2025. Vol. 36. No. 1. P. 51–60. DOI: 10.12429/j.advps.2024.0036.

14. Gartler S., Scheer J., Meyer A. et al. A Transdisciplinary, Comparative Analysis Reveals Key Risks from Arctic Permafrost Thaw // Communications Earth & Environment. 2025. Vol. 6. Art. 21. DOI: 10.1038/s43247-024-01883-w.

15. Manos E., Witharana C., Liljedahl A. K. Permafrost Thaw-Related Infrastructure Damage Costs in Alaska Are Projected to Double under Medium and High Emission Scenarios // Communications Earth & Environment. 2025. Vol. 6. Art. 221. DOI: 10.1038/s43247-025-02191-7.

16. Лобковский Л. И., Габсатаров Ю. В., Алексеев А. Г., Крючков В. Г., Баранов А. А., Семилетов И. П. Мониторинг динамики криолитозоны Чукотки спутниковыми геодезическими методами // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2026. № 1. С. 5–23. DOI: 10.7868/S3034530826010011.

17. Wang Z., Xiao M., Nicolsky D. High-Resolution Geomechanical Modeling Reveals Accelerating Infrastructure Risks from Permafrost Degradation in Northern Alaska // Communications Earth & Environment. 2026. Vol. 7. Art. 375. DOI: 10.1038/s43247-026-03240-5.

18. Manos E., Streletskiy D. A., Witharana C., Haggerty E., Liljedahl A. K. Refined Modeling of Arctic Circumpolar Building Stock Increases Estimated Mid-Century

Permafrost Degradation Damages // Earth's Future. 2026. Vol. 14. No. 7. Art. e2026EF008578. DOI: 10.1029/2026EF008578.

References

1. Streletskiy D. A., Clemens S., Lanckman J.-P., Shiklomanov N. I. The Costs of Arctic Infrastructure Damages Due to Permafrost Degradation // Environmental Research Letters. 2023. Vol. 18. No. 1. Art. 015006. DOI: 10.1088/1748-9326/acab18.

2. Porfiryev B. N., Eliseev D. O. An Integral Approach to Economic Assessment of the Consequences of Permafrost Degradation for the Stability of Fixed Assets in the Russian Arctic // Problemy Forecastirovaniye. 2023. No. 2. pp. 30–43. DOI: 10.47711/0868-6351-197-30-43.

3. Wang Z., Xiao M., Liew M., Jensen A., Farquharson L., Romanovsky V., Nikolsky D. et al. Arctic Geohazard Mapping Tools for Civil Infrastructure Planning: A Systematic Review // Cold Regions Science and Technology. 2023. Vol. 214. Art. 103969. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103969.

4. Brushkov A. V., Alekseev A. G., Badina S. V., Drozdov D. S., Dubrovin V. A., et al. Experience in operating structures and the need to manage the thermal regime of soils in the permafrost zone // Zapiski Gornogo Instituta. 2023. Vol. 263. Pp. 742–756.

5. Landers K., Streletskiy D. (Un)frozen Foundations: A Study of Permafrost Construction Practices in Russia, Alaska, and Canada // Ambio. 2023. Vol. 52. No. 7. P. 1170–1183. DOI: 10.1007/s13280-023-01866-9.

6. Porfiryev B.N., Eliseev D.O. Scenario Assessment of Expected Damage from Permafrost Degradation: Regional and Sectoral Aspects // Problems of Forecasting. 2023. No. 5 (200). P. 124–135. DOI: 10.47711/0868-6351-200-124-135.

7. Filimonov A. A., Strokova L. A. Justification for the Application of Global Navigation Satellite Systems for Monitoring Deformations of Underground Pipelines in the Cryolithozone // Bulletin of Perm University. Geology. 2024. Vol. 23. No. 1. Pp. 46–56. DOI: 10.17072/psu.geol.23.1.46.

8. Scheer J., Tomaškovičová S., Ingeman-Nielsen T. Thaw Settlement Susceptibility Mapping for Roads on Permafrost — Towards Climate-Resilient and Cost-Efficient

Infrastructure in the Arctic // Cold Regions Science and Technology. 2024. Vol. 220. Art. 104136. DOI: 10.1016/j.coldregions.2024.104136.

9. Sadeghi Chorsi T., Meyer F. J., Dixon T. H. Toward Long-Term Monitoring of Regional Permafrost Thaw with Satellite Interferometric Synthetic Aperture Radar // The Cryosphere. 2024. Vol. 18. P. 3723–3740. DOI: 10.5194/tc-18-3723-2024.

10. Kotov P. I., Pryamitsky A. V., Kunchulia G. M. Dynamics of the Temperature Regime of Permafrost Soils in Deep Boreholes in the Central Part of Norilsk // Earth's Cryosphere. 2025. Vol. 29. No. 1. P. 3–13. DOI: 10.15372/KZ20250101.

11. Lanis A. L., Usov D. A., Nagaev E. I., Pushkarev V. E. Geotechnical model of the "embankment - foundation" system under conditions of permafrost degradation in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug // Bulletin of the Rostov State Transport University. 2025. No. 2. pp. 8–18. DOI: 10.46973/0201-727X_2025_2_8.

12. Streletskiy D. A., Maslakov A., Grosse G., Shiklomanov N. I., Farquharson L., Zwieback S. et al. Thawing Permafrost Is Subsiding in the Northern Hemisphere — Review and Perspectives // Environmental Research Letters. 2025. Vol. 20. No. 1. Art. 013006. DOI: 10.1088/1748-9326/ada2ff.

13. Demidov N. E., Anisimov O. A., Anisimov M. A., Borisik A. L. et al. Conception and First Results of the Russian National System of Background Permafrost Monitoring // Advances in Polar Science. 2025. Vol. 36.No. 1. P. 51–60. DOI: 10.12429/j.advps.2024.0036.

14. Gartler S., Scheer J., Meyer A. et al. A Transdisciplinary, Comparative Analysis Reveals Key Risks from Arctic Permafrost Thaw // Communications Earth & Environment. 2025. Vol. 6. Art. 21. DOI: 10.1038/s43247-024-01883-w.

15. Manos E., Witharana C., Liljedahl A. K. Permafrost Thaw-Related Infrastructure Damage Costs in Alaska Are Projected to Double under Medium and High Emission Scenarios // Communications Earth & Environment. 2025. Vol. 6. Art. 221. DOI: 10.1038/s43247-025-02191-7.

16. Lobkovsky L. I., Gabsatarov Yu. V., Alekseev A. G., Kryuchkov V. G., Baranov A. A., Semiletov I. P. Monitoring the dynamics of the Chukotka permafrost zone using

satellite geodetic methods // Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2026. No. 1. P. 5–23. DOI: 10.7868/S3034530826010011.

17. Wang Z., Xiao M., Nicolsky D. High-Resolution Geomechanical Modeling Reveals Accelerating Infrastructure Risks from Permafrost Degradation in Northern Alaska // Communications Earth & Environment. 2026. Vol. 7. Art. 375. DOI: 10.1038/s43247-026-03240-5.

18. Manos E., Streletskiy D. A., Witharana C., Haggerty E., Liljedahl A. K. Refined Modeling of Arctic Circumpolar Building Stock Increases Estimated Mid-Century Permafrost Degradation Damages // Earth's Future. 2026. Vol. 14.No. 7. Art. e2026EF008578. DOI: 10.1029/2026EF008578.

Статья поступила в редакцию 24.03.2026; одобрена после рецензирования 28.04.2026; принята к публикации 30.08.2026.

The article was submitted 24.03.2026; approved after peer review 28.04.2026; accepted for publication 30.08.2026.