 © Авторы статьи / Authors of the article

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ/BASES AND FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.5 EDN: GSYKTC

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ГЛУБИНОЙ ОТТАИВАНИЯ ПОРОД В КРИОЛИТОЗОНЕ

Научная статья

Галкин А.[1, *]

[1] Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (afgalkin[at]mail.ru)

Предложена: 07.10.2026; Принята: 12.11.2026; Опубликована: 20.11.2026

Аннотация

Целью исследований было получение простой инженерной зависимости для принципиальной оценки возможности использования дополнительного увлажнения пород деятельного слоя криолитозоны для создания защитного слоя, исключающего проявления термокарста при наличии ледового комплекса в геологическом разрезе. Идея работы состояла в том, что если расчетная толщина слоя будет меньше, необходимой для предотвращения развития термокарста, то данный способ в принципе нельзя применять и необходимо искать другие технологические решения обеспечения надежности мерзлых породных оснований. Получена аналитическая зависимость, позволяющая определить возможную максимальную толщину слоя для грунтов с заданной начальной влажностью (льдистостью) и пористостью. Результаты вариантных расчетов представлены в виде 2D и 3D графиков, позволяющих наглядно убедиться в правомерности выбранного подхода к оценке эффективности борьбы с термокарстом дополнительным увлажнением пород деятельного слоя грунта криолитозоны.

Ключевые слова: криолитозона, деятельный слой, глубина, увлажнение, расчет, термокарст, пористость, влажность.

ASSESSMENT OF THE FEASIBILITY OF CREATING A PROTECTIVE LAYER BY CONTROLLING THE THAW PENETRATION IN THE CRYOLITHOZONE

Research article

Galkin A.[1, *]

[1] Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

* Corresponding author (afgalkin[at]mail.ru)

Suggested: 07.10.2026; Accepted: 12.11.2026; Published: 20.11.2026

Abstract

The aim of the research was to derive a simple engineering relation for a preliminary assessment of the feasibility of using additional moistening of the active layer rocks in the cryolithozone to create a protective layer that would prevent the formation of thermokarst where an ice complex is present in the geological section. The idea behind the work was that if the calculated thickness of the layer is less than that required to prevent the development of thermokarst, then this method cannot, in principle, be applied, and other technical solutions must be sought to ensure the stability of frozen rock foundations. An analytical dependency was derived that allows the determination of the maximum possible layer thickness for soils with a given initial moisture content (ice content) and porosity. The results of the various calculations are presented in the form of 2D and 3D graphs, which clearly demonstrate the validity of the chosen approach to assessing the effectiveness of combating thermokarst through the additional hydration of the active soil layer in the cryolithozone.

Keywords: cryolithozone, active layer, depth, moisture content, calculation, thermokarst, porosity, humidity.

Введение

Освоение арктических и субарктических территорий, составляющих более 60% площади Российской Федерации, является стратегическим приоритетом долгосрочного экономического и инфраструктурного развития. Специфика капитального строительства в данных регионах неразрывно связана с понятием криолитозоны — территорий, характеризующихся повсеместным распространением многолетнемерзлых грунтов. С термодинамической точки зрения вечномерзлые грунты представляют собой сложные многокомпонентные полидисперсные системы, прочностные и деформационные свойства которых напрямую зависят от их температурного режима, фазового состава и степени насыщенности влагой (льдом). Дополнительным дестабилизирующим фактором современной эпохи выступает глобальное изменение климата, наиболее интенсивно проявляющееся именно в высоких широтах. Повышение среднегодовой температуры атмосферного воздуха приводит к деградации вечной мерзлоты, увеличению мощности сезонно-талого (деятельного) слоя и, как следствие, к активизации опасных криогенных процессов: термокарста, морозного пучения, термоэрозии и солифлюкции [1], [2].

Особую опасность для устойчивости ландшафта и искусственных насыпей транспортных путей представляют грунты, характеризующиеся наличием крупных подземных ледяных включений (пластовых и повторно-жильных

 © Авторы статьи / Authors of the article

льдов), так называемые «ледовые комплексы», а также заторфованные и песчаные массивы в верхней части геологического разреза. При протаивании таких систем происходит потеря несущей способности грунтов, сопровождающаяся провалами земляного полотна и разрушением несущих строительных конструкций. [3], [4], [5], [6]. В связи с этим разработка, теоретическое обоснование и внедрение новых криогенных строительных материалов, высокоэффективных теплоизоляционных экранов и комбинированных геотехнических методов регулирования гидротермического режима деятельного слоя грунта являются важнейшей научно-практической задачей современной геотехники и мерзлотоведения. В геокриологии сам мерзлый грунт рассматривается как специфический, природный криогенный строительный материал, цементирующей основой которого выступает подземный лед. Несущая способность такого «материала» не является постоянной величиной и жестко лимитирована температурным фактором. Согласно основополагающим принципам проектирования (в соответствии с регламентом СП 25.13330.2020), строительство в криолитозоне может осуществляться по двум принципам. Первый принцип предполагает сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии в течение всего периода строительства и эксплуатации сооружения. Второй принцип допускает оттаивание мерзлых грунтов с учетом прогноза их осадки или выполнения предварительного теплового и механического преобразования. При наличии в зоне теплового влияния крупных ледяных включений и сильнольдистых грунтов (ледового комплекса) первый принцип является единственно возможным безопасным решением, поскольку превышение температуры выше точки начала замерзания влаги приводит к фазовому переходу «лед–вода» и разрушению структурных связей массива [7].

Традиционные, хорошо зарекомендовавшие себя на практике, методы реализации первого принципа строительства в криолитозоне включают устройство проветриваемых подполий для зданий на свайных основаниях, отсыпку теплоизоляционных песчано-гравийных насыпей и монтаж сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ) — жидкостных или парожидкостных термосифонов. [8]. Тем не менее, при строительстве линейных объектов (автомобильных дорог, проездов, технологических площадок), где устройство свайных оснований с вентилируемым подпольем конструктивно невозможно, удержание фронта оттаивания в пределах безопасных значений представляет собой сложную задачу. Для защиты мерзлых грунтовых оснований используются мощные теплоизоляционные экраны из экструдированного пенополистирола или пеностекла. Однако механическое перекрытие теплового потока изоляционными материалами имеет свои пределы эффективности и требует значительных экономических затрат [5], [8], [9].

В связи с этим в последние годы возрастает интерес к альтернативным, комбинированным методам управления тепловым режимом грунтов, одним из которых является регулируемое увлажнение деятельного (сезонно-талого) слоя. Данный метод базируется на термодинамических закономерностях фазовых переходов воды и существенном различии теплофизических свойств грунтов в талом и мерзлом состояниях. Физический парадокс метода заключается в том, что увеличение влагонасыщения верхнего почвенно-грунтового слоя ведет к существенному снижению глубины его оттаивания в летний период при одновременном интенсивному промерзанию зимой [10], [11], [12], [13].

Целью настоящей работы было определение величины максимально возможного защитного слоя между глубиной оттаивания и породами ледового комплекса при дополнительном увлажнении талого грунта с поверхности.

Методы и принципы исследования

Для оценки воспользуемся классической формулой Стефана [14] для определения глубины оттаивания пород при начальной температуре, близкой к температуре плавления льда. Такое допущение дает определенный расчетный запас при определении глубины оттаивания пород (увеличивает значение) и, следовательно, повышает надежность результатов, учитывая их прикладное значение. Исходную формулу запишем в удобном для анализа виде

$$S_0 = P/\sqrt{W_0}P = \sqrt{2t\lambda\tau/L\rho} \quad (1)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

S_0 — глубина оттаивания пород, м;

t – средняя температура воздуха за теплый период года, ^{0}C;

λ — теплопроводность талых пород, Вт/мК;

ρ — плотность мерзлых пород, кг/м^3;

τ — длительность теплого периода, с;

W_0 — начальная льдистость пород деятельного слоя, д.е.;

L — скрытая теплота плавления льда, Дж/кг.

Допустим, что, в результате комплекса мелиоративных мероприятий, льдистость пород деятельного слоя изменилась до величины W_1. Естественно, что и глубина оттаивания пород деятельного слоя уменьшится до величины S_1. Разница между этими двумя величинами и будет толщиной защитного слоя

$$S = S_0 - S_1 = P\left(1/\sqrt{W_0} - 1/\sqrt{W_1}\right) \quad (2)$$

Поскольку задача решается для принципиальной оценки целесообразности дополнительного увлажнения талых пород, допустимо учитывать физические характеристики грунта, например, плотность и теплопроводность, входящие в формулу (1), как некие средние величины, в пределах рассмотренного диапазона колебаний влажности (льдистости) грунта. Оценочные расчеты показывают, что для характерных теплофизических и климатических характеристик криолитозоны Центральной Якутии, параметр «P» изменяется в пределах $0{,}9 \le P \le 1{,}1$ и можно в дальнейших расчетах считать $P \approx 1{,}0$. В этом случае, с учетом того, что целью является максимально возможное увлажнение пород ($W_1 = W_v - W_0$, *где* W_v — максимальная свободная пористость пород, которая может быть заполнена влагой при дополнительном увлажнении), формула (2) примет вид

 © Авторы статьи / Authors of the article

$$S = \left(1/\sqrt{W_0} - 1/\sqrt{W_v - W_0}\right) \quad (3)$$

В идеальном случае, можно считать, что $W_v \approx 1{,}0$. Это даст еще больший «запас прочности» полученным результатам. То есть, если и в этом случае толщина защитного слоя будет не соответствовать необходимым по факту нерастепления пород ледового комплекса значениям, то в реальных условиях это значение наверняка не сможет быть достигнуто и смысла в проведении мелиоративных мероприятий нет. Если в качестве расчетного показателя брать параметр дополнительного увлажнения, то формула (2) может быть записана в удобном для анализа виде

$$S = S_0 - S_1 = \frac{P}{\sqrt{W_0}}\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+W_d/W_0}}\right] \quad (4)$$

Здесь параметр W_d означает долевое дополнительное увлажнение грунтов деятельного слоя, д.е. Естественно, что данный параметр не может превышать долевого показателя пористости грунта. Пористость грунта и дополнительное увлажнение грунта связаны между собой соотношением $W_d \le W_v$. То есть, равенство этих величин означает полное увлажнение грунта (все свободное поровое пространство заполнено влагой). Формула (4) получена из (2) с учетом того, что $W_1 = W_0 + W_d$. Подставляя данное выражение в уравнение (2), после несложных преобразований, придем к уравнению (4).

Основные результаты

По полученным формулам были проведены вариантные расчеты, результаты которых представлены в виде графиков на рисунках. На рис.1 показано изменение толщины защитного слоя (S,м) в зависимости от начальной влажности грунта (Wo, д.е.) и различной степени насыщения грунта: кривые 1 и 4 — 1,0; кривые 2 и 3 — 0,9; при изменении параметра «P» от 1,1 (кривые 1и 2) до 0,9 (кривые 3 и 4).

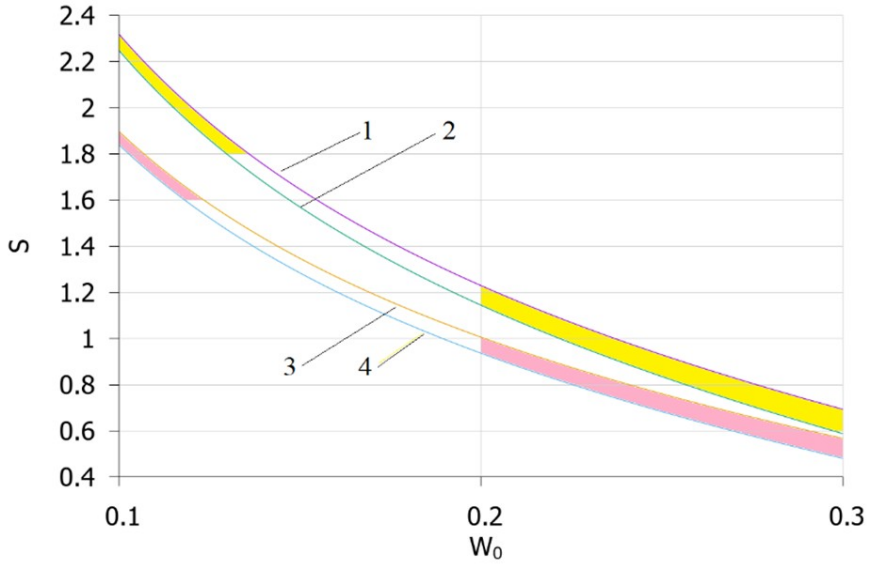


Рисунок 1 - Изменение толщины защитного слоя (S, м) в зависимости от начальной влажности грунта (Wo, д.е.) при различной степени насыщения грунта:
кривые 1 и 4 – 1,0; *кривые 2 и 3* – 0,9
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.5.1

Примечание: при изменении параметра «P» от 1,1 (кривые 1и 2) до 0,9 (кривые 3 и 4)

 © Авторы статьи / Authors of the article

Желтым и розовым цветом выделены области для сравнительного количественного анализа влияния степени насыщения талой зоны влагой на толщину защитного слоя. Как видно из графиков, как при полном, так и не полном возможном увлажнении талого слоя, в реальном диапазоне изменения параметра «Р» для характерных условий криолитозоны, результаты не слишком отличаются и находятся в допустимой для инженерных прогнозов точности во всем рассмотренном диапазоне изменения начальной влажности грунта. Характер кривых на рисунке также позволяет сделать вывод, что, чем больше начальная влажность, тем меньше образующийся защитный слой, независимо от степени дополнительного насыщения грунта влагой. Последнее утверждение подтверждают графики изменения толщины защитного слоя от влажности при различной степени дополнительного увлажнения, приведенные на рис.2.

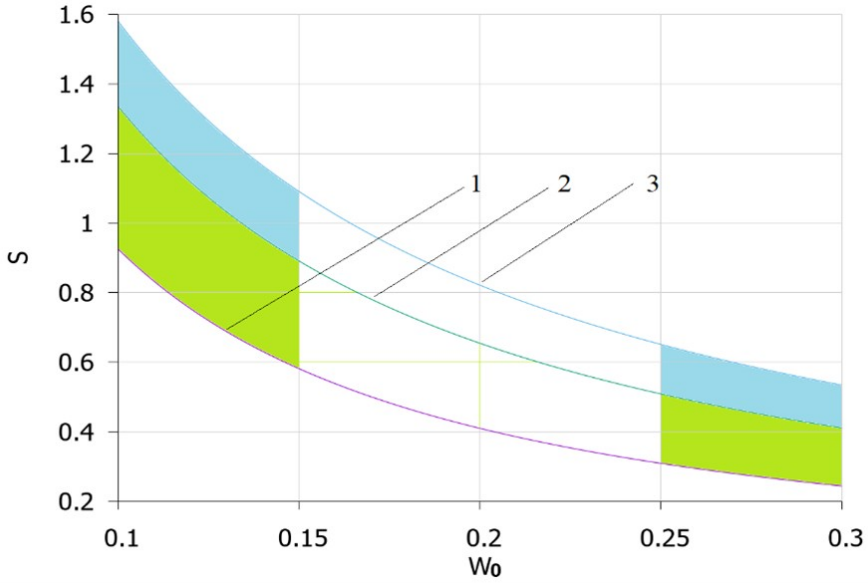


Рисунок 2 - Изменение толщины защитного слоя (S,м) в зависимости от начальной влажности грунта (Wo, д.е.) при различной степени дополнительного увлажнения грунта (Wd, д.е.):
1 – 0,1; *2* – 0,2; *3* – 0,3
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.5.2

Зеленым и голубым цветом выделены области для сравнительного количественного анализа влияния степени дополнительного увлажнения талой зоны влагой в различных диапазонах начальной влажности на толщину защитного слоя. Как видно из графиков, при одном и том же уровне увеличения начальной влажности, равного 0,05, рост защитного слоя в диапазоне начальной влажности с 0,1 до 0,15 значительно выше, чем в диапазоне изменения от 0,25 до 0,3. Причем это характерно для любой степени дополнительного увлажнения. Например, для первого диапазона начальной влажности и дополнительном увлажнении, равном 0,3 изменение составляет почти 0,5м. А для второго выделенного цветом, диапазона (0,25–0,3) всего 0,1м. То есть в 5 раз меньше. На рис.3 приведен 3D график, характеризующий предельно возможную глубину оттаивания, которую можно получить при полном увлажнении талого слоя в зависимости от начального значения влажности и глубины оттаивания грунта.

 © Авторы статьи / Authors of the article

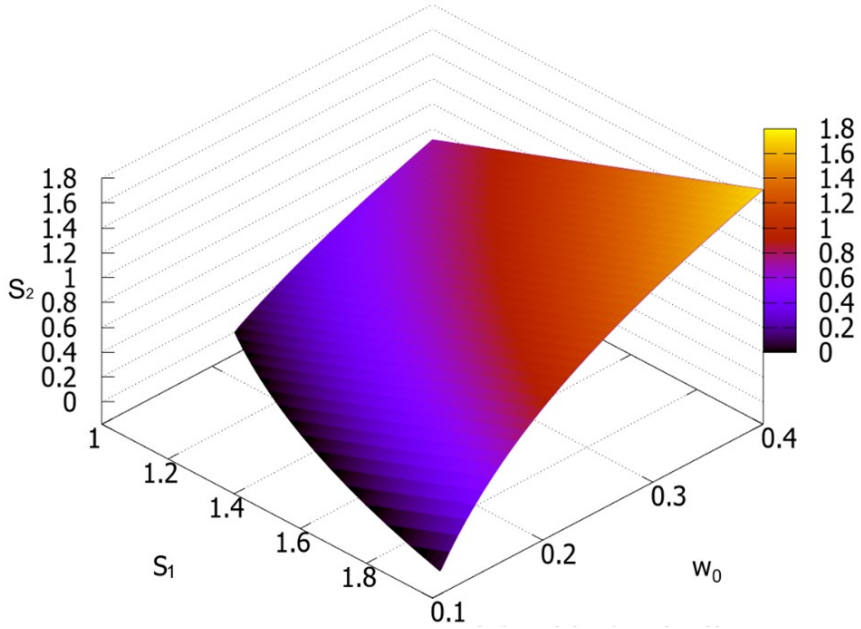


Рисунок 3 - Предельно возможная глубина оттаивания ($S_{2,м}$) в зависимости от начальной влажности (Wo, д.е.) и глубины оттаивания грунта ($S_{1,м}$) при полном насыщении влагой талого слоя
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.5.3

Цветовая дифференциация плоскости на рисунке показывает, что в зависимости от начальных условий управление глубиной деятельного слоя с помощью увлажнения является достаточно мощным инструментов снижения вероятности проявлений термокарста, за счет образования защитного слоя мерзлых пород между деятельным слоем и ледовым комплексом. В то же время, существует область, где применять данный способ не целесообразно.

Заключение

Получены простые расчетные зависимости для оценки целесообразности увлажнения пород деятельного слоя грунтов криолитозоны с целью создания дополнительного защитного слоя мерзлых пород, как средства для снижения вероятности возникновения термокарста. Показано, что чем больше начальная влажность, тем меньше возможная толщина защитного слоя, независимо от степени дополнительного увлажнения грунта влагой. Представлены графики, которые позволяют наглядно убедиться в правомерности выбранного подхода к оценке эффективности борьбы с термокарстом дополнительным увлажнением пород деятельного слоя пород криолитозоны. Результаты работы могут представлять интерес для специалистов в области строительства, гляциологии, мелиорации и инженерного мерзлотоведения. Методические аспекты статьи будут полезны научным работникам, занимающимся проблемами прогноза и оценки теплового режима грунтов криолитозоны. Дальнейшие направления исследований в данной области должны быть направлены на изучение влияния влажности (льдистости) дисперсных грунтов на глубину оттаивания с учетом зависимости плотности и теплопроводности грунта от льдистости и количества незамерзшей воды.

Финансирование

Статья подготовлена по материалам исследований, выполненных в рамках плановой темы лаборатории геотермии криолитозоны ИМЗ СО РАН № 0303-2026-0007 «Геотемпературное поле и многолетнемерзлые толщи Азиатской части России. Реакция теплового режима многолетнемерзлых пород на изменение климата».

Funding

The article is based on research carried out as part of the planned topic of the Geothermal Laboratory of the Cryolithozone at the Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, No. 0303-2026-0007: "Geothermal field and permafrost in the Asian part of Russia. Response of the thermal regime of permafrost to climate change".

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Сообщество рецензентов журнала «Современное строительство и архитектура».
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.5.4

Review

Community of Reviewers of the Modern Construction and Architecture.
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.5.4

Список литературы / References

1. Брушков А.В. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне. / А.В. Брушков, А.Г. Алексеев, С.В. Бадина и др. // Записки Горного института. — 2023. — № 263. — С. 742–756.

 © Авторы статьи / Authors of the article

2. Мельников В.П. Обеспечение надежности инженерных сооружений в Арктике при современных климатических изменениях. / В.П. Мельников, Н.С. Молокитина, Я.Б. Горелик и др. // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата. Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 150-летию М.И. Сумгина; — Якутск: ЯНЦ, 2023.

3. Сериков С.И. Морозобойное растрескивание грунтов и его роль в состоянии поверхности и инфраструктуры г. Якутска / С.И. Сериков, М.М. Шац // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. — 2018. — № 1. — С. 56–69.

4. Zhang X Thawing settlement risk of running pipeline in permafrost regions / X Zhang, S.G. Feng, P.C. Chen // Oil Gas Storage Transporation. — 2013. — № 6. — P. 365–369.

5. Galkin A.F. Thermal Protection of Roads in The Permafrost Zone / A.F. Galkin, V.Yu. Pankov // Journal of Applied Engineering Science. — 2022. — № 2. — P. 395–399.

6. Wen Z. Thermal interaction between a thermokarst lake and a nearby embankment in permafrost regions / Z. Wen, D. Wang, W. Ma et al. // Cold Regions Science and Technology. — 2018. — № 155. — P. 214–224.

7. Guofang X. Temperature Effect on the Compressive Strength of Frozen Soils: A Review / X. Guofang, Q. Jilin, W. Wei // Recent Advances in Geotechnical Research, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. — 2019. — № 1. — P. 227–236.

8. Ермилова Н.Ю. Термостабилизация многолетнемерзлых грунтов: технологии и оборудование / Н.Ю. Ермилова, др и // Инженерный вестник Дона. — 2021. — № 5. — С. 424–432.

9. Галкин А.Ф. Экономическая эффективность использования новых теплоизоляционных материалов в холодных регионах / А.Ф. Галкин, М.Н. Железняк, А.Ф. Жирков и др. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2025. — № 3. — С. 404–415.

10. Галкин А.Ф. Оценка эффективности снежной мелиорации при борьбе с термоэрозией земель в криолитозоне / А.Ф. Галкин, М.Н. Железняк, А.Ф. Жирков // Проблемы криосферы Земли. Сборник тезисов Всероссийской научной конференции; — Пущино: ИФХиБПП РАН, 2025.

11. Жирков А.Ф. Оценка возможности восстановления разрушенных процессом термокарста земель в условиях Центральной Якутии / А.Ф. Жирков, М.А. Сивцев // Мерзлотные почвы в антропоцене. Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции; — Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2023.

12. Пат. 2813326 Российская Федерация, МПК A01B 79/02. Способ мелиорации нарушенных термокарстом земель / Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Железняк М.Н. и др.; заявитель и патентообладатель Галкин Александр Александрович. — № 2022134737; заявл. 2022-12-28; опубл. 2024-02-12, — 6 с.

13. Сивцев М.А. Оценка оптимальной нормы предзимнего полива для создания защитного слоя в условиях распространения ледового комплекса / М.А. Сивцев, А.Ф. Жирков, В.П. Осипов // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2026. — № 2. — С. 244-256.

14. Галкин А.Ф. Effect of temperature on the thawing depth of frozen rocks / А.Ф. Галкин, И.В. Курта // Mining Informational and Analytical Bulletin. — 2020. — № 2. — P. 82–91.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Brushkov A.V. Opy't e'kspluatacii sooruzhenij i neobxodimost' upravleniya teplovy'm rezhimom gruntov v kriolitozone. [Experience in operation of structures and the need for thermal regime management of soils in the permafrost zone] / A.V. Brushkov, A.G. Alekseev, S.V. Badina et al. // Journal of Mining Institute. — 2023. — № 263. — P. 742–756. [in Russian]

2. Mel'nikov V.P. Obespechenie nadezhnosti inzhenerny'x sooruzhenij v Arktike pri sovremenny'x klimaticheskix izmeneniyax. [Ensuring reliability of engineering structures in the Arctic under modern climate changes] / V.P. Mel'nikov, N.S. Molokitina, Ya.B. Gorelik et al. // Stability of Natural and Technical Systems of the Cryolithozone under Climate Change: Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation Dedicated to the 150th Anniversary of M.I. Sumgin; — Yakutsk: YANCZ, 2023. [in Russian]

3. Serikov S.I. Morozobojnoe rastreskivanie gruntov i ego rol' v sostoyanii poverxnosti i infrastruktury' g. Yakutska [Frost cracking of soils and its role in the state of the surface and infrastructure of Yakutsk] / S.I. Serikov, M.M. Shacz // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urbanistics. — 2018. — № 1. — P. 56–69. [in Russian]

4. Zhang X Thawing settlement risk of running pipeline in permafrost regions / X Zhang, S.G. Feng, P.C. Chen // Oil Gas Storage Transporation. — 2013. — № 6. — P. 365–369.

5. Galkin A.F. Thermal Protection of Roads in The Permafrost Zone / A.F. Galkin, V.Yu. Pankov // Journal of Applied Engineering Science. — 2022. — № 2. — P. 395–399.

6. Wen Z. Thermal interaction between a thermokarst lake and a nearby embankment in permafrost regions / Z. Wen, D. Wang, W. Ma et al. // Cold Regions Science and Technology. — 2018. — № 155. — P. 214–224.

7. Guofang X. Temperature Effect on the Compressive Strength of Frozen Soils: A Review / X. Guofang, Q. Jilin, W. Wei // Recent Advances in Geotechnical Research, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. — 2019. — № 1. — P. 227–236.

8. Ermilova N.Yu. Termostabilizaciya mnogoletnemerzly'x gruntov: texnologii i oborudovanie [Thermal stabilization of permafrost soils: technologies and equipment] / N.Yu. Ermilova, dr i // Engineering Journal of Don. — 2021. — № 5. — P. 424–432. [in Russian]

9. Galkin A.F. E'konomicheskaya e'ffektivnost' ispol'zovaniya novy'x teploizolyacionny'x materialov v xolodny'x regionax [Economic efficiency of using new thermal insulation materials in cold regions] / A.F. Galkin, M.N. Zheleznyak, A.F. Zhirkov et al. // Natural Resources of the Arctic and Subarctic. — 2025. — № 3. — P. 404–415. [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

10. Galkin A.F. Otsenka effektivnosti snezhnoi melioratsii pri borbe s termoeroziei zemel v kriolitozone [Evaluation of the effectiveness of snow reclamation in combating thermal erosion of lands in the cryolithozone] / A.F. Galkin, M.N. Zheleznyak, A.F. Zhirkov // Problems of the Earth's Cryosphere: Abstracts of the All-Russian Scientific Conference; — Pushchino:IFKHIBPP RAS, 2025. [in Russian]

11. Zhirkov A.F. Otsenka vozmozhnosti vosstanovleniya razrushennikh protsessom termokarsta zemel v usloviyakh Tsentralnoi Yakutii [Assessment of the possibility of restoring lands destroyed by thermokarst in Central Yakutia] / A.F. Zhirkov, M.A. Sivtsev // Permafrost Soils in the Anthropocene: Abstracts of the All-Russian Scientific and Practical Conference; — Siktivkar: IB FIT Komi Scientific Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2023. [in Russian]

12. Pat. 2813326 Russian Federation, IPC A01B 79/02. Sposob melioracii narushenny'x termokarstom zemel' [Method of reclamation of lands disturbed by thermokarst] / Galkin A.F., Zhirkov A.F., Zheleznyak M.N. et al.; the applicant and the patentee Galkin Aleksandr. — № 2022134737; appl. 2022-12-28; publ. 2024-02-12, — 6 p. [in Russian]

13. Sivcev M.A. Ocenka optimal'noj normy' predzimnego poliva dlya sozdaniya zashhitnogo sloya v usloviyax rasprostraneniya ledovogo kompleksa [Assessment of the optimal norm of pre-winter watering for creating a protective layer in the conditions of the ice complex distribution] / M.A. Sivcev, A.F. Zhirkov, V.P. Osipov // Natural Resources of the Arctic and Subarctic. — 2026. — № 2. — P. 244-256. [in Russian]

14. Галкин А.Ф. Effect of temperature on the thawing depth of frozen rocks / А.Ф. Галкин, И.В. Курта // Mining Informational and Analytical Bulletin. — 2020. — № 2. — P. 82–91.