

УДК 624.139.24

ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НАСЫПИ СЕВЕРНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ (В ТУНДРОВОЙ ЗОНЕ У СТАНЦИИ ХАНОВЕЙ)

Павел Игоревич Котов^{1✉}, Владислав Сергеевич Исаев²,
Евгений Николаевич Оспенников³, Елена Павловна Шибилia⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Москва, Россия; kotovpi@mail.ru✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Москва, Россия; isaev@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Москва, Россия; neogeoman@mail.ru

⁴ Норвежский университет наук и технологий Тронхейм, Норвегия; elena.scibilia@ntnu.no

Аннотация. Приведены результаты полевых исследований насыпи Северной железной дороги в районе учебного полигона кафедры геокриологии МГУ имени М.В. Ломоносова у станции Хановей, где выполнялись следующие виды работ: статическое зондирование грунтов, проходка горных выработок, измерение мощности слоя сезонного оттаивания и температуры грунтов, мониторинг осадки насыпи, лабораторные исследования. На основе этих данных в программе Qfrost составлена математическая модель с учетом неравномерности снежного покрова в исследуемом районе. Расчеты температурного режима в основании насыпи до 2050 г., проведенные с учетом климатических изменений (согласно сценарию RCP 4.5), показали, что мощность талика у насыпи за 30 лет увеличится на 40%, а без учета этого фактора — на 17%. Рассмотрены особенности положения и строения насыпи, состава и свойств грунтов оснований, которые в значительной степени влияют на ее устойчивость.

Ключевые слова: железные дороги, мерзлота, насыпь, изменение климата, моделирование, прогноз

Для цитирования: Котов П.И., Исаев В.С., Оспенников Е.Н., Шибилia Е.П. Прогноз температурного режима насыпи Северной железной дороги (в тундровой зоне у станции Хановей) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 2. С. 49–58.

FORECAST TEMPERATURE REGIME OF NORTHERN RAILWAY EMBANKMENT (IN TUNDRA NEAR HANOVEY STATION)

Pavel I. Kotov^{1✉}, Vladislav S. Isaev², Evgeniy N. Ospennikov³, Elena P. Scibilia⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kotovpi@mail.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; isaev@geol.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; neogeoman@mail.ru

⁴ Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway; elena.scibilia@ntnu.no

Abstract. The article presents the results of field studies near Northern Railway embankment (Hanovey station) in fieldwork area of Geocryology Department (Lomonosov Moscow State University), where performed: cone penetration test, measuring thickness of active layer of and soil temperatures, monitoring settlement of embankment, laboratory tests. Mathematical model was compiled in the Qfrost program based on these data taking into account the unevenness of the snow cover in the study area. Calculations of the temperature regime of the embankment until 2050, carried out taking into account climatic changes (according to the RCP 4.5 scenario), showed that the thickness of the talik at the embankment will increase 40% in 30 years and without taking this factor into account — 17%. The article also discusses the features of the position and structure of the embankment, the composition and properties of frozen soils, which significantly affect the stability of the embankment.

Keywords: railways, permafrost, embankment, climate change, modeling, forecast

For citation: Kotov P.I., Isaev V.S., Ospennikov E.N., Scibilia E.P. Forecast temperature regime of Northern Railway embankment (in tundra near Hanovey station). *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 2: 49–58 (In Russ).

Введение. Криолитозона занимает около 65% территории России [Ершов, 2002]. В настоящее время протяженность эксплуатируемых железных дорог в России в зонах распространения многолетнемерзлых пород составляет около 5 тыс. км. Ввод в эксплуатацию первой железной дороги на мерзлоте (Забайкальская — часть Транссибирской магистрали) относится к началу XX в., а активное

строительство железных дорог продолжается в настоящее время (линии Беркамит—Нижний Бестях, участки Северного широтного хода: Салехард—Бованенково, Салехард—Надым и т.д.). Эксплуатация существующих железных дорог показывает, что происходят многочисленные деформации земляного полотна, связанные с деградацией мерзлоты [Kondratiev, 2017].



Рис. 1. Характерные просадки пути в районе исследований

Протяженность участков с осадками насыпей на железных дорогах составляет свыше 800 км, что приводит к увеличению эксплуатационных затрат и необходимости проведения работ по исправлению пути. При этом 75% участков приходится на Дальневосточную железную дорогу, 13% — на Восточно-Сибирскую, 6% — на Северную, остальные 5% — на Забайкальскую и Свердловскую [Dydyshko, 2017]. В связи с этим основное внимание исследователей было обращено на изучение первых двух регионов [Kondratiev, 2017; Kudryavtsev et al., 2017].

Длина Северной железной дороги, расположенной в зоне вечной мерзлоты, составляет 460 км. Движение поездов по Северной железной дороге осуществляется с помощью тепловозов. До станции Инта железная дорога двухпутная, а участок Инта–Воркута — однопутный. При этом только железнодорожный транспорт обеспечивает круглогодичную связь г. Воркута (население около 70 тыс. человек) с остальными частями страны. Постоянного автомобильного сообщения с городом не существует. Воркутинский район располагает самыми большими в Европе запасами угля. Воркута — административный и логистический центр для организаций, занимающихся эксплуатацией крупнейшего газопровода в России Бованенково–Ухта. Таким образом, устойчивость полотна железной дороги имеет стратегическое значение для всего региона.

Строительство железной дороги в районе г. Воркута началось в 1938 г., временная железная дорога, построенная из местных материалов, существовала до 1950 г. В 1960-х гг. была проведена капитальная реконструкция земляного полотна, и в дальнейшем на дороге проводились лишь плановые ремонты наиболее деформированных участков.

Строительство линии Инта–Воркута и последующая эксплуатация вызвали существенное изменение мерзлотной обстановки. Это обусловлено нарушением теплообмена поверхности земли с атмосферой в результате изменения водопроницаемо-

сти грунтов, переформирования снежных отложений [Isaev et al., 2020], что приводит к увеличению деформаций железнодорожного полотна и ограничению массы железнодорожных составов.

За годы эксплуатации проводились многочисленные выправки пути с подъемами на участках деформирующегося земляного полотна. Однако эти мероприятия не устраняют причину просадок, а лишь исправляют последствия. Актуальная задача — проведение математического моделирования взаимодействия насыпи Северной железной дороги в районе распространения высокотемпературных многолетнемерзлых пород с прогнозом изменения геокриологических условий (в том числе с учетом вариации климата) и оценкой изменения устойчивости насыпи. Эти данные в дальнейшем можно использовать для планирования мероприятий по инженерной защите и повышения надежности эксплуатации железнодорожного полотна в регионе.

Природные условия участка. За модельный участок принят район около железнодорожной станции Хановой (31 км от г. Воркута), где расположен учебный полигон кафедры геокриологии МГУ имени М.В. Ломоносова. По данным проведенного попикетного обследования на этом участке пути протяженностью 10 км наблюдаются значительные деформации, характер которых показан на рис. 1.

Рельеф местности представлен небольшими холмами, собранными в гряды, и холмисто-грядовыми формами субмеридионального простиранья, чередующимися с обширными, часто заболоченными понижениями. Относительная высота увалов над уровнями рек колеблется в пределах 25–70 м, ширина — от 2 до 6 км и более.

Характерная особенность территории — обилие озер. Озерность этой территории достигает 55%. На территории Воркутинского района насчитывается до 1620 озер. Заозеренность и заболоченность территории связаны в основном с наличием мерзлых пород,

Климатические характеристики (по данным метеостанции г. Воркута)

Таблица 1

Показатель	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
$T_{\text{возд}}, ^\circ\text{C}$	−19,91	−19,71	−15,38	−9,27	−2,24	7,05	12,65	9,66	4,23	−4,17	−12,91	−16,99	−5,58
H , мм	351	502	718	787	567	—	—	—	—	88	154	213	—

Примечания. $T_{\text{возд}}$ — среднемесячная температура воздуха (1937–2019); H — среднемесячная мощность снежного покрова (2005–2019).

развитие которых определяет особенности режима грунтовых и подземных вод.

Климат Воркутинского района субарктический. К особенностям субарктического климата относится продолжительная холодная зима, сменяющаяся холодным и прохладным летом. Безморозный период составляет всего около 70 сут., тогда как продолжительность зимы — около 8 мес. Среднегодовая температура воздуха на тундровых пространствах в окрестностях г. Воркута составляет около $-5,58\text{ }^\circ\text{C}$ (за период с 1937 по 2019 г.), а мощность снежного покрова на конец апреля в среднем — 787 мм, максимально зафиксированная — 1560 мм (табл. 1).

Мощность многолетнемерзлых пород колеблется в широких пределах: типичная мощность для Воркуты 50–100 м, для Инты 8–10 м. Температура на глубине нулевых годовых амплитуд составляет: в Воркуте обычно от $-0,2$ до $-1,0\text{ }^\circ\text{C}$, в Инте около $0\text{ }^\circ\text{C}$. Распространение многолетнемерзлых пород на исследуемом участке неравномерное — встречены мерзлые и талые участки, а также зоны с заглубленной кровлей мерзлых грунтов.

Материалы и методы исследований. Изучение состава и свойств грунтов в районе насыпи проводилось комплексом методов инженерно-геологических исследований.

Методом наземной георадиолокации на насыпи не удалось обнаружить кровлю многолетнемерзлых грунтов, что связано со структурой насыпи и высокой температурой мерзлых грунтов в рассматриваемом районе.

Инженерно-геологическое бурение на вершине насыпи нецелесообразно из-за необходимости долговременной остановки движения поездов, поэтому использовался метод статического зондирования специальной установкой компании FUGRO, смонтированной на путеизмерительном вагоне, от самой верхней части насыпи без разбора шпальной решетки [Sokolov et al., 2016]. За окно в движении поездов (3 ч.) удалось пройти 12 м. В результате по данным зондирования выделено четыре слоя (балласт, гравийно-песчаная смесь, песок насыпи, и грунты основания, представленные суглинком), которые отличаются по механическим свойствам (рис. 2). Неоднородность насыпи связана с историей строительства железной дороги в этом регионе. В 1941–1942 гг. для обеспечения СССР углем насыпь железнодорожного полотна была отсыпана песчано-гравийными грунтами из местных карьеров. Грунты постоянно испытывали деформации. В 1950–1960 гг. для поддержания положения проектных отметок насыпи были использованы балласт и гравий. В связи с этим в центре насыпи находится плотный обводненный слой песчаного грунта.

Измерения температуры, выполненные зондом установки статического зондирования, показали значения $-0,5\text{ }^\circ\text{C}$ на глубине 7 м от балласта. Средняя температура грунтов в близлежащих скважинах, расположенных в 20–40 м от насыпи, составляет от $-0,2$ до $-0,6\text{ }^\circ\text{C}$ [Isaev et al., 2020].

В дальнейшем из шурфа у основания насыпи отобраны образцы из слоев III и VI, для которых

Таблица 2

Свойства грунтов

Свойства пород	Балласт, I	Гравийно-песчаная смесь, II	Песок насыпи, III	Суглинок, VI
Плотность скелета, г/см^3	1,9	2,03	1,7	1,44
Влажность весовая, %	3	5	15	25
Влажность незамерзшей воды, %	0	0	0	10
Теплопроводность талых пород, $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	1,65	1,8	2,03	1,33
Теплопроводность мерзлых пород, $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	1,7	1,85	2,31	1,58
Объемная теплоемкость талых пород, $\text{кДж/(м}^3\cdot^\circ\text{C)}$	1665	1873	2804	3005
Объемная теплоемкость мерзлых пород, $\text{кДж/(м}^3\cdot^\circ\text{C)}$	1545	1667	2162	2487
Объемная теплота фазовых переходов, МДж/м^3	19	33	102	82
Температура начала замерзания пород, $^\circ\text{C}$	0	0	$-0,1$	$-0,2$

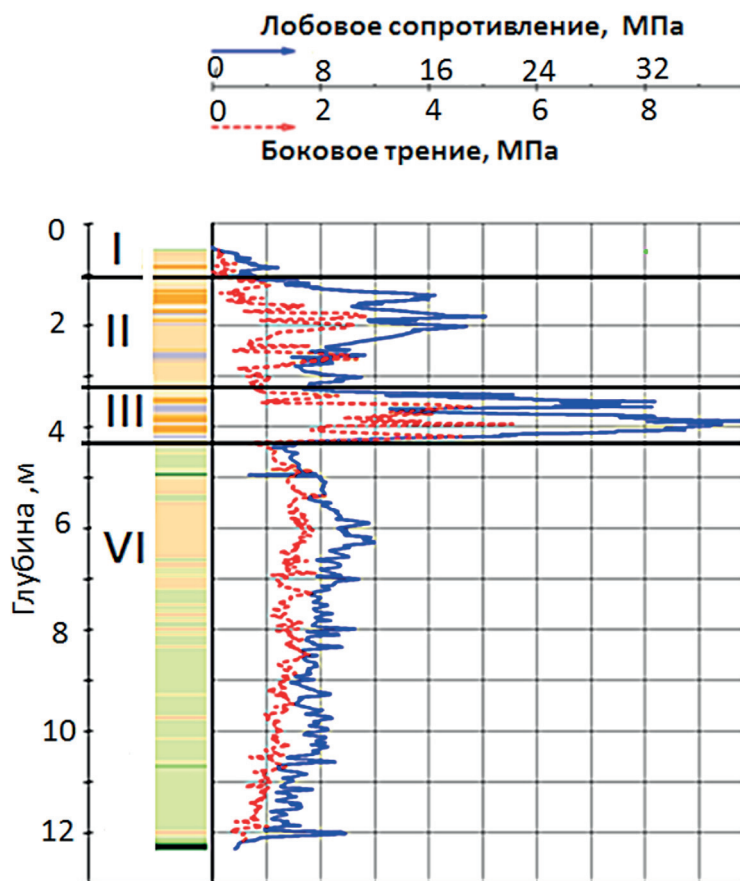


Рис. 2. Результаты статического зондирования

определены плотность, влажность, пределы пластичности, температура начала замерзания. Для слоев I и II использованы табличные данные [Хрусталеv, 2005].

Необходимые для расчета теплофизические свойства пород рассчитаны в соответствии с нормативами СП 25.13330.2012 [2012]. Расчетные и экспериментальные данные для каждого слоя насыпи приведены в табл. 2.

Железнодорожная насыпь имеет трапециевидную форму сечения при ширине основной площадки 4,4 м, ширина насыпи по низу 16,0 м, высота 4,2 м.

Методика математического моделирования. Для расчетов использовали программу Qfrost, где учитывался только кондуктивный механизм переноса тепла, который считается основным при моделировании температурного режима [Песоцкий, 2016]. Кондуктивный перенос тепла описывается эмпирическим законом Фурье, который устанавливает пропорциональную зависимость между плотностью теплового потока и градиентом температуры.

Наличие насыпи, как положительной формы рельефа, существенно влияет на характер снегонакопления в условиях выраженного метелевого переноса снега. Поскольку снежный покров в этих природных условиях — один из основных температурообразующих факторов, то его необходимо учитывать [Isaev et al., 2020]. При создании модели были

использованы следующие предпосылки. Поскольку насыпь имеет симметричную форму, моделировали только половину объекта, отделенную вертикальной границей, которая проходит по оси насыпи. Вертикальный размер расчетной области должен превышать глубину проникновения годовых колебаний температуры в породах, которая в рассматриваемом районе составляет 10 м. Поэтому мощность расчетной области принимали равной 20 м. Естественные условия остаются практически не нарушенными на расстоянии около 3–5 размеров инженерного объекта. С учетом того, что полуширина основания насыпи составляет 8 м, удаление правой теплонепроницаемой границы области от оси насыпи принято равным 32 м [Хрусталеv, 2005].

Для обеспечения единственности решения уравнения теплопроводности необходимо задать начальные и граничные условия. Начальные условия описывают температурное поле в некоторый момент времени, принимаемый за начало отсчета. В качестве начального условия задавали постоянную температуру пород, равную $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, во всей расчетной области. Эта среднегодовая температура характерна для пород исследуемого участка.

В рассматриваемой задаче левая граница на оси насыпи, соответствующая плоскости симметрии температурного поля, непроницаема для тепла, и на ней задается нулевое условие II рода. Такое же условие задается и на удаленных от изучаемого объекта нижней и правой границах. На верхней границе применяется условие III рода, поскольку здесь имеют место теплоизолирующие покровы — снежный и растительный, а также разная температура у насыпи и в природных условиях [СП..., 2019].

По мере удаления от оси насыпи выделяется 5 участков с разными условиями снегонакопления и развития биогенных напочвенных покровов. На основной площадке насыпи (полуширина зоны 2,2 м) зимой существует маломощный снежный покров (в среднем за зиму около 0,1 м), летом грунт оголен. Верхняя часть склона насыпи характеризуется снегонакоплением, близким к нормальному ($\sim 0,3\text{ м}$) и отсутствием напочвенного покрова. На нижней части откоса наблюдается повышенное снегонакопление — в 1,5–2 раза больше, чем для открытой поверхности (для расчета принято, что оно больше в 1,75 раза), и отсутствие биогенного покрова. Начиная от подножия откоса насыпи в полосе шириной 5 м снег повышенной мощности (такой же, как в предыдущей части) залегает уже на мохово-лишайниковом покрове. Наконец, дальше начинается область естественного снегонакопления на биогенном покрове.

Таблица 3

Граничные условия модели

Номер условия	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура												
1	–19,91	–19,71	–15,38	–9,27	–2,24	12,10	18,22	14,34	6,39	–4,17	–12,91	–16,99
2,3	–19,91	–19,71	–15,38	–9,27	–2,24	11,75	17,76	14,01	6,26	–4,17	–12,91	–16,99
4,5	–19,91	–19,71	–15,38	–9,27	–2,24	7,05	12,65	9,66	4,23	–4,17	–12,91	–16,99
Коэффициент теплообмена												
1	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	14,00	14,00	14,00	14,00	7,49	3,75	3,75
2	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	14,00	14,00	14,00	14,00	4,26	2,43	1,76
3	0,61	0,43	0,30	0,27	0,38	14,00	14,00	14,00	14,00	2,43	1,39	1,00
4	0,42	0,30	0,21	0,19	0,27	6,43	6,43	6,43	6,43	1,44	0,89	0,67
5	0,71	0,51	0,36	0,33	0,45	6,43	6,43	6,43	6,43	2,20	1,44	1,10

Указанные закономерности учитываются ниже при задании граничных условий модели, в частности, при задании температуры насыпи и коэффициента теплообмена (табл. 3).

Расчет температуры насыпи в летний период проведен с учетом поправки на инсоляцию по методике, приведенной в работе Л.Н. Хрусталева [2005], с использованием климатических данных [СП..., 2019]. Для периодов с отрицательной среднемесячной температурой температура на поверхности основной площадки и снежного покрова принималась равной температуре воздуха. Трасса на исследуемом участке проходит в меридиональном направлении, поэтому для откосов западной и восточной экспозиций вводился коэффициент к величине радиационного баланса, равный полусумме его значений для откосов северной и южной экспозиции [Кудрявцев и др., 1974]. На основной горизонтальной площадке насыпи значение коэффициента задавалось равным 1.

Значение коэффициента теплообмена на поверхности пород для летнего и зимнего сезонов рассчитывали следующим образом. Сначала находили термическое сопротивление покрова на различных участках по формуле:

$$R = h/\lambda, \quad (1)$$

где h и λ — мощность и теплопроводность конкретного слоя теплоизоляции на поверхности соответственно.

Теплопроводность снега рассчитывалась по формуле Проскуракова:

$$\lambda_{\text{сн}} = 0,021 + 1,01\rho_{\text{сн}}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{сн}}$ и $\rho_{\text{сн}}$ — теплопроводность и мощность снега соответственно.

Теплопроводность снега составляет 0,27 Вт/м·К в соответствии со средней за зиму плотностью 0,25 г/см³ в природных условиях [Методические..., 1988]

и 0,37 Вт/м·К в соответствии со средней за зиму плотностью 0,35 г/см³ у насыпи. Теплопроводность мохово-лишайникового покрова была измерена зондовым методом и составляла в талом состоянии 0,45 Вт/м·К, а в мерзлом — 0,53 Вт/м·К. Если на поверхности залегает несколько слоев изоляции (растительность и снежный покров), то их общее термическое сопротивление равно сумме значений сопротивления отдельных слоев. Коэффициент теплообмена на поверхности пород рассчитывался по формуле:

$$\alpha = 1/R, \quad (3)$$

где α — коэффициент теплообмена, R — общее термическое сопротивление.

После завершения всех операций по созданию модели рассчитывали динамику температурных полей на 59 лет с 1960 по 2019 г. За конечный результат расчета принимали значение 15 сентября 2019 г. Мониторинговые исследования на учебном полигоне Хановой проходили с 10 по 20 сентября в рамках полевой геоэкологической практики. Эти данные использовались для верификации модели, а затем выполнялся прогноз на 30 лет с учетом климатических изменений и без таковых.

Результаты исследований и их обсуждение.

После выполнения математического моделирования получены следующие геоэкологические характеристики: среднегодовая температура пород и мощность слоя сезонного оттаивания на различных участках. В результате расчетов установлено, что температура на глубине колебания нулевой амплитуды в природных условиях составляет 0,55 °С, а у насыпи на глубине 7 м от балласта — 0,45 °С. Глубина сезонного оттаивания в природных условиях 1,4 м, а у основания насыпи формируется талик мощностью почти в 4 раза больше (5,3 м, рис. 3). Эти данные вполне соответствуют натурным, которые получены при полевых исследованиях. Результаты матема-

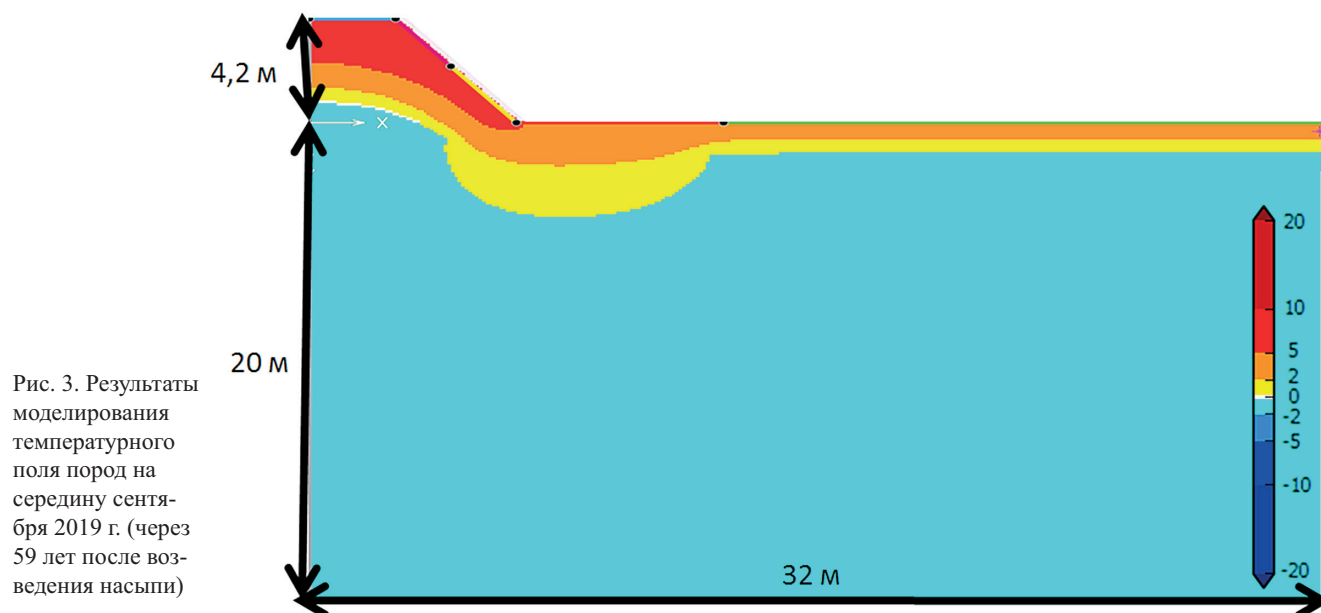


Рис. 3. Результаты моделирования температурного поля пород на середину сентября 2019 г. (через 59 лет после возведения насыпи)

тического моделирования показали, что в течение первых 5 лет начинается формироваться талик вдоль подножия склона насыпи в виде полосы шириной 4–5 м (рис. 3).

Обработка значений среднегодовой температуры воздуха показала, что с 1998 г. наблюдался ее устойчивый рост (рис. 4), а в период с 1937 по 1998 г. среднегодовая температура в среднем не менялась и составляла $-5,8^{\circ}\text{C}$.

За последние десятилетия изменение климата оказало воздействие на природные и природно-технические системы на всех континентах. Во многих экосистемах происходят вызванные климатом изменения природной среды [IPCC, 2013]. Для понимания потенциальных воздействий изменения климата на общество и экосистемы используются

сценарии, предназначенные для исследования таких последствий.

Основными инструментами, которые используются для прогноза изменения климата, служат глобальные климатические модели общей циркуляции атмосферы и океана. В настоящее время доступны модельные расчеты изменения климата, сформированные в рамках международного проекта CMIP5 при подготовке 5-го оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата [IPCC, 2013]. В проекте CMIP5 представлены сценарии RCP (Representative Concentration Pathway) или будущих оценок парниковых газов и других радиационно-активных веществ. Эти сценарии предполагают различные прогнозы выбросов парниковых газов и, следовательно, связанное с ними прираще-

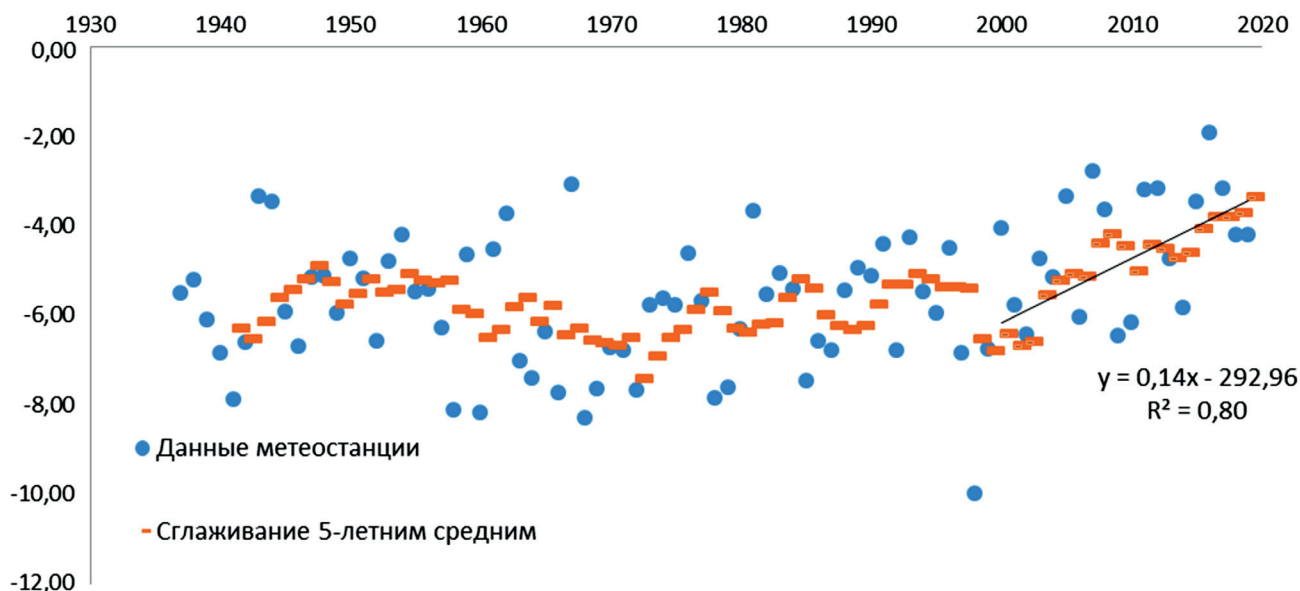


Рис. 4. Значения температуры воздуха на метеостанции в г. Воркута (1937—2019)

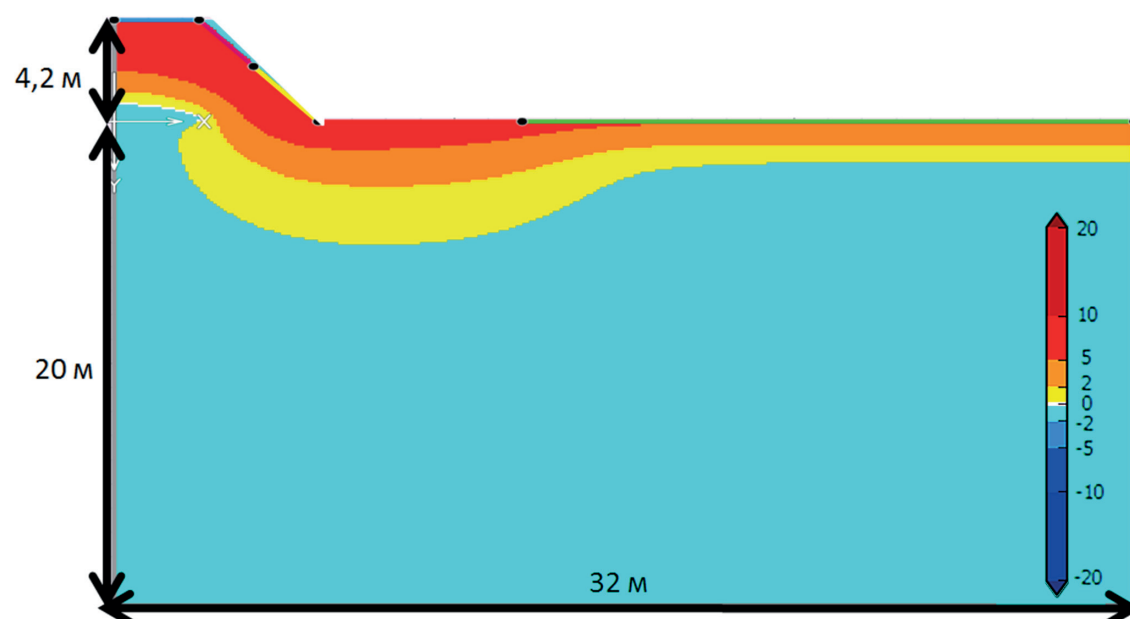


Рис. 5. Результаты моделирования температурного поля пород на середину сентября 2050 г. с учетом тренда к потеплению

ние глобального радиационного баланса к 2100 г. Однако повышение температуры отличается для различных областей в зависимости от региональных факторов. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды разработала для территории России прогнозы повышения температуры [Второй оценочный..., 2014]. Сценарий RCP 2.6 предполагает лишь небольшое увеличение эмиссии газов, а повышение температуры на территории Республики Коми будет составлять $3 \pm 1,2$ °C, при сценарии RCP 4,5– $4,8 \pm 1,4$ °C, а при сценарии RCP 8,5 — $8,1 \pm 1,7$ °C.

Если подставить в уравнение, которое аппроксимировано линейной функцией, температуру воздуха с 1998 по 2019 г. (рис. 4), для 2100 г. получим, что температура увеличится к этому году на 4,4 °C. Это соответствует сценарию RCP 4.5, поэтому при моделировании использовался тренд потепления 0,048 °C/год. Это было сделано, чтобы оценить возможное изменение температурного режима у насыпи при дальнейшем потеплении климата (при использовании умеренного сценария изменения температуры воздуха).

Моделирование температурного режима грунтов на следующие 30 лет (с 2019 по 2050 г.) показало, что если не брать в расчет потепление климата, то происходит незначительно изменение мощности слоя сезонного оттаивания в природных условиях, а талик вдоль подножия склона насыпи увеличится до 6,2 м. При расчете с учетом сценария RCP 4.5 глубина сезонного оттаивания в природных условиях увеличилась в 2 раза (до 2,8 м), а в районе насыпи — до 7,4 м (рис. 5).

Моделирование температурного режима насыпи было выполнено для территории Воркуты В.А. Исаковым [2015], однако для расчетов использованы модельные свойства и не учитывалось увеличение мощности снежного покрова за счет метелевого пе-

реотложения. Данные моделирования [Исаков, 2015] показали увеличение глубины оттаивания с формированием зон оттаивания у насыпи мощностью до 1–2 м, а при использовании описанной выше методики и свойств грунтов — 5–6 м, что соответствует данным полевым исследованиям. В последнее время многие исследователи учитывают неоднородность мощности снежного покрова при моделировании температурного режима насыпи [Fortier et al., 2011; O'Neill, Burn, 2017], а также в природных условиях для высокотемпературных мерзлых грунтов [Johansson et al., 2013]. Для более точной оценки влияния снежного покрова необходимо учитывать не средние многолетние значения, а использовать прогнозы изменения мощности снежного покрова в соответствии с климатическими моделями [Fortier et al., 2011; Jan, 2020].

Неоднородное распределение снега у насыпи в значительной степени влияет на устойчивость полотна железной дороги. По данным инженерных обследований службы надзора Северной железной дороги в рассматриваемом районе просадки развивались с начала эксплуатации дороги. Суммарная величина просадки на этом участке составляла 140–190 мм в год, но в отдельные годы увеличивалась до 230–250 мм. Нужно учитывать, что просадки происходили в разных частях дороги (участок около 10 км) и могли не повторяться каждый год. В 2016 г. было зафиксировано 303 просадки насыпи, а в 2017 году — 374. При этом среднегодовая температура в 2016 г. была на 2 °C выше, чем в 2017 г. Различие было только в мощности снега. Так, в 2016 г. среднегодовая мощность снега составила 131 мм (максимально 370 мм), а в 2017 г. — 368 мм (максимально 910 мм). Таким образом, именно мощность снежного покрова — один из важных факторов, который необходимо учитывать для этого региона.

В результате анализа данных можно сделать вывод, что осадки при оттаивании — не основной фактор воздействия на деформации железнодорожного полотна. Ведь при средней осадке 150 мм в год за 70 лет общая просадка составит около 10 м, что, конечно, невозможно, так как в рассматриваемом районе преимущественно распространены эпикриогенные грунты, которые не обладают такой высокой льдистостью.

Экспериментальные исследования по определению деформационных характеристик оттаивающих грунтов не проводились. Однако можно рассчитать осадки по регрессионной формуле, предложенной на основе обобщения данных испытаний грунтов на севере европейской части России и в Западной Сибири [Kotov et al., 2014]. Осадка при влажности суглинка от 25 до 35% составляет от 7 до 11 см при оттаивании 1 м мерзлого грунта. Как показали данные бурения в изучаемом районе, суглинки могут содержать линзы льда [Isaev et al., 2020]. Мощность линз невелика и составляет несколько десятков сантиметров, что в некоторой степени увеличит осадку. Но даже при максимальной осадке в 11 см общая осадка с 2020 по 2050 г. увеличится на 22 см (возможно, с учетом линз льда до 50 см) за 30 лет с учетом тренда потепления климата. Если тренд не учитывать, то осадка будет еще меньше. Даже с учетом потепления осадка будет составлять не более 10 см в год, это не столь критическое значение, так как по требованию нормативных документов величина деформаций железнодорожного пути за год не должна превышать 20 см [СП..., 2015]. Таким образом, нужно учитывать дополнительные факторы, которые воздействуют на устойчивость насыпи.

Во-первых, в модели не учитывалось, что при динамических нагрузках пылеватые оттаивающие обводненные грунты могут превращаться в «плывуны», что приведет к возникновению еще больших просадок [Kudryavtsev et al., 2016]. А в совокупности с повышенной влажностью грунтов под насыпью и воздействием динамической нагрузки от поездов может проявиться тиксотропия в естественных грунтах сезонно-талого слоя и их последующее выдавливание из-под насыпи под воздействием динамической и статической нагрузки. Так, при полевых исследованиях обнаружены пятна-медальоны, характеризующиеся тиксотропными свойствами, размером от 0,3 до 0,8 см. Эти же грунты могут находиться под насыпью и деформироваться. Перераспределение напряжений, возникающее в грунте под насыпью, также один из факторов, значительно влияющих на деформации мерзлых грунтов при оттаивании, помимо криогенного строения, влажности, льдистости, плотности [Kotov et al., 2015]. По данным статического зондирования модуль деформации грунта в мерзлом состоянии составляет 22 МПа, однако при оттаивании модуль деформации может уменьшиться на порядок (в зависимости от влажности и плотности мерзлого грунта) [Kotov et al., 2017]. Кроме того, при

повышении температуры происходит быстрая просадка грунта, а затем дальнейшее деформирование под нагрузкой.

Во-вторых, не учитывалось влияние режима надмерзлотных вод сезонно-талого слоя, так как изучаемый участок расположен на слабонаклонной поверхности, поэтому в дренажных канавах вдоль дороги аккумулируется поверхностный сток с вышележащей части склона. Под действием статической и динамической нагрузки от насыпи происходит снижение фильтрационной способности грунтов в ее основании. Дорожная насыпь, таким образом, создает преграду на пути фильтрующихся надмерзлотных вод: чем более интенсивным будет сток на участке насыпи, тем больше будет воды у насыпи за счет барражного эффекта, что приведет в южных регионах криолитозоны к дополнительному оттаиванию многолетнемерзлых пород [Пассек и др., 2005]. Кроме того, не учитывалась влияние инфильтрации летних дождевых осадков, хотя наблюдения показали, что в годы с жарким дождливым летом просадка насыпи увеличивается на данном участке. Избыточное количество влаги, скапливающейся у подножья насыпи и на прилегающих к ней территориях в результате ухудшения условий стока, увеличения прихода атмосферных осадков и снижения транспирации, может вызвать повышение уровня грунтовых вод вплоть до поверхности земли. Все это приводит к заболачиванию и появлению термокарстовых озер, которые и были зафиксированы при маршрутных наблюдениях на участке между станциями Хановой и Песец.

В-третьих, рядом с водопропускными сооружениями (мелкие водотоки) в районе изучаемого участка также наблюдаются деформации. Как показали данные геофизических исследований, у большинства водотоков формируются таликовые зоны мощностью от 2 до 10 м.

В-четвертых, не учитывалось, что при формировании многолетней чаши оттаивания под насыпью и наличием большого количества воды возможно развитие криогенного пучения. Наличие этого процесса вполне объясняет зафиксированные просадки пути при достаточно малой влажности. Просадки начинаются в конце августа, но в основном они происходят в сентябре–октябре, так как именно в это время наблюдается максимальная глубина сезонного оттаивания, что подтверждается данными математического моделирования. Однако в зимний период значительная часть величины просадки компенсируется морозным распучиванием оттаявших грунтов. Отметим, что на БАМе именно эти два процесса — осадки при оттаивании и сезонное пучение в условиях замкнутых криогенных систем — приводят к формированию сопряженных малоамплитудных пучин и просадок, на долю которых приходится почти половина деформирующегося пути [Афанасенко и др., 1995]. Также моделирование процессов пучения и оттаивания в насыпи проводи-

лось для условий центральной Якутии [Permyakov et al., 2020]. В районе Северной железной дороги наблюдались значительные деформации пучения вследствие принудительного охлаждения грунтов насыпи термостабилизирующими системами (участок перехода газопровода в районе станции Песец), поэтому можно с уверенностью сказать, что грунты там относятся к категории пучинистых.

Кроме того, особенности строения насыпей Северной железной дороги могут влиять на процессы пучения и осадки. Слой плотного песка, из которого состояла первая насыпь, и сейчас находящийся в центре, имеет разную мощность — от 1 до 3 м. Сильноуплотненные и насыщенные водой прослои пылеватых песков при промерзании в осенне-зимний период будут превращаться в сезонно-мерзлые сильнольдистые горизонты. При оттаивании таких горизонтов может происходить их разуплотнение и выдавливание под нагрузкой, что и приводит к дополнительной деформации сооружения.

Таким образом, прогнозируемые изменения температурного режима насыпи и деформаций в районе станции Хановой могут быть гораздо больше, чем получено при расчетах. Неоднородность снежного покрова, строения насыпи, уровня грунтовых вод, состава, строения и свойств грунтов оснований, статических, динамических, температурных воздействий в значительной степени определяют устойчивость насыпи.

Заключение. Анализ полученных данных показал, что необходимо учитывать неоднородность мощности снежного покрова при моделировании температурного режима мерзлых грунтов в районе Северной железной дороги.

Данные о температуре воздуха в районе метеостанции г. Воркута показали наличие тренда

потепления воздуха в рассматриваемом регионе. Прогноз температурного режима насыпи с учетом этого тренда выявил, что талик у основания насыпи за 30 лет увеличится на 40% (7,4 м), а без него — на 17% (6,2 м). Все это свидетельствует о необходимости учета изменения климатических данных на устойчивость инфраструктуры в районе Северной железной дороги. Помимо этого, прогнозируемое увеличение вертикальной мощности таликовой зоны делает необходимым детальное исследование суммарной льдистости грунтов основания земляного полотна, поскольку от ее величины в первую очередь будет зависеть и величина их осадки при оттаивании.

В предложенной модели не учитывалось влияние грунтовых вод и водотоков, которые могут привести к еще большему оттаиванию. Неравномерная осадка насыпи может быть также связана с наличием процессов пучения, прослоев песчаного грунта в теле насыпи, линз льда и тиксотропных грунтов, которые при оттаивании и воздействии динамических нагрузок будут вызывать еще большую дополнительную просадку основной площадки насыпи.

Благодарности. Благодарим магистрантов и аспирантов кафедры геокриологии МГУ имени М.В. Ломоносова и Норвежского университета наук и технологий за помощь в проведении полевых исследований.

Финансирование. Исследование поддержано норвежским центром международной кооперации в образовании (Norwegian Center for International Cooperation in Education), Проект «Российско-норвежские исследования, основанные на обучении специалистов для работы в холодных регионах» (Russian-Norwegian research-based education in cold regions engineering).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афанасенко В.Е., Гарагуля Л.С., Нистратова Т.А., Осипенников Е.Н. Развитие опасных геокриологических процессов на Центральном участке БАМ // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 1995. № 4. С. 70–81.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 60 с.

Ершов Э.Д. Общая геокриология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 683 с.

Исаков В.А. Температурный режим в основаниях дорог на вечной мерзлоте // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2015. № 3. С. 25–34.

Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Меламед В.Г. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. 430 с.

Методические рекомендации по определению климатических характеристик при проектировании автомобильных дорог и мостовых переходов. М.: ЦБНТИ Минавтодора РСФСР, 1988. 46 с.

Пассек В.В., Юсупов С.Н., Невмерзжущая Л.И. Изменение температурного режима вечномерзлых грунтов при подтоплении территории, расположенной рядом с земляным полотном // Мат-лы III конф. геокриологов России. Т. 4. Ч. 8. 2005. С. 209–214.

Песоцкий Д.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ QFrost № 2016611710 от 22.04.2016.

СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Стандартинформ, 2012. 154 с.

СП 121.13330.2019. Аэродромы. М.: Стандартинформ, 2019. 110 с.

СП 238.1326000.2015. Железнодорожный путь. М.: Стандартинформ, 2015. 71 с.

СП 447.1325800.2019. Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования. М.: Стандартинформ, 2019. 51 с.

Хрусталева Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 544 с.

Dydyshko P.I. Deformation of railway subgrade upon permafrost and stabilization measures // Earth's Cryosphere. 2017. N 4. P. 43–57.

Fortier R., LeBlanc A.M., Yu W. Impacts of permafrost degradation on a road embankment at Umiujaq in Nunavik (Quebec), Canada // *Can. Geotech. J.* 2011. Vol. 48, N 5. P. 720–740.

IPCC 2013: Climate change the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner et al.]. UK: Cambridge Univer. Press, 2013. 1535 p.

Isaev V., Kotov P., Sergeev D. Technogenic hazards of Russian north railway // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 49. P. 311–320.

Jan A., Painter S. Permafrost thermal conditions are sensitive to shifts in snow timing // *Environ. Res. Lett.* 2020. DOI: 10.1088/1748-9326/ab8ec4

Johansson M., Callaghan T.V., Bosi J. et al. Rapid responses of permafrost and vegetation to experimentally increased snow cover in sub-arctic Sweden // *Environ. Res. Lett.* 2013. Vol. 8, N 3. P. 1–10.

Kondratiev V.G. Main geotechnical problems of railways and roads in kriolitozone and their solutions // *Proced. Engineering*. 2017. Vol. 189. P. 702–709.

Kotov P.I., Roman L.T., Sakharov I.I. et al. Influence of thawing conditions and type of testing on deformation characteristics of thawing soil // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015. Vol. 5, N 3. P. 254–261.

Kotov P.I., Roman L.T., Tsarapov M.N. Forecast settlement of frozen soils after thawing // *J. Heilongjiang Univ. Eng.* 2014. Vol. 5, N 3. P. 1–5.

Kotov P.I., Roman L.T., Tsarapov M.N. The influence of thawing and consolidation conditions on the deformation properties of thawing soils // *Moscow University Geol. Bull.* 2017. Vol. 72, N 2. P. 153–158.

Kudryavtsev S.A., Kazharsky A.V., Goncharova E.D. et al. Embankment on permafrost Eastern polygon of Baikal-Amur Mainline // *Proced. Engineering*. 2017. Vol. 189. P. 774–782.

Kudryavtsev S.A., Maleev D.Yu., Tsvigunov D.G., Goncharova E.D. Disalgnment of railroad poles as dynamic effect of rolling stock // *Proced. Engineering*. 2016. Vol. 165. P. 1858–1865.

O'Neill H.B., Burn C.R. Impacts of variations in snow cover on permafrost stability, including simulated snow management Dempster Highway, Peel Plateau, Northwest Territories // *Arctic Sci.* 2017. Vol. 3, N 2. P. 150–178.

Permyakov P.P., Zhirkov A.F., Varlamov S.P. et al. Numerical modeling of railway embankment deformations in permafrost regions, Central Yakutia // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 50. P. 93–103.

Sokolov I.S., Volkov N.G., Isaev V.S. Cone penetration testing for railways on permafrost. *Proc. XI Intern. Conf. on Permafrost*, 2016. P. 1144–1145.

Статья поступила в редакцию 31.01.2021;
одобрена после рецензирования 30.06.2021;
принята к публикации 28.04.2022.