

Научная статья
УДК 504.7: 502.53
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/109-118>

Повышение безопасности дорог в условиях глобального потепления

Владимир Алексеевич Стетюха

Забайкальский государственный университет, Чита, Российская Федерация
✉ stetjukha_chita@mail.ru

Аннотация. Приводятся параметры глобального потепления и характеристики изменения мощности сезонно-талого слоя в восточных регионах страны, изменения температуры грунта в зоне распространения многолетней мерзлоты. Определяются последствия потепления, создающие угрозу экологической безопасности. Рассматриваются примеры использования теплоизоляции в условиях регионов с суровым климатом. Актуальность проблемы связана с глобальным потеплением и угрозой деградации многолетнемерзлых грунтов в отдельных регионах. Анализ литературных источников показал недостаточную степень исследования оптимальных способов применения теплоизоляции, связанных с выбором толщины слоя, глубины ее размещения, а также сроками укладки. Объектом исследования являются массивы грунта с прослойками из теплоизоляционных материалов. В массивах присутствуют высокотемпературные многолетнемерзлые грунты. Предмет исследования – поля температуры в массиве грунта и их изменения при размещении теплоизоляции в грунте. Целью работы является количественная оценка влияния параметров теплоизоляции на температурный режим грунта, выявление наиболее эффективных способов применения теплоизоляции. Поля температуры в массиве грунта определяются решением нелинейной задачи тепломассопереноса по разработанной автором методике. Оценивается влияние теплоизоляции на характер изменения температуры грунта на разной глубине в разные периоды времени. Приводятся поля температуры при разной толщине теплоизолятора, разных вариантах и сроках его размещения в массиве грунта. Анализ результатов подтверждает целесообразность использования теплоизоляции в рассматриваемых условиях. Определены величина перемещения нижней границы сезонно-талого слоя при использовании теплоизоляции и рекомендуемые сроки размещения теплоизоляции. Область применения результатов – инженерная защита транспортных сооружений.

Ключевые слова: экологическая безопасность, массив грунта, синтетический теплоизолятор, многолетнемерзлый грунт, теплопроводность

Для цитирования: Стетюха В.А. Повышение безопасности дорог в условиях глобального потепления // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2(59). С. 109–118.

Original article
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/>

Improving road safety under conditions of global warming

Vladimir A. Stetjukha

Transbaikal State University, Chita, Russian Federation
✉ stetjukha_chita@mail.ru

Abstract. The parameters of global warming and the characteristics of changes in the thickness of the seasonally thawed layer in the eastern regions of the country, changes in ground temperature in the permafrost zone are presented. The consequences of warming that pose a threat to environmental safety are determined. Examples of the use of thermal insulation in regions with harsh climates are given. The urgency of the problem is

related to global warming and the threat of degradation of permafrost in certain regions. An analysis of literary sources showed an insufficient degree of research into the optimal methods of using thermal insulation related to the choice of layer thickness, depth of its placement, as well as the timing of installation. The object of the study is soil masses with layers of thermal insulation materials. High-temperature permafrost soils are present in the massifs. The subject of the study is the temperature fields in the soil mass and their changes when thermal insulation is placed in the soil. The purpose of the article is to quantify assess the influence of thermal insulation parameters on the temperature regime of the soil, to identify the most effective ways to use thermal insulation. The temperature fields in the soil mass are determined by solving the nonlinear problem of heat and mass transfer according to the method developed by the author. The influence of thermal insulation on the nature of changes in soil temperature at different depths in different time periods is estimated. The temperature fields for different thicknesses of the heat insulator and different options and timing of its placement in the soil mass are presented. The analysis of the results confirms the expediency of using thermal insulation in the conditions under consideration. The magnitude of movement of the lower boundary of the seasonally thawed layer when using thermal insulation and the recommended timing of thermal insulation placement are determined. The scope of application of the results is engineering protection of transport facilities.

Keywords: environmental safety, soil mass, synthetic thermal insulator, permafrost, thermal conductivity

For citation: Stetjukha V.A. Improving road safety under conditions of global warming. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 2(59), pp. 109–118. (In Russ.).

Введение

Глобальное потепление климата на Земле отмечается на протяжении длительного времени [1, 2]. Наблюдения Росгидромета подтверждают развитие этого процесса и на территории России [3]. В среднем по России с 1976 г. увеличение температуры приземного воздуха происходит с интенсивностью $0,49^{\circ}\text{C}$ за 10 лет [3]. Повышение температуры приземного воздуха в среднем за год за период с 1976 по 2022 г. по Сибири и восточным регионам России, $^{\circ}\text{C}/10$ лет: Западная Сибирь – $0,40$, Средняя Сибирь – $0,56$, Прибайкалье и Забайкалье – $0,40$, Приамурье и Приморье – $0,38$, Восточная Сибирь – $0,56$.

В целом по России в подавляющем большинстве случаев отмечается увеличение мощности сезонно-талого слоя (СТС) [4], что может указывать на продолжение процесса деградации многолетнемерзлых грунтов (ММГ) в регионах их залегания. В докладе Росгидромета отмечается увеличение мощности СТС и в восточных регионах страны [4]. За 2007–2021 гг. увеличение мощности СТС в среднем за 10 лет в регионах Центральной Сибири составило $5\text{--}39$ см, на Дальнем Востоке – $5\text{--}17$ см. Растепление мерзлоты отмечается в регионах Забайкалья и Прибайкалья [1]. Так, за период с 1909 по 2008 г. в Байкальском регионе увеличение сезонного протаивания на открытых участках равнялось $1\text{--}1,6$ м, на участках, покрытых лесом – $0,2\text{--}0,25$ м.

Распределение трендов минимальной температуры грунта на территории России за 1976–2022 гг. представлено в докладе Росгидромета [3], где отмечается, что в зоне многолетней мерзлоты минимальная температура грунта на глубине 80 см повышается на $0,4\text{--}0,8^{\circ}\text{C}$ за 10 лет. На глубине 160 см повышение минимальной температуры грунта на севере Восточной Сибири и Дальнего Востока составляет $0,4\text{--}0,8^{\circ}\text{C}$ за 10 лет; на глубине 320 см на юге Западной и Средней Сибири и в Восточной Сибири повышение больше $0,2^{\circ}\text{C}$ за 10 лет. Степень повышения среднегодовой температуры ММГ за период с 1965 по 2020 г. в Средней Сибири составила $1,38^{\circ}\text{C}$, на Юге Сибири – $1,21^{\circ}\text{C}$, в Прибайкалье и Забайкалье – $1,87^{\circ}\text{C}$ [5]. Также отмечается, что увеличение мощности СТС к 2020 г. в Средней Сибири достигло $0,4$ м, в Прибайкалье и Забайкалье – $0,3$ м.

Кроме глобального потепления существенное влияние на поля температуры в грунте оказывают и техногенные воздействия. Сочетание таких факторов, как глобальное потепление климата и техногенные воздействия на среду, приводит к более масштабному увеличению мощности СТС и деградации ММГ. При освоении новых территорий также происходит повышение температуры поверхности грунта и приповерхностного слоя воздуха под действием совокупности техногенных тепловых источников на участке. Отмечаются повышение температуры воздуха в г. Чита по сравнению с примыкающими территориями на $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ и уменьшение

площади распространения ММГ в черте города с 70% в 60-е годы XX в. до 15–20% [6]. Приводятся данные о повышении температуры ММГ и опускании ее кровли на месторождениях Забайкалья на фоне повышения среднегодовых температур воздуха и при влиянии техногенных факторов воздействия [7].

Следствием деградации ММГ могут являться значительные деформации оттаивающих массивов грунта, термокарст, солифлюкция, нарушения уровня подземных вод, образование оползней и наледей, подтопление и заболачивание территорий, как следствие – нарушение экологического равновесия на прилегающих территориях. Перечисленные явления создают угрозу для техногенных объектов: нарушение устойчивости откосов насыпей и выемок, подтопления объектов, повреждения оснований. В свою очередь, это может приводить к возникновению аварийных ситуаций, нарушениям технологических процессов. Возникает угроза снижения несущей способности насыпей и пропускной способности дорог.

Для снижения рисков нанесения ущерба окружающей среде, обеспечения максимальной экономической эффективности производственных процессов и безопасности объектов необходимо ограничивать процессы оттаивания ММГ. Традиционно применяются такие способы управления их состоянием, как теплоизоляция, устройство солнцезащитных экранов, применение термостабилизаторов, совмещение технологических процессов с наиболее благоприятными температурными режимами в году.

В ряде научных публикаций даны примеры использования теплоизоляционных материалов для сглаживания климатических воздействий на массивы грунта. Это распределение полей температуры в насыпях дорог и в их основаниях с применением теплоизоляционных материалов [8, 9, 10, 11, 12]; сравнение экономической эффективности применения двух изоляционных материалов в конструкциях автомобильных дорог в условиях распространения ММГ [10]; метод определения верхней границы ММГ в насыпях дорог с использованием теплоизоляции [12]. Вычислениями подтверждается стабилизация границы ММГ в основании насыпи земляного полотна дороги при использовании теплоизоляции.

Даны результаты экспериментальных исследований распределения температуры в насыпях дорог в условиях сезонного промерзания грунтов [9, 11]. Рассматривается влияние на промерзание и оттаивание элементов земляного полотна и дорожных одежд теплоизоляционных материалов в их составе [13, 14]. Представлены методы расчета полей температуры в железнодорожном полотне в условиях Амуро-Якутской магистрали с учетом слоев теплоизоляции и снежного покрова в криолитозоне [8, 15].

Теплоизоляция грунтовых массивов является актуальной задачей в условиях распространения ММГ. Анализ литературных источников выявил недостаточную степень исследования оптимальных способов применения теплоизоляции, способных решать задачу уменьшения влияния экстремальных значений температуры наружного воздуха на колебания температуры в массиве грунта в условиях глобального потепления. Учет большого количества осложняющих факторов, многообразие параметров природного и техногенного характера требуют разработки и использования методики исследования. Данная методика предполагает учет таких факторов, как сроки природных и техногенных воздействий, геометрические параметры объектов воздействия и их размещение в пространстве, физические свойства грунтов, изменение граничных условий на поверхности и др. Методы исследования должны быть связаны с выбором толщины слоя теплоизоляции и глубины ее размещения, а также сроками укладки, должны обеспечивать достоверное прогнозирование результатов применения теплоизоляции с учетом особенностей конкретного региона.

Целью работы является количественная оценка влияния параметров теплоизоляции на температурный режим грунтов, выбор оптимальных вариантов теплоизоляции грунтов, ограничивающих деградацию ММГ в условиях глобального потепления, на основе математического моделирования теплопереноса. Задачи статьи – это определение оптимальной толщины изолятора и сроков его укладки, оптимальной глубины размещения теплоизоляции от поверхности по критериям недопущения деградации ММГ и уменьшения величины СТС. Объектом исследования являются массивы грунта с прослойками из теплоизоляционных материалов,

расположенные в регионе Центрального Забайкалья. В составе грунта присутствуют высокотемпературные ММГ, наиболее уязвимые к изменениям условий на дневной поверхности. Предмет исследования – поля температуры в массиве грунта и их изменение при трансформации условий размещения теплоизоляции в грунте.

Материалы и методы

Эффективность теплоизоляции зависит от области и способов ее применения. Способы применения теплоизоляции и ожидаемые результаты решения проблем при ее применении в условиях возможной деградации ММГ приводятся в таблице. По назначению теплоизоляции в разных сферах использования в таблице выделены защита оснований объектов и защита откосов насыпей и выемок от деградации ММГ как на период производства работ, так и в период эксплуатации объектов. При этом безопасность рассматриваемых объектов обусловлена ограничением воздействий на природные объекты, безопасной безаварийной эксплуатацией дорог, исключением травматизма и созданием безопасных условия для людей.

Эффективность применения теплоизоляции в условиях залегания ММГ
The efficiency of using thermal insulation in permafrost conditions

Объекты и области применения теплоизоляции	Назначение теплоизоляции	Предотвращаемые последствия нарушения состояния объектов
Теплоизоляция насыпей и откосов насыпей	Сохранение ММГ под насыпью	Деформации насыпи и дорожной одежды
Теплоизоляция оснований под насыпью	Недопущение деградации ММГ под насыпью на период эксплуатации объекта	Деформации и повреждения дорожной одежды при просадках, повышение аварийности на дорогах
Теплоизоляция откосов выемок	Стабилизация верхней границы ММГ после нарушения теплового и водного балансов на поверхности при производстве работ	Обрушения, оползни, наледи, нарушение безопасных условий работы и технологий производства
Теплоизоляция примыкающих к дороге участков	Сохранение ММГ на проблемных примыкающих к дороге участках в мерзлом состоянии на длительный период времени	Заболачивание территорий, нарушение уровней подземных вод
	Краткосрочное размещение теплоизоляции на период производства работ с последующим удалением	Нарушение водно-теплового баланса на примыкающей территории

Разнообразие факторов природно-климатических и техногенных воздействий и вариантов их локализации требует индивидуального подхода к оценке эффективности применения мероприятий в каждом конкретном случае. Для выполнения необходимых аналитических расчетов автором разработана компьютерная программа, реализующая решение нелинейных задач тепломассопереноса с учетом динамики изменения внешних условий на дневной поверхности грунта и наличия слоев теплоизоляции (номер регистрации в Роспатенте – 2023664388 от 04.06.2023).

Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в массиве грунта со слоями теплоизоляции реализуется в указанной программе на основе разработанной автором методики [16]. Применяемые алгоритмы позволяют устанавливать поля температуры в грунте при различных условиях размещения теплоизоляционных материалов с учетом климатических и техногенных воздействий на грунт. В основу используемых алгоритмов положены дифференциальные уравнения тепломассопереноса, учитывающие теплопередачу при диффузионном переносе влаги и перенос влаги, связанный с градиентом температуры. При образовании зоны влагонасыщения перенос влаги описывается уравнениями фильтрации. В уравнение

баланса тепла включаются альbedo поверхности, прямая и рассеянная солнечная радиация, эффективное излучение поверхности, а также тепловые потоки, обусловленные конвективным переносом и испарением. В уравнении баланса влаги кроме осадков и техногенных источников увлажнения, стока и испарения влаги учитывается интенсивность перемещения влаги в приповерхностном слое под действием сил гравитации, градиентов влажности и температуры.

Результаты

Для оценки эффективности применения теплоизоляции рассматривается массив грунта, сложенный суглинками с влажностью 30% и объемным весом скелета $\gamma = 1,4 \text{ тс/м}^3$. Характеристики изолятора: объемный вес $\gamma = 33 \text{ кгс/м}^3$, удельная теплоемкость $C_0 = 1,6 \text{ кДж/кг}\cdot\text{°C}$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,03 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Массив грунта расположен в регионе Забайкальского края со среднегодовой температурой воздуха минус $0,5\text{°C}$. Варьируются время укладки утеплителя (разные периоды года), толщина слоев утеплителя и глубина его размещения от дневной поверхности. Изменение температуры наружного воздуха определяется по данным из сводов правил (СП 131.13330.2018. Строительная климатология), начальное распределение температуры по глубине – по результатам наблюдений в регионе.

Для выбора эффективного способа применения теплоизоляции в условиях распространения ММГ рассматривается характер распределения полей температуры в массиве грунта в естественных условиях в отмеченные на рис. 1 месяцы. Как видно из графиков, представленных на рисунке, объемы массивов грунта, характеризующиеся отрицательной температурой в холодные периоды года, различаются значительно. На графиках можно выделить участки грунтовых массивов с различной по величине отрицательной температурой. Отдельные участки, характеризующиеся наличием наиболее низких температур грунта, обуславливают и сохранение отрицательной температуры грунта в целом. Наименее обширные зоны промерзания наблюдаются в ноябре и марте, наиболее обширные – в январе и феврале. При этом в феврале зона отрицательных температур на большой глубине в последнем случае является более обширной. По этой причине январь и февраль можно рассматривать как наиболее рациональные периоды укладки теплоизоляции в целях сохранения ММГ.

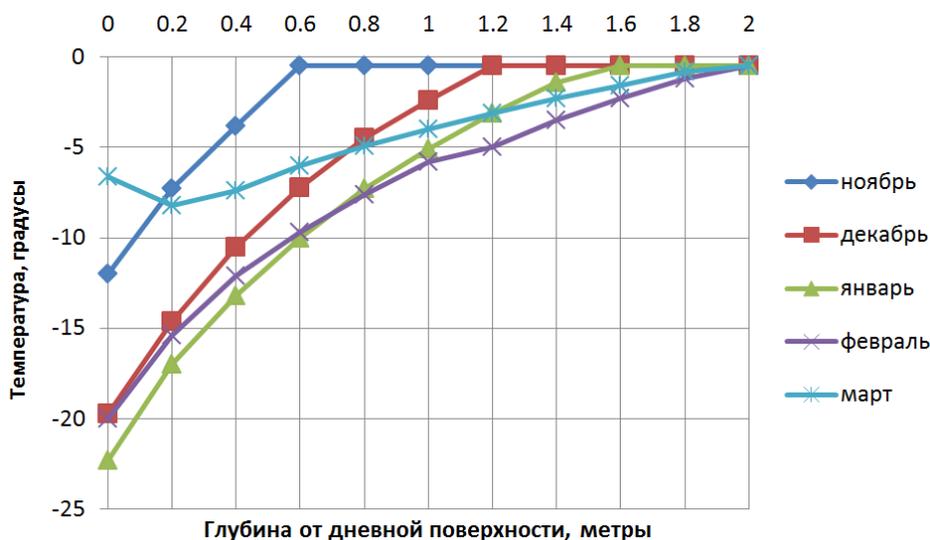


Рис. 1. Распределение температуры в массиве грунта в естественных условиях

Fig. 1. Temperature distribution in soil mass under natural conditions

Распределение температуры в массиве грунта для исследуемых вариантов с теплоизоляцией приводится на рис. 2. Кроме параметров теплоизоляции на рисунке указывается месяц, в котором изоляция размещается в грунте. Представлен и характер распределения температуры в массиве грунта при размещении слоев теплоизоляции на разной глубине от дневной

поверхности после укладки изоляции в феврале. Рассмотрены варианты размещения изоляции толщиной 0,1 м на глубине 0,1, 0,2 и 0,3 м от дневной поверхности. Для указанных вариантов распределение температуры приведено для августа в год, следующий за годом укладки изоляции. Для подтверждения эффективности изоляции на рисунке также приводится характер распределения температуры в массиве грунта в естественных условиях.

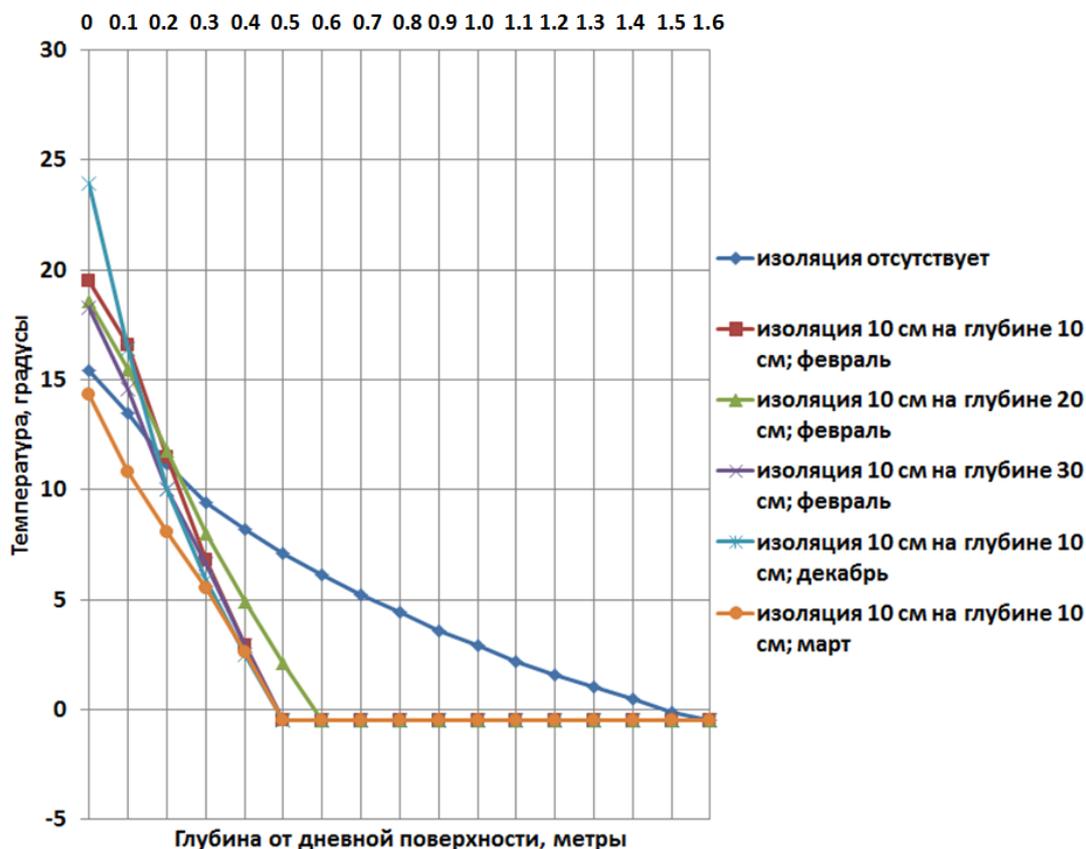


Рис. 2. Распределение температуры в массиве грунта для указанных вариантов изоляции
 Fig. 2. Temperature distribution in the soil mass for the indicated insulation options

Как видно из графиков, эффективность теплоизоляции с увеличением глубины ее размещения незначительно снижается. По этой причине выбор глубины размещения теплоизоляции в рамках рассматриваемых параметров задачи может быть сделан в пользу уменьшения затрат при производстве работ или для обеспечения минимальной деформируемости слоя теплоизолятора под нагрузкой.

Выполнена оценка влияния размеров слоя изоляции на величину СТС при размещении теплоизоляции на расстоянии 0,1 м от дневной поверхности. Установлено, что размещение слоев изоляции толщиной 0,1, 0,2 и 0,3 м приводит к близким по величине результатам распределения температуры в грунте. Величина СТС при всех вариантах утепления массива составила около 0,5 м. Таким образом, разница в глубине промерзания между естественными условиями и вариантами с изоляцией при размещении изолятора на глубине 0,1 м составляет около 1 м. Полученная эффективность рассматриваемого варианта с теплоизоляцией толщиной 0,1 м, выражаемая уменьшением размера СТС до 0,5 м, соответствует результатам для регионов с ММГ [8, 12].

Выполнено исследование влияния сроков укладки теплоизоляции в разные периоды года на характер распределения температуры в грунте и на величину СТС. Приведены графики распределения температуры массива грунта при размещении теплоизоляции в декабре, феврале и марте при их одинаковых размерах и глубине размещения (см. рис. 2). Из графиков следует, что результаты размещения изоляции в холодный период года различаются незначительно. Через большой промежуток времени величины СТС выравниваются.

Характер изменения температуры в массиве грунта при укладке изоляции толщиной 0,1 м на глубине 0,1 м в теплый период года приводится на рис. 3.

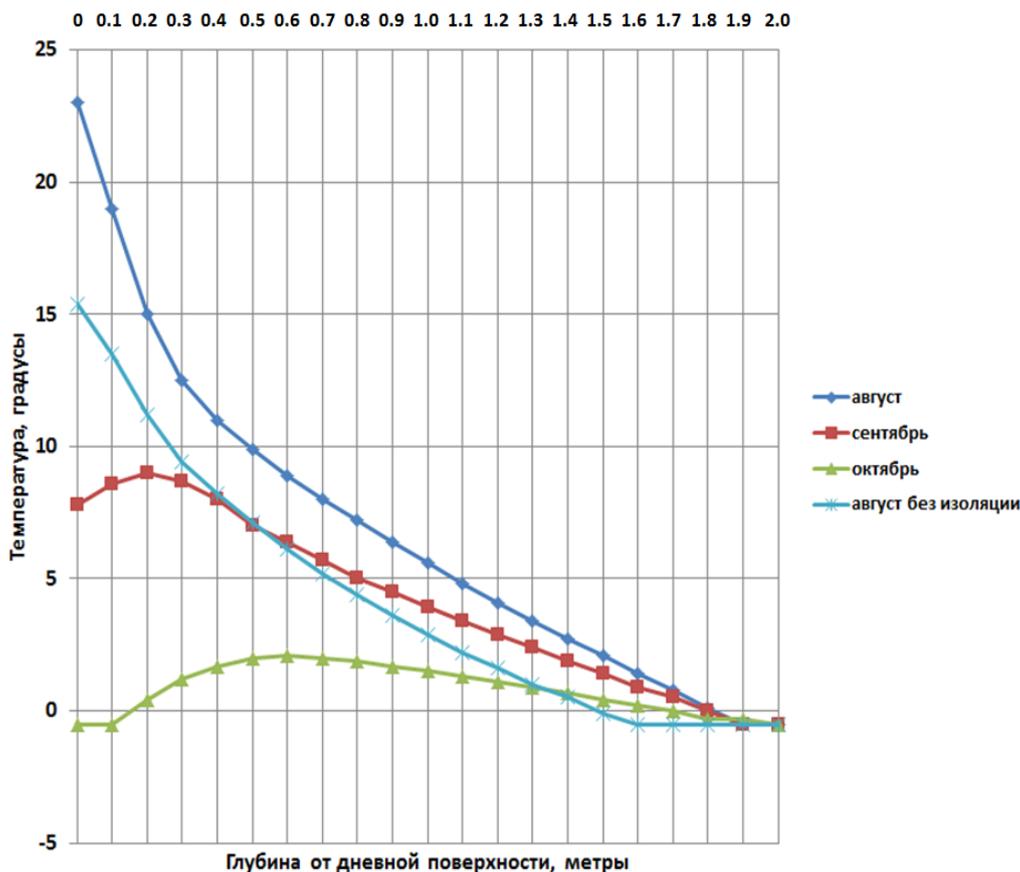


Рис. 3. Распределение температуры в массиве грунта в указанные месяцы при укладке изоляции в июле

Fig. 3. Temperature distribution in the soil mass in the indicated months when laying insulation in July

На графиках представлены результаты определения полей температуры в ближайшие 3 месяца после укладки теплоизоляции в середине июля. Наибольшее повышение температуры в массиве грунта отмечается через месяц после укладки изоляции. При этом температура на разной глубине превышает температуру грунта в естественных условиях. В сентябре наблюдается значительное понижение температуры у поверхности массива. В октябре в большей части массива грунта отмечается более низкая температура по сравнению с вариантом ее распределения в естественных условиях. Таким образом, большим недостатком при укладке теплоизоляции в теплый период года является увеличение СТС. При рассмотренном варианте размещения изоляции в июле наибольшее увеличение СТС по сравнению с естественными условиями достигает 0,4 м.

Заключение

Математическое моделирование теплофизических процессов в грунте по используемой методике с учетом особенностей климата и граничных условий позволяет объективно оценивать результаты применения теплоизоляции в массивах грунта.

В работе подтверждается эффективность и целесообразность теплоизоляции грунтов в рассматриваемых условиях. Применение теплоизоляции позволяет решать актуальную задачу регулирования температурного режима грунтов, сохранения ММГ в мерзлом состоянии в условиях глобального потепления. Проведенные исследования уточняют параметры теплоизоляции, обеспечивающие предохранение ММГ от деградации. При разработке графиков

проведения работ необходимо отдавать предпочтение укладке теплоизоляции в холодный период года. Установлено, что размещение теплоизоляции на большой глубине снижает ее эффективность. Изложенная методика оценки эффективности теплоизоляции может быть использована для различных климатических и геокриологических условий регионов.

Рекомендуемые способы применения теплоизоляционных материалов в условиях пространства ММГ повышают безопасность объектов строительства и транспорта.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Автор подтверждает ответственность за следующее: разработка концепции и дизайна исследования; сбор данных; анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста.

The author confirms responsibility for the following: study conception and design, data collection, analysis and interpretation of results and manuscript preparation.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Куликов А.И., Убугунов Л.Л., Мангатаев А.Ц. О глобальном изменении климата и его экосистемных следствиях // Арктидные экосистемы. 2014. Т. 20. № 3. С. 5–13.
2. Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В. Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского Севера России) // Географическая среда и живые системы. 2022. № 1. С. 6–30. <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30>
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. Москва: Росгидромет, 2023. 104 с.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. Москва: Росгидромет, 2022. 104 с.
5. Никифорова Н.С., Коннов А.В. Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата // Construction and Geotechnics. 2021. Т. 12. № 3. С. 14–24. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.3.02>
6. Шестернев Д.М., Васютин Л.А. Тепловое загрязнение геологической среды криолитозоны урбанизированных территорий Забайкалья (на примере г. Чита) // Вестник Читинского государственного университета. 2012. № 1. С. 43–51.
7. Верхотуров А.Г. Влияние деградации многолетнемерзлых пород на условия разработки месторождений полезных ископаемых в Забайкалье // Материалы Международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной 20-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос». Тюмень: Сити-Пресс, 2011. С. 114–116.
8. Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н., Емельянова Л.В., Ведерникова М.А. Использование синтетических изоляторов для сохранения мерзлотных условий в основании железнодорожной насыпи // Криосфера Земли. 2008. Т. XII, № 2. С. 84–89.
9. Иванов К.С., Галлямов Д. Р., Дашинимаев З. Б. Исследование промерзания грунта с применением теплоизоляции из гранулированной пеностеклокерамики // Вестник ЗабГУ. 2019. Т. 25. № 7. С. 34–44. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-7-34-44>
10. Коротков Е.А., Иванов К.С. Новые дорожные конструкции для холодных регионов с устройством морозозащитных, теплоизоляционных и дренирующих слоев из гранулированного теплоизоляционного материала «Диатомик» // Второй Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах: материалы симпозиума (Новосибирск, 24–26 сентября 2015 г.). Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2015. С. 137–142. EDN: VJJWOP
11. Лопашук В.В., Лопашук А.В., Ермолин В.Н., Казаринов А.Е. Исследование температурного режима земляного полотна автомобильной дороги Петропавловск-Камчатский – Мильково // Вестник Евразийской науки. 2021. № 2. Т. 13. URL: <https://esj.today/PDF/46SAVN221.pdf> (дата обращения 23.03.24).
12. Чжан А.А. Расчет положения верхней границы многолетнемерзлых грунтов в теле и основании земляного полотна при наличии теплоизоляции на откосах // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 4. С. 54–59. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-4\(54-59\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-4(54-59))

13. Liu G., Zhang B. Experimental study on the thermal conductivity of light soil mixed with EPS particles // Fifth Asian Regional Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for Sustainable Adaptation to Climate Change. 13 to 15 December 2012. Bangkok, Thailand. 2012. P. 463–466.
14. Edgar T., Potter C., Mathis R. Frost Heave Mitigation Using Polymer Injection and Frost Depth Prediction // Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering. 2015. Pp. 416–427. <https://doi.org/10.1061/9780784479315.037>
15. Вабищевич П.Н., Варламов С.П., Васильев В.И., Васильева М.В., Степанов С.П. Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги // Математическое моделирование. 2016. Т. 28, № 10. С. 110–124.
16. Стетюха В.А. Совершенствование моделей переноса тепла и влаги при оценке воздействий горного производства на породы в условиях Южного Забайкалья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 10. С. 71–74. EDN: IFAMVX

REFERENCES

1. Kulikov A., Ubugunov L., Mangataev A. On global climate change and its ecosystem consequences. *Arcid ecosystems*, 2014, vol. 20, no. 3, pp. 5–13. (In Russ.).
2. Shpolyanskaya N., Osadchaya G., Malkova G. Modern climate change and the reaction of the permafrost zone (on the example of Western Siberia and the European North of Russia). *Geographical environment and living systems*, 2022, no. 1, pp. 6–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30>
3. Report on climate features in the Russian Federation for 2022. Moscow, Roshydromet Publ., 2023, 104 p. (In Russ.).
4. Report on climate features in the Russian Federation for 2021. Moscow, Roshydromet Publ., 2022, 104 p. (In Russ.).
5. Nikiforova N., Konnov A. Bearing capacity of piles in permafrost under climate change. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, no. 3, pp. 14–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.3.02>
6. Shesternev D., Vasyutich L. Thermal pollution of the geological environment of the permafrost zone of urbanized territories of Transbaikalia (on the example of the city of Chita). *Bulletin of Chita State University*, 2012, no. 1, pp. 43–51. (In Russ.).
7. Verkhoturov A. The influence of permafrost degradation on the conditions for the development of mineral deposits in Transbaikalia. Materials of the International Scientific and Practical Conference on Engineering Permafrost, dedicated to the twentieth anniversary of the creation of NPO Fundamentstroyarkos LLC. Tyumen, City Press Printing House, 2011. 114–116 p. (In Russ.).
8. Ashpiz E., Khrustalev L., Emelyanova L., Vedernikova M. The use of synthetic insulators to preserve permafrost conditions at the base of a railway embankment. *Cryosphere of the Earth*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 84–89. (In Russ.).
9. Ivanov K., Gallyamov D., Dashinimaev Z. Study of soil freezing using thermal insulation made of granulated glass-ceramic foam. *Bulletin of ZabsU*, 2019, vol. 25, no. 7, pp. 34–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-7-34-44>
10. Korotkov E., Ivanov K. New road structures for cold regions with the installation of frost-protective, heat-insulating and drainage layers from granular thermal insulation material “Diatomik”. Second International Symposium of subgrade in cold regions: materials of the symposium. Novosibirsk, September 24–26, 2015. Novosibirsk, Publishing house of the Siberian State Transport University, 2015. P. 137–142. (In Russ.).
11. Lopashuk V., Lopashuk A., Ermolin V., Kazarinov A. Study of the temperature regime of the roadbed of the Petropavlovsk-Kamchatsky – Milkovo highway. *Bulletin of Eurasian Science*, 2021, vol. 13, no. 2. <https://esj.today/PDF/46SAVN221.pdf> (accessed: March 23, 2024).
12. Zhang A. Calculation of the position of the upper boundary of permafrost in the body and base of the roadbed in the presence of thermal insulation on slopes. *Cryosphere of the Earth*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 54–59. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-4\(54-59\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-4(54-59))
13. Liu G., Zhang B. Experimental study on the thermal conductivity of light soil mixed with EPS particles. Fifth Asian Regional Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for Sustainable Adaptation to Climate Change. 13 to 15 December 2012. Bangkok, Thailand. 2012. P. 463–466.

14. Edgar T., Potter C., Mathis R. Frost Heave Mitigation Using Polymer Injection and Frost Depth Prediction. Proceedings of the 16th International Conference on Cold Regions Engineering. July 19-22, 2015, Salt Lake City, Utah. 2015. 416–427 p. <https://doi.org/10.1061/9780784479315.037>
15. Vabishchevich P., Varlamov S., Vasiliev V., Vasilyeva M., Stepanov S. Numerical modeling of the temperature field of the permafrost soil foundation of a railway. *Mathematical Modeling*, 2016, vol. 28, no. 10, pp. 110–124. (In Russ.).
16. Stetyukha V. Improving models of heat and moisture transfer when assessing the impacts of mining on rocks in the conditions of Southern Transbaikalia. *Mining information and analytical bulletin*. 2004, no. 10, pp. 71–74. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Стетюха Владимир Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор факультета строительства и экологии, Забайкальский государственный университет, Чита, Российская Федерация, stetjukha_chita@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4553-9558>.

Vladimir A. Stetjukha, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Faculty of Civil Engineering and Ecology, Transbaikal State University, Chita, Russian Federation, stetjukha_chita@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4553-9558>

Статья поступила в редакцию / Received: 19.04.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 07.06.2024.

Принята к публикации / Accepted: 10.06.2024.