

Оценка возможности применения теплоизоляционных материалов, производимых с использованием золошлаковых отходов, для основной площадки земляного полотна

Д.А. Ковенькин[✉], Д.О. Туманов, Е.В. Каймов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

[✉]kovenkin_da@irgups.ru

Резюме

В статье вкратце рассказано о планомерной модернизации Южного дублера Транссибирской железнодорожной магистрали, который позволяет быстрее доставлять грузы к Восточному полигону ОАО «РЖД» из добывающих и промышленных центров Южной Сибири. Затронута проблема поиска решений по стабилизации основной площадки земляного полотна, возникшая при строительстве вторых путей на участках Южного хода. Дело в том, что один из существующих способов борьбы с пучением замерзающих грунтов и осадкой оттаивающих не всегда дает нужный эффект. Речь идет о применении пенополистирольных плит. В работе обозначены дефекты таких плит, проявляющиеся во время укладки. Для борьбы с пучением грунтов рассматривается новый материал на основе золошлаковых отходов. Он разработан и предложен учеными Забайкальского института железнодорожного транспорта. Определяется возможность его использования для основной площадки земляного полотна. Расчеты проводились с помощью программного комплекса Frost 3D Universal. Для расчета были взяты показатели реального объекта, расположенного на перегоне Запань – Тагул Красноярской железной дороги. При проведении исследования выяснилось, что применять композиционные материалы на особенно груженапряженных железнодорожных линиях, а также на линиях I–III категорий на основной площадке земляного полотна возможно, однако это потребует увеличения толщины слоя теплоизоляционных материалов, что, в свою очередь, может привести к удорожанию проекта. Это не относится к линиям IV категории, на которых использование композиционных материалов в целом достаточно целесообразно.

Ключевые слова

площадка земляного полотна, величина морозного пучения, глубина промерзания, композиционные материалы, особогрузо-напряженные линии, пенополистирольные плиты, золошлаковые отходы

Для цитирования

Ковенькин Д.А. Оценка возможности применения теплоизоляционных материалов, производимых с использованием золошлаковых отходов, для основной площадки земляного полотна / Д.А. Ковенькин, Д.О. Туманов, Е.В. Каймов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 1 (85). С. 20–33. DOI 10.26731/1813-9108.2025.1(85).20-33.

Информация о статье

поступила в редакцию: 04.03.2025 г.; поступила после рецензирования: 11.03.2025 г.; принята к публикации: 12.03.2025 г.

Assessment of the possibility of using thermal insulation materials produced using ash and slag waste for the main roadbed platform

Д.А. Ковенькин[✉], Д.О. Туманов, Е.В. Каймов

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

[✉]kovenkin_da@irgups.ru

Abstract

The article briefly describes the planned modernization of the Southern Transsib stand-in, which allows faster delivery of goods to the Eastern Russian Railways Polygon from the mining and industrial centers of Southern Siberia. One of the problems in the construction of the second tracks on Southern Passage sections was raised, expressed in the search for solutions to stabilize the main roadbed platform. The fact is that one of the existing methods to combat the heaving of freezing and settlement of thawing soils does not always give the desired effect. We are talking about expanded polystyrene slabs. The defects of expanded polystyrene slabs during their laying are shown. A new material based on ash and slag waste for combating soil heaving is being considered. The material was developed and proposed by scientists from the Trans-Baikal Institute of Railway Transport. The possibility of using thermal insulation materials based on ash and slag waste for the main platform of the roadbed is being determined. The calculations were carried out using the Frost 3D Universal software package. The calculation is based on a real object on the Zapan – Tagul section of the Krasnoyarsk Railway. The conducted studies have shown that it is possible to use composite materials on especially heavily stressed lines, as well as lines of categories I–III on the main platform of the roadbed. However, this will require an increase in the thickness of the thermal insulation materials, which in turn may lead to an increase in the cost of the project. Nevertheless, on category IV lines, the use of composite materials is generally quite reasonable.

Keywords

the platform of the roadbed, the magnitude of frost heaving, the depth of freezing, composite materials, especially heavily stressed lines, expanded polystyrene boards, ash and slag waste

For citation

Koven'kin D.A., Tumanov D.O., Kaimov E.V. Otsenka vozmozhnosti primeneniya teploizolyatsionnykh materialov, proizvodimykh s ispol'zovaniem zoloshlakovykh otkhodov, dlya osnovnoi ploshchadki zemlyanogo polotna [Assessment of the possibility of using thermal insulation materials produced using ash and slag waste for the main roadbed platform]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. Vol. 85. No. 1. Pp. 20–33. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.1(85).20-33.

Article Info

Received: March 4, 2025; Revised: March 11, 2025; Accepted: March 12, 2025.

Введение

Трасса из Кузбасса через горы Кузнецкого Алатау, Хакасско-Минусинскую котловину, Восточные Саяны и Канско-Рыбинскую лесостепь с выходом на Тайшет изначально строилась в 1960-е гг. в однопутном исполнении. Поэтому в связи с ростом грузопотока в сторону Восточного полигона ОАО «РЖД» уже более десяти лет проводит планомерную модернизацию Южного дублера Транссибирской магистрали. Южный ход позволяет быстрее доставлять грузы к Восточному полигону из добывающих и промышленных центров Южной Сибири. Активно строятся вторые пути на перегонах (рис. 1), расширяются станции, через горные хребты Саян пробиваются вторые параллельные тоннели, а через реки возводят новые мосты (рис. 2).

Полностью открыть двухпутное движение поездов на всем перегоне Запань – Тагул Красноярская железная дорога планирует в конце 2025 г.

Новые объекты позволяют увеличить пропускную способность этого лимитирующего участка Южного хода Транссиба почти на 30 %, а интервал попутного следования поездов сократится с 20 до 8 мин.

Цель модернизации линии Междуреченск – Тайшет – увеличение пропускной и пропускной способностей в направлении пограничных переходов в КНР и портов Дальнего Востока. Планово завершается расширение от Абакана до Саянской, одновременно ведется строительство новых путей на участках от Саянской до Тайшета. Здесь из 16 перегонов 13 пока остаются однопутными.

Перевозки к портам Тихого океана России и наземным переходам в Китай неуклонно растут. Поэтому встал вопрос о строительстве дополнительных путей на второй северной железнодорожной переправе через Енисей и в Красноярске [1].



Рис. 1. Строительство вторых путей на участке пути Запань – Тагул
Fig. 1. Construction of second tracks on the Zapan' – Ta'gul section of the route



Рис. 2. Строительство второго моста через р. Бирюса на перегоне Запань – Тагул
Fig. 2. Construction of the second bridge across the Biryusa River on the Zapan' – Tagul section

Приведем некоторые технико-экономические показатели второго пути на участках Южного хода:

- категория железнодорожной линии – особогрузонапряженная;
- расчетный максимальный вес грузового поезда при стандартном подвижном составе – 6 300 т;
- расчетный максимальный вес для маршрутов, состоящих из инновационных вагонов с повышенной осевой нагрузкой – 7 100 т;
- скорость движения грузовых поездов – не более 90 км/ч;
- скорость движения пассажирских поездов – не более 140 км/ч.

Для достижения таких технико-экономических показателей необходимо особое внимание уделить «лечению больных мест» земляного полотна. Наиболее часто возникающей проблемой при строительстве вторых путей на участке Междуреченск – Абакан – Тайшет является деформация земляного полотна вследствие морозного пучения. Ликвидация пучин на железнодорожном пути проблема достаточно актуальная в связи с тем, что они являются одной из самых распространенных деформаций пути в зимнее время, а при оттаивании грунта в начале лета в местах пучин происходят такие деформации, как осадки и опасные резкие про-

садки пути [2–9]. Одним из способов ликвидации пучин является защита пучинистого (влажного) грунта от сезонного промерзания. В настоящие времена для этого используют синтетический теплоизолатор (пенополистирол), обладающий низкой теплопроводностью, гидрофобными свойствами и небольшой массой [10].

Пенополистирольные плиты целесообразно применять в случаях, когда другие противопучинные мероприятия оказываются технически неосуществимыми или экономически нецелесообразными, в том числе:

- на коротких по протяжению участках с залеганием пучинистых или многолетнемерзлых просадочных при оттаивании грунтов;
- при большой глубине промерзания грунтов в случае невозможности отвода воды из траншеи вырезки, предназначенной для заполнения дренирующим материалом;
- в местах залегания на незначительной глубине подземного льда.

Несмотря на массовость применения пенополистирольных плит у них существует ряд недостатков. Основными являются: низкая прочность, низкая устойчивость к влаге, подверженность термоокислительным процессам, повышение вибрационных свойств. На рис. 3 показано растрескивание плит во время их укладки на основную площадку земляного полотна.

В целях устранения недостатков теплоизоляционного слоя, выполненного из пенополистирольных плит, а также повышения эффективности защиты земляного полотна от воздействия отрицательных температур было предложено использовать вновь разработанный материал на основе золошлаковых отходов [11–14].

Теплоизоляция, изготовленная с использованием золошлаковых отходов – это экспериментальный материал, который получен в результате смешивания при определенных условиях специальной запатентованной полимерной добавки с отходами угольного горения (золошлаковыми отходами).

Данный материал разработан учеными Забайкальского института железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения под руководством Н.А. Коноваловой. На рис. 4 представлены образцы таких материалов.

Цель статьи – оценка возможности применения теплоизоляционных материалов на ос-

нове золошлаковых отходов для основной площадки земляного полотна с учетом категории железной дороги.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- рассмотреть реальный участок земляного полотна на перегоне Запань – Тагул для получения достоверных расчетов;

- определить температуру грунтов в теле земляного полотна под существующей и предложенными теплоизоляциями;

- произвести расчет глубины промерзания грунтов под теплоизоляциями;

- рассчитать высоту морозного пучения грунтов для каждого варианта теплоизоляции.

Объект исследования – земляное полотно железных дорог, подверженное деформациям морозного пучения.

Предмет исследования – новый теплоизоляционный материал для ликвидации морозного пучения грунтов земляного полотна железных дорог.



Рис. 4. Образцы полученных композиционных материалов
Fig. 4. Samples of the obtained composite materials

Научная новизна: впервые определялась возможность использования нового теплоизоляционного материала для ликвидации пучин.

Экспликация инженерно-геологических элементов приведена в табл. 2.

Исходные данные

Исходные данные по грунтам земляного полотна, а также балластной призмы представлены в табл. 1.

Геометрия кластеров расчетной модели принята по данным инженерно-геологических изысканий. Исследуемый поперечный профиль земляного полотна адаптировался к модели путем сглаживания и примитивизации отдельных элементов, что позволило избежать возникновения нереалистичных точек пластических деформаций.

Проектный поперечный профиль земляного полотна приведен на рис. 5.

Путь на участке проектирования бесстыковой, балласт щебеночный толщиной под шпалой не менее 40 см. Суммарная толщина балласта не менее 55 см. Толщина подбалластного защитного слоя принята 1,24 м.

На основании технического отчета об инженерно-геологических изысканиях по степени морозной пучинистости [15] в пределах глубин сезонного промерзания (4,60 м) залегают грунты, принятые по наихудшему результа-

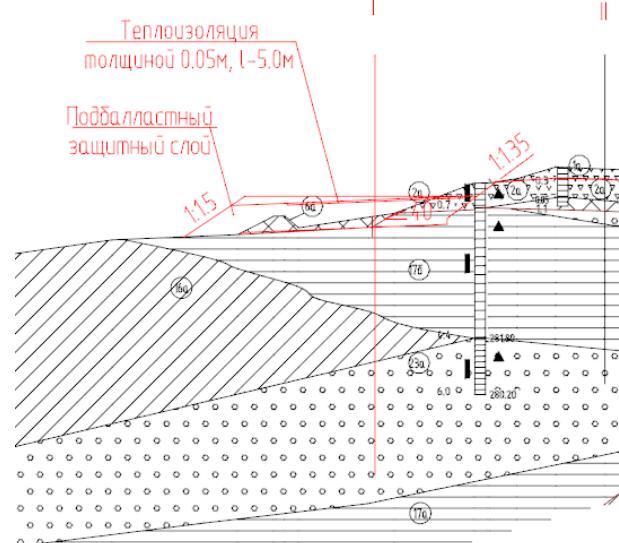


Рис. 5. Проектный поперечный профиль
Fig. 5. Design transverse profile

Рассмотрено моделирование теплового режима железнодорожного земляного полотна с теплоизоляцией под балластной призмой. Толщина теплоизоляции – 0,05 м. Ширина плизы – 5 м, что соответствует второму климати-

Таблица 1. Физические и теплофизические свойства грунтов
Table 1. Physical and thermophysical properties of soils

Наименование инженерно-геологического элемента Name of the Engineering and geological element	Теплопроводность, Вт/(м · К) Thermal conductivity, W/(m · K)		Объемная теплоемкость, МДж/(м ³ · К) Volumetric heat capacity, MJ/(m ³ · K)		Суммарная влажность, д.е. Total humidity, d.e.	Плотность в сухом состоянии, кг/м ³ Dry density, kg/m ³	Температура начала замерзания, °C Freezing point, °C
	талого thawed	мерзлого frozen	талого thawed	мерзлого frozen			
16а Суглинок Loam	1,57	1,80	3,17	2,41	0,13	1 830,00	-0,31
23а Галечниковый грунт Pebble soil	2,00	2,20	2,39	2,08	0,10	1 800,00	-0,32
17а Глина твердая Clay solid	2,00	2,20	2,39	2,08	0,15	1 800,00	-0,32
176 Глина полутвердая Semi-hard clay	1,57	1,80	3,17	2,41	0,19	1 710,00	-0,31
Насыпь Песок Sand embankment	1,45	1,51	2,35	2,18	0,05	1 900,00	0,00
Щебень Crushed stone	2,00	2,35	1,84	1,675	0,10	1 800,00	0,00

Таблица 2. Экспликация грунтов
Table 2. Explication of soils

Номер инженерно-геологического элемента Number Engineering and geological element	Наименование грунта Name of the soil	Степень морозной пучинистости ε_{fn} Degree of frost heaviness ε_{fn}
Озерно-аллювиальные отложения Lacustrine-alluvial deposits		
16a	Суглинок галечниковый, твердый, с примесью органического вещества Pebble loam, hard, with an admixture of organic matter	Непучинистые ($\varepsilon_{fn} = 0,3\text{--}0,95\%$) Non-heaving ($\varepsilon_{fn} = 0,3\text{--}0,95\%$)
17a	Глина твердая Hard clay	Непучинистые ($\varepsilon_{fn} = 0,3\text{--}0,95\%$) Non-heaving ($\varepsilon_{fn} = 0,3\text{--}0,95\%$)
17б	Глина с галькой полутвердая Clay with pebbles semi-hard	Слабопучинистые ($\varepsilon_{fn} = 1,5\text{--}3,0\%$) Slightly heaving ($\varepsilon_{fn} = 1,5\text{--}3,0\%$)
23a	Галечниковый грунт с суглинистым заполнителем, малой степени водонасыщения Pebble soil with loamy filler, low degree water saturation	Непучинистые ($\varepsilon_{fn} = 0,3\text{--}0,95\%$) Non-heaving ($\varepsilon_{fn} = 0,3\text{--}0,95\%$)

Таблица 3. Допустимые характеристики теплоизоляции
Table 3. Acceptable thermal insulation characteristics

Показатель Indicator	Величина Size meaning
Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	≥ 35
Механические свойства: Mechanical properties	
Прочность на сжатие при 10%-ной линейной деформации, МПа Compressive strength at 10% linear deformation, MPa	≥ 0,5
Предел прочности при изгибе, МПа Bending strength, MPa	≥ 0,7
Деформативность под многократно приложенной динамической нагрузкой, % Deformability under repeatedly applied dynamic load, %	≤ 5
Водопоглощение по объему за 24 ч, % Water absorption by volume in 24 h, %	≤ 0,5
Коэффициент теплопроводности во влажном состоянии, Ккал/(м · ч · °C) Thermal conductivity coefficient in wet state, Kcal/(m · h · °C)	≤ 0,04

ческому району ($2\,000 \leq \Omega \leq 2\,500\text{°C} \cdot \text{сут}$). Толщина защитного слоя на покрытии – 10 см.

Применяемые плиты теплоизоляции должны обладать характеристиками, представленными в табл. 3.

Исходные данные по средней месячной и годовой температурам воздуха приняты по метеостанции «Тайшет» [16] (табл. 4). Температурный тренд глобального потепления для данной местности – $0,06\text{°C}$ градуса в год. Средне-

зимняя теплопроводность снегового покрова равна $0,28\text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{°C}$.

На основной площадке земляного полотна высота снега принята равной 0. Это связано с постоянной очисткой железнодорожного пути от снега по условиям эксплуатации.

В табл. 5 приведены теплофизические свойства материалов. Обращаем ваше внимание на то, что показатель теплопроводности для композиционного материала выше нормы.

Таблица 4. Климатические условия
Table 4. Climatic conditions

Характеристика Characteristic	Месяц Month											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, °C Temperature air, °C	-18,90	-16,20	-8,20	1,20	8,90	16,00	18,40	15,30	8,30	0,80	-9,70	-17,40
Коэффициент конвективного теплообмена, Bt/(m ² ·K) Coefficient convective heat exchange, W/(m ² K)	15,80	14,96	14,96	16,22	16,22	14,96	13,70	13,70	14,12	15,80	15,80	16,22
Скорость ветра, м/с Wind speed, m/s	2,30	2,10	2,10	2,40	2,40	2,10	1,80	1,80	1,90	2,30	2,30	2,40
Высота снежного покрова на откосах, м Snow height cover on slopes, m	0,47	0,49	0,51	0,47	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,25	0,38
Теплопроводность снега, Bt/(m · K) Thermal conductivity snow, W/(m · K)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28

Таблица 5. Физические характеристики строительных материалов
Table 5. Physical characteristics of building materials

Параметр материала Material parameter	Наименование материала Name of the material	
	Пенополистерол Expanded polystyrene	Композиционный материал Composite material
Начальная температура, °C Initial temperature, °C	1	1
Объемная теплоемкость, МДж / (м ³ ·°C) Volumetric heat capacity, MJ / (m ³ · °C)	0,0621	0,0796
Теплопроводность, Вт / (м·°C) Thermal conductivity, W/(m·°C)	0,031	0,17 > 0,04
Суммарная весовая влажность, д.е. Total moisture content by weight, d.u.	0	0
Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	45	78,2
Температура фазового перехода, °C Phase transition temperature, °C	0	0
Коэффициент фильтрации, м/сут Filtration coefficient, m/day	8,64*10 ⁻⁸	8,64*10 ⁻⁸

Методика расчета

Теплотехнические сравнительные расчеты проводились с применением программного комплекса Frost 3D Universal, разработанного ООО «Симмэйкерс».

Frost 3D – программный комплекс для моделирования процессов тепломассопереноса в многолетнемерзлых грунтах (ММГ) с учетом влияния внешних тепловых воздействий. Frost

3D позволяет получать научно-обоснованные прогнозы тепловых режимов ММГ в условиях теплового влияния трубопроводов, добывающих скважин, зданий, гидротехнических и других сооружений с учетом термостабилизации грунта.

Оценка среднемесячной температуры поверхности насыпи производилась согласно п. 5.2.13 [17]. Расчет температуры на поверхно-

сти насыпи T_n с учетом солнечной радиации вычислялся следующим образом:

$$T_n = T_s + \frac{R - Q}{\alpha},$$

где T_s – среднемесячная температура атмосферного воздуха, $^{\circ}\text{C}$ (см. табл. 4); α – коэффициент теплообмена поверхности с атмосферой, $\text{Вт} / \text{м}^2$, равный

$$\alpha(v) = \begin{cases} (2,4v + 2,3), & \text{при } v < 4,6 \text{ м/с} \\ 3,7(v - 1), & \text{при } v > 4,6 \text{ м/с} \end{cases}$$

где v – скорость ветра, м/с ; R – радиационный баланс поверхности насыпи для песчаных и щебеночных, $\text{Вт} / \text{м}^2$, который определяется по формуле –

$$R = 0,61 \cdot \Phi - 20;$$

Q – потери тепла дневной поверхности за счет испарения и нагрева подстилающих пород и фазовых переходов в них, $\text{Вт} / \text{м}^2$, определяемые как

$$Q = 0,49 \cdot \Phi - 60,$$

где Φ – суммарная солнечная радиация, $\text{Вт} / \text{м}^2$.

Учет воздействия солнечной радиации особенно актуален при расчете дорожных насыпей в случаях, когда происходит постоянная очистка дорожного полотна от снегового покрова или длительное затенение одного из откосов насыпи.

Данные по суммарной солнечной радиации определяются по рис. 6 в зависимости от широты.

Для естественной поверхности грунта воздействие солнечной радиации можно учесть по [18] (п. 7 приложения А) следующим образом:

$$t_{\text{пр}} = t + \Delta t_r - \Delta t_e,$$

где $t_{\text{пр}}$ – расчетное значение среднемесячной температуры воздуха, $^{\circ}\text{C}$; t – среднемесячная температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$; Δt_r и Δt_e – поправки к среднемесячным температурам воздуха за счет солнечной радиации и испарения соответственно, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta t_r = r / \alpha; \Delta t_e = \Delta t_r \cdot k; \alpha = 10 \sqrt{v},$$

где r – среднемесячная сумма радиационного баланса для рассматриваемого элемента поверхности, $^{\circ}\text{C}$; α – коэффициент теплообмена на поверхности грунта, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; k – коэффициент, учитывающий характер поверхности, принимаемый в первом приближении, равный 0,8 для естественной поверхности и 0,3 – для оголенной.

Согласно [18] при отсутствии достаточных данных допускается учитывать суммарную поправку путем прибавления к среднемесячным значениям температуры воздуха с апреля по сентябрь температурной добавки $\Delta t = 3 ^{\circ}\text{C}$.

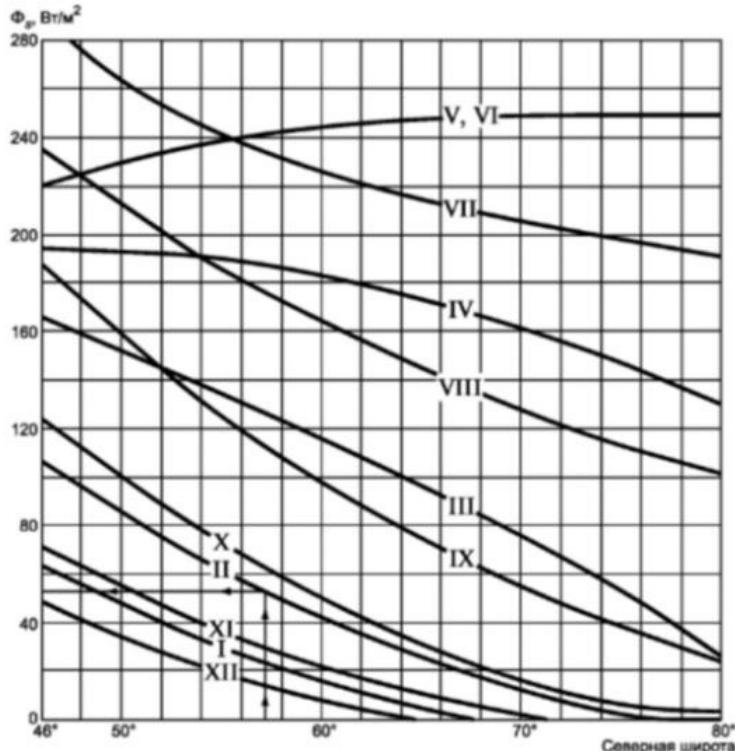


Рис. 6. Зависимость суммарной солнечной радиации от широты

Fig. 6. Dependence of total solar radiation on latitude

Таблица 6. Значение суммарной солнечной радиации
Table 6. The value of total solar radiation

Параметр Parameter	Месяц Month											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Суммарная солнечная радиация Φ , Вт/м ² Total solar radiation Φ , W/m ²	30	60	135	190	240	240	240	185	125	75	35	20

Учет дополнительного теплопритока на естественную поверхность грунта за счет воздействия солнечной радиации производился в соответствии с рис. 6, для 55° северной широты. Результаты расчета представлены в табл. 6.

Результаты расчета

Расчет температуры грунтов в теле земляного полотна проводился с прогнозом эффективности действия предложенных противопучинных мероприятий сроком на пять лет. Трехмерная модель насыпи показана на рис. 7. Конечно-элементная модель представлена на рис. 8. Расчетная сетка модели состоит из 9 259 элементов и 19 008 узлов.

Результаты теплотехнических расчетов, проведенных с применением программного комплекса Frost 3D, представлены в виде изоповерхностей температурного распределения по всему поперечному сечению земляного полотна. На рис. 9 и 10 показано такое распределение. Отображается цветовое распределение температур, где красный – самая высокая температура, а синий – самая низкая.

Теплотехнические сравнительные расчеты с применением программного комплекса Frost 3D Universal позволили определить температуру грунта под теплоизоляцией. На рис. 11 показано изменение температуры грунта под теплоизоляторами в течение всего пяти лет эксплуатации.

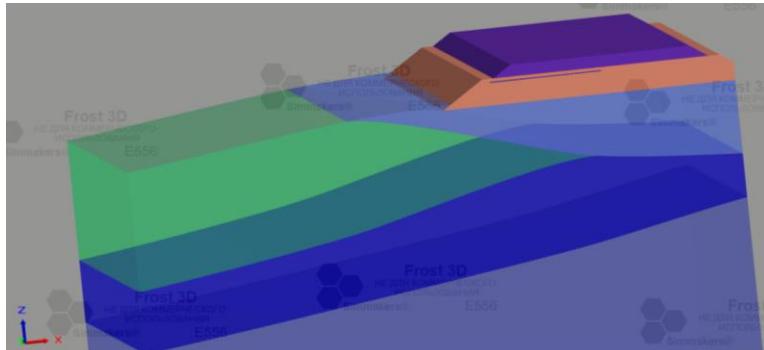


Рис. 7. Трехмерная геометрия земляного полотна
Fig. 7. Three-dimensional geometry of the roadbed

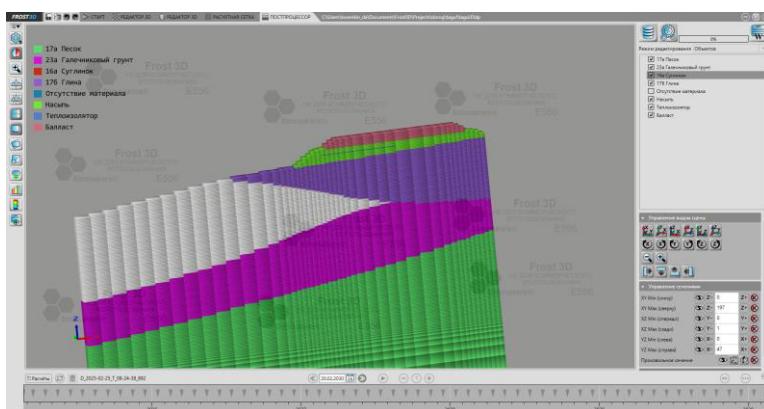


Рис. 8. Расчетная сетка модели
Fig. 8. The calculated grid of the model

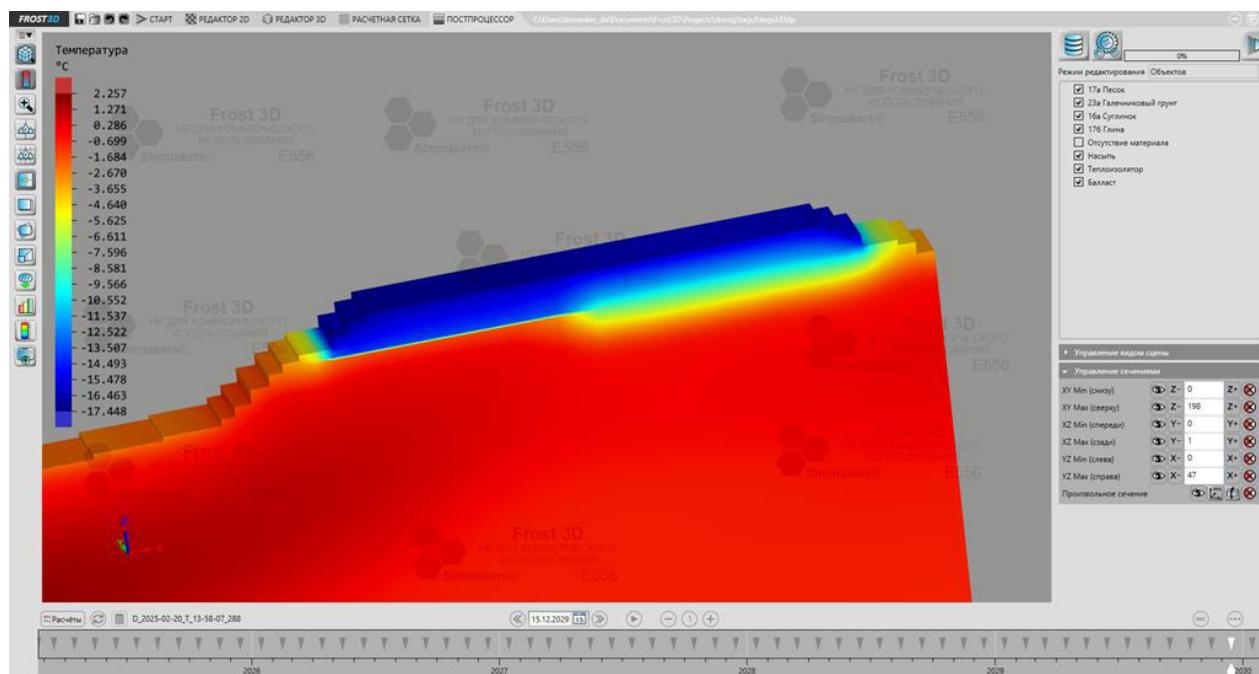


Рис. 9. Трехмерная визуализация температуры в сечении XZ расчетной области
Fig. 9. Three-dimensional visualization of temperature in the XZ section of the computational domain

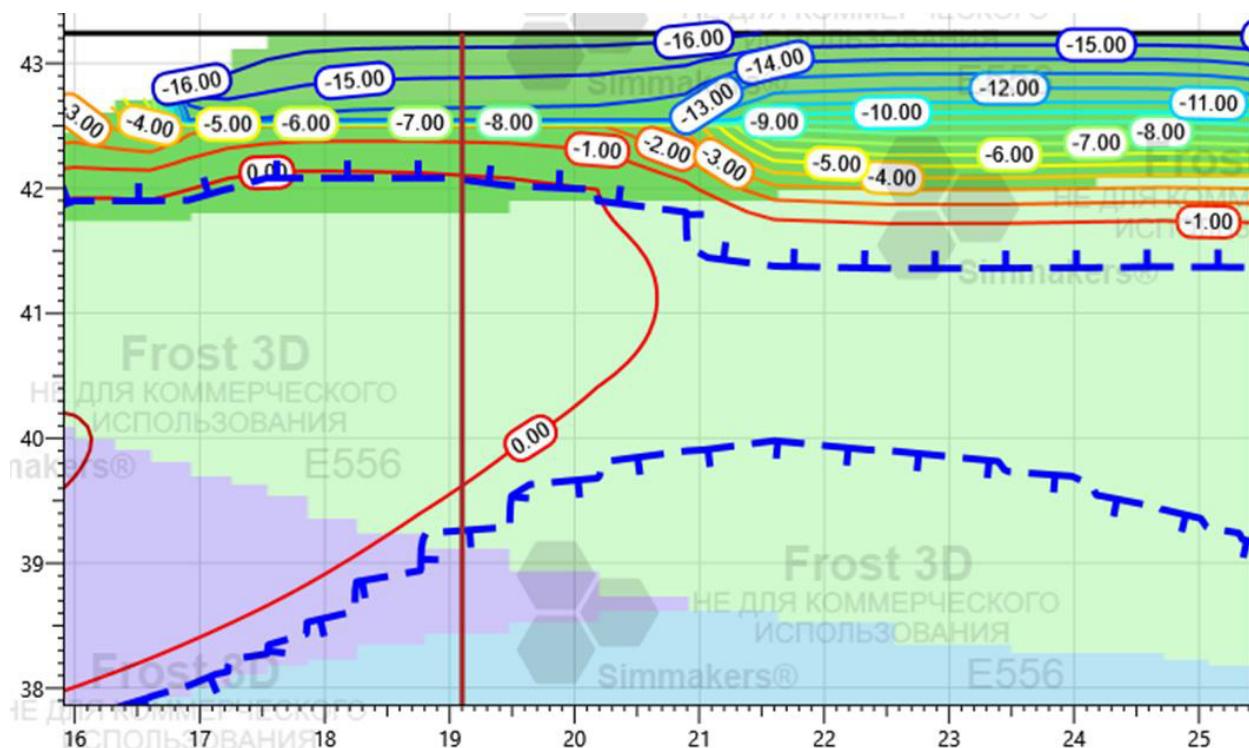


Рис. 10. Распределение температуры на 15.12.2029
Fig. 10. Temperature distribution as of December 15, 2029

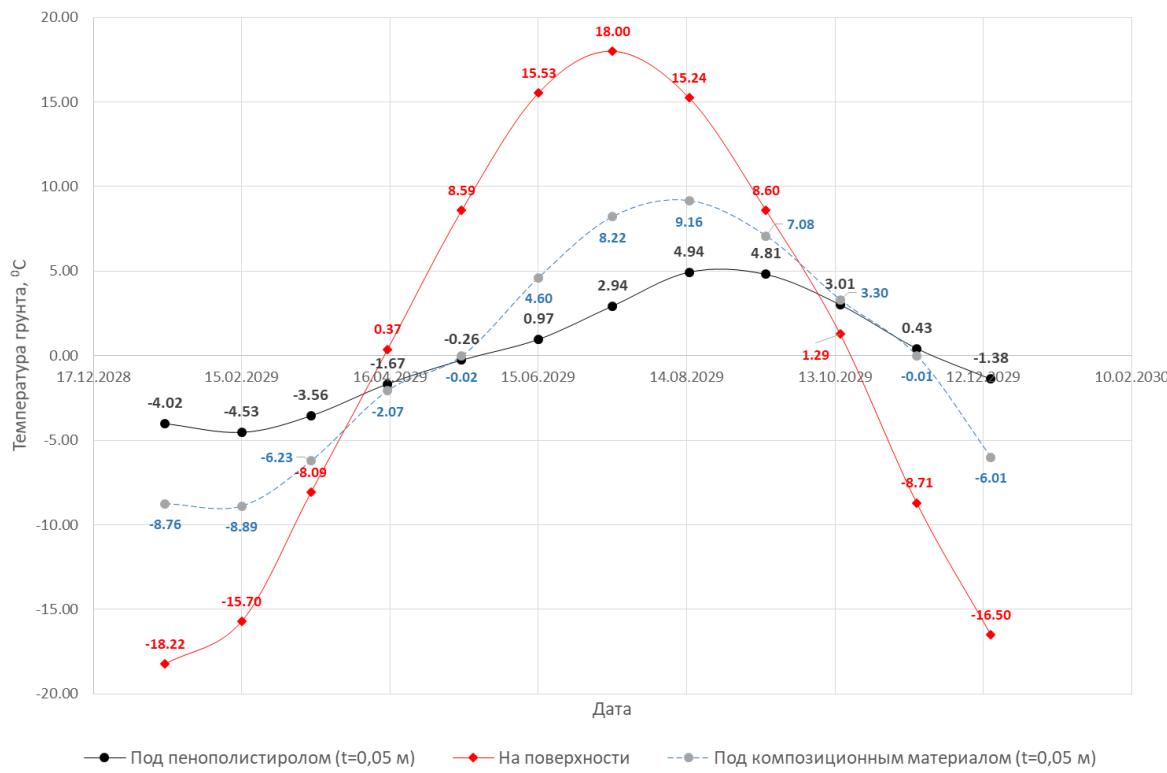


Рис. 11. Изменение температуры грунта под теплоизоляторами в течении пятого года эксплуатации
Fig. 11 Changes in ground temperature under thermal insulators during the fifth year of operation

Температура грунта под теплоизоляторами достигает своего минимума в феврале. Под пенополистиролом ее значение составляет $-4,53^{\circ}\text{C}$, в то же время под композиционным материалом она равна $-8,89^{\circ}\text{C}$.

Следовательно, по теплотехническим свойствам композиционный материал на основе отходов производства немногим хуже существующих пенополистирольных материалов. Однако для оценки возможности его применения в качестве теплоизоляционного на основной площадке земляного полотна был проведен расчет высоты морозного пучения.

Под морозным (криогенным) пучением понимается внутриобъемное деформирование промерзающих влажных почв и грунтов, приводящее к увеличению их объема вследствие кристаллизации в них воды и разуплотнения минеральной составляющей при образовании ледяных включений в виде прослойков, линз и поликристаллов.

На железных дорогах основным нормируемым параметром, характеризующим морозное пучение, является высота морозного пучения, которая определяется простейшей зависимостью:

$$h_{\text{пуч}} = \sum_{i=1}^n (H_i \cdot \varepsilon_{fni}),$$

где $h_{\text{пуч}}$ – высота пучения; ε_{fni} – коэффициент пучения в i -ом слое; H_i – глубина промерзания грунта i -го слоя.

В соответствии с нормативными документами [19, 20], регламентирующими допустимые деформации морозного пучения на железных дорогах, предельная высота равномерного морозного пучения грунтов земляного полотна не должна превышать нормативных значений $[h_{\text{пуч}}]$, определяемых категорией дороги. Рассматриваемый участок пути Запань – Тагул относится к особогрузонапряженной железнодорожной линии. В связи с этим допустимая высота равномерного морозного пучения, согласно [20], составляет 15 мм.

На основании данных инженерно-геологических изысканий получены величины коэффициента морозного пучения для грунтов, из которых сложено земляное полотно на рассматриваемом участке:

- 0,1 % – для песка;
- 2 % – для глины.

Глубина промерзания зависит от климатических условий, а также физических свойств грунтов, слагающих промерзшую толщу. Для определения глубины промерзания земляного полотна решают нестационарную теплофизическую задачу, в которой по изменению температуры воздуха на поверхности устанавливают проникновение изотермы с нулевой температурой в грунтовую толщу в течение периода с отрицательными температурами.

Глубина промерзания грунта определялась также с помощью программного комплекса Frost 3D Universal. На рис. 10 она показана синим цветом и основной штрихпунктирной кривой с бергштрихами, которые направлены в сторону мерзлых грунтов. Расчеты высоты морозного пучения проведены для периода с наибольшей глубиной сезонного промерзания. Такому периоду соответствует февраль. Результаты сведены в табл. 7.

Полученные данные позволили сделать следующие выводы:

1. Применение пенополистирольных плит толщиной 0,05 м в данных условиях возможно, так как максимальная величина морозного пучения не превышает допустимой величины для особогрузонапряженных линий – 13,49 мм < 15 мм.

2. Применение композиций ионных материалов толщиной 0,05 м в данных условиях невозможно в связи с тем, что максимальная величина морозного пучения превысила допустимую в 2,2 раза.

3. Однако применение композиционных материалов такой же толщины возможно для железнодорожных линий IV категории при допустимой величине пучения до 35 мм.

4. Можно говорить о том, что применять композиционные материалы на особогрузонапряженных линиях, а также линиях I–III категорий возможно, но это потребует увеличения толщины теплоизоляционных материалов. Аналогичные расчеты показали, что для рассмотренных условий эксплуатации потребуется толщина плит, равная 0,2 м. В этом случае максимальная величина морозного пучения будет меньше допустимой величины для особогрузонапряженных линий.

Заключение

Исходя из изложенного, основная цель данной работы, заключающаяся в определении возможности применения теплоизоляционных композиционных материалов на особогрузонапряженных линиях с помощью проведения тепловых прогнозных расчетов, достигнута.

Расчеты показали, что по теплотехническим свойствам композиционный материал на основе отходов производства немногим хуже существующих пенополистирольных материалов. Тем не менее применять композиционные материалы на особогрузонапряженных линиях, а также на линиях I–III категорий на основной площадке земляного полотна возможно, но это потребует увеличения толщины теплоизоляционных материалов, что, в свою очередь, может привести к удорожанию проекта.

На линиях IV категории применение композиционных материалов в целом достаточно целесообразно.

Определены сферы применения композиционных материалов на основе золошлаковых отходов для основной площадки земляного полотна. Данные материалы можно применять на

Таблица 7. Расчет величины пучения
Table 7. Calculation of the heave value

Параметры Parameters	Для пенополистирола ($t = 0,05$ м) For expanded polystyrene ($t = 0,05$ m)	Для композиционного материала ($t = 0,05$ м) For composite material ($t = 0,05$ m)
Глубина промерзания, м Freezing depth, m	2,26	3,24
Толщина балласта, м Ballast thickness, m	0,55	0,55
Толщина песка под плитой, м Thickness of sand under the slab, m	1,09	1,09
Толщина промерзшего слоя глины, м Thickness of frozen clay layer, m	0,62	1,60
Величина морозного пучения, мм Frost heave value, mm	13,49	33,09

железнодорожных линиях IV категории. На линиях с более высокой категорией использование таких материалов должно сопровождаться экономическим обоснованием.

Список литературы

1. На Южном ходе Транссиба завершается строительство моста через Бирюсу // ДЕЛА.ru : сайт. URL : <https://dela.ru/news/288637/> (дата обращения 21.02.2025).
2. Кондратьев В.Г. Активные способы укрепления основания земляного полотна на вечномерзлых грунтах. Чита : Забтранс, 2001. 100 с.
3. Кондратьев В.Г. Стабилизация земляного полотна на вечномерзлых грунтах. Чита : Полиграф-Ресурс, 2011. 176 с.
4. Ковенькин Д.А., Валиев Н.А. Защита от деградации многолетнемерзлых грунтов на снегозаносимых участках // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 11. С. 23–26.
5. Принятие решений при выборе конструкций и параметров сезонных охлаждающих устройств / В.А. Подвербный, А.А. Перельгина, Л.Ю. Гагарин и др. // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2019. С. 147–160.
6. Кирпичников К.А., Дашинимаев З.Б., Баклаженко А.Г. Способ стабилизации земляного полотна в районах распространения вечной мерзлоты с применением инновационных материалов // Образование – Наука – Производство : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2018. Т. 1. С. 92–96.
7. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Эксперименты по стабилизации земляного полотна на центральном участке Байкало-Амурской магистрали с помощью солнцеосадкозащитных навесов // Инженерная геология. 2015. № 4. С. 56–63.
8. Валиев Н.А., Кондратьев В.Г. Результаты опытно-экспериментальных работ по охлаждению многолетнемерзлых грунтов в основании железнодорожного пути на центральном участке БАМ // Материалы Пятой конференции геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова. М, 2016. Т. 1. С. 168–175.
9. Валиев Н.А. Термокомплекс, защита от деградации оснований земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы десятой Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2019. Т. 1. С. 538–541.
10. Использование синтетических теплоизоляторов для сохранения мерзлотных условий в основании железнодорожной насыпи / Е.С. Ашпиз, Л.Н. Хрусталев, Л.В. Емельянова и др. // Криосфера земли. 2008. Т. 12. № 2. С. 84–89.
11. Повышение реакционной способности золошлаковых отходов с целью их утилизации в дорожном строительстве / Д.В. Бесполитов, П.П. Панков, Н.А. Коновалова и др. // Молодая наука Сибири. 2023. № 1 (19). С. 242–247. URL: <https://ojs.irkups.ru/index.php/mns/article/view/1105/840> (дата обращения 24.02.2025).
12. Оценка пригодности золошлаковых отходов Забайкальского края для производства дорожно-строительных материалов / П.П. Панков, Н.Д. Шаванов, Д.В. Бесполитов и др. // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 5. С. 15–21.
13. Коновалова Н.А. Научное и практическое обоснование получения экологически безопасных строительных материалов на основе крупнотоннажных отходов производства : дис. ... д-ра. техн. наук. Иркутск, 2022. 373 с.
14. Панков П.П. Разработка экологически безопасных дорожно-строительных материалов на основе крупнотоннажных отходов производства : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2021. 166 с.
15. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Введ. 2021-01-01. М. : Стандартинформ, 2020. 41 с.
16. СП 131.13330.2020 Строительная климатология (ред. 30.06.2023): утв. приказом Минстроя РФ № 859/пр от 24.12.2020. Введ. : 2021-06-25. М. : Минстрой России, 2020. 146 с.
17. СП 498.1325800.2020 Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории : утв. приказом Минстроя РФ № 910/пр от 30.12.2020. Введ. 2021-07-01. М. : Минстрой России, 2021. 42 с.
18. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования : утв. приказом Минстроя РФ № 82/пр от 04.02.2019 (ред. 09.02.2023). Введ. 2019-08-05. М. : Минстрой России, 2019. 58 с.
19. СП 32-104-98 Проектирование земляного полотна железных дорог колен 1520 мм : одобрен Письмом Минземстроя РФ № 13-498 от 08.09.1998 г. Введ. : 1999-01-01. М. : Госстрой России, 1999. 160 с.
20. СП 238.1326000.2015 Железнодорожный путь : утв. приказом Минтранса РФ № 209 от 06.07.2015. Введ. 2015-07-01. М. : Минтранс России, 2015. 71 с.

References

1. Na Yuzhnom hode Transsiba zavershaetsya stroitel'stvo mosta cherez Biryusu (Elektronnyi resurs) [Construction of a bridge across the Biryusa River is being completed on the Southern course of the Transsib (Electronic resource)]. Available at: <https://dela.ru/news/288637/> (Accessed February 21, 2025).
2. Kondrat'ev V.G. Aktivnye sposoby ukrepleniya osnovaniya zemlyanogo polotna na vechnomerzlykh gruntakh [Active methods of strengthening the foundation of the roadbed on permafrost soils]. Chita: Zabtrans Publ., 2001. 100 p.
3. Kondrat'ev V.G. Stabilizatsiya zemlyanogo polotna na vechnomerzlykh gruntakh [Stabilization of the roadbed on permafrost soils]. Chita: Poligraf-Resurs Publ., 2011. 176 p.
4. Koven'kin D.A., Valiev N.A. Zashchita ot degradatsii mnogoletnemerzlykh gruntov na snegozanosimykh uchastkakh [Protection from degradation of permafrost soils on snow-bearing areas]. Put' i puteshestvo khozyaistvo [Track and track facilities], 2021, no 11, pp. 23–26.
5. Podverbnyi V.A., Perelegina A.A., Gagarin L.Yu., Ural'skii D.A. Prinyatie reshenii pri vybore konstruktii i parametrov sezonnnykh okhlazhdayushchikh ustroistv [Decision-making when choosing designs and parameters of seasonal cooling devices]. Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» [Materials of the III All-

Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production». Chita, 2019, pp. 147–160.

6. Kirpichnikov K.A., Dashinimaev Z.B., Baklazhenko A.G. Sposob stabilizatsii zemlyanogo polotna v raionakh rasprostraneniya vechnoi merzloty s primeneniem innovatsionnykh materialov [A method for stabilizing the roadbed in permafrost distribution areas using innovative materials]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2 t)* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2018. Vol. 1, pp. 92–96.

7. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Eksperimenty po stabilizatsii zemlyanogo polotna na tsentral'nom uchastke Baikal-Amurskoi magistrali s pomoshch'yu solntseosadkozashchitnykh navesov [Experiments on the stabilization of the roadbed on the central section of the Baikal-Amur highway with the help of sunshade canopies]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology], 2015, no. 4, pp. 56–63.

8. Valiev N.A., Kondrat'ev V.G. Rezul'taty optytno-eksperimental'nykh rabot po okhlazhdeniyu mnogoletnemerzlykh gruntov v osnovanii zheleznodorozhnoy puti na tsentral'nom uchastke BAM [Results of experimental work on the cooling of permafrost soils at the base of the railway track on the central section of the Baikal-Amur magistral]. *Materialy Pyatoi konferentsii geokriologov Rossii* [Materials of the Fifth Conference of geocryologists of Russia]. Moscow, 2016, Vol. 1, pp. 168–175.

9. Valiev N.A. Termokompleks, zashchita ot degradatsii osnovani zemlyanogo polotna na mnogoletnemerzlykh gruntakh [Thermocomplex, protection from degradation of the foundations of the roadbed on permafrost soils]. *Materialy Desyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirs'kogo regiona»* [Proceedings of the Tenth International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2019, Vol. 1, pp. 538–541.

10. Ashpiz E.S., Khrustalev L.N., Emel'yanova L.V., Vedernikova M.A. Ispol'zovanie sinteticheskikh teploizolatorov dlya sokhraneniya merzlotnykh uslovii v osnovanii zheleznodorozhnoy nasypy [Using of synthetical thermal insulators for conservation of frozen soil conditions in the base of railway embankment]. *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth], 2008, Vol. 12, no 2, pp. 84–89.

11. Bespolitov D.V., Pankov P.P., Konovalova N.A., Goroyan T.A. Povyshenie reaktsionnoi sposobnosti zoloshlakovykh otkhodov s tsel'yu ikh utilizatsii v dorozhnom stroitel'stve [Increasing the reactivity of ash and slag waste for the purpose of their utilization in road construction]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 1 (19), pp. 242–247.

12. Pankov P.P., Shavanov N.D., Bespolitov D.V., Konovalova N.A. Otsenka prigodnosti zoloshlakovykh otkhodov Zabaikal'skogo kraya dlya proizvodstva dorozhno-stroitel'nykh materialov [Assessment of the suitability of ash and slag waste of the Trans-Baikal Territory for the production of road-building materials]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2023, Vol. 27, no 5, pp. 15–21.

13. Konovalova N.A. Nauchnoe i prakticheskoe obosnovanie polucheniya ekologicheski bezopasnykh stroitel'nykh materialov na osnove krupnotonnazhnykh otkhodov proizvodstva [Scientific and practical justification of obtaining environmentally friendly building materials based on large-tonnage production waste]. Doctor's thesis. Irkutsk, 2022. 373 p.

14. Pankov P.P. Razrabotka ekologicheski bezopasnykh dorozhno-stroitel'nykh materialov na osnove krupnotonnazhnykh otkhodov proizvodstva [Development of environmentally safe road-building materials based on large-tonnage production waste]. Ph.D.'s thesis. Irkutsk, 2021. 166 p.

15. GOST 25100-2020 Grunty. Klassifikatsiya [State Standard 25100-2020 Soils. Classification]. Moscow: Standartinform Publ., 2020. 41 p.

16. SP 131.13330.2020 Stroitel'naya klimatologiya (red. 30.06.2023) [Set of Rules no 131.13330.2020 Building climatology (ed. June 30, 2023)]. Moscow: Minstroi Publ., 2020. 146 p.

17. SP 498.1325800.2020 Osnovaniya i fundamenti zdani i sooruzhenii na mnogoletnemerzlykh gruntakh. Trebovaniya k inzhenernoi podgotovke territorii [Set of rules 498.1325800.2020 Soil bases and foundations of buildings and structures on permafrost soils. Requirements for land development of the area]. Moscow: Minstroi Rossii Publ., 2020. 42 p.

18. SP 447.1325800.2019 Zheleznye dorogi v rayonakh vechnoi merzloty. Osnovnye polozheniya proektirovaniya (red. 09.02.2023) [Set of rules 447.1325800.2019 Railways in the permafrost areas. General positions of projecting (ed. February 9, 2023)]. Moscow: Minstroi Rossii Publ., 2019. 58 p.

19. SP 32-104-98 Proektirovaniye zemlyanogo polotna zheleznykh dorog kolei 1520 mm [Set of rules no 32-104-98 Design of earthwork for rail ways with 1520 mm track]. Moscow: Gosstroy Rossii Publ., 1999. 160 p.

20. SP 238.1326000.2015 Zheleznodorozhnyi put' [Set of rules 238.1326000.2015 The railway track]. Moscow: Mintrans Rossii Publ., 2015. 71 p.

Информация об авторах

Ковенькин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kovenkin_da@irgups.ru.

Туманов Дмитрий Олегович, аспирант кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: tumanov.dmitry2014@yandex.ru.

Каймов Евгений Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: eugen-kaimov@yandex.ru.

Information about the authors

Dmitrii A. Koven'kin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kovenkin_da@irgups.ru.

Dmitrii O. Tumanov, Ph.D. Student of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: tumanov.dmitry2014@yandex.ru.

Evgenii V. Kaimov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Building of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: eugen-kaimov@yandex.ru.