

Научная статья**УДК 551.583: 551.345****DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-2-41-51****Влияние глобального потепления на многолетнемёрзлые грунты
в условиях Забайкалья****Владимир Алексеевич Стетюха**Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия
stetjukha_chita@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4553-9558>

Актуальность проблемы обусловлена влиянием изменений температуры наружного воздуха на поля температуры многолетнемёрзлых грунтов (ММГ) и экологическое состояние природно-техногенных систем. Объект исследования – массив грунта, включающий ММГ. Предмет исследования – поля температуры грунтов в условиях повышения среднегодовой температуры воздуха. Цель исследования – прогнозирование изменения полей температуры ММГ в условиях глобального потепления в Забайкалье. Задачи исследования: анализ изменений температуры воздуха и грунта в регионе при потеплении; прогнозирование влияния температуры и влажности грунтов на изменение температуры ММГ численным методом. Методология и методы исследования представлены оценкой влияния потепления на ММГ, анализом изменений температуры воздуха и грунта, прогнозированием деградации ММГ численным методом. Распределение полей температуры в грунте определяется методом решения нелинейных задач тепломассопереноса. В результате проведённых исследований установлены закономерности изменения полей температуры грунта при повышении температуры воздуха в зависимости от влажности и температуры ММГ в условиях Забайкальского края. Определено положение верхней границы ММГ в условиях глобального потепления с учётом указанных факторов. Анализ результатов проведённых исследований позволил выделить грунты, в наибольшей степени подверженные изменениям условий их залегания с изменением температуры атмосферного воздуха. Установлены наиболее опасные сочетания факторов, вызывающих деградацию ММГ в зоне размещения объектов. Область применения результатов – определение состояния грунтов для обеспечения устойчивости и экологической безопасности возводимых и примыкающих к ним объектов строительства и горного производства.

Ключевые слова: многолетнемёрзлые грунты, температура воздуха, сезонно-тальный слой, температура грунта, экологическая безопасность, глубина оттаивания, потепление, влажность, тепломассоперенос, баланс тепла

Для цитирования

Стетюха В. А. Влияние глобального потепления на многолетнемёрзлые грунты в условиях Забайкалья // Вестник Забайкальского государственного университета. 2025. Т. 31, № 2. С. 41–51. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-2-41-51

Original article**The Impact of Global Warming on Permafrost in the Conditions of Transbaikal Region****Vladimir A. Stetyukha**Transbaikal State University, Chita, Russia
stetjukha_chita@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4553-9558>

The relevance of the problem is due to the influence of changes in outdoor air temperature on the temperature fields of permafrost and the ecological state of natural and man-made systems. The object of the study is a soil massif including permafrost. The subject of the study is soil temperature fields under conditions of increasing average annual air temperature. The purpose of the work is to predict changes in the temperature fields of permafrost under conditions of global warming in Transbaikal region. The objectives of the study are to analyze changes in air and soil temperature in the region during warming, to predict the effect of soil temperature and humidity on changes in the temperature of permafrost using a numerical method. The methodology and methods implement the assessment of the global warming impact on permafrost, the analysis of changes in air and soil temperature and the prediction of permafrost degradation using a numerical method. The distribution of temperature fields in the soil is determined by solving nonlinear heat and mass transfer problems. As a result of the studies, patterns of changes in soil temperature fields with an increase in air temperature depending on the humidity and temperature of permafrost in the Transbaikal region are established. The position of the upper boundary of permafrost is determined under global warming conditions taking into account the specified factors. The analysis of the results of the studies allows us to identify soils that are most susceptible to changes

© Стетюха В. А., 2025

in their occurrence conditions with a change in atmospheric air temperature. The most dangerous combinations of factors causing permafrost degradation in the area of the facilities are established. The scope of the results is to determine the state of soils to ensure the sustainability and environmental safety of construction and mining facilities under construction and adjacent to them.

Keywords: permafrost, air temperature, seasonally thawed layer, soil temperature, environmental safety, thawing depth, warming, humidity, heat and mass transfer, heat balance

For citation

Stetyukha V. A. The Impact of Global Warming on Permafrost in the Conditions of Transbaikal Region // Transbaikal State University Journal. 2025. Vol. 31, no. 2. P. 41–51. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-2-41-51

Введение. В последнее время всё большее внимание в мире привлекают процессы, связанные с глобальным потеплением на нашей планете. В бюллетене мониторинга изменений климата¹ отражены параметры изменений температуры воздуха на планете за 1850–2024 гг. Отмечается, что среднегодовая температура на Земле в настоящее время почти на 1,5 °С выше уровня 1850–1900 гг., при этом потепление в Северном полушарии происходит более активно, чем в Южном [1]. Увеличение температуры приземного воздуха на территории России также отличается большой интенсивностью. Фактические и ожидаемые уровни потепления представлены в докладе².

С повышением температуры воздуха увеличивается глубина сезонного оттаивания и происходит деградация многолетнемёрзлых грунтов (далее – ММГ). В ряде работ такие процессы отмечаются в Северном полушарии в целом [2–4], на территории России в Сибири и на западе Российской Арктики – в работах [5; 6] и в докладе³.

Повышение температуры приземного воздуха и сопутствующие ему процессы оказывают влияние на многие сферы жизни и деятельности человека, экологическое состояние природных и техногенных систем. Возникают дополнительные условия при возведении и эксплуатации объектов строительства и горного производства, которые связаны с потерей устойчивости откосов техногенного происхождения, возможностью развития криогенных процессов.

В работе решается проблема, связанная с оттаиванием ММГ в регионе. Для определения

возможных последствий повышения температуры воздуха и деградации ММГ для объектов строительства и горного производства, повышения их экологической безопасности выполняется оценка влияния как факторов воздействий, так и отдельных характеристик грунтов. Приводится оценка изменений температуры воздуха и глубины сезонного оттаивания грунта в Забайкальском регионе. На основе данных об изменениях температуры воздуха и грунта выполняются расчёты тепломассопереноса в грунте по алгоритмам и программам, которые разработал В. А. Стетюха [7], оценивается роль свойств грунта и отдельных факторов воздействий. Используемые инструменты позволяют прогнозировать перемещение кровли ММГ в условиях глобального потепления с учётом региональных особенностей.

Актуальность исследования обусловлена влиянием изменений температуры наружного воздуха на поля температуры многолетнемёрзлых грунтов и экологическое состояние природно-техногенных систем.

Объект исследования – массив грунта, включающий ММГ.

Предмет исследования – поля температуры грунта в условиях повышения среднегодовой температуры воздуха.

Цель исследования – прогнозирование изменения полей температуры ММГ в условиях глобального потепления в Забайкалье.

Задачи:

- оценка изменений температуры воздуха в Забайкалье;
- определение характера изменений температуры грунта в регионе;
- прогнозирование влияния температуры и влажности грунтов на изменение температуры ММГ численным методом при потеплении.

Методология и методы исследования.

Методика проводимых в работе исследований в целом сводится к анализу изменений температуры воздуха и их прогнозу, оценке фактических изменений температуры массивов грунта в условиях увеличения температуры воздуха в регионе по материалам Росгидромета и других источников, последующему прогнозированию изменений температуры

¹ Бюллетень мониторинга изменений климата Земного шара. Приземная температура – 2024. Годовой обзор. – М.: ФГБУ ИГКЭ, 2025. – 32 с.

² Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. – 124 с. – URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf (дата обращения: 12.02.2025). – Текст: электронный.

³ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 г. – М.: РОСГИДРОМЕТ, 2025. – 135 с. – URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download (дата обращения: 25.03.2025). – Текст: электронный.

и глубины залегания ММГ аналитическим методом. Выявляются наиболее уязвимые к повышению температуры воздуха грунты, выполняется оценка степени деградации ММГ.

При всём разнообразии условий залегания ММГ и их температуры наиболее уязвимы к повышению температуры воздуха в первую очередь высокотемпературные ММГ, расположенные на небольшой глубине от поверхности. При исследовании их состояния прогнозирование процессов должно учитывать наибольшее количество факторов, влияющих на достоверность результатов. Даже незначительный вклад каждого из факторов может давать суммарный неблагоприятный для экологической безопасности объектов эффект.

Для определения полей температуры в массивах грунтов в работе использованы разработанные алгоритмы и программа расчёта, которые создал В. А. Стетюха [7]. В применяемых алгоритмах используются уравнения нестационарного тепломассопереноса, а также уравнения, учитывающие баланс тепла и баланс влаги на дневной поверхности в разные периоды года. Уравнения переноса тепла и влаги учитывают диффузионный влагоперенос и перенос влаги, обусловленный градиентом температуры. Уравнения баланса тепла на дневной поверхности позволяют учитывать альbedo поверхности, солнечную радиацию и эффективное излучение поверхности. Принимаются во внимание потоки тепла, вызванные испарением и конвективным переносом. Уравнениями баланса влаги учитываются осадки, испарение влаги с поверхности, перемещение влаги под действием гравитации и градиентов температуры в слое, примыкающем к дневной поверхности.

Используемая математическая модель отличается механизмом адаптации к изменяющимся во времени условиям. На каждом заданном временном шаге учитываются изменение свойств грунтов в зависимости от их температуры и влажности, изменение положения границ между мёрзлой и талой зонами. В каждой точке массива грунта меняются такие свойства, как коэффициент влагопереноса, теплопроводность и теплоёмкость. Корректировка свойств на каждом шаге вычислений выполняется с учётом известных зависимостей, получаемых на основе экспериментов. Используются критерии фазового перехода. Условия на поверхности являются функциями времени, а их параметры меняются при смене сезонов. Вычисления по используемым алгоритмам позволяют выявлять наиболее неблагоприятные сочетания

параметров при определении влияния потепления в регионе на состояние ММГ.

Разработанность темы исследования.

В работах многих авторов рассматривается влияние оттаивания ММГ на инфраструктуру, надёжность дорожной сети и состояние прибрежных участков [8–10]. При оттаивании ММГ возникают экологические угрозы в условиях загрязнения территорий [3; 11]. Примеры воздействия на инфраструктуру и экономику нашей страны отражены в работах [12; 13] и докладе¹. В Забайкальском крае также отмечается наличие деформаций зданий на фоне повышения температуры воздуха в регионе [14; 15]. В работе [16] приводятся характеристики ММГ на месторождениях полезных ископаемых в Забайкалье и негативные процессы, связанные с повышением температуры воздуха и деградацией ММГ. Образование наледей и развитие оползней оказывают влияние на проведение горных работ, что приводит к снижению устойчивости бортов карьеров. В работе² отмечается необходимость и важность своевременного реагирования на существующие угрозы.

В зарубежных исследованиях изучение деградации ММГ и моделирование этих процессов в основном выполняются для арктической зоны. В работах [17; 18] используются традиционные модели процессов теплопереноса в нелинейной постановке с учётом характерных для арктических регионов факторов воздействий. Работа [19] отличается использованием долговременного прогнозирования развития термодинамических процессов и оценками распределения энергии в больших объёмах грунта. Исследователи процессов оттаивания [20; 21] выделяют в своих работах роль гидрологии грунта, влияние грунтовых вод, прогнозирование просадок грунта в долговременной перспективе.

Изучение и моделирование процессов, связанных с деградацией ММГ на территории России, также в основном выполняется для арктических регионов [22; 23].

В условиях конкретных регионов повышение температуры воздуха влияет на состояние ММГ в разной степени в связи с различиями внешних воздействий и характеристик грунтов. Прогнозирование степени влияния

¹ Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Наукомкие технологии, 2022. – 124 с. – URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf (дата обращения: 12.02.2025). – Текст: электронный.

² Nunataryuk. 2021. Permafrost Matters: Time to React. – URL: <https://nunataryuk.org> (дата обращения: 12.02.2025). – Текст: электронный.

отдельных факторов на грунты при повышении температуры воздуха в Забайкалье в перечисленных и других известных работах не рассматривается, что требует проведения дополнительных исследований.

Результаты исследования.

Изменение температуры воздуха в Забайкалье. По данным Росгидромета¹ повышение температуры приземного воздуха по сравнению со средними температурами за 1991–2020 гг. в 2024 г. в Забайкалье и Прибайкалье составило в среднем за год 1,35 °С: весной – 1,6 °С, летом – 1,78 °С, осенью – 1,17 °С. Темпы роста температуры в Забайкалье и Прибайкалье за 1976–2024 гг. составили по среднегодовой температуре 0,41 °С за 10 лет: зимой – 0,28 °С / 10 лет, весной – 0,61 °С / 10 лет, летом – 0,45 °С / 10 лет, осенью – 0,31 °С / 10 лет.

Институт глобального климата и экологии представил доклад², в котором приводятся отклонения температуры приземного воздуха от средних температур за 1991–2020 гг. в 2024 г. в Забайкалье и Прибайкалье за летний период. Приведённые отклонения в сторону повышения за летний период в целом составили 1,78 °С: за июнь – 0,71 °С, за июль – 2,7 °С, за август – 1,96 °С. По среднегодовой температуре за летний сезон темпы роста температуры в Забайкалье и Прибайкалье за 1976–2024 гг. составили 0,45 °С / 10 лет.

В докладе Росгидромета³ приводится прогноз повышения температуры воздуха в России до конца ХХI в. В нём представлены графики, которые отражают прогнозы изменения средней годовой температуры воздуха по разным сценариям за указанные двадцатилетия по отношению к базовому периоду 1995–2014 гг. По одному из представленных сценариев повышение среднегодовой температуры приземного воздуха по отношению к базовому периоду 1995–2014 гг. за

¹ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 г. – М.: РОСГИДРОМЕТ, 2025. – 135 с. – URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download (дата обращения: 25.03.2025). – Текст: электронный.

² Изменения климата 2024. Лето: июнь – август. Обзор состояния и тенденций изменения климата России. – М.: РОСГИДРОМЕТ, 2024. – 39 с. – URL: http://downloads.igce.ru/climate_change/monitoring-klimata/Russia/2024/2024III.pdf (дата обращения: 12.02.2025). – Текст: электронный.

³ Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. – 124 с. – URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf (дата обращения: 12.02.2025). – Текст: электронный.

2021–2040 гг. может достигать около 2 °С, а за 2081–2100 гг. – около 7 °С.

Представленные результаты отражают нарастание темпов повышения температуры воздуха в регионе в последние годы и указывают на вероятность дальнейшего увеличения темпов потепления в Российской Федерации. Ожидаемая реакция ММГ на возможное вероятное повышение температуры в ближайшей перспективе должна быть спрогнозирована.

При проектировании и строительстве зданий, строительстве дорог, проведении открытых горных работ должны учитываться реальные изменения климата. При определении глубины оттаивания ММГ выполняются теплотехнические расчёты, при этом температура наружного воздуха принимается по нормам СНиП «Строительная климатология». Строительными нормами и правилами в выпусках разных лет устанавливались средняя месячная и годовая температуры воздуха. В качестве примера указанные температуры для региона Забайкалья (г. Чита) приводятся в табл. 1.

Для сравнения в нижней части табл. 1 также представлены средние фактические температуры воздуха в указанные годы по данным сайтов «Погода и климат»⁴, «Погодные сервисы»⁵.

По приведённым данным отмечается устойчивая тенденция повышения температуры воздуха в последние годы. Между значениями температуры, представленными в нормативных документах, и фактическими температурами наблюдаются заметные различия. Фактическое повышение среднегодовых температур в регионе в основном превышает эти показатели в нормативных документах. Данное обстоятельство должно учитываться при проектировании объектов, а также оно требует своевременной корректировки СНиП.

Изменение глубины оттаивания и температуры грунта на территории Забайкалья. Отмеченная тенденция увеличения температуры воздуха приводит к увеличению температуры грунтов. В докладе Росгидромета⁶ на картах России представлен характер изменения температуры грунта за 1976–2024 гг.

⁴ Погода и климат: [сайт]. – URL: <https://www.pogodaclimat.ru> (дата обращения: 12.02.2025). – Текст: электронный.

⁵ Погодные сервисы: [сайт]. – URL: <https://www.pogoda-service.ru> (дата обращения: 12.02.2025). – Текст: электронный.

⁶ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 г. – М.: РОСГИДРОМЕТ, 2025. – 135 с. – URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download (дата обращения: 25.03.2025). – Текст: электронный.

На территории Забайкалья на глубине 0,8 м от поверхности на юге края повышение температуры составляет 0,21–0,4 °C/10 лет, на севере края – до 0,41–0,6 °C/10 лет, на

глубине 1,6 м на большей части края – до 0,21–0,4 °C/10 лет, на севере края – до 0,41–0,6 °C/10 лет, на глубине 3,2 м на большей части региона – до 0,01–0,2 °C/10 лет.

Таблица 1 / Table 1

**Средняя месячная и годовая температуры воздуха в Забайкальском крае (г. Чита) /
Average monthly and annual air temperatures in the Transbaikal Region (Chita)**

Temperatura в нормах СНиП и фактическая / Temperature in SNiP norms and actual	Зима / Winter			Весна / Spring			Лето / Summer			Осень / Autumn			Год / Year
	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
СНиП II А 6 62	-24,1	-26,8	-21,8	-11,7	0	7,8	15,1	18,5	15,2	8,4	-1,4	-14,3	-2,9
СНиП II А. 6.72	-23,8	-26,6	-21,8	-11,5	0,3	8,2	15,5	18,8	15,5	8,3	-1	-14,4	-2,7
СНиП 2 01 01 82	-24,3	-27,7	-23,2	-12	0,3	8,4	15,5	18,8	15,6	8,2	-1,5	-14,8	-3,1
СНиП 23-01-99*	-23,5	-26,2	-22,2	-11,1	-0,4	8,4	15,7	17,8	15,2	7,7	-1,8	-14,3	-2,9
СП 131.13330.2020	-22,5	-25,5	-20	-9,4	1,3	9,5	16,4	18,7	15,9	8,5	-0,8	-13	-1,7
1962 г.	-19,7	-23,9	-18,8	-12,7	0,6	7,8	14,2	17,4	14,9	7,0	-2,8	-17,7	-2,8
1972 г.	-23,8	-23,4	-22,3	-11,0	0,5	7,8	13,6	16,7	14,5	7,7	-4,0	-19,2	-3,6
1982 г.	-18	-24,4	-17,9	-11,9	2,5	7,1	16,4	17,3	14,8	7,3	-2,1	-11,1	-1,7
2000 г.	-26,2	-30,0	-22,0	-6,9	2,9	11,6	18,7	18,4	16,9	9,4	-2,4	-16,3	-2,2
2020 г.	-18,9	-23,6	-15,9	-4,8	4,4	11,3	16,3	20,1	16,5	10,7	-0,1	-9,6	0,5
2024 г.	-21,2	-23	-19,7	-6,5	3,4	12	17,9	23,2	19	9,7	-0,1	-12,4	0,2

В работе [16] приводится температура ММГ на рудных месторождениях Забайкалья в Шилкинско-Аргунской геокриологической области, где в 80-е гг. XX в. она в основном изменялась в пределах от -2 до -3 °C. Через несколько десятков лет на некоторых месторождениях температура ММГ составила от -0,1 до -0,5 °C и от -0,5 до -1 °C.

Температура ММГ в зоне г. Читы также претерпела значительные изменения. Её значения на отдельных участках в начале XXI в. приводятся в работе [24]. Фактическая температура в пределах равнинных участков указанных в работе районов Читино-Ингодинской впадины составляет от -0,5 до -1 °C.

Температура и влажность грунтов по данным инженерно-геологических изысканий на исследуемых площадках в Забайкальском регионе приводятся в работе [14]. Влажность грунтов изменяется в широком диапазоне и составляет в основном 12–30 %. Температура грунтов на глубине нулевых амплитуд на рассматриваемых в работе участках изменяется в следующих пределах: Кадала 0– -0,5 °C; пос. Восточный 0– -0,2 °C; ул. Магистральная (г. Чита) – от 0 до -0,6 °C; ул. Московская (г. Чита) – от 0 до -0,5 °C; ул. Недорезова (г. Чита) – от 0 до -0,2 °C; район Зенитная Горка (г. Чита) – от -0,2 до -0,4 °C. Глубина сезонного оттаивания на

рассматриваемых участках зависит от состава грунта, затенённости участка, влажности грунта и изменяется в основном от 0,5 до 5 м. На надпойменных террасах глубина оттаивания грунтов с высокой влажностью составляет 1–1,5 м.

С увеличением температуры приземного воздуха и температуры грунта изменяется и положение кровли ММГ. В работе [25] приводится положение кровли ММГ в регионах Забайкалья и Бурятии, определяемое по результатам геофизических исследований. На площадках у метеостанций Росгидромета кровля ММГ в Романовке расположена на глубине 1,5–2 м, в Усуглях – 1,5 м, в Тунгокочене – 2–2,5 м, в Усть-Каренге – 1,5–3 м. Глубина оттаивания ММГ на участках дороги «Амур» также колеблется в широких пределах и на отдельных участках принимает значения 1,3, 1,6–2,2 м [27]. Как следует из приведённых параметров, степень воздействия изменений температуры воздуха на грунт в значительной степени зависит от конкретных условий и требует применения специальной методики по её прогнозированию.

Результаты исследования влияния характеристик грунта на глубину сезонного оттаивания. Для оценки результатов воздействия глобального потепления на поля температуры грунта в условиях залегания

высокотемпературных ММГ рассматриваются грунты с параметрами, характеризующими их как наиболее уязвимые к повышению температуры, с вероятностью деградации. Рассматриваются различные варианты изменения среднегодовой температуры воздуха при разных значениях температуры и влажности грунта. Учитываются приведенные фактические и прогнозируемые изменения температуры воздуха, фактические глубина залегания и температура ММГ в регионе. Рассматриваются грунты с влажностью 20–25 %, плотностью скелета грунта 1400 г/см³, температурой от -0,2 до -0,5 °C в условиях прогнозируемого повышения температуры воздуха. Определяется степень изменения температуры грунта в течение 9,5 лет после изменения температуры приземного воздуха.

На первом этапе исследований определяется влияние изменений температуры воздуха на температуру грунта. Проведены вычисления для суглинка влажностью 25 %. Рассматривается вариант, когда первоначальная температура ММГ принимается равной -0,5 °C. Температура наружного воздуха

варьируется в пределах от -3 °C до +5 °C. Полученные результаты представлены в табл. 2.

При решении задачи установлено, что в зоне нулевых амплитуд температура ММГ для всех вариантов остаётся равной -0,5 °C. Как видно из представленных результатов, с изменением температуры воздуха для грунта с указанной влажностью глубина оттаивания изменяется на 0,1–0,2 м по сравнению с вариантом с температурой наружного воздуха -0,5 °C. Указанные изменения температуры грунта и глубины их оттаивания при изменениях температуры воздуха происходят в течение 0,5–2,5 лет и в ближайшие 9,5 лет сохраняются на прежнем уровне. В рассматриваемых условиях отмечаются незначительные изменения исследуемых параметров грунта.

На следующем этапе оценивалось влияние на глубину оттаивания грунта с влажностью 25 % такого фактора, как температура ММГ, которая имела первоначальные значения -0,5, -0,3 и -0,2 °C. Температура наружного воздуха повышается от -0,5 до +3 °C. Характер изменения температуры грунта и глубины его оттаивания представлен в табл. 3.

Таблица 2 / Table 2

**Влияние среднегодовой температуры воздуха на глубину оттаивания и температуру ММГ /
The influence of average annual air temperature on the depth of thawing and temperature of permafrost**

Влажность грунта, % / Soil moisture, %	Среднегодовая температура воздуха, °C / Average annual air temperature, °C	Начальная температура ММГ, °C / Initial temperature MMG, °C	Максимальная глубина оттаивания, м / Maximum thaw depth, m	Температура грунта на глубине нулевых амплитуд, °C / Ground temperature at a depth of zero amplitudes, °C	Время достижения максимальной глубины оттаивания, лет / Time to reach the maximum thaw depth, years
25	-3	-0,5	1,5	-0,5	0,5
	-0,5		1,7	-0,5	1,5
	3		1,8	-0,5	2,5
	5		1,9	-0,5	2,5

Таблица 3 / Table 3

**Влияние температуры ММГ на глубину их оттаивания при влажности 25 % /
The influence of permafrost temperature on the depth of their thawing at 25 % humidity**

Влажность грунта, % / Soil moisture, %	Среднегодовая температура воздуха, °C / Average annual air temperature, °C	Начальная температура ММГ, °C / Initial temperature MMG, °C	Максимальная глубина оттаивания, м / Maximum thaw depth, m	Температура грунта на глубине 12 м при оттаивании, °C / Ground temperature at a depth of 12 m during thawing, °C	Время достижения максимальной глубины оттаивания, лет / Time to reach the maximum thaw depth, years
25	3	-0,5	1,8	-0,5	2,5
		-0,3	1,9	-0,07	7,5
		-0,2	2,5	0,02	7,5
	-0,5	-0,5	1,7	-0,5	1,5
		-0,3	1,7	-0,5	5,5

При температуре грунта $-0,5^{\circ}\text{C}$ повышение температуры воздуха от $-0,5^{\circ}\text{C}$ до $+3^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению максимальной глубины оттаивания на 0,1 м за 2,5 года, при температуре грунта $-0,3^{\circ}\text{C}$ увеличение составляет 0,2 м за 7,5 лет, а при температуре грунта $-0,2^{\circ}\text{C}$ максимальная глубина оттаивания увеличивается на 0,8 м за 7,5 лет. При начальной температуре $-0,3^{\circ}\text{C}$ температура ММГ повышается, а при начальной температуре $-0,2^{\circ}\text{C}$ становится положительной.

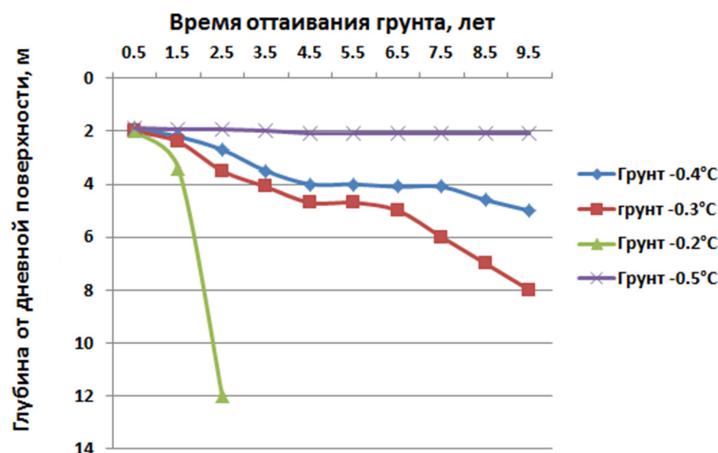
Для сравнения в табл. 3 приводятся результаты определения влияния температуры ММГ на глубину оттаивания грунта с влажностью 25 % и среднегодовой температурой наружного воздуха $-0,5^{\circ}\text{C}$. В этом случае при повышении температуры ММГ от $-0,5^{\circ}\text{C}$ до $-0,3^{\circ}\text{C}$ увеличение глубины оттаивания составляет 0,1 м, а температура ММГ в зоне нулевых амплитуд не изменяется.

Характер изменений, происходящих с грунтом с различной начальной температурой и влажностью 20 % при повышении температуры наружного воздуха до $+3^{\circ}\text{C}$, представлен в табл. 3. Состояние грунта на глубине 12 м в этом случае остаётся стабильным только при температуре $-0,5^{\circ}\text{C}$. При температуре $-0,4^{\circ}\text{C}$ через 9,5 лет максимальная глубина оттаивания увеличивается до 5 м, а температура ММГ повышается до $-0,2^{\circ}\text{C}$. При температуре $-0,3^{\circ}\text{C}$ через 9,5 лет максимальная глубина оттаивания увеличивается до 8 м, а температура ММГ на глубине 12 м повышается до $-0,2^{\circ}\text{C}$. При температуре ММГ $-0,2^{\circ}\text{C}$ до исследуемой глубины 12 м происходит оттаивание грунта и повышение его температуры до $0,66^{\circ}\text{C}$. В последней строке табл. 4 приводится вариант с характеристиками грунта до потепления. Характер изменения глубины оттаивания грунта с течением времени прослеживается на рисунке.

Таблица 4 / Table 4

Влияние температуры ММГ на глубину их оттаивания при влажности 20 % / The influence of permafrost temperature on the depth of their thawing at 20 % humidity

Влажность грунта, % / Soil moisture, %	Среднегодовая температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$ / Average annual air temperature, $^{\circ}\text{C}$	Начальная температура ММГ, $^{\circ}\text{C}$ / Initial temperature MMG, $^{\circ}\text{C}$	Максимальная глубина оттаивания в исследуемом диапазоне 12 м, м / The Maximum thaw depth in the studied range is 12 m, m	Температура грунта на глубине 12 м после изменения условий, $^{\circ}\text{C}$ / Ground temperature at a depth of 12 m after a change in conditions, $^{\circ}\text{C}$	Время достижения максимальной глубины оттаивания, лет / Time to reach the maximum thaw depth, years
20	3	-0,5	2,1	-0,5	4,5
		-0,4	5	-0,2	9,5
		-0,3	8	-0,2	9,5
		-0,2	12	0,66	2,5
		-0,5	1,9	-0,5	1,5



Изменение глубины оттаивания грунта со временем при различной температуре ММГ / Change in soil thaw depth over time at different temperatures of permafrost

Выходы. Приведённый анализ изменений температуры воздуха и грунта в регионе в течение ближайшего периода формирует исходную информацию для прогнозирования состояния ММГ в условиях глобального потепления. Выявляемые на основе теплофизических расчётов закономерности позволяют прогнозировать изменения полей температуры грунта с различными характеристиками при изменениях температуры воздуха, устанавливать наиболее опасные сочетания факторов, вызывающих деградацию ММГ в зоне размещения объектов. Из представленных результатов исследо-

ваний следует, что наибольшую угрозу для объектов строительства и горного производства в рассматриваемом диапазоне времени представляет деградация ММГ с влажностью 20 % и меньше при температуре ММГ -0,3 °С и ниже. Теоретическая и практическая значимость работы определяются возможностью решения задач по предотвращению деструктивных криогенных процессов, обеспечению экологической безопасности объектов, уточнению объёмов и технологии производства работ, условий эксплуатации объектов с учётом возможных деформаций грунта в Забайкальском регионе.

Список литературы

- Rantanen M., Karpechko A. Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // Commun Earth Environ. 2022. No. 3. DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3. EDN: PRZRHP
- Obu J., Westermann S., Barboux C., Bartsch A., Delaloye R., Grosse G., Wiesmann A. ESA Permafrost Climate Change Initiative (Permafrost_cci): Permafrost Active Layer Thickness for the Northern Hemisphere // NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis. 2021. Vol. 3.0. DOI: 10.5285/67a3f8c8dc914ef99f7f08eb0d997e23
- Miner K. R., D'Andrilli J., Mackelprang R., Edwards A., Malaska M. J., Waldrop M. P., Miller C. E. Emergent biogeochemical risks from Arctic permafrost degradation // Nat Clim Chang. 2021. No. 11. P. 809–819. DOI: 10.1038/s41558-021-01162-y. EDN: UAQRST
- Walter Leal Filho, Maria Alzira Pimenta Dinis, Gustavo J. Nagy, Umberto Fracassi. On the (melting) rocks: Climate change and the global issue of permafrost depletion // Science of the Total Environment. 2023, 166615 (2023). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166615
- Han L., Menzel L. Hydrological variability in southern Siberia and the role of permafrost degradation // Journal of Hydrology. 2022, 127203 (2022). DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127203. EDN: VHBILD
- Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Yu., Nikitin K., Orekhov P., Ponomareva O., Romanovsky V., Sadurtdinov M., Shein A., Skvortsov A., Sudakova M., Tsarev A. Spatial and temporal variability of permafrost in the western part of the Russian Arctic // Energies. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 311. DOI: 10.3390/en15072311. EDN: RDGTTA
- Степюха 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
- Hjort J., Streletskiy D., Dor'e G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure // Nat Rev Earth Environ. 2022. No. 3. P. 24–38. DOI: 10.1038/s43017-021-00247-8. EDN: JSXFHX
- Yakubovich A., Yakubovich I. Using the Response Surface to Assess the Reliability of the Russian Cryolithozone Road Network in a Warming Climate // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258. P. 486–495. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_42. EDN: ZCNOJI
- Larsen J. N., Schweitzer P., Abass K., Dolosio N., Gartler S., Ingeman-Nielsen T., Vullierme M. Thaw-ing permafrost in Arctic coastal communities: a framework for studying risks from climate change // Sustainability. 2021. No. 13. DOI: 10.3390/su13052651. EDN: ZLKZKZ
- Langer M., von Deimling T. S., Westermann S., Rolph R., Rutte R., Antonova S., Rachold V., Schultz M., Oehme A., Grosse G. Thawing permafrost poses environmental threat to thousands of sites with legacy industrial contamination // Nat Commun. 2023. No. 14. P. 1721. DOI: 10.1038/s41467-023-37276-4. EDN: CCGXKZ
- Брушков А. В., Васина А. И., Кияшко Н. В., Мельников М. И., Осокин А. А., Черняк Ю. В., Фалалеева А. А. Глобальное потепление и состояние вечной мерзлоты в России // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2024. № 6. С. 4–11. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-4-11. EDN: WPQJZW
- Михеев П. Н. О подходах к учёту рисков изменения климатических условий при планировании и реализации нефтегазовых проектов // Проблемы анализа риска. 2021. Т. 18, № 1. С. 52–65. DOI: 10.32686/1812-5220-2021-18-1-52-65. EDN: PKPNML
- Шестернев Д. М., Шестернев Д. Д. Пучение крупнообломочных пород Читино-Ингодинской впадины в связи с потеплением климата // Криосфера Земли. 2007. Т. 11, № 4. С. 80–92. EDN: KUAGDP
- Сальников П. И. Устойчивость фундаментов зданий на мёрзлых грунтах в Южном Забайкалье. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1996. 208 с. EDN: ZKADAV

16. Верхотов А. Г. Влияние деградации многолетнемёрзлых пород на условия разработки ме-сторождений полезных ископаемых в Забайкалье. Текст: электронный // Материалы междунар. науч.-практ. конф. по инженерному мерзлотоведению, посвящ. XX-летию создания ООО НПО «Фундамент-стройаркос». Тюмень: Сити-Пресс, 2011. С. 114–116. URL: https://www.npo-fsa.ru/sites/default/files/sbornik_mezhdunarodnoy_nauchno-prakticheskoy_konferencii_po_inzhenernomu_merzlotovedeniyu_7-10_noyabrya_2011.pdf (дата обращения: 23.03.2024). EDN: PHONWX
17. Langer M., Nitzbon J., Groenke B., Assmann L. M., Schneider von Deimling T., Stuenzi S. M. Westermann S. The evolution of Arctic permafrost over the last 3 centuries from ensemble simulations with the cryogridlite permafrost model // The Cryosphere. 2024. No. 18. P. 363–385. DOI: 10.5194/tc-18-363-2024. EDN: LZUIIR
18. Ekici A., Beer C., Hagemann S., Boike J., Langer M., Hauck C. Simulating high-latitude permafrost regions by the JSBACH terrestrial ecosystem model // Geoscientific Model Development. 2014. No. 7. P. 631–647. DOI: 10.5194/gmd-7-631-2014. EDN: SPBUWX
19. Steinert N. J., Cuesta-Valero F. J., García-Pereira F., de Vrese P., Melo Aguilar C. A., García-Bustamante E., Jungclaus J., González-Rouco J.F. Underestimated land heat uptake alters the global energy distribution in CMIP6 climate models // Geophysical Research Letters. 2024. No. 51. DOI: 10.1029/2023GL107613. EDN: QKOBIT
20. Painter S. L., Coon E. T., Khattak A. J., Jastrow J. D. Drying of tundra landscapes will limit subsidence-induced acceleration of permafrost thaw // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2023. No. 120. DOI: 10.1073/pnas.2212171120. EDN: YOEIBM
21. de Vrese P., Georgievski G., Gonzalez Rouco J. F., Notz D., Stacke T., Steinert N. J., Wilkenskjeld S., Brovkinet V. Representation of soil hydrology in permafrost regions may explain large part of inter-model spread in simulated Arctic and subarctic climate // The Cryosphere. 2023. No. 17. P. 2095–2118. DOI: 10.5194/tc-17-2095-2023. EDN: RNNFBC
22. Алексеев А. Г., Сазонов П. М., Рябухина В. Г. Методика прогнозирования значений сезонно-тального слоя в районах распространения многолетнемёрзлых грунтов с учётом их деградации при климатическом потеплении // Вестник НИЦ «Строительство». 2024. № 43. С. 81–92. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-4(43)-81-92. EDN: PJNFYA
23. Иванов В. А., Рожин И. И. Моделирование деградации многолетнемёрзлых пород при потеплении климата в условиях Центральной Якутии на ближайшие 300 лет. Текст: электронный // Современные научёкие технологии. 2021. № 10. С. 41–47. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=38852> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.17513/snt.38852. EDN: DPXBCP
24. Шестернев Д. М., Васютич Л. А. Тепловое загрязнение геологической среды криолитозоны урбанизированных территорий Забайкалья (на примере г. Чита). Текст: электронный // Вестник Читинского государственного университета. 2012. № 1. С. 43–51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teplovoe-zagryaznenie-geologicheskoy-sredy-kriolitozony-urbanizirovannyh-territoriy-zabaykalya-na-primere-g-chita> (дата обращения: 23.03.2024). EDN: OORFSV
25. Самохвалов Н. Д., Борисик А. Л., Стрелецкая И. Д., Тетерин А. В. Современное состояние многолетнемёрзлых пород Прибайкалья и Забайкалья по данным геофизических исследований // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. Вып. 11. С. 571–580. DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-571-580. EDN: MSVOKG
26. Кондратьев С. В. Деформации Забайкальской части федеральной автомобильной дороги «Амур» Чита – Хабаровск на участках льдистых многолетнемёрзлых грунтов: причины и пути решения проблемы (на примере перехода через руч. Чичон): дис. канд. геол.-минерал. наук: 25.00.08. Чита: ЗабГУ, 2016. 225 с. URL: <https://www.crust.irk.ru/images/upload/newsfull166/948.pdf>. (дата обращения: 25.03.2025). Текст: электронный. EDN: AKEHJH

References

- Rantanen M, Karpechko AY, Lipponen A, Nordling K, Hyvärinen O, Ruosteenoja K, Ruosteenoja K, Vihma T, Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ.* 2022;(3). DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3. EDN: PRZRHP
- Obu J, Westermann S, Barboux C, Bartsch A, Delaloye R, Grosse G, Wiesmann A. ESA Permafrost Climate Change Initiative (Permafrost_cci): Permafrost Active Layer Thickness for the Northern Hemisphere. *NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis.* 2021;(3.0). DOI: 10.5285/67a3f8c8dc914ef99f7f08eb0d997e23
- Miner KR, D'Andrilli J, Mackelprang R, Edwards A, Malaska MJ, Waldrop MP, Miller CE. Emergent biogeochemical risks from Arctic permafrost degradation. *Nat Clim Chang.* 2021;(11):809–819. DOI: 10.1038/s41558-021-01162-y. EDN: UAQRST
- Walter Leal Filho, Maria Alzira Pimenta Dinis, Gustavo J. Nagy, Umberto Fracassi. On the (melting) rocks: Climate change and the global issue of permafrost depletion. *Science of the Total Environment.* 2023;166615(2023). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166615

5. Han L, Menzel L. Hydrological variability in southern Siberia and the role of permafrost degradation. *Journal of Hydrology*. 2022;127203(2022). DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127203. EDN: VHBILD
6. Malkova G, Drozdov D, Vasiliev A, Gravis A, Korostelev Y, Nikitin K, Orekhov P, Ponomareva O, Romanovsky V, Sadurdinov M, Skvortsov A, Sudakova M, Tsarev A, Kraev G, Shein A. Spatial and temporal variability of permafrost in the western part of the Russian Arctic. *Energies*. 2022;15(7):311. DOI: 10.3390/en15072311. EDN: RDGTTA
7. Stetyukha VA. Improving heat and Moisture Transfer Models in Assessing the Impact of Mining Operations on Rocks in the Conditions of Southern Transbaikalia. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2004;(10):71–74. EDN: IFAMVX (In Russian).
8. Hjort J, Streletska D, Dor'e G, Wu Q, Bjella K, Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure. *Nat Rev Earth Environ*. 2022;(3):24–38. DOI: 10.1038/s43017-021-00247-8. EDN: JSXFHX
9. Yakubovich A, Yakubovich I. Using the Response Surface to Assess the Reliability of the Russian Cryolithozone Road Network in a Warming Climate. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021;(1258):486–495. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_42. EDN: ZCNOJI
10. Larsen JN, Ingimundarson JH, Schweitzer P, Gartner S, Meyer A, Abass K, Rautio A, Timlin U, Dolosio N, Vanderlinden JP, Vullierme M, Ingeman-Nielsen T, Scheer J, Ungsberg L. Thawing permafrost in Arctic coastal communities: a framework for studying risks from climate change. *Sustainability*. 2021;(13). DOI: 10.3390/su13052651. EDN: ZLKKZE
11. Langer M, von Deimling TS, Westermann S, Rolph R, Rutte R, Antonova S, Rachold V, Schultz M, Oehme A, Grosse G. Thawing permafrost poses environmental threat to thousands of sites with legacy industrial contamination. *Nat Commun*. 2023;(14):1721. DOI: 10.1038/s41467-023-37276-4. EDN: CCGXKZ
12. Brushkov AV, Vasina AI, Kiyashko NV, Mel'nikov MI, Osokin AA, Chernyak YuV, Falaleeva AA. Global Warming And Permafrost Condition In Russia. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriâ 4: Geologîâ*. 2024;(6):4–11. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-4-11. EDN: WPQJZW (In Russian).
13. Mikheev PN. On Approaches to Taking into Account the Risks of Changing Climatic Conditions when Planning and Implementing Oil and Gas Projects. *Issues of Risk Analysis*. 2021;18(1):52–65. DOI: 10.32686/1812-5220-2021-18-1-52-65. EDN: PKPNML (In Russian).
14. Shesternev DM, Shesternev DD. Heaving of Coarse-Grained Rocks of the Chita-Ingodinskaya Depression in Connection with Global Warming. *Kriosfera Zemli*. 2007;11(4):80–92. EDN: KUAGDP (In Russian).
15. Salnikov PI. Stability of building foundations on frozen soils in the Southern Transbaikal Region. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 1996. 208 p. EDN: ZKADAV (In Russian).
16. Verkhoturov AG. The Effects of Permafrost Soils Degradation on Terrestrial Ecosystems of Trans-Baikal. In: Proceedings of the International scientific and practical conference on engineering permafrost science, dedicated to the twentieth anniversary of the establishment of "Fundamentstroyarkos" LLC. Tyumen: City-Press Printing House; 2011. P. 114–116. Available from: https://www.npo-fsa.ru/sites/default/files/sbornik_mezhdunarodnoy_nauchno-prakticheskoy_konferencii_po_inzhenernomu_merzlotovedeniyu_7-10_noyabrya_2011.pdf (accessed 23.03.2024). EDN: PHONWX (In Russian).
17. Langer M, Nitton J, Groenke B, Assmann LM, Schneider von Deimling T, Stuenzi SM, Westermann S. The evolution of Arctic permafrost over the last 3 centuries from ensemble simulations with the cryoGridlite permafrost model. *The Cryosphere*. 2024(18):363–385. DOI: 10.5194/tc-18-363-2024. EDN: LZUIIR
18. Ekici A, Beer C, Hagemann S, Boike J, Langer M, Hauck C. Simulating high-latitude permafrost regions by the JSBACH terrestrial ecosystem model // Geoscientific Model Development. 2014. No. 7. P. 631–647. DOI: 10.5194/gmd-7-631-2014. EDN: SPBUWX
19. Steinert NJ, Cuesta-Valero FJ, García-Pereira F, de Vrese P, Melo Aguilar CA, García-Bustamante E, Jungclaus J, González-Rouco JF. Underestimated land heat uptake alters the global energy distribution in CMIP6 climate models. *Geophysical Research Letters*. 2024;(51). DOI: 10.1029/2023GL107613. EDN: QKOBIT
20. Painter SL, Coon ET, Khattak AJ, Jastrow JD. Drying of tundra landscapes will limit subsidence-induced acceleration of permafrost thaw. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2023;(120). DOI: 10.1073/pnas.2212171120. EDN: YOEIBM
21. de Vrese P, Georgievski G, Gonzalez Rouco JF, Notz D, Stacke T, Steinert NJ, Wilkenskjeld S, Brovkin V. Representation of soil hydrology in permafrost regions may explain large part of inter-model spread in simulated Arctic and subarctic climate. *The Cryosphere*. 2023;(17):2095–2118. DOI: 10.5194/tc-17-2095-2023. EDN: RNNFBC
22. Alekseev AG, Sazonov PM, Ryabukhina VG. Methodology For Forecasting The Values Of Seasonal Thaw Layer In Permafrost Areas Considering Their Degradation Under Climate Warming. *Bulletin of the Scientific Research Center Construction*. 2024;(43):81–92. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-4(43)-81-92. EDN: PJNFYA (In Russian).
23. Ivanov VA, Rozhin II. Modeling Of Degradation Of Permafrost In The Process Of Climate Warming In Central Yakutia For The Coming 300 Years. *Modern science-intensive technologies*. 2021;(10):41–47. Available from: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=38852> (accessed 05.03.2025). DOI: 10.17513/snt.38852. EDN: DPXBCP (In Russian).

24. Shesternyov DM, Vasyutich LA. Thermal Pollution of Cryolitozone Geological Environment of the Urban Areas of Zabaikalie (On the Example of Yhe Town Chita). *Transbaikal State University Journal*. 2012;(1):43–51. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/teplovoe-zagryaznenie-geologicheskoy-sredy-kriolitozony-urbanizirovannyh-territoriy-zabaykalya-na-primere-g-chita> (accessed 23.03.2024). EDN: OORFSV (In Russian).
25. Samokhvalov ND, Borisik AL, Streletskaia ID, Teterin AV. Current State of Permafrost Conditions in Transbaikalia Region Based on Geophysical Data. *Relief and Quaternary Deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2024;(11):571–580. DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-571-580. EDN: MSVOKG (In Russian).
26. Kondratyev SV. Deformations of the Trans-Baikal part of the federal highway “Amur” Chita – Khabarovsk on sections of icy permafrost soils: causes and solutions: cand. sci. diss.: 25.00.08. Chita; 2016. 225 p. Available from: <https://www.crust.irk.ru/images/upload/newsfull166/948.pdf>. (accessed 25.03.2025). EDN: AKEHJH (In Russian).

Информация об авторе

Стетюха Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры строительства, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; stetjukha_chita@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4553-9558>. Область научных интересов: геоэкология, геокриология, горная теплофизика.

About the author

Stetyukha Vladimir Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Construction department, Transbaikal State University, Chita, Russia, stetjukha_chita@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4553-9558>. Research interests: geoecology, geocryology, mining thermal physics.

Статья поступила в редакцию 02.04.2025; одобрена после рецензирования 12.05.2025; принята к публикации 19.05.2025.

**Received 2025, April 02; approved after review 2025, May 12;
accepted for publication 2025, May 19.**