

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.139.5

DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_48

*Е. И. Нагаев, Д. А. Усов, А. Л. Ланис, Д. В. Величко***ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ АДАПТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ
ПРИ ДЕГРАДАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ
В ОСНОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Аннотация. В условиях изменения климата особую актуальность приобретает обеспечение устойчивой эксплуатации транспортной инфраструктуры, расположенной в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Для сооружений, эксплуатируемых по I принципу повышение среднегодовых температур создает предпосылки для деградации ММГ, что приводит к развитию криогенных деформаций, снижению надежности и безопасности сооружения. В статье представлены результаты геокриологического моделирования системы «сооружение – основание» на участке железной дороги Чум – Лабытнанги в Ямало-Ненецком автономном округе, выполненное с использованием специализированных программных комплексов. Подтверждена возможность распространения базовой геокриологической модели на другие участки транспортной инфраструктуры путем сопоставления результатов численного моделирования с данными инженерно-геокриологического мониторинга, включая термометрические измерения в скважинах, не превышающих 0,1 °С. На основе анализа температурного поля и деформаций обоснован критерий целесообразности адаптационных мероприятий. Полученные результаты имеют практическое значение для обоснования долгосрочной стратегии адаптации транспортной инфраструктуры к климатическим изменениям.

Ключевые слова: деградация многолетнемерзлых грунтов, прогнозное моделирование, железнодорожный путь, криогенные деформации, изменения климата.

Для цитирования: Обоснование целесообразности адаптационных мероприятий при деградации многолетнемерзлых грунтов в основании транспортных сооружений / Е. И. Нагаев, Д. А. Усов, А. Л. Ланис, Д. В. Величко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 48–60. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_48.

Введение

Общая протяженность земляного полотна на сети железных дорог составляет более 86,4 тыс. км, в том числе дефектного и деформирующегося земляного полотна 8,6 тыс. км или 10 % от общей протяженности [1]. Средний процент дефектности земляного полотна и искусственных сооружений $X_{\text{ср.}}$ составляет 11,6 %. При этом на 6 железных дорогах процент дефектности превышает сетевой показатель (рис. 1).

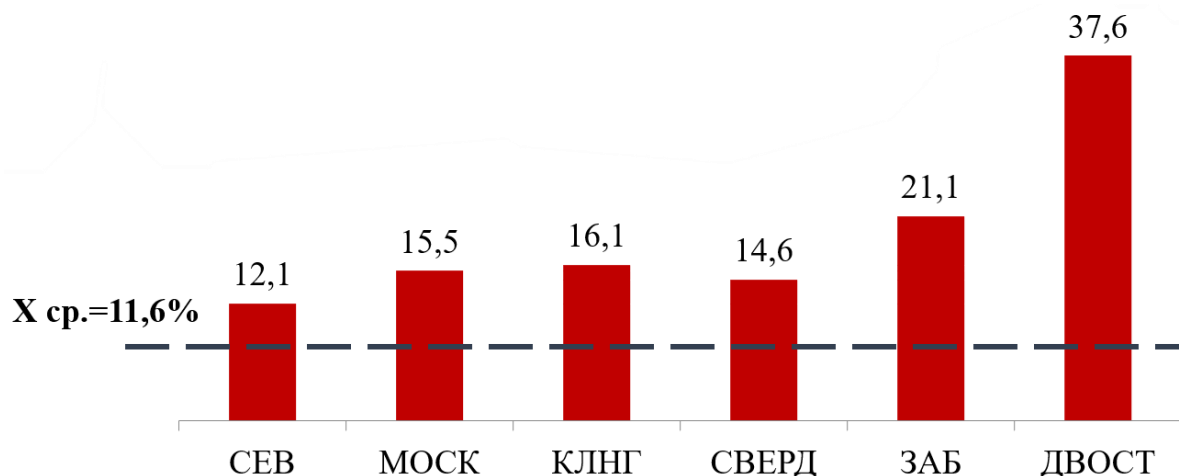


Рис. 1. Дефектность земляного полотна на дорогах, превышающих сетевой показатель [1]

В структуре дефектов и деформаций железнодорожного пути на дефекты земляного полотна приходится более 50 % (рис. 2). Превышает это значение в процентном соотношении только такие деформации, как осадки, в том числе криогенного характера, общее количество которых составляет 15 % от общего количества [2].

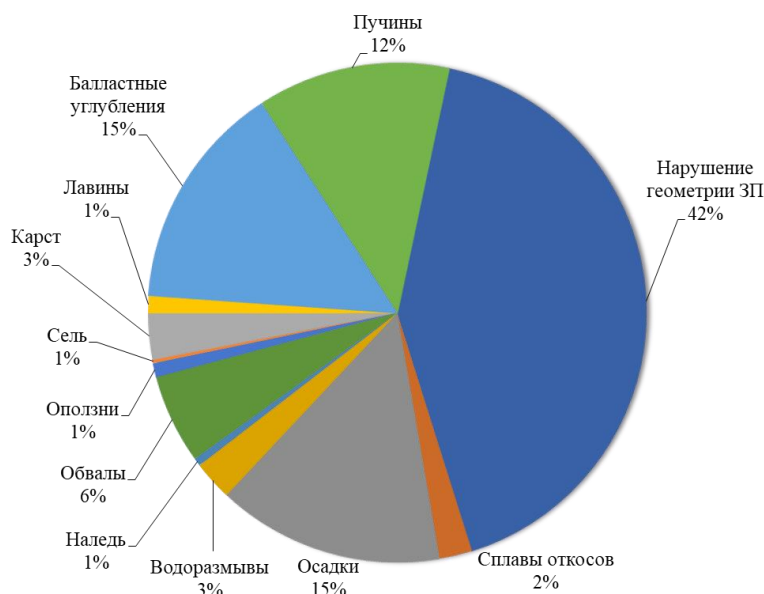


Рис. 2. Структура дефектов и деформаций железнодорожного пути, 2022 г. [2]

Одной из главных причин возникновения деформаций криогенного характера является глобальное изменение климата, оказывающее повсеместное влияние на эксплуатацию транспортных сооружений в условиях Арктической зоны РФ в связи с деградацией многолетнемерзлых грунтов (ММГ) естественного основания [3]. Помимо глобального изменения климата сопутствующими причинами деградации ММГ являются:

- несовершенство водоотводных сооружений, приводящее к застою поверхностных вод вблизи сооружения [3];
- снежный покров, в связи с особенностями метелевого снегопереноса [4];
- неравномерность температурного поля основания [5];
- техногенное воздействие, служащее катализатором для изменения теплообмена в системе «сооружение-основание» [4–7].

Согласно исследованиям китайских ученых [2], аналогичная проблема деформирования присутствует на Цинхай-Тибетской железной дороге, на которой примерно 275 км ММГ находится в диапазоне температур выше -1°C и половина обладает высоким содержанием льда [2]. То есть порядка 122 км высокотемпературной мерзлоты с высоким содержанием льда могут быть особенно подвержены таянию при повышении температуры всего на 1°C , что уже сейчас приводит к значительному увеличению просадок насыпи железной дороги при оттаивании [2]. Аналогичная проблема сложилась и на Цинхай-Тибетской автомагистрали.

В Арктической зоне РФ темпы повышения среднегодовой температуры воздуха превышают глобальные показатели – они примерно вдвое выше мировых. Это явление особенно заметно в Западной Сибири, где за последние сто лет температура возросла на $4,0\text{--}5,5^{\circ}\text{C}$ [8]. Такие изменения отражаются на состоянии окружающей среды и грунтовых условиях.

В большей или меньшей степени, в зависимости от конкретных ландшафтных условий местности, на теплообмен влияет сукцессия растительности [9]. От интенсивности сукцессии и техногенной депрессии экосистемы, вызванной деятельностью человека, зависит регуляция тепла, влаги, кровля ММГ и минерализация [9].

Как отдельно на сукцессию, так и на теплообмен ММГ оказывает влияние грунтовый и поверхностный сток воды, который может быть нарушен в ходе строительства и эксплуатации линейных сооружений, в связи с несовершенством водоотводных сооружений или их отсутствием.

Необходимо рассмотреть метелевый снегоперенос, как один из факторов теплообмена с атмосферой. Как известно, отложения снега, скопившиеся в пределах эксплуатируемой насыпи, а также

термокарстовых понижениях, оказывают отепляющее воздействие. Причем в пределах термокарстовых понижений снегоперенос будет способствовать развитию процессов термокарста и обводнения оттаивающих грунтов [10].

Анализ состояния вопроса показывает, что деградация ММГ является одним из ключевых процессов, влияющих на безопасную эксплуатацию железнодорожного пути без ограничения скорости движения в Арктической зоне.

Таким образом, развитие транспортной сети в Арктической зоне РФ в условиях глобального изменения климата и воздействия антропогенных факторов будет неотъемлемо связано с адаптацией существующих и проектируемых сооружений к особенностям, связанным с деградацией ММГ в основании, как и в условиях Цинхай-Тибетской железной дороги [11]. Это возможно лишь при условии разработки новых и усовершенствовании существующих методик строительства и эксплуатации, которые должны опираться на геотехнический и геокриологический прогноз. Однако, в этом случае возникнет проблема обоснования целесообразности применения адаптационных мероприятий.

В статье исследование проведено на фактических материалах инженерно-геокриологических изысканий участка Северной железной дороги Чум – Лабытнанги в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО), расположенном в северной части Западной Сибири, характеризующемся распространением ММГ, подверженных деградации. Исходные параметры, включая литологический состав, влажность, теплофизические характеристики грунтов, начальные температурные условия, приняты на основании данных полевых наблюдений и лабораторных испытаний, выполненных в ходе инженерных изысканий и проводимого инженерно-геокриологического мониторинга по данному объекту в рамках гранта Российского научного фонда № 24-19-20036.

Для решения выявленной проблемы в настоящей статье поставлены следующие задачи:

1) подтвердить возможность использования ранее составленной геокриологической модели [3] на другие участки транспортной инфраструктуры путем количественной верификации расчетных температурных полей с данными инженерно-геокриологического мониторинга;

2) выявить динамику понижения кровли ММГ и развития неравномерных осадок основания на прогнозный период с выявлением критических рубежей изменения термодинамического состояния грунтового массива;

3) предложить критерий целесообразности применения адаптационных мероприятий в условиях ЯНАО.

Материалы и методы исследования

Для численного прогнозирования теплового режима системы «сооружение-основание» была использована геокриологическая модель, структурно и параметрически ориентированная на особенности линейных транспортных сооружений (рис. 3) [7]. Входные параметры модели, включая теплофизические характеристики инженерно-геологических элементов и граничные условия на поверхности, были параметризованы под конкретные инженерно-геологические и климатические условия исследуемого участка, что позволило воспроизвести реальный гидротермический режим системы в условиях деградации ММГ.

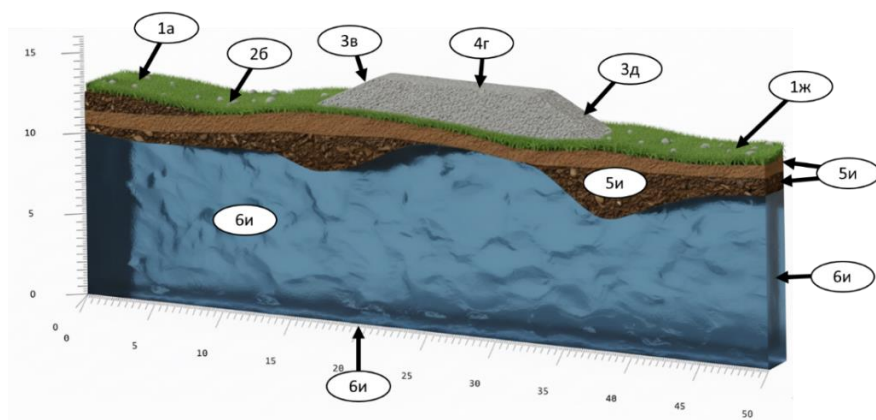


Рис. 3. Геокриологическая модель поперечного профиля насыпи железнодорожного пути в условиях деградации ММГ в ЯНАО

Условные обозначения элементов модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Поэлементное описание геокриологической модели

Граничное условие	Вид грунта	Элемент
Юго-восточная экспозиция, нормальное снегонакопление	Сезоннооттаивающий грунт – сильноразложившийся водонасыщенный торф с глинистым грунтом текучей консистенции	1а
Северо-западная экспозиция, нормальное снегонакопление		1ж
Юго-восточная экспозиция, ямообразный профиль, без аккумуляции поверхностных вод, повышенное снегонакопление	Зона термической просадки	2б
Юго-восточная экспозиция, наклонная поверхность, повышенное снегонакопление	Существующее тело земляного полотна после возникновения деградации ММГ – техногенный грунт: песок неоднородный маловлажный средней плотности	3в
Северо-западная экспозиция, наклонная поверхность, повышенное снегонакопление		3д
Горизонтальная поверхность с отсутствием снегонакопления	Верхнее строение пути	4г
Основание земляного полотна (деятельный слой) – супесь пылеватая, текучей консистенции	Адиабатическое граничное условие, соответствующее нулевому тепловому потоку	5и
Основание земляного полотна (многолетнемерзлый грунт) – суглинок легкий, пылеватый, пластичномерзлый, льдистый, слоисто-сетчатой криотекстуры, при оттаивании текучий	Адиабатическое граничное условие, соответствующее нулевому тепловому потоку	6и

В рамках численного моделирования были заданы граничные условия, учитывающие инсоляцию, скорость ветра, сезонную изменчивость высоты и теплопроводности снегового покрова, наличие поверхностных вод и атмосферную температуру. Особое внимание было уделено заданию адиабатических условий, которые моделировались как области с нулевым тепловым потоком, исключающие теплообмен с окружающей средой.

Исходные данные для моделирования, включая сезонно-переменную высоту снежного покрова и пространственно-временное распределение температур, были получены на основе результатов натурных измерений, выполненных в ходе инженерно-геокриологического мониторинга на участке Северной железной дороги Чум – Лабытнанги.

Данные по высоте снежного покрова учитывали его изменчивость по месяцам холодного периода. Высота снежного покрова определялась на основании регулярных замеров в точках наблюдения, выбранных с учетом метелевого перераспределения снега и аккумуляции в термокарстовых понижениях. Для элементов, не подверженных снегонакоплению (верхнее строение пути, тип «г»), высота покрова принята равной нулю. Указанные параметры использованы для задания нестационарных граничных условий теплообмена с атмосферой.

Температурный режим ММГ и деятельного слоя определялся с использованием термодатчиков, установленных в скважинах на различных глубинах. Полученные зависимости изменения температуры во времени использованы для формирования граничных и начальных условий при численном моделировании теплового поля.

Климатические параметры граничных условий, представленные в табл. 2, разделены по типам поверхностей модели (элементы 1а–6и, табл. 2) с учетом их экспозиции, режима снегонакопления и влияния конструктивных элементов железнодорожного пути. Региональный климатический прогноз принят в соответствии со сценарием SSP5-8.5, согласно которому темп потепления составляет 0,77 °C/десятилетие [12].

Таблица 2

Климатические параметры граничных условий

Характеристика	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Граничные условия типа «а»												
Температура, °С	-27,30	-26,30	-16,40	-8,80	2,90	15,80	27,20	17,50	6,50	-6,10	-17,50	-23,90
Скорость ветра, м/с	3,60	3,50	4,30	4,40	4,50	4,20	3,70	3,80	3,90	3,90	4,10	3,70
Высота снежного покрова, м	2,00	2,00	2,00	2,10	1,50	0,50	-	-	-	0,50	1,00	1,50
Граничные условия типа «б»												
Температура, °С	-27,30	-26,30	-16,40	-8,80	2,90	15,80	27,20	17,50	6,50	-6,10	-17,50	-23,90
Скорость ветра, м/с	3,60	3,50	4,30	4,40	4,50	4,20	3,70	3,80	3,90	3,90	4,10	3,70
Высота снежного покрова, м	2,20	2,40	2,40	2,10	1,50	0,50	-	-	-	0,50	1,00	1,50
Граничные условия типа «в»												
Температура, °С	-24,10	-23,10	-15,10	-8,60	-0,80	12,79	18,61	13,32	6,07	-3,80	-14,90	-20,30
Скорость ветра, м/с	3,60	3,50	4,30	4,40	4,50	4,20	3,70	3,80	3,90	3,90	4,10	3,70
Высота снежного покрова, м	1,55	2,00	2,26	2,10	2,00	-	-	-	-	0,20	0,35	1,00
Граничные условия типа «г»												
Температура, °С	-27,10	-24,80	-12,90	-2,80	8,00	18,70	27,50	17,60	7,10	-4,60	-17,30	-23,90
Скорость ветра, м/с	3,60	3,50	4,30	4,40	4,50	4,20	3,70	3,80	3,90	3,90	4,10	3,70
Высота снежного покрова, м	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Граничные условия типа «д»												
Температура, °С	-27,30	-26,30	-16,40	-8,80	2,90	15,80	27,20	17,50	6,50	-6,10	-17,50	-23,90
Скорость ветра, м/с	3,60	3,50	4,30	4,40	4,50	4,20	3,70	3,80	3,90	3,90	4,10	3,70
Высота снежного покрова, м	2,20	2,40	2,40	2,10	1,50	0,50	-	-	-	0,50	1,00	1,50
Граничные условия типа «е»												
Температура, °С	-27,30	-26,30	-16,40	-8,80	2,90	15,80	27,20	17,50	6,50	-6,10	-17,50	-23,90
Скорость ветра, м/с	0,71	0,69	0,85	0,87	0,89	0,83	0,73	0,75	0,77	0,77	0,81	0,73
Высота снежного покрова, м	1,68	2,02	2,46	2,10	0,4	-	-	-	-	0,60	0,96	1,20
Граничные условия типа «ж»												
Температура, °С	-27,30	-26,30	-16,40	-8,80	2,90	15,80	27,20	17,50	6,50	-6,10	-17,50	-23,90
Скорость ветра, м/с	3,60	3,50	4,30	4,40	4,50	4,20	3,70	3,80	3,90	3,90	4,10	3,70
Высота снежного покрова, м	2,00	2,00	2,00	2,10	1,50	0,50	-	-	-	0,50	1,00	1,50
Граничные условия типа «и»												
Температура, °С	Тепловое распределение по термометрическим скважинам											
Скорость ветра, м/с	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Высота снежного покрова, м	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Теплофизические характеристики грунтов и материалов, использованные в численном моделировании, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Теплофизические свойства грунтов

№ ИГЭ	Теплопроводность, Вт/(м·К)		Объемная теплоемкость, МДж/(м³·К)		Суммарная влажность, доля единицы	Плотность в сухом состоянии, кг/м³	Температура начала замерзания, °С
	талого	мерзлого	талого	мерзлого			
1	0,25	0,54	1,48	1,08	1,35	520	–0,18
3	1,20	1,36	1,66	1,42	0,07	1640	0,00
5	1,80	2,01	3,14	2,23	0,37	1300	–0,15
6	1,57	1,78	3,50	2,53	0,42	1290	–0,20

Распределение температурных полей в грунте на начальный момент времени расчета в интерфейсе программного комплекса представлено на рис. 4. Эти данные были получены в результате нулевого цикла измерений, выполненных 24.09.2024.

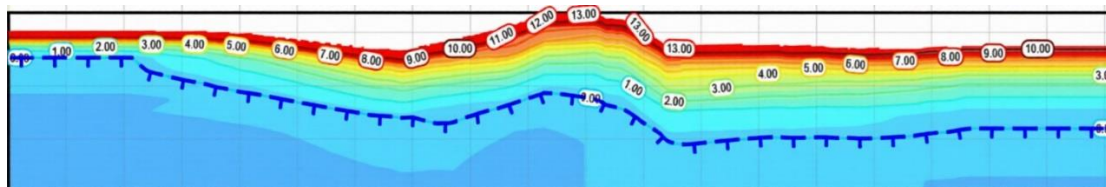


Рис. 4. Температурное распределение на нулевой цикл измерения (24.09.2024)

Верификация расчетной схемы выполнена путем количественного сопоставления температурных полей, полученных в программном комплексе, с данными инженерно-геокриологического мониторинга на контрольных скважинах участка Чум – Лабитнанги (рис. 5).

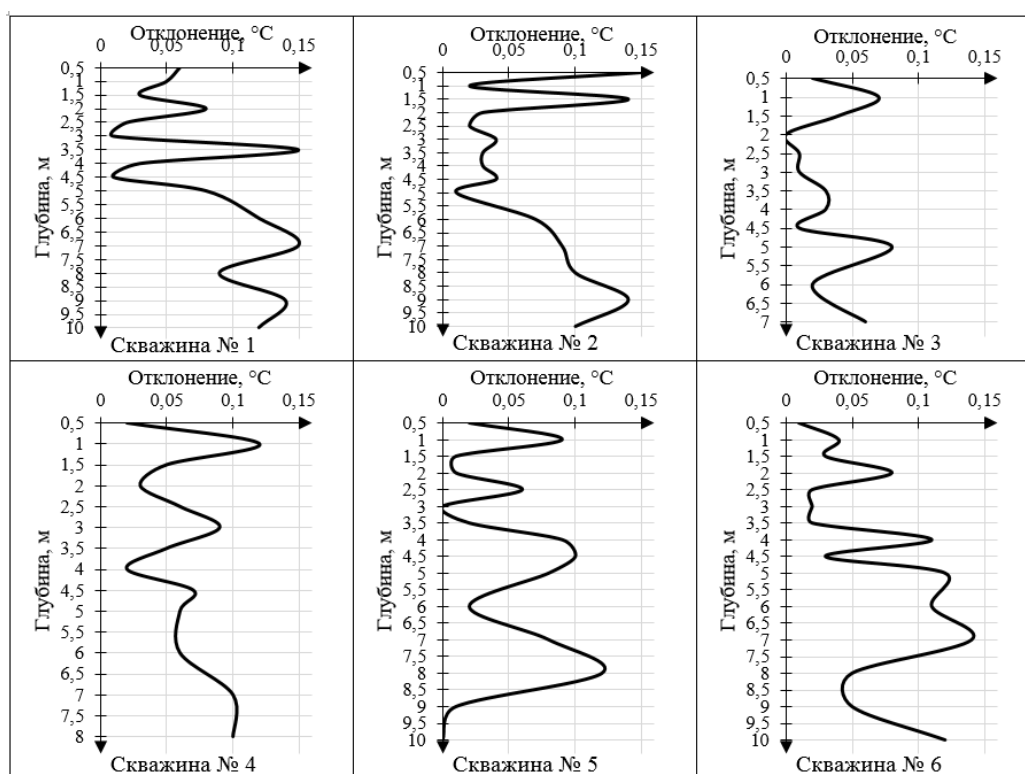


Рис. 5. Сравнение расчетов геокриологической модели и результатов инженерно-геокриологического мониторинга на 15.05.2025

По результатам расчета полученные значения не превышают погрешность измерительных приборов для выполнения термометрических измерений – 0,1 °С.

Полученные результаты верификации позволяют сделать вывод о принципиальной возможности распространения базовой (ранее разработанной) геокриологической модели [3] на другие транспортные сооружения. Устойчивость расчетного решения при варьировании локальных параметров (рельеф, экспозиция склонов, режим снегонакопления, теплофизические характеристики ИГЭ) свидетельствует о том, что модель может использоваться в качестве универсального инструмента для прогнозного анализа деградации ММГ при условии корректной параметризации под конкретные инженерно-геологические и климатические условия объекта.

Результаты исследования

Для оценки долгосрочного теплового поведения ММГ основания земляного полотна железнодорожного пути выполнен прогнозный расчет, который позволил получить пространственное распределение температурного поля в теле насыпи и основании, а также оценить динамику изменения теплового режима грунтов в условиях естественного воздействия климатических факторов без применения специальных мероприятий.

На пятом году моделирования отмечено постепенное повышение температуры в нижней части разреза. Наиболее выраженные изменения наблюдаются в верхней части разреза, где отмечаются значительные колебания температур и деградация ММГ со стороны откоса с солнечной экспозицией. Средняя глубина протаивания многолетнемерзлых грунтов составила два метра относительно начального момента измерения. При этом сохраняется слабо выраженное мерзлое «ядро» в теле насыпи и удаленные от дневной поверхности области, в особенности с теневой экспозиции (рис. 6).

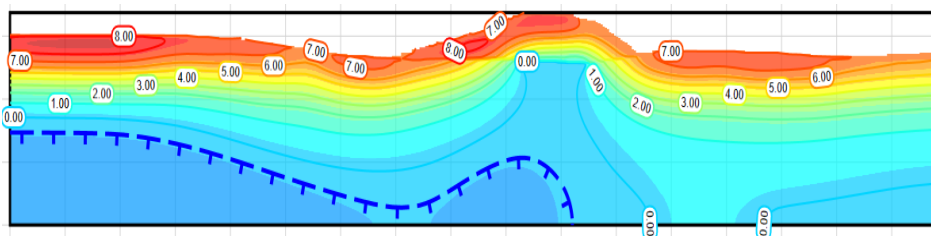


Рис. 6. Температурное распределение на пятый год моделирования (15.09.2029)

К десятому году моделирования (рис. 7) наблюдается дальнейшее развитие положительных температур в основании насыпи. Формируется устойчивая тенденция к увеличению глубины деятельного слоя и продолжению деградации ММГ. Средняя глубина протаивания ММГ составила более 4 м относительно начального момента измерения.

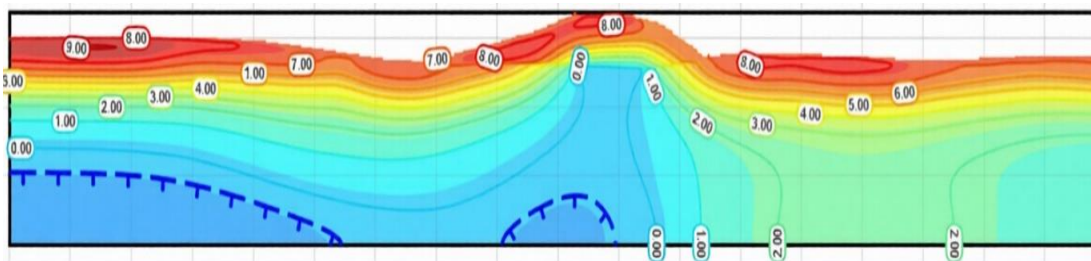


Рис. 7. Температурное распределение на десятый год моделирования (15.09.2034)

Выполненный прогнозный расчет температурного режима грунтов показал, что в условиях естественной эксплуатации с учетом глобального изменения климата без применения мер по адаптации наблюдается постепенная деградация ММГ. Это может привести к развитию неравномерных деформаций основания и снижению надежности железнодорожного пути.

Результаты моделирования также позволили оценить осадку сооружения, вызванную оттаиванием, и выполнить разделение на зоны поперечного профиля земляного полотна (рис. 8). Критериями зонирования послужили различия в тепловом режиме, гидрологических условиях, экспозиции склонов и степени техногенного воздействия. Таким образом, выделены четыре характерные зоны, отличающиеся по интенсивности криогенных процессов и уровню деформационной угрозы в период с 2024 по 2044 год (рис. 9). Такое пространственное разделение позволяет учитывать неоднородность криогенных процессов при обосновании специальных мероприятий и организации системы инженерно-гео-криологического мониторинга.

На рис. 8 обозначены границы зон, а также расположение контрольных скважин.

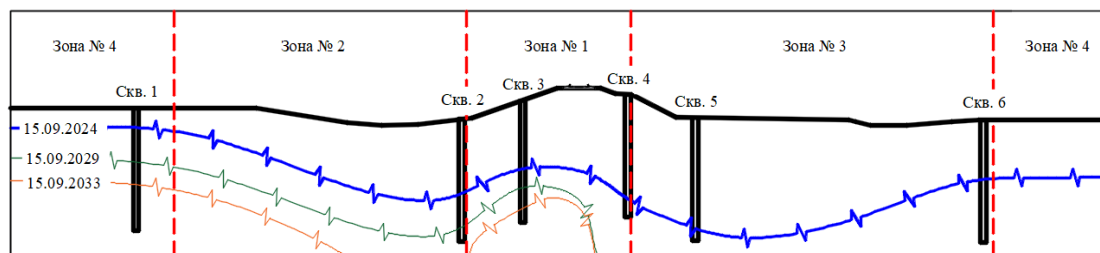


Рис. 8. Геокриологический поперечный профиль железнодорожного пути с выделенными характерными зонами и прогнозируемым положением кровли ММГ

Зона № 1 охватывает участок непосредственно под насыпью железнодорожного пути. Здесь наблюдается деградация ММГ, однако она менее интенсивна, чем в зоне № 2.

Зона № 2 расположена в непосредственной близости к откосной части насыпи и характеризуется увеличенной деградацией ММГ. В пределах зоны № 2 формируются термические просадки, в которых скапливаются поверхностные воды, создающие отепляющий эффект и способствующие дальнейшему оттаиванию грунтов. Деформации носят преимущественно вертикальный характер (термические просадки) и локализуются у подошвы откосов.

Зона № 3 расположена на откосной части насыпи с солнечной экспозицией склона. Она подвержена максимальному комплексу неблагоприятных факторов: влиянию насыпи, затоплению в теплый период года и интенсивной инсоляции. Сочетание этих факторов создает условия для наиболее интенсивной деградации ММГ на всем ее протяжении. Данная зона является наиболее уязвимой с точки зрения обеспечения надежности железнодорожного пути.

Зона № 4 представлена двумя видами территорий не подверженных прямому техногенному воздействию железнодорожной насыпи, но различающихся по экспозиции и степени деградации ММГ. Это участки с затененной экспозицией и сохранным мохово-торфяным покровом, выполняющим функцию природного теплоизолятора. Зона № 4 служит естественным индикатором изменения климата и может использоваться в качестве фоновой при сравнении с техногенно нарушенными участками.

Для визуализации деградации ММГ на рис. 9 для четырех временных горизонтов: 2024–2029 гг., 2024–2034 гг., 2024–2039 гг. и 2024–2044 гг., – выполнено распределение суммарной осадки дневной поверхности в поперечном профиле, где за начало отсчета по оси абсцисс принята левая грань модели. При расчетах осадки нагрузка от подвижного состава не учитывалась, что позволяет оценить влияние глобального изменения климата и криогенных процессов на развитие деформаций.

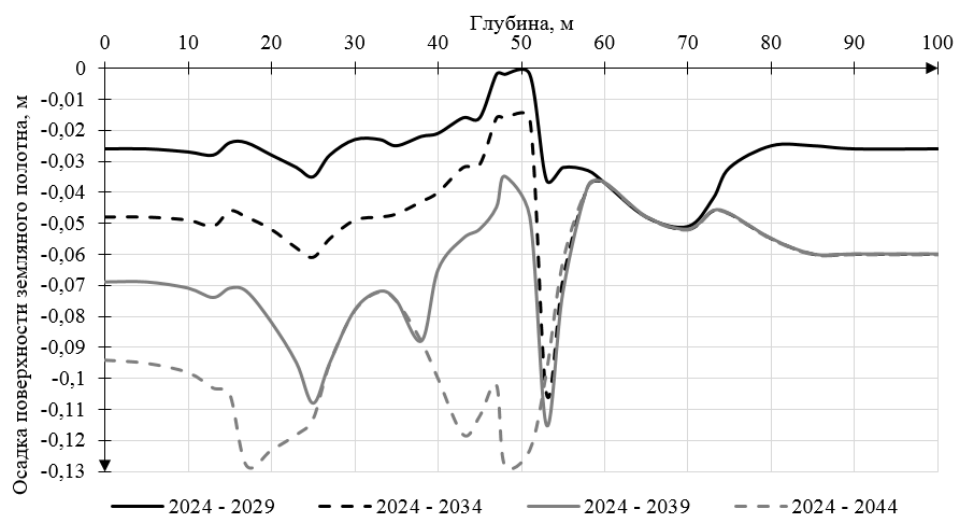


Рис. 9. Прогнозируемые значения суммарной осадки дневной поверхности при оттаивании в поперечном профиле

В течение первых пяти лет (2024–2029 гг.) осадки носят умеренный и относительно равномерный характер, локализованный преимущественно в зонах откосов. Под телом насыпи значительных деформаций не наблюдается, что свидетельствует о сохранении мерзлого состояния грунтов в этой области.

К концу десятилетнего периода (2024–2034 гг.) происходит интенсивное увеличение осадок, особенно в подоткосной части насыпи с солнечной экспозиции. Зона III полностью оттаивает, и осадка достигает своего пика на данном этапе. При этом скорость деформаций в этой зоне превышает значения в остальных участках.

На 15-летнем горизонте (2024–2039 гг.) наблюдается резкое усиление неравномерности осадок, что представляет повышенную опасность для надежности сооружения. Впервые появляется осадка под телом земляного полотна, что свидетельствует о начале оттаивания грунтов непосредственно под насыпью.

К концу 20-летнего периода (2024–2044 гг.) осадки достигают максимальных значений и обладают высокой степенью неравномерности.

Таким образом, криогенные деформации развиваются от начальной стадии локального проседания до критического состояния, характеризующегося общим прогрессирующим оттаиванием основания и развитием опасных неравномерных осадок.

Анализ результатов теплотехнического расчета и деформирования основания насыпи железнодорожного пути в условиях деградации ММГ позволил обосновать критерий целесообразности адаптационных мероприятий, основанный на выявлении границы перехода между двумя принципами использования ММГ.

На основе результатов численного моделирования установлено, что в течение первых 10 лет (2024–2034 гг.) процесс деградации ММГ носит локальный характер. В этот период под телом насыпи сохраняется мерзлое состояние грунтов, а деформации, хотя и интенсивно развиваются, остаются управляемыми и поддающимися регулированию, что позволяет эксплуатировать сооружение по I принципу.

После 10-летнего рубежа (с 2034 г.) наблюдается качественное изменение в характере криогенных процессов: начинается оттаивание грунтов непосредственно под телом насыпи, сопровождающееся значительной и неравномерной осадкой. Этот процесс указывает на переход системы в новое термодинамическое состояние, при котором восстановление и поддержание ММГ становится сложнее и экономически более затратным.

С этого момента развитие деформаций становится прогрессирующим и необратимым, а распределение осадок резко неравномерным, что создает опасность для надежности железнодорожного пути. Это свидетельствует о необходимости перехода на II принцип проектирования на ММГ.

На основе результатов выполненного моделирования обоснование целесообразности применения специальных мероприятий можно выполнить в соответствии с критерием недостижения допустимых осадок в связи с оттаиванием ММГ при глобальном изменении климата, который может быть выражен неравенством:

$$k_d = \frac{S_{sub}^i}{S_{lim}} \geq 1, \quad (1)$$

где S_{sub}^i – осадка основания сооружения на i год теплотехнического расчета;

S_{lim} – допустимая осадка основания сооружения в связи с оттаиванием ММГ.

Стоит отметить, что благодаря такому критерию можно выбрать очередность выполнения работ на линейно-протяженных объектах, так как осадка основания сооружения на разных участках будет достигать допустимых значений на различный год теплотехнического расчета.

Однако такие специальные мероприятия могут быть направлены как на поддержание I принципа проектирования на ММГ (замораживание), так и на переход ко II принципу проектирования на ММГ (оттаивание). В таком случае необходимо выполнить дополнительную проверку по технико-экономическому обоснованию термостабилизации грунтов. В этом случае предлагается эффективность термостабилизации оценивать через коэффициент теплообмена термостабилизаторов. Так критерий возможности сохранения I принципа проектирования на ММГ можно сформулировать следующим образом: эффективность термостабилизации достигается при поднятии границы ММГ до необходимого уровня с учетом глобального изменения климата и ограничивается значением коэффициента теплообмена, при котором технико-экономическая эффективность термостабилизации снижается при изменении параметров термостабилизаторов в сравнении с переходом на II принцип проектирования на ММГ, что может быть представлено в виде неравенств:

$$\alpha_{min} < \alpha \leq \alpha_{lim}, \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{lim}} \leq \alpha_{\text{max}}, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплообмена термостабилизатора, необходимый для поднятия ММГ до нужного уровня;

α_{min} – минимальный коэффициент теплообмена термостабилизатора, принимаемый 2 Вт/К·м²;

α_{lim} – предельный коэффициент теплообмена термостабилизатора, после которого снижается технико-экономическая эффективность в сравнении с переходом на II принцип проектирования на ММГ;

α_{max} – максимальный коэффициент теплообмена термостабилизатора, принимаемый 20 Вт/К·м².

Указанные предельные значения коэффициента теплообмена приняты на основе анализа технических характеристик, наиболее распространенных двухфазных термосифонов, функционирующих на основе парорефрижераторных циклов. Нижний порог соответствует минимальной эффективности пассивных охлаждающих устройств при неблагоприятных условиях теплоотдачи, тогда как верхний порог отражает предельную интенсивность теплопереноса, достижимую для серийных конструкций термосифонов при оптимальном режиме фазовых переходов теплоносителя [13, 14].

При этом переход ко II принципу проектирования на ММГ с использованием мероприятий по принудительному оттаиванию на эксплуатируемых сооружениях может быть выполнен только в случае отсутствия слабых и длительно консолидирующих грунтов, попадающих в область оттаивания, что связано с возможным значительным деформированием основания сооружения. В случае наличия таких грунтов необходимо прибегать к специальным мероприятиям, позволяющим осуществить плавный переход от I принципа ко II без допущения снижения надежности и дополнительных скачкообразных деформаций сооружения до завершения консолидации грунтов.

Так, авторами обоснован критерий целесообразности адаптационных мероприятий, который определяется наступлением момента перехода от локального оттаивания ММГ в подоткосных зонах к началу деградации непосредственно под телом земляного полотна, сопровождающимся интенсивными и неравномерными осадками; до этого момента сохраняется техническая возможность и экономическая целесообразность адаптационных мероприятий с эксплуатацией по I принципу, после него – ставится обоснованный переход на II принцип с учетом полного оттаивания основания и переработкой условий эксплуатации и мониторинга сооружения.

Заключение

Подтверждена возможность распространения базовой (ранее разработанной) геокриологической модели на другие участки транспортной инфраструктуры на основе сопоставления результатов инженерно-геокриологического мониторинга и результатов численного моделирования. Средние значения отклонений температур по всем скважинам находятся в пределах допустимой погрешности (0,1 °C) и изменяется от 0,06 до 0,1 °C.

Проведен прогнозный расчет деградации ММГ на период с 2024 по 2044 гг. с использованием программного комплекса. Получены данные о динамике изменения температурного поля и положения кровли многолетнемерзлых грунтов, а также осадки сооружения.

На основе анализа динамики изменения температурного поля и осадки сооружения выделены четыре характерные зоны, отличающиеся по интенсивности криогенных процессов и уровню деформационной угрозы в период с 2024 по 2044 год. Такое пространственное разделение позволяет учитывать неоднородность криогенных процессов при обосновании адаптационных мероприятий и организации системы инженерно-геокриологического мониторинга.

Предложен критерий обоснования целесообразности адаптационных мероприятий, позволяющий корректно определить дальнейший принцип проектирования на ММГ в условиях глобального изменения климата.

Список литературы

- 1 Андреева, Т. С. Цена курса не изменит / Т. С. Андреева // РЖД-Партнер. – 2019. – № 11–12. – С. 399–400. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/publications/rzd-partner/-11-12-399-400-iyun-2019/tsena-kursa-ne-izmenit/> (дата обращения: 12.04.2026).
- 2 Permafrost Degradation Threatening the Qinghai – Xizang Railway / Q. Wu, W. Ma, Y. Lai,

References

- 1 Andreeva, T. S. The price trend will not change the way / T. S. Andreeva // RZD-Partner. – 2019. – No. 11–12. – P. 399–400. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/publications/rzd-partner/-11-12-399-400-iyun-2019/tsena-kursa-ne-izmenit/> (date of access: 04/12/2026).
- 2 Permafrost Degradation Threatening the Qinghai – Xizang Railway / Q. Wu, W. Ma, Y. Lai, G. Cheng

G. Cheng // Engineering. – 2025. – Vol. 49. – P. 177–189. – ISSN 2095-8099. – DOI 10.1016/j.eng.2024.01.023.

3 Обоснование системы инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемых насыпей линейных транспортных сооружений в условиях Ямало-Ненецкого автономного округа / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, Д. А. Усов, Р. С. Печенкин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1 (73). – С. 68–76. – DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_68.

4 **Liston, G.** A snow-transport model for complex terrain / G. Liston, M. Sturm // Journal of Glaciology. – 1998. – Vol. 44 (148). – P. 498–516. – DOI 10.3189/S0022143000002021.

5 **Qingbai, W.** The thermal effect of differential solar exposure on embankments along the Qinghai – Tibet Railway / W. Qingbai, L. Yongzhi, H. Zeyong // Cold Regions Science and Technology. – 2011. – Vol. 66 (1). – P. 30–38. – ISSN 0165-232X. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.01.001> (дата обращения: 12.04.2026).

6 Sunny-shady slope effect on the thermal and deformation stability of the highway embankment in warm permafrost regions / Yaling Chou, Yu Sheng, Yuwen Li [et al.] // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – Vol. 63 (1–2). – P. 78–86. – ISSN 0165-232X. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.05.001> (дата обращения: 12.04.2026).

7 **Ланис, А. Л.** Геокриологическое моделирование системы «сооружение – основание» в условиях деградации многолетнемерзлых грунтов / А. Л. Ланис, Д. А. Усов, Е. И. Нагаев // Construction and Geotechnics. – 2025. – Т. 16, № 4. – С. 46–63. – DOI 10.15593/2224-9826/2025.4.04.

8 Социальная устойчивость регионов российского Севера и Арктики : оценка и пути достижения / Е. П. Башмакова, И. А. Гущина, Д. Л. Кондратович [и др.]. – Апатиты : Колеский научный центр Российской академии наук, 2018. – 169 с. – ISBN 978-5-91137-384-9.

9 **Cheng, G.** Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau / G. Cheng, T. Wu // Journal of Geophysical Research : Earth Surface. – 2007. – Vol. 112, F02S03. – DOI 10.1029/2006JF000631.

10 **Wu, Q.** Engineering geological characteristics and processes of permafrost along the Qinghai – Xizang (Tibet) Highway / Q. Wu, B. Shi, H.-Y. Fang // Engineering Geology. – 2003. – Vol. 68. – P. 387–396.

// Engineering. – 2025. – Vol. 49. – P. 177–189. – ISSN 2095-8099. – DOI 10.1016/j.eng.2024.01.023.

3 Substantiation of the engineering-geocryological monitoring system for operated embankments of linear transport facilities in the conditions of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug / A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, D. A. Usov, R. S. Pechenkin // The Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport. – 2025. – No. 1 (73). – P. 68–76. – DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_68.

4 **Liston, G.** A snow-transport model for complex terrain / G. Liston, M. Sturm // Journal of Glaciology. – 1998. – Vol. 44 (148). – P. 498–516. – DOI 10.3189/S0022143000002021.

5 **Qingbai, W.** The thermal effect of differential solar exposure on embankments along the Qinghai – Tibet Railway / W. Qingbai, L. Yongzhi, H. Zeyong // Cold Regions Science and Technology. – 2011. – Vol. 66 (1). – P. 30–38. – ISSN 0165-232X. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.01.001> (date of access: 04/12/2026).

6 Sunny-shady slope effect on the thermal and deformation stability of the highway embankment in warm permafrost regions / Yaling Chou, Yu Sheng, Yuwen Li [et al.] // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – Vol. 63 (1–2). – P. 78–86. – ISSN 0165-232X. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.05.001> (date of access: 04/12/2026).

7 **Lanis, A. L.** Geocryological modeling of the “structure – foundation” system under conditions of permafrost degradation / A. L. Lanis, D. A. Usov, E. I. Nagaev // Construction and Geotechnics. – 2025. – Vol. 16, No. 4. – P. 46–63. – DOI 10.15593/2224-9826/2025.4.04.

8 Social sustainability of the regions of the Russian North and the Arctic : assessment and ways of achievement / E. P. Bashmakova, I. A. Gushchina, D. L. Kondratovich [et al.]. – Apatity : Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 2018. – 169 p. – ISBN 978-5-91137-384-9.

9 **Cheng, G.** Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau / G. Cheng, T. Wu // Journal of Geophysical Research : Earth Surface. – 2007. – Vol. 112, F02S03. – DOI 10.1029/2006JF000631.

10 **Wu, Q.** Engineering geological characteristics and processes of permafrost along the Qinghai – Xizang (Tibet) Highway / Q. Wu, B. Shi, H.-Y. Fang // Engineering Geology. – 2003. – Vol. 68. – P. 387–396.

11 Comparison of permafrost degradation under natural ground surfaces and embankments of the Qinghai – Tibet Highway / F. Yu, J. Qi, X. Yao, Y. Liu // Cold Regions Science and Technology. – 2015. – Vol. 114. – P. 1–8.

12 Projection of Regional Climate Change for 2023–2064 In The Northern Part of the Western Russian Arctic : A Support for Russian Railways / A. G. Kostianoy, A. D. Gvishiani, S. A. Lebedev [et al.] // Geography, Environment, Sustainability. – 2025. – Vol. 4 (18). – P. 61–79. – URL: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2025-4179> (дата обращения: 12.04.2026).

13 **Ибрагимов, Э. В.** Экспериментальные исследования инновационных конструкций полонаклонных конструкций термостабилизаторов грунта / Э. В. Ибрагимов, Я. А. Кроник, Е. В. Куплинова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 4 (45). – № 3. – С. 208–220.

14 Сравнительная оценка эффективности работы двухфазных термосифонов для термостабилизации грунтов в криолитозоне / Р. М. Баясан, А. Д. Лобанов, Т. В. Баясан, С. И. Голубин // Инженерные изыскания. – 2012. – № 7. – С. 61–63. – ISSN 1997-8650.

11 Comparison of permafrost degradation under natural ground surfaces and embankments of the Qinghai – Tibet Highway / F. Yu, J. Qi, X. Yao, Y. Liu // Cold Regions Science and Technology. – 2015. – Vol. 114. – P. 1–8.

12 Projection of Regional Climate Change for 2023–2064 In The Northern Part of the Western Russian Arctic : A Support for Russian Railways / A. G. Kostianoy, A. D. Gvishiani, S. A. Lebedev [et al.] // Geography, Environment, Sustainability. – 2025. – Vol. 4 (18). – P. 61–79. – URL: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2025-4179> (date of access: 04/12/2026).

13 **Ibragimov, E. V.** Experimental studies of innovative designs of hollow-inclined soil thermal stabilizer structures / E. V. Ibragimov, Ya. A. Kronik, E. V. Kuplinova // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Building. – 2014. – No. 4 (45). – No. 3. – P. 208–220.

14 Comparative assessment of the performance of two-phase thermosyphons for thermal stabilization of soils in the cryolithic zone / R. M. Bayasan, A. D. Lobanov, T. V. Bayasan, S. I. Golubin // Engineering Survey. – 2012. – No. 7. – P. 61–63. – ISSN 1997-8650.

E. I. Nagaev, D. A. Usov, A. L. Lanis, D. V. Velichko

JUSTIFICATION OF THE FEASIBILITY OF ADAPTATION MEASURES FOR PERMAFROST DEGRADATION IN THE FOUNDATIONS OF TRANSPORT STRUCTURES

Abstract. In the context of climate change, ensuring the sustainable operation of transport infrastructure located in permafrost zones has become particularly urgent. For structures operated according to Principle I (maintaining the frozen state of the ground), rising average annual temperatures create the conditions for permafrost degradation. This leads to the development of cryogenic deformations and reduction in the reliability and safety of the structures. This article presents the results of geocryological modeling of the "structure-foundation" system on the Chum-Labytnangi railway section in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, conducted using specialized software packages. The possibility of extending the basic geocryological model to other sections of transport infrastructure was confirmed by comparing numerical modeling results with engineering-geocryological monitoring data; including temperature measurements in boreholes not exceeding 0.1°C. Based on the analysis of temperature fields and deformations, a criterion for the feasibility of adaptation measures is substantiated. The obtained results have practical significance for substantiating a long-term strategy for adapting transport infrastructure to climate change.

Keywords: degradation of permafrost soils, predictive modeling, railway track, cryogenic deformations, climate change.

For citation: Justification of the feasibility of adaptation measures for permafrost degradation in the foundations of transport structures / E. I. Nagaev, D. A. Usov, A. L. Lanis, D. V. Velichko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 48–60. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_48.

Сведения об авторах**Нагаев Егор Игоревич**

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
аспирант,
e-mail: einagaev@mail.ru

Усов Дмитрий Андреевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: usovda96@yandex.ru

Ланис Алексей Леонидович

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: alangeo@bk.ru

Величко Дмитрий Валерьевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: velichko@stu.ru

Information about the authors**Nagaev Egor Igorevich**

Siberian Transport University (STU),
Chair “Railway Track and Track Facilities”,
Postgraduate Student,
e-mail: einagaev@mail.ru

Usov Dmitry Andreevich

Siberian Transport University (STU),
Chair “Railway Track and Track Facilities”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: usovda96@yandex.ru

Lanis Alexey Leonidovich

Siberian Transport University (STU),
Chair “Railway Track and Track Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: alangeo@bk.ru

Velichko Dmitry Valerievich

Siberian Transport University (STU),
Chair “Railway Track and Track Facilities”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: velichko@stu.ru