

УДК 625.12

## Анализ изменения температурного режима насыпи в криолитозоне Якутии (на примере численного моделирования в COMSOL Multiphysics)

**А. В. Петряев, А. В. Святогорова, М. С. Мяки**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Петряев А. В., Святогорова А. В., Мяки М. С.* Анализ изменения температурного режима насыпи в криолитозоне Якутии (на примере численного моделирования в COMSOL Multiphysics) // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 34–44. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-34-44

### Аннотация

В статье представлены результаты численного моделирования теплового режима в криолитозоне, расположенной в Центральной Якутии (район с резко континентальным климатом и распространением многолетнемерзлых грунтов). **Цель:** выполнить численный анализ изменения температурного режима железнодорожной насыпи и многослойного основания, расположенных в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов Центральной Якутии с учетом фазовых переходов «вода — лед» и сезонных колебаний климатических факторов. **Методы:** в работе использован метод конечно-элементного моделирования нестационарных процессов теплопереноса в программном комплексе COMSOL Multiphysics. **Результаты:** установлены характерные особенности распределения температур в теле насыпи и основании в зимний и летний периоды. **Практическая значимость:** полученные данные могут быть использованы при проектировании линейных сооружений (железных и автомобильных дорог) в криолитозоне для обоснования необходимости применения конструктивных мероприятий.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые грунты, криолитозона, численное моделирование, сезонное оттаивание, железные дороги

### Введение

Освоение территорий с суровыми климатическими условиями, в частности Республики Саха (Якутия), требует особого подхода к проектированию линейных сооружений. Транспортная инфраструктура в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) подвержена высоким рискам деформаций, связанных с изменением температурного поля основания при строительстве и эксплуатации [1, 5]. Нарушение теплового равновесия может привести к оттаиванию грунтов, развитию осадок, что влечет за собой снижение безопасности движения и увеличение затрат на ремонт [7].

Классические аналитические методы не всегда позволяют учесть нелинейность процессов теплопереноса, зависимость теплофизических свойств от температуры и фазовые переходы поровой влаги [3]. Для прогнозирования деградации мерзлоты при изменении климата активно применяются методы численного

моделирования [9]. В связи с этим актуальным является применение конечно-элементного моделирования. Данная работа посвящена анализу изменения температур в насыпи и основании в течение 5 лет эксплуатации с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics. Результаты позволяют оценить глубину сезонного промерзания и оттаивания, а также выявить зоны потенциально опасных температурных изменений.

### Описание района строительства

В качестве объекта исследования выбран участок железной дороги в Центральной Якутии. Климат района резко континентальный, характеризуется продолжительной зимой (до 7–8 месяцев) с низкими температурами (средняя температура января — от  $-38$  до  $-42$  °C) и коротким летом (средняя температура июля — от  $+18$  до  $+20$  °C). Суммарная продолжительность безморозного периода не превышает 90–100 дней [5].

Глубина сезонного оттаивания естественных грунтов (в ненарушенных условиях) варьируется от 1,2 до 2,0 м в зависимости от типа грунта и влажности [8]. Долгосрочный мониторинг в Центральной Якутии подтверждает увеличение глубины сезонного протаивания на техногенно-нарушенных территориях [10].

Геологический разрез:

1. Насыпь: супесь пылеватая, средней плотности, влажность — 14–16 %.

2. Основание:

- слой 1 (0–2,5 м): суглинок текучепластичный, влажность — 20–22 %, степень влажности —  $> 0,8$ ;

- слой 2 (2,5–5,0 м): песок средней крупности, насыщенный водой;

- слой 3 (5,0–12,0 м): суглинок полутвердый, криогенного строения.

Температура грунтов на глубине нулевых годовых амплитуд (10–15 м) составляет от  $-1,5$  до  $-2,0$  °C, что указывает на наличие многолетнемерзлой толщи (сплошное распространение). Проектная высота насыпи — 2,5 м, ширина основной площадки — 12 м, заложение откосов — 1:1,5.

### Описание метода расчета в программе COMSOL Multiphysics

Численное моделирование выполнено в двумерной постановке (плоская деформация) в модуле Heat Transfer in Porous Media (Heat Transfer Module) [4]. Выбор двумерного профиля (поперечное сечение насыпи и основания) позволяет адекватно оценить влияние атмосферных факторов и боковой теплоотдачи на температурное поле [6].

### Основные допущения

1. Грунты рассматриваются как трехкомпонентные пористые среды (скелет, вода, лед) [3].

2. Теплофизические характеристики грунтов зависят от температуры и фазового состояния воды.

3. Фильтрация влаги в поровом пространстве не учитывается (задача решается в сопряженной тепловой постановке, без учета массопереноса, что является консервативным подходом для оценки температур) [2, 6].

4. Фазовый переход «вода — лед» происходит в интервале температур от 0 до  $-0,5$  °C с использованием метода эффективной теплоемкости [4].

### Базовые уравнения теплопереноса

Уравнение теплопроводности с учетом фазового перехода в пористой среде имеет вид [4, 6]:

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k_{eff} \nabla T) = Q, \quad (1)$$

где  $T$  — температура, °C (или °K);

$t$  — время, с;

$(\rho C_p)_{eff}$  — эффективная объемная теплоемкость среды, Дж/(м<sup>3</sup>·K);

$k_{eff}$  — эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K).

Эффективные свойства рассчитываются на основе объемного усреднения свойств компонентов (скелет, вода, лед):

$$(\rho C_p)_{eff} = \theta_s (\rho C_p)_s + \theta_w (\rho C_p)_w + \theta_i (\rho C_p)_i, \quad (2)$$

$$k_{eff} = \theta_{sk} + \theta_{wk} + \theta_{ik}, \quad (3)$$

где  $\theta_s$ ,  $\theta_w$ ,  $\theta_i$  — объемные доли скелета, воды и льда соответственно, подчиняющиеся условию  $\theta_s + \theta_w + \theta_i = 1$ .

### Учет фазового перехода

Для учета скрытой теплоты фазового перехода используется метод эквивалентной теплоемкости [2, 4]. В интервале температур фазового перехода  $[T_m - \Delta T, T_m + \Delta T]$  эффективная теплоемкость определяется как:

$$C_{eff}(T) = (\rho C_p)_{eff} + L \frac{\partial \theta_w}{\partial T}, \quad (4)$$

где  $L$  — удельная скрытая теплота фазового перехода воды (334 кДж/кг);

$\frac{\partial \theta_w}{\partial T}$  — скорость изменения содержания незамерзшей воды с температурой.

Функция содержания незамерзшей воды аппроксимируется экспоненциальной зависимостью (на основе экспериментальных данных для супесей и суглинков):

$$\theta_w(T) = \begin{cases} \theta_{w0}, & T > T_m + \Delta T \\ \theta_{w0} \cdot \exp(\beta \cdot (T - T_m)), & T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T, \\ 0 & T < T_m - \Delta T \end{cases} \quad (5)$$

где  $\beta$  — эмпирический коэффициент, характеризующий скорость вымерзания влаги.

### Начальные и граничные условия

Начальное условие: распределение температуры по глубине задано на 1 января (конец периода максимального сезонного промерзания). Принимается линейная зависимость температуры от глубины, характерная для установившегося режима в криолитозоне [5]:

$$T(z, 0) = T_{\text{surf}} + \Gamma \cdot z, \quad (6)$$

где  $T_{\text{surf}}$  — приведенная температура на поверхности;

$\Gamma$  — геотермический градиент.

Граничные условия:

1. На поверхности грунта и откосах насыпи: задано граничное условие 3-го рода (конвективный теплообмен и солнечная радиация в упрощенном виде через эквивалентную температуру наружного воздуха  $T_{\text{air}}(t)$ ) [2, 4]:

$$-k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{\text{air}}(t)), \quad (7)$$

где  $\partial T / \partial n$  — производная температуры по внешней нормали к поверхности, °С/м;  
 $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи на поверхности (принимается 15–20 Вт/(м²·К) с учетом ветрового режима) [6];

$T$  — температура поверхности грунта, °С;

$T_{\text{air}}(t)$  — температура наружного воздуха, изменяющаяся во времени, °С.

Температура наружного воздуха задавалась в виде гармонической функции с годовым периодом и поправкой на среднегодовую температуру [2, 8]:

$$T_{\text{air}}(t) = T_{\text{avg}} + A_{\text{amp}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{365} + \phi\right). \quad (8)$$

Параметры: среднегодовая температура  $T_{\text{avg}} = -8,5$  °С, амплитуда  $A_{\text{amp}} = 35$  °С, начальная фаза  $\phi$  соответствует минимальной температуре в январе.

2. На нижней границе основания (глубина — 15 м): условие теплового потока, соответствующего геотермическому потоку Земли ( $q = 0,05$  Вт/м²), либо фиксированная температура  $T = -2,0$  °С (постоянная).

3. На боковых границах: условие тепловой изоляции (симметрия) на расстоянии 15 м от оси насыпи.

### Параметризация материалов

Теплофизические свойства материалов заданы с учетом их состояния (талое/мерзлое). Для каждого слоя (супесь, суглинок, песок) в COMSOL созданы узлы Porous Material с переключением свойств при фазовом переходе [4].

**ТАБЛИЦА. Теплофизические характеристики грунтов [3, 7]**

| Материал           | Плотность скелета, кг/м <sup>3</sup> | Теплопроводность (тал./мерз.), Вт/(м·К) | Теплоемкость (тал./мерз.), кДж/(кг·К) |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| Супесь (насыпь)    | 1700                                 | 1,2/1,8                                 | 1,1 / 0,9                             |
| Суглинок (сл. 1,3) | 1850                                 | 1,1/1,7                                 | 1,2/1,0                               |
| Песок (сл. 2)      | 1950                                 | 1,5/2,1                                 | 1,0/0,8                               |

*Примечание:* влажность (суммарная) принята: для супеси — 0,18, суглинка — 0,25, песка — 0,22 (доля незамерзшей воды при 0 °С составляла 0,05–0,1) [7].

### Реализация в COMSOL

Расчет выполнен на неструктурированной сетке с локальным сгущением в зоне насыпи и верхней части основания (максимальный размер элемента — 0,1 м) [4]. Использовался временной решатель с автоматическим контролем шага (BDF) для нестационарных задач. Период расчета — 5 лет (1825 дней) с шагом вывода результатов 30 дней [6].

### Результаты расчета

В данном разделе представлены результаты численного моделирования температурного режима.

Изотермы показывают глубину промерзания до 4,5 м под бровкой насыпи, наличие непромерзающей зоны под центром насыпи отсутствует. Максимальные отрицательные температуры на поверхности откоса достигают –35 °С. Расчет представлен на рис. 1.

Формирование талого «стакана» под насыпью. Глубина сезонного оттаивания под подошвой насыпи составляет 1,8 м. Температура на поверхности насыпи достигает +24 °С. Многолетнемерзлые грунты основания (суглинок) сохраняются ниже глубины 4,0 м. Расчет представлен на рис. 2.

Представлены кривые изменения температуры на глубинах: 0,5 м (тело насыпи), 2,5 м (подошва насыпи / верх основания), 5,0 м (слой песка), 10,0 м (нижний суглинок) за 5 лет. Наблюдается затухание амплитуды колебаний с глубиной и наличие тренда к повышению среднегодовой температуры на глубине 5 м на 0,3 °С за 5 лет. Расчет представлен на рис. 3.

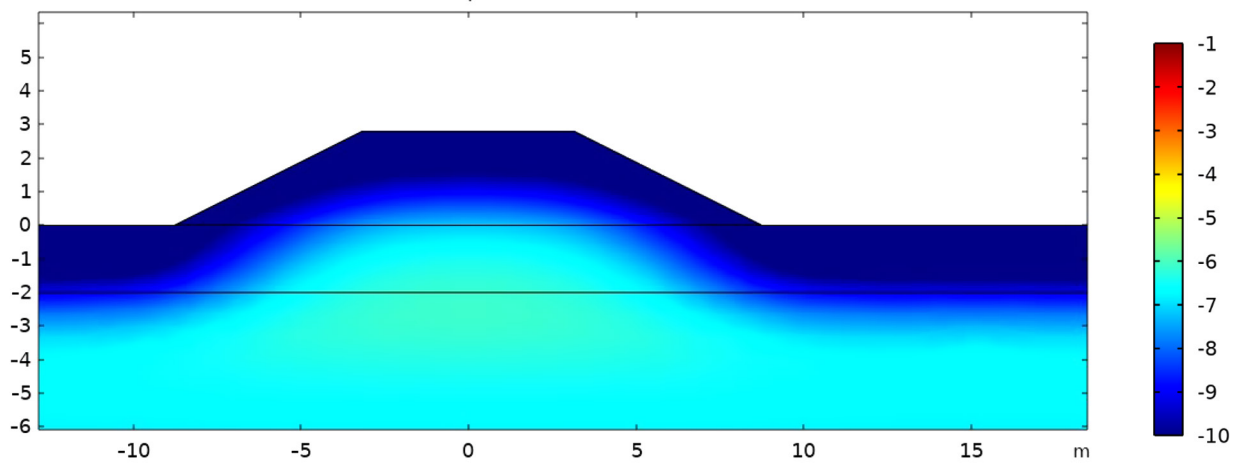


Рис. 1. Распределение температур в поперечном сечении насыпи через 1 год (зима)

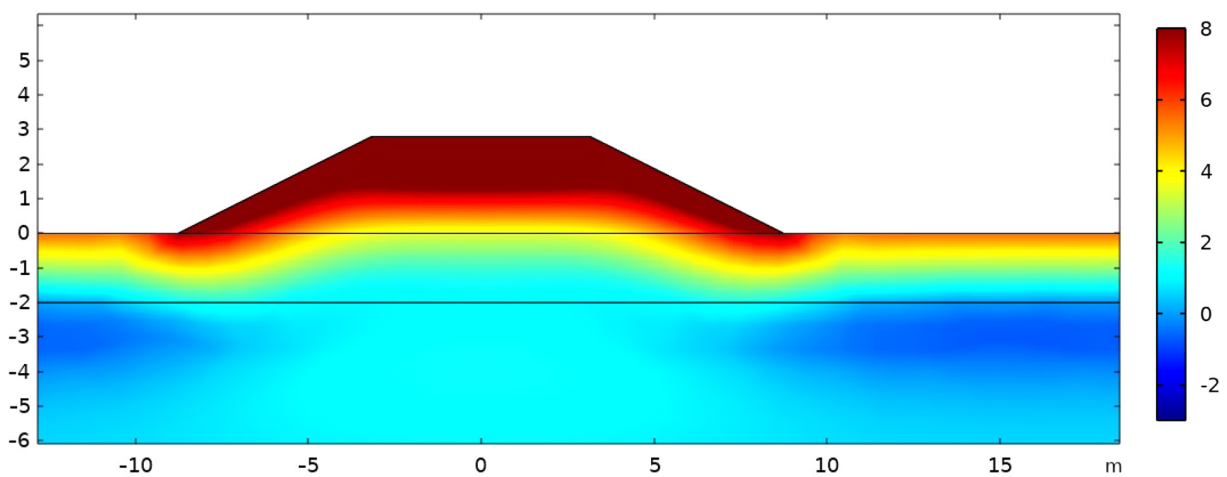


Рис. 2. Распределение температур в поперечном сечении насыпи через 1 год (лето)

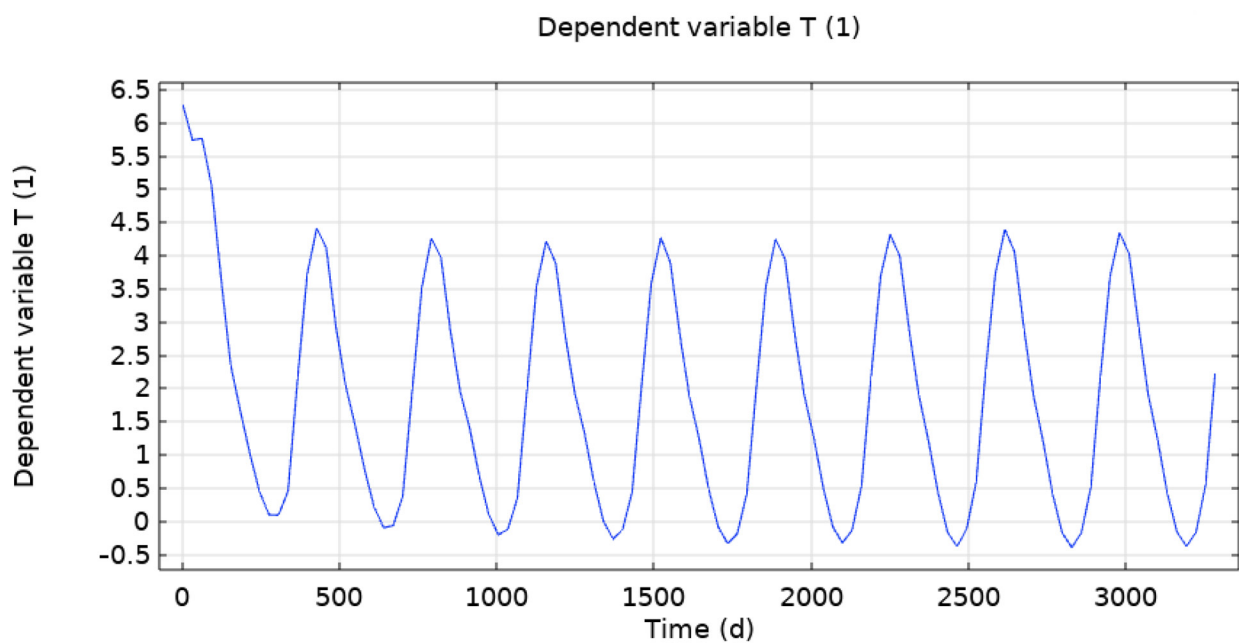
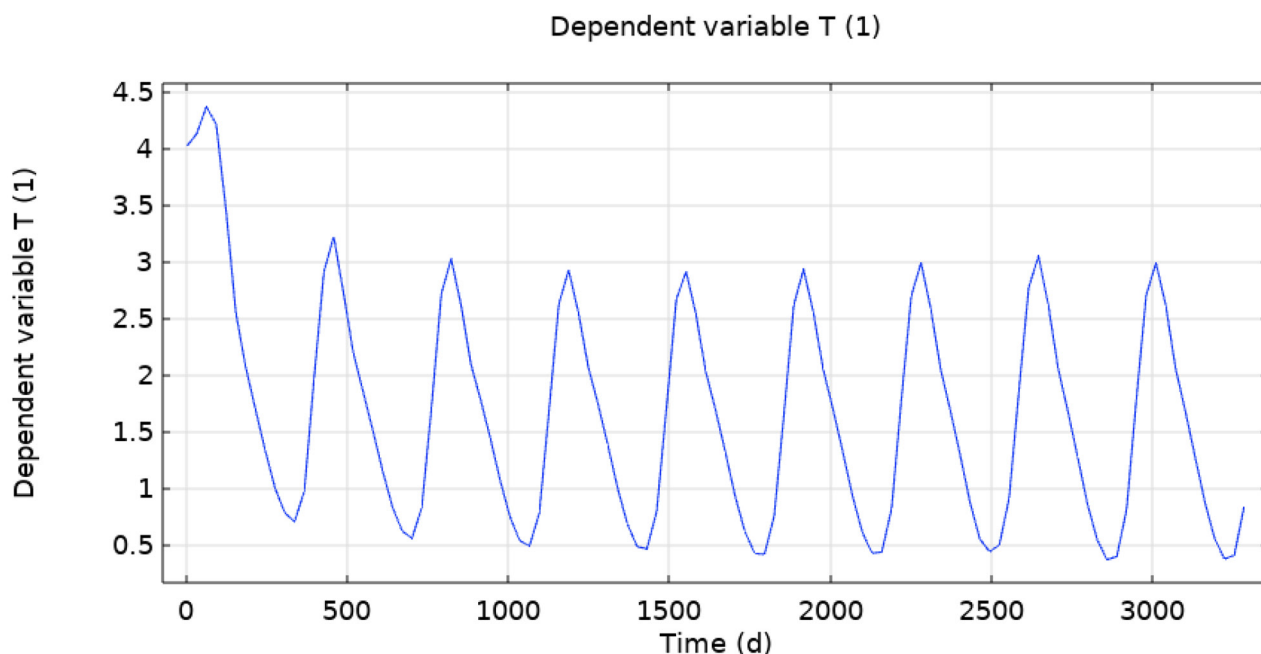


Рис. 3. График изменения температуры грунтов земляного полотна во времени

График показывает максимальную глубину оттаивания в конце каждого летнего периода. За 5 лет глубина сезонного оттаивания увеличилась с 2,0 до 2,2 м, что свидетельствует о постепенном накоплении тепла в основании. Расчет представлен на рис. 4.



**Рис. 4.** Динамика положения фронта оттаивания (глубина нулевой изотермы) по оси насыпи

### Анализ результатов

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов о тепловом взаимодействии дорожной насыпи с многолетнемерзлым основанием:

1. Асимметрия температурного поля. Моделирование показало, что из-за различий в инсоляции южного и северного откосов (в условиях реального рельефа) наблюдается некоторая асимметрия изотерм. Однако в рамках принятой упрощенной модели (учет только конвекции) наибольшее влияние на тепловой режим оказывает высота насыпи. Насыпь высотой 2,5 м обеспечивает сохранение мерзлоты в основании при условии отсутствия техногенных нарушений [1, 5]. Однако, как показано в [9], инсоляция откосов разной экспозиции может вносить коррективы в температурное поле.

2. Эволюция температурного поля во времени. На графиках изменения температур (рис. 3) четко прослеживается затухание годовых колебаний с глубиной. На глубине 10 м амплитуда колебаний составляет менее 0,5 °С. Важно отметить, что в слое песка (слой 2) наблюдается эффект теплового буфера: высокий коэффициент теплопроводности песка способствует не только более быстрому отводу

тепла зимой, но и ускоряет проникновение тепла летом. За 5 лет расчетного периода выявлен незначительный ( $0,2\text{--}0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) рост среднегодовой температуры на глубине заложения кровли многолетнемерзлых пород (5–6 м). Это может быть связано с аккумуляцией тепла в теле насыпи [2, 8].

3. Динамика оттаивания. Увеличение глубины сезонного оттаивания на 0,4 м за 5 лет (рис. 4) не является критическим для данного региона, однако указывает на тенденцию к деградации мерзлоты при отсутствии охлаждающих устройств (например, вентилируемых труб или теплоизоляции) [5]. На Амуро-Якутской магистрали аналогичные условия потребовали применения термоизоляционных мероприятий [9]. При проектировании на более длительный срок (25–50 лет) данная тенденция может привести к переходу основания из пластичномерзлого состояния в талое, что чревато осадками [1].

4. Ограничения модели. Важно отметить, что принятое допущение об отсутствии фильтрации влаги может приводить к занижению скорости конвективного переноса тепла в песчаном слое (слой 2), особенно в период оттаивания [2]. Для уточнения прогноза деформаций рекомендуется дальнейшее развитие модели в направлении связанного термогидродинамического расчета (ТНМ — Thermo-Hydro-Mechanical) [6].

## Выводы

1. В результате выполнения численного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics установлено, что температурный режим насыпи высотой 2,5 м и многослойного основания в условиях Центральной Якутии характеризуется устойчивой динамикой промерзания и оттаивания.

2. За пятилетний период эксплуатации глубина сезонного оттаивания под подошвой насыпи увеличилась с 2,1 до 2,5 м. Несмотря на это, кровля многолетнемерзлых грунтов (суглинков на глубине 5 м) сохраняет отрицательные температуры (от  $-1,0$  до  $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), что свидетельствует о сохранении мерзлотного состояния основания на данный период.

3. Эффективная объемная теплоемкость и зависимость содержания незамерзшей воды от температуры, реализованная через функцию фазового перехода, оказали существенное влияние на кинетику промерзания. Учет этих параметров является обязательным для корректного прогноза.

4. Полученные данные могут быть использованы в качестве обоснования для применения конструктивных мероприятий (устройство охлаждающих систем) при проектировании дорог в аналогичных инженерно-геологических условиях на срок службы более 10 лет.

## Список источников

1. Чжан Р.В., Петров А.Н. Геокриологическая безопасность линейных сооружений в условиях изменения климата // Криосфера Земли. 2023. Т. 27, № 4. С. 45–57.
2. Zhou J., Ma W., Mu Y. Long-Term Thermal Stability of Embankment in Permafrost Regions: A Numerical Study Using Coupled Heat Transfer and Phase Change Model // Cold Regions Science and Technology. 2022. Vol. 198. Pp. 103–115.
3. Королев М.В. Численное моделирование температурного режима автомобильных дорог в криолитозоне // Инженерная геология. 2024. № 1. С. 22–31.
4. COMSOL AB. Heat Transfer Module User's Guide. Version 6.2. Stockholm: COMSOL AB, 2023. 420 p.
5. Железняк М.Н., Булдович С.Н. Прогноз изменения геокриологических условий при освоении территорий Восточной Сибири. Новосибирск: Гео, 2021. 312 с.
6. Li S., Zhang H., Wang Y. Analysis of the Thermal Regime of Highway Embankment in Permafrost Regions Based on COMSOL Multiphysics // Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering. ASCE, 2023. Pp. 134–145.
7. Стручков А.И., Спиридонов В.Б. Теплофизические свойства дисперсных грунтов Якутии // Вестник Северо-Восточного федерального университета. 2022. Т. 19, № 3. С. 55–63.
8. Mikhailov V., Syromyatina E. Numerical Analysis of the Influence of Climate Warming on the Stability of Road Embankments in Central Yakutia // Transportation Geotechnics. 2024. Vol. 45. Pp. 101–112.
9. Шестернев Д.М., Литовко А.В. Опыт проектирования и строительства на участке «Ледовый комплекс» Амуро-Якутской железнодорожной магистрали // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2017. Т. 22, № 2. С. 28–33.
10. Скрыбин П.Н. Динамика термического режима грунтов на трассах линейных сооружений Центральной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 23, № 1. С. 48–53.

Дата поступления: 26.06.2026

Решение о публикации: 28.07.2026

## Контактная информация:

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — доктор техн. наук; pgups60@mail.ru

СВЯТОГОРОВА Анастасия Владимировна — аспирант, ассистент кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; svyatogorova@pgups.ru

МЯКИ Михаил Сергеевич — студент; myaki\_ss@mail.ru

## Analysis of Temperature Regime Changes in an Embankment within the Permafrost Zone of Yakutia (Based on Numerical Modeling in COMSOL Multiphysics)

A. V. Petryaev, A. V. Svyatogorova, M. S. Myaki

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** Petryaev A. V., Svyatogorova A. V., Myaki M. S. Analysis of Temperature Regime Changes in an Embankment within the Permafrost Zone of Yakutia (Based on Numerical Modeling in COMSOL Multiphysics) // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 34–44. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-34-44 (In Russian)

### Abstract

The article presents the results of numerical modeling of the thermal regime of a railway embankment located in Central Yakutia (a region with a sharply continental climate and widespread permafrost). **Objective:** to perform a numerical analysis of the temperature regime changes in a railway embankment and its multi-layered foundation, situated in the continuous permafrost zone of Central Yakutia, considering “water-ice” phase transitions and seasonal fluctuations of climatic factors. **Methods:** the study employs the finite element method for modeling non-stationary heat transfer processes within the COMSOL Multiphysics software package. **Results:** the modeling established characteristic features of temperature distribution within the embankment body and foundation during winter and summer. **Practical significance:** the obtained data can be utilized in the design of linear structures (railways and highways) in permafrost zones to justify the necessity of employing structural mitigation measures.

**Keywords:** permafrost, cryolithozone, numerical modeling, seasonal thawing, railways

### References

1. Zhang R. V., Petrov A. N. Geokriologicheskaya bezopasnost' linejnykh sooruzhenij v usloviyakh izmeneniya klimata [Geocryological Safety of Linear Structures under Climate Change], *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 45–57. (In Russian)
2. Zhou J., Ma W., Mu Y. Long-Term Thermal Stability of Embankment in Permafrost Regions: A Numerical Study Using Coupled Heat Transfer and Phase Change Model, *Cold Regions Science and Technology*, 2022, vol. 198, pp. 103–115.
3. Korolev M. V. Chislennoe modelirovanie temperaturnogo rezhima avtomobilnykh dorog v kriolitozone [Numerical Simulation of the Temperature Regime of Highways in the Cryolithozone], *Inzhenernaya geologiya [Engineering Geology]*, 2024, no. 1, pp. 22–31. (In Russian)
4. COMSOL AB. Heat Transfer Module User's Guide, version 6.2, Stockholm, COMSOL AB, 2023, 420 p.
5. Zheleznyak M. N., Buldovich S. N. Prognoz izmeneniya geokriologicheskikh uslovij pri osvoenii territorij Vostochnoj Sibiri [Forecast of Changes in Geocryological Conditions during the Development of Territories in Eastern Siberia], Novosibirsk, Geo, 2021, 312 p. (In Russian)
6. Li S., Zhang H., Wang Y. Analysis of the Thermal Regime of Highway Embankment in Permafrost Regions Based on COMSOL Multiphysics, *Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering*, ASCE, 2023, pp. 134–145.

7. Struchkov A. I., Spiridonov V. B. Teplofizicheskie svoystva dispersnykh gruntov Yakutii [Thermophysical Properties of Dispersed Soils in Yakutia], *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta [Bulletin of the North-Eastern Federal University]*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 55–63. (In Russian)
8. Mikhajlov V., Syromyatina E. Numerical Analysis of the Influence of Climate Warming on the Stability of Road Embankments in Central Yakutia, *Transportation Geotechnics*, 2024, vol. 45, pp. 101–112.
9. Shesternev D. M., Litovko A. V. Opyt proektirovaniya i stroitel'stva na uchastke “Ledovyj kompleks” Amuro-Yakutskoj zheleznodorozhnoj magistrali [Experience in Design and Construction at the “Ice Complex” Section of the Amur-Yakutsk Railway], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki [Natural Resources of the Arctic and Subarctic]*, 2017, vol. 22, no. 2, pp. 28–33. (In Russian)
10. Skryabin P. N. Dinamika termicheskogo rezhima gruntov na trassakh linejnykh sooruzhenij Tsentral'noj Yakutii [Dynamics of the Thermal Regime of Soils along Linear Structures in Central Yakutia], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki [Natural Resources of the Arctic and Subarctic]*, 2018, vol. 23, no. 1, pp. 48–53. (In Russian)

Received: June 26, 2026

Accepted: July 28, 2026

**Author's information:**

Andrej V. PETRYAEV — Dr. Sci. in Engineering; pgups60@mail.ru

Anastasiya V. SVYATOGOROVA — Postgraduate Student, Assistant of the “Road Construction of the transport complex” Department; svyatogorova@pgups.ru

Mikhail S. MYAKI — Student; myaki\_ss@mail.ru