ISSN 1999-4125 (Print) **ISSN 2949-0642 (Online)**

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД, РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА
GEOMECHANICS, DESTRUCTION OF ROCKS BY EXPLOSION, MINE AEROGASDYNAMICS AND MINING THERMOPHYSICS

Научная статья
УДК 624.1 : 622.838.53 : 622.71 [51]
DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-100-109

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ СООРУЖЕНИЙ ГАРАЖНОГО ТИПА В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Курилко Александр Сардокович, Хохолов Юрий Аркадьевич, Киселев Валерий Васильевич, Соловьев Дмитрий Егорович*, Хосоев Доржо Владимирович

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН

* для корреспонденции: solovjevde@igds.ysn.ru

Аннотация.
В статье рассмотрены вопросы обеспечения безопасности аварийного объекта – гаража, возведенного в криолитозоне и эксплуатируемого с положительным температурным режимом. Приведены схемы расположения сезонных охлаждающих устройств (СОУ) под зданием гаража, а также трехмерная область для расчета температурного режима грунтов под ним с наличием СОУ. Изложены причины появления аварийной ситуации, возникшей в результате растепления мерзлых грунтов под гаражом с образованием протаявшей чаши и, как следствие этого, деформаций практически всех элементов сооружения. Приведены результаты проведенных исследований температурного режима грунтов под основанием гаража, подтверждающие нарушение проектных температурных условий его эксплуатации, и отсутствие в проекте мероприятий по стабилизации отрицательного температурного режима грунтов. Кроме этого, проведенными расчетами выявлено наличие процессов растепления грунтов под зданием гаража в зимний период при отсутствии теплоизоляции. В графической форме подробно изложены результаты численных экспериментов, проведенных на специально разработанной трехмерной математической модели, по формированию и прогнозу параметров формируемого температурного режима грунтов при использовании сезонных охлаждающих устройств, имеющих практическую значимость. Подчеркивается эффективность применения СОУ для восстановления и стабилизации отрицательного температурного режима грунтов, а также наличие теплоизоляции под бетонным перекрытием полов для нейтрализации тепловых потоков, поступающих от здания. Отмечается важность и необходимость проведения исследований по прогнозу температурного режима грунтов на математических моделях при проведении предпроектных работ на строящиеся наземные объекты криолитозоны, эксплуатируемые с положительным температурным режимом, обеспечивая тем самым их длительную безремонтную и безопасную эксплуатацию.

CC BY

Информация о статье
Поступила:
24 марта 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
15 июня 2026 г.

Принята к публикации:
01 июля 2026 г.

Ключевые слова:
Фундаменты наземных сооружений, криолитозона, многолетнемерзлые грунты, температурный режим, сезонные охлаждающие устройства (СОУ), математическое моделирование, теплоизоляция

Для цитирования: Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Киселев В.В., Соловьев Д.Е., Хосоев Д.В. Восстановление и стабилизация отрицательного температурного режима грунтов сооружений гаражного типа в условиях криолитозоны // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 3 (175). С. 100-109. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-100-109, EDN: UWIDEB

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2025-0047, регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР 1025041400027-4).

Введение.

С интенсивным освоением северо-восточных регионов РФ, ростом темпов строительства различных объектов возник дефицит площадок, пригодных для их возведения в отдельных районах криолитозоны. В связи с этим зачастую приходится осваивать неблагоприятные техногенно нарушенные территории, с высокотемпературной «вялой» мерзлотой, с наличием надмерзных таликов, высокоминерализованных грунтовых вод.

Строительство и последующая эксплуатация возведенных на таких площадках наземных сооружений различного назначения требует выполнения специальных предпроектных мероприятий, направленных, в частности, на стабилизацию отрицательного температурного режима грунтов и инженерную защиту фундаментов возведенных объектов от растепления, в особенности эксплуатируемых с положительным температурным режимом, предотвращая тем самым их преждевременный выход из строя.

По заключению специалистов, одним из важных и необходимых условий качественного проектирования, строительства и безаварийной эксплуатации объектов, возводимых в криолитозоне, является прогноз динамики температурного режима грунтов в основаниях сооружений в период их возведения и последующей эксплуатации, составленный по результатам математического моделирования происходящих процессов тепломассообмена.

Выполнение таких исследований также крайне необходимо для решения насущной проблемы освоения северных территорий – ликвидации многочисленных аварийных ситуаций и восстановления работоспособности деформированных сооружений, возникших из-за развития необратимых осадочных смещений, сопровождающихся разрушением фундаментов.

В частности, такая проблема возникла на территории Тарынского золоторудного комбината, расположенного в Оймяконском районе Республики Саха (Якутия), где произошло деформирование основания фундаментов здания гаража, приведшее к осадке центральных колон, деформации стен, полов и подкрановых балок.

Для выявления причин возникновения аварийной ситуации и разработки мероприятий по нормализации обстановки на этом объекте были проведены специальные исследования, в том числе с использованием математического моделирования, результаты которых изложены в настоящей статье.

Объект исследования. Аварийный гараж для автотранспорта представляет собой отапливаемое двухэтажное прямоугольное здание (Рис. 1) размером 36,0×47 м, возведенное в 2016 г., разделенное на блоки. Фундаменты здания – монолитные столбчатые бетонные колонны с глубиной заложения 2,1 м. Основанием фундаментов служили отсыпанные крупнообломочные талые скальные вскрышные породы. После четырехлетней эксплуатации гаража было отмечено деформирование колонн, стен, полов и подкрановых балок (Рис. 1).

Рис. 1. Общий вид фасада здания гаража (просматривается развитие негативных деформационных процессов)
Fig. 1. General view of the facade of the garage building (the development of negative deformation processes is visible)

Проведенное обследование [1] выявило, что грунты под зданием растеплились и в настоящее время используются не по первому принципу, как это было предусмотрено проектом, т. е. с сохранением их в мерзлом состоянии в процессе эксплуатации, а по второму принципу – т. е. находятся в талом состоянии.

Необходимо отметить, что применение специальных технических устройств для стабилизации мерзлого состояния грунтов проектом не было предусмотрено.

В соответствии с данными проведенных термометрических замеров, приведенных на Рис. 2, можно констатировать, что кровля многолетней мерзлоты за прошедший четыре года эксплуатации значительно углубилась, и температура грунтов не опускается ниже -1^0С (т. е. ниже предусмотренных проектом значений).

Таким образом, было сделано заключение, что под гаражом образовалась чаша оттаивания, инициирующая прогрессирующую аварийную ситуацию, которая во избежание обрушения здания должна быть приостановлена и ликвидирована, в частности, путем искусственного промораживания оттаявших грунтов.

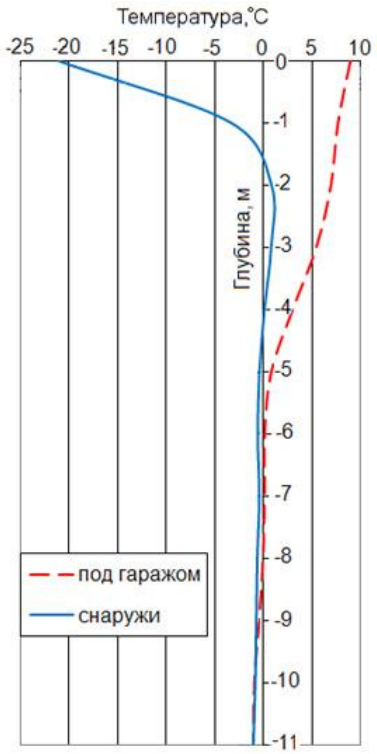

Рис. 2. Графики распределения температуры грунтов по глубине под гаражом и снаружи
Fig. 2. Graphs of soil temperature distribution by depth under and outside the garage

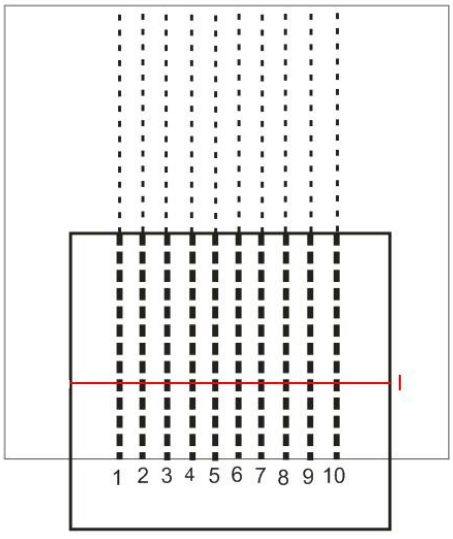

Рис. 3. Схема расположения СОУ под гаражом
Fig. 3. Layout of SCU under the garage

Искусственное замораживание грунтов рекомендуется производить с помощью наиболее экономичных, безэнергетических сезонно-охлаждающих устройств (СОУ), работающих в зимнее время на атмосферном холоде, получивших широкое распространение в районах криолитозоны [2–9]. Разработка различных инженерно-технических решений процессов промораживания, а также мероприятий противодействия оттаиванию с потерей несущей способности грунтов требуют совершенствования методики численного математического моделирования с учетом конкретных реалий процесса теплового влияния здания и охлаждающего СОУ на температурный режим грунтов. В связи с этим исследование закономерностей теплопереноса в основаниях фундаментов инженерных сооружений приобретает первостепенное значение для оценки их надежности и долговечности. Целью работы является прогноз температурного режима грунтов под гаражом с учетом работы СОУ, возведенного в криолитозоне и эксплуатируемого с положительным температурным режимом.

Методы. Для оценки эффективности использования СОУ с целью восстановления и последующей стабилизации отрицательного температурного режима оттаявших грунтов под гаражом и рационального (эффективного) регулирования их температурного режима была модифицирована ранее разработанная трехмерная математическая модель [8, 9] и проведены численные эксперименты.

В расчетах принято, что СОУ начинают работать при понижении температуры атмосферного воздуха начиная с -10°С. В начальный момент времени задается распределение температуры грунтов. Для численного решения задачи протаивания-промерзания грунтов применяется метод сглаживания [10–13], а для решения трехмерной задачи теплообмена использован метод суммарной аппроксимации [14, 15], который сводит исходную задачу к последовательности решения одномерных задач. При этом разностные схемы удовлетворяют условиям аппроксимации и устойчивости. На каждом временном слое решается последовательность одномерных задач. Все системы разностных уравнений выводятся с учетом геометрии рассматриваемой области. Схема расположения горизонтальных СОУ под гаражом и трехмерная область для численного моделирования представлены на Рис. 3 и 4. СОУ 1, 2, 9 и 10 расположены на глубине 2,75 м, а СОУ 3-8 – на глубине 1,7 м. В качестве начальных условий приняты данные фактических замеров температур грунтов в термометрических скважинах (Рис. 2).

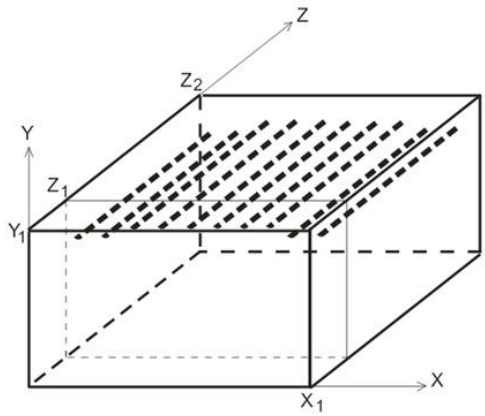

Рис. 4. Трехмерная область для расчета температурного режима грунтов под гаражом с наличием СОУ
Fig. 4. A three-dimensional area for calculating the temperature regime of soils under a garage with SCU

Результаты исследования. По результатам моделирования и проведенных расчетов сделана оценка динамики изменений температур протаявших грунтов с учетом работы СОУ, которые представлены в графической форме в виде температурных изолиний по сечению I (Рис. 5–8). На Рис. 5 приведены температурные изолинии под гаражом к концу зимы в первый год эксплуатации СОУ. Из графиков видно, что в грунтовом массиве под гаражом к этому моменту образовалась мерзлая зона на глубине от 1 м до 4 м, а талая зона под замороженным участком сохраняется на глубине от 7 до 9 м и под полом до 1 м. На Рис. 6 приведены температурные изолинии в грунтовом массиве под гаражом к концу лета. Графики свидетельствуют, что мерзлая зона, образовавшаяся после первого года эксплуатации СОУ, протаяла в летний период и глубина талой зоны составила 5 м.

На Рис. 7 приведены температурные изолинии под гаражом в начале марта в четвертый год эксплуатации СОУ. Отчетливо

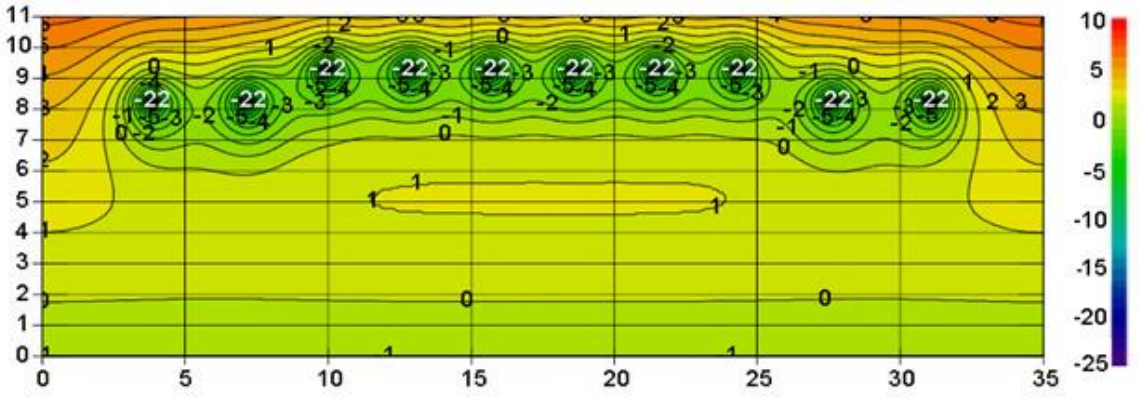

Рис. 5. Температурные изолинии в грунтовом массиве под гаражом в начале марта в первый год эксплуатации СОУ
Fig. 5. Isotherms in the soil massif under the garage at the beginning of March in the first year of operation of the SCU

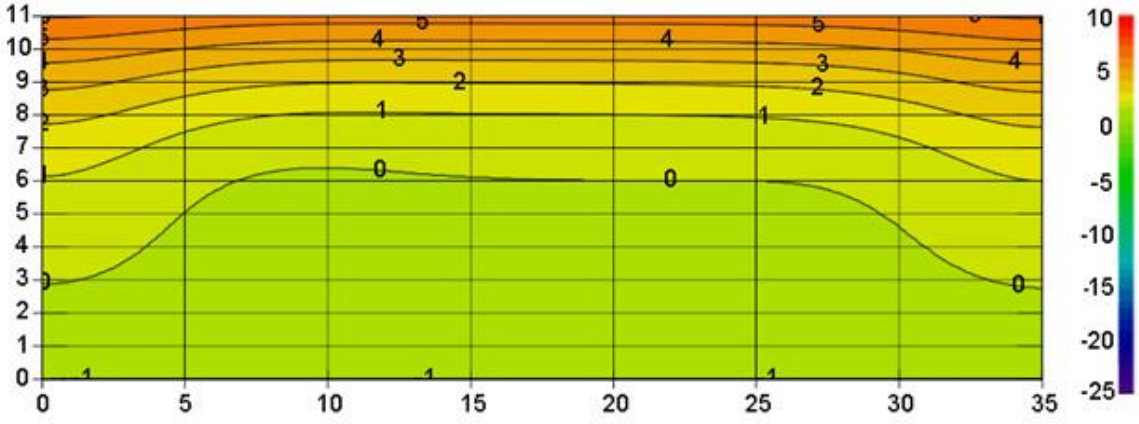

Рис. 6. Температурные изолинии в грунтовом массиве под гаражом в начале октября в первый год эксплуатации СОУ
Fig. 6. Isotherms in the soil massif under the garage at the beginning of October in the first year of operation of the SCU

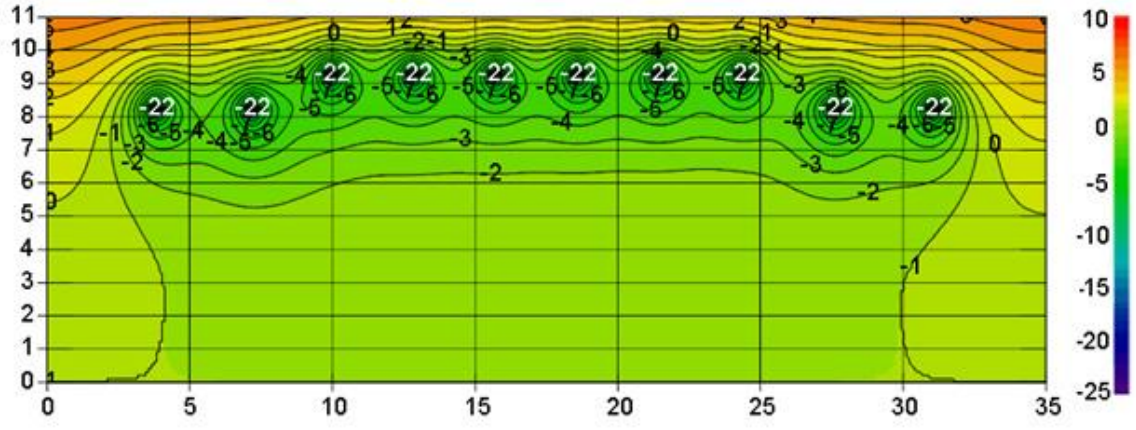

Рис. 7. Температурные изолинии в грунтовом массиве под гаражом в начале марта в четвертый год эксплуатации СОУ

Fig. 7. Isotherms in the soil massif under the garage at the beginning of March in the fourth year of operation of the SCU

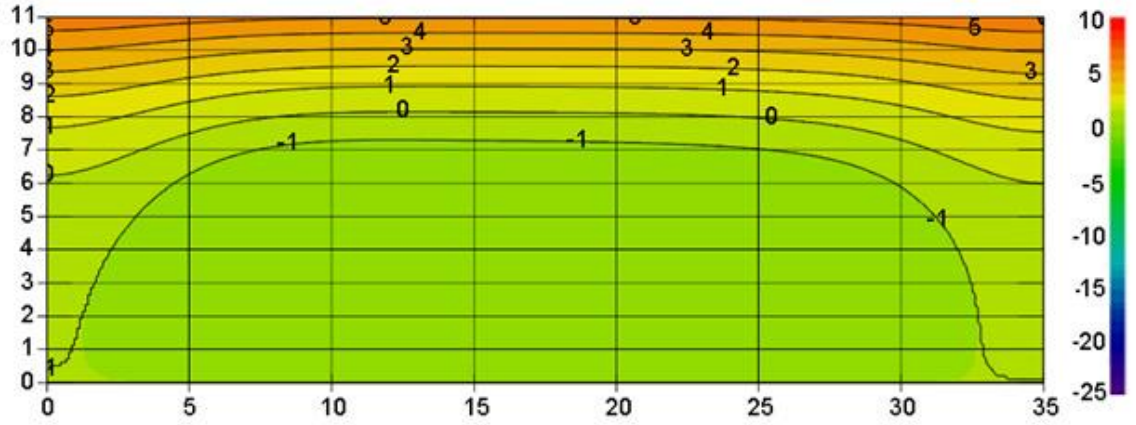

Рис. 8. Температурные изолинии в грунтовом массивепод гаражом в начале октября в четвертый год эксплуатации СОУ

Fig. 8. Isotherms in the soil massif under the garage at the beginning of October in the fourth year of operation of the SCU

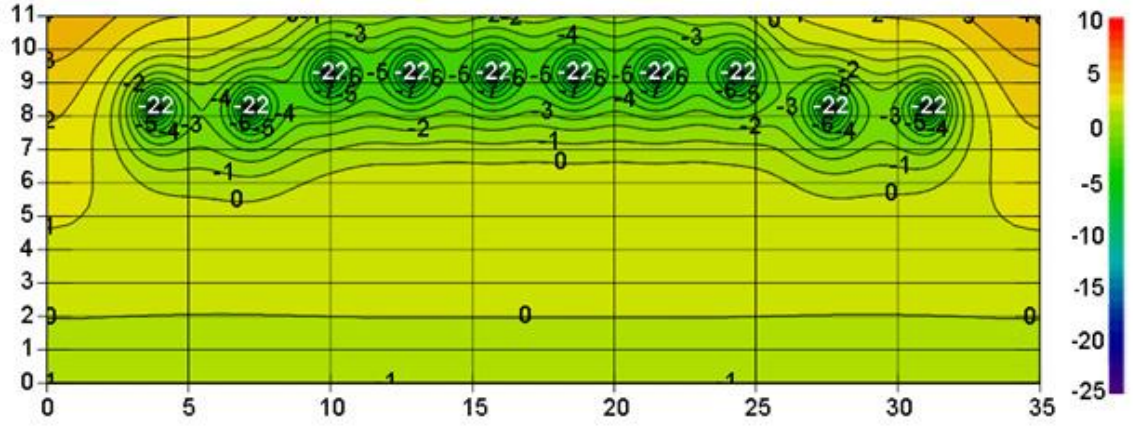

Рис. 9. Температурные изолинии в грунтовом массиве под гаражом в начале марта в первый год эксплуатации СОУ с наличием теплоизоляции

Fig. 9. Isotherms in the soil massif under the garage at the beginning of March in the first year of operation of the SCU with thermal insulation

видно, что грунты под гаражом в зимний период находятся уже в мерзлом состоянии на всю глубину. Температурные изолинии под гаражом к концу лета четвертого года представлены на Рис. 8.

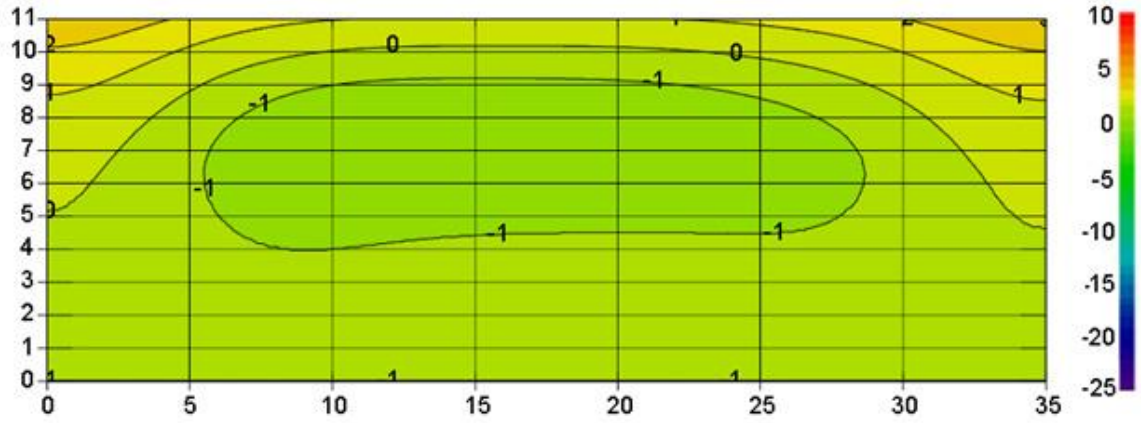

Рис. 10. Температурные изолинии в грунтовом массиве под гаражом в начале октября в первый год эксплуатации СОУ с наличием теплоизоляции
Fig. 10. Isotherms in the soil massif under the garage at the beginning of October in the first year of operation of the SCU with thermal insulation

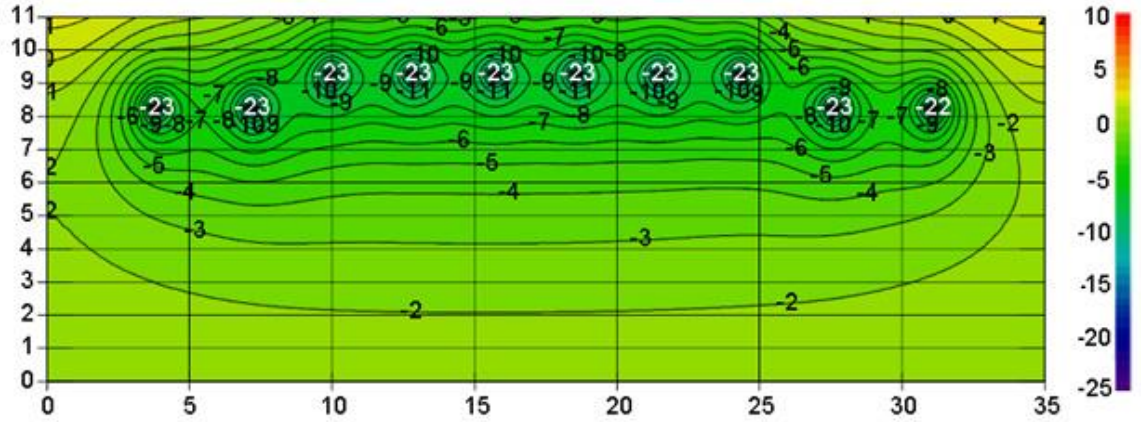

Рис. 11. Температурные изолинии в грунтовом массиве под гаражом в начале марта в четвертый год эксплуатации СОУ с наличием теплоизоляции
Fig. 11. Isotherms in the soil massif under the garage at the beginning of March in the fourth year of operation of the SCU with thermal insulation

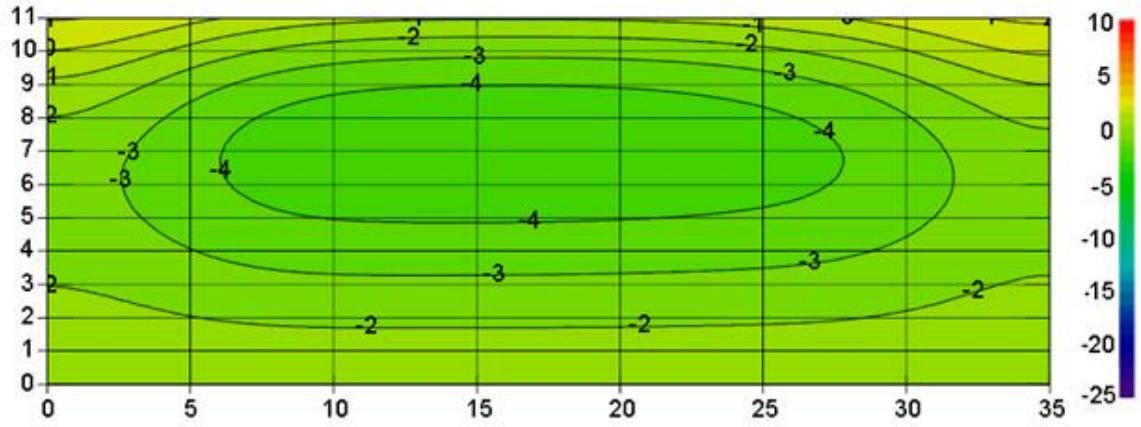

Рис. 12. Температурные изолинии в грунтовом массиве под гаражом в начале октября в четвертый год эксплуатации СОУ с теплоизоляции
Fig. 12. Isotherms in the soil massif under the garage at the beginning of October in the fourth year of operation of the SCU with thermal insulation

Из Рис. 8 видно, что грунты под гаражом в летний период протаивают до глубины 3 м, таким образом, запасов накопленного за зимний период холода не хватает для поддержания грунтов в необходимом круглогодичном мерзлом состоянии. Мощность протаивавшего слоя грунтов превышает глубину заложения

фундаментов здания примерно на 1 м, что не гарантирует безопасную эксплуатацию здания.

Также сделаны аналогичные тепловые расчеты при наличии теплоизоляции под бетонным перекрытием полов. Теплоизоляционный материал – листовой пенополистирол толщиной 0,1 м. Коэффициент теплопроводности 0,04 Вт/(м·К). Результаты расчетов, приведенные на Рис. 9–12, показывают, что к концу лета после первого года эксплуатации СОУ глубина протаивания грунтов составляет 1 м (Рис. 10), а к концу лета четвертого года эксплуатации СОУ грунты гаража под полом сохраняются в круглогодичном мерзлом состоянии (Рис. 12).

Выводы.

1. Результаты математического моделирования и проведенные расчеты показали, что под бетонным перекрытием полов при отсутствии теплоизоляции происходит интенсивное протаивание грунтов теплом, исходящим от здания гаража, даже замороженных в зимний период с помощью СОУ. Это значительно замедляет процесс накопления холода грунтами. Так, после первого года применения СОУ глубина протаивания к концу лета составила примерно 7 м. Проведенные прогнозные расчеты температурного режима грунтов под гаражом при эксплуатации СОУ (до 4 лет) показали, что глубины протаивания к концу лета составляют 3 м. Таким образом, мощность слоя глубина протаявших грунтов превышает глубину заложения фундаментов здания примерно на 1 м, что не гарантирует безопасную эксплуатацию здания.

2. Применение СОУ рационально и эффективно позволяет в прогрессирующем темпе аккумулировать холод грунтами под основанием фундаментов гаража.

3. Наличие теплоизоляции под бетонным перекрытием пола позволяет существенно сократить хладопотери за счет теплообмена с теплым гаражом. После первого года применения СОУ к концу лета глубина протаивания грунтов под зданием может достигнуть 1 м. На 4-тый год применения СОУ к концу лета протаивания грунтов не происходит. Таким образом, наличие теплоизоляции пола после двух сезонов работы СОУ может обеспечить мерзлое состояние грунтов под основанием фундаментов здания.

4. Можно считать вполне обоснованным заключение о важности и необходимости проведения исследований по прогнозу температурного режима грунтов на математических моделях при ведении предпроектных решений на строящиеся наземные объекты в криолитозоне, эксплуатируемые с положительным температурным режимом, обеспечивая их длительную, безремонтную и безопасную эксплуатацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно-технический отчет по результатам обследования технического состояния объекта капитального строительства: «Гараж ТО и ТР автотранспорта» на площадке месторождения «Дражное» Тарынского золоторудного комбината». М. : НИИОСН им. Н. М. Герсеванова, 2020. 120 с.

2. Alzoubi M. A., Xu M., Hassani F. P., Poncet S., Sasmito A. P. Artificial ground freezing: A review of thermal and hydraulic aspects // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Т. 104. Art. 103534.

3. Ефимов В. М., Васильчук Ю. К., Рожин И. И., Попенко Ф. Е., Степанов А. В. Моделирование температурного режима грунтовых оснований с сезонно-охлаждающими устройствами в условиях криолитозоны Республики Саха (Якутия) // Арктика и Антарктика. 2017. №4. С. 86–97. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.4.25036.

4. Пермяков П. П., Варламов С. П., Железняк М. Н. Воздействие вертикального сезонно охлаждающего устройства на тепловлажностный режим грунта // Криосфера Земли. 2017. № 1. Т. 21. С. 66–72.

5. Степанов А. В., Попенко Ф. Е., Рожин И. И. Основы инженерной защиты объектов строительства в криолитозоне. Новосибирск : Наука, 2014. 448 с.

6. Васильев В. И. Моделирование распределения нестационарных температурных полей в криолитозоне при проектировании геотехнических сооружений: учебн. Пособие под ред. В. И. Васильева, Н. И. Сидняева. М. : КУРС, 2017. 624 с.

7. Baisheva L. M., Permyakov P. P., Bolshakov A. M. Heat and mass transfer of a coolant in horizontal seasonal cooling devices 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. № 753. Art. 042092.

8. Romanova E., Khokholov Yu. Maintaining thermal stability of a fill slone in cryolitozone // E3S Web of Conferences 192. VIII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources», EDP Siences. 2020. C. 01021. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201021.

9. Kurilko A. S., Popenko F. E., Khokholov Yu. A., Romanova E. K. Forecast of thermal mode for the slope fill-up ground, considering the operation of seasonal cooling units in cryolithic zone conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. P. 988(4). Art. 042014. DOI: 10.1088/1755-1315/988/4/042014.

10. Самарский А. А., Моисеенко Б. Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислит. мат. и мат. физики. 1965. Т. 5. № 5. С. 816–827.

11. Тихонов, А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1977. 736 с.

12. Изаксон В. Ю., Петров Е. Е. Численные методы прогнозирования и регулирования теплового режима горных пород области многолетней мерзлоты. Якутск : ЯНЦ СО АН СССР, 1986. 95 с.

13. Хохолов Ю. А. Математическое моделирование тепловых процессов в горных выработках криолитозоны // Проблемы и перспективы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых криолитозоны: Труды Межд. научно-практ. конф. Якутск : Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2005. Том 2. С. 76–82.

14. Самарский А. А. Теория разностных схем. М. : Наука, 1983. 616 с.

15. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М. : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:
Курилко Александр Сардокович, в. н. с., Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, (677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, 43), д.т.н., e-mail: kurilko-aleksandr@mail.ru
Хохолов Юрий Аркадьевич, в. н. с., Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, (677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, 43), д.т.н., ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9510-3808, e-mail: khokholov@igds.ysn.ru
Киселев Валерий Васильевич, с. н. с., Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, (677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, 43), к.т.н., ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0555-1453
Соловьев Дмитрий Егорович, в. н. с., Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, (677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, 43), к.т.н., ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2562-5368, e-mail: solovjevde@igds.ysn.ru
Хосоев Доржо Владимирович, м. н. с., Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, (677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, 43), ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1466-8509, e-mail: dkhosoyev@mail.ru

Заявленный вклад авторов:
Курилко Александр Сардокович – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, формулировка выводов, написание текста.
Хохолов Юрий Аркадьевич – научный менеджмент, постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, формулировка выводов, написание текста.
Киселев Валерий Васильевич – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.
Соловьев Дмитрий Егорович – сбор и анализ данных, выводы, написание текста.
Хосоев Доржо Владимирович – обработка результатов, оформление текста и графической информации.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

RESTORATION AND STABILIZATION OF NEGATIVE TEMPERATURE CONDITIONS OF SOILS OF GARAGE-TYPE STRUCTURES IN THE PERMAFROST ZONE

Alexandr S. Kurilko, Yuri A. Khokholov, Valery V. Kiselev, Dmitrii E. Solovev *, Dorzho V. Hosoev

Mining Institute of the North SB RAS

* for correspondence: solovjevde@igds.ysn.ru

CC BY

Article info
Received:
24 March 2026

Accepted for publication:
15 June 2026

Accepted:
01 July 2026

Keywords: *Foundations of above-ground structures, cryolithozone, permafrost soils, temperature regime, seasonal cooling units (SCU), mathematical modeling, thermal insulation*

Abstract.
This article examines the safety of a hazardous facility — a garage built in the permafrost zone and operated under positive temperature conditions. It presents diagrams of the seasonal freezing units (SCU) beneath the garage, as well as a three-dimensional domain for calculating the temperature regime of the soil beneath it with the SCU. The causes of the emergency, which arose as a result of thawing of frozen ground beneath the garage, forming a thawed basin and, consequently, deformation of virtually all structural elements, are described. The results of temperature studies of the soil beneath the garage's foundation are presented, confirming a violation of the design temperature conditions for its operation and the absence of measures to stabilize the negative temperature conditions in the design. Furthermore, the calculations revealed the presence of soil thawing processes under the garage during the winter period in the absence of thermal insulation. The results of numerical experiments conducted using a specially developed three-dimensional mathematical model for the formation and prediction of soil temperature parameters using seasonal freezing units, which have practical significance, are presented in graphic form. The effectiveness of using SCU for restoring and stabilizing subzero soil temperatures is emphasized, as is the use of thermal insulation under concrete floor slabs to neutralize heat fluxes from the building. The importance and necessity of conducting research to predict soil temperatures using mathematical models during pre-design work for above-ground structures in the permafrost zone operating under positive temperature conditions is noted, thereby ensuring their long-term, maintenance-free and safe operation.

For citation: Kurilko A.S., Khokholov Yu.A., Kiselev V.V., Solovev D.E., Hosoev D.V. Restoration and stabilization of negative temperature conditions of soils of garage-type structures in the permafrost zone. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 3(175):100-109. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-100-109, EDN: UWIDEB

REFERENCES

1. Scientific and technical report on the results of the survey of the technical condition of the capital construction project: "Garage for maintenance and repair of motor vehicles" at the site of the Drazhnoye deposit of the Taryn gold ore mining plant." Moscow: N.M. Gersevanov Research Institute of Optical and Optical Systems; 2020. 120 p. (In Russ.)

2. Alzoubi M.A., Xu M., Hassani F.P., Poncet S., Sasmito A.P. Artificial ground freezing: A review of thermal and hydraulic aspects. *Tunnelling and Underground Space Technology.* 2020; 104:103534. (in Eng.)

3. Efimov V.M., Vasilchuk Yu.K., Rozhin I.I., Popenko F.E., Stepanov A.V. Modeling the temperature regime of soil foundations with seasonal cooling devices in the cryolithozone of the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Antarctic.* 2017; (4):86-97. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.4.25036. (In Russ.)

4. Permyakov P.P., Varlamov S.P., Zheleznyak M.N. The impact of a vertical seasonal cooling device on the heat and moisture regime of the soil. *Earth's Cryosphere.* 2017; 1(21):66-72. (In Russ.)

5. Stepanov A.V., Popenko F.E., Rozhin I.I. Fundamentals of engineering protection of construction projects in the cryolithozone. Novosibirsk: Nauka; 2014. 448 p. (In Russ.)

6. Vasiliev V.I., Sidnyaev N.I. Modeling the distribution of non-stationary temperature fields in the cryolithozone when designing geotechnical structures: textbook. M.: KURS; 2017. 624 p. (In Russ.)

7. Baisheva L.M., Permyakov P.P., Bolshakov A.M. Heat and mass transfer of a coolant in horizontal seasonal cooling devices. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020; 753:042092. (in Eng.)

8. Romanova E., Khokholov Yu. Maintaining thermal stability of a fill slone in cryolitozone. *E3S Web of Conferences 192. VIII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesources", EDP Siences.* 2020. Art. 01021. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201021. (in Eng.)

9. Kurilko A.S., Popenko, F.E., Khokholov Yu.A., Romanova E.K. Forecast of thermal mode for the slope fill-up ground, considering the operation of seasonal cooling units in cryolithic zone conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2022; 988(4):042014. DOI: 10.1088/1755-1315/988/4/042014. (In Eng.)

10. Samarskii A.A., Moiseenko B.D. An efficient end-to-end counting scheme for the multidimensional Stefan problem. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 1965; 5(5):816-827. (In Russ.)

11. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. Equations of Mathematical Physics. M.: Nauka; 1977. 736 p. (In Russ.)

12. Izakson V.Yu., Petrov E.E. Numerical methods for forecasting and regulating the thermal regime of rocks in permafrost areas. Yakutsk: Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1986. 95 p. (In Russ.)

13. Khokholov Yu. A. Mathematical modeling of thermal processes in mine workings of the cryolithozone. *Problems and prospects of integrated development of mineral deposits of the cryolithozone: Proceedings of the Int. scientific-practical. conf.* Yakutsk: Publishing house of the Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2005. (2):76-82. (In Russ.)

14. Samarsky A.A. Theory of difference schemes. Moscow: Nauka; 1983. 616 p. (In Russ.)

15. Samarsky A.A., Vabishchevich P.N. Computational heat transfer. M.: Editorial URSS, 2003. 784 p. (In Russ.)

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Alexandr S. Kurilko, leading researcher, Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, (677980, Russian Federation, Yakutsk, Lenin Ave., 43), doctor of technical sciences, e-mail: kurilko-aleksandr@mail.ru

Yuri A. Khokholov, leading researcher, Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, (677980, Russian Federation, Yakutsk, Lenin Ave., 43), doctor of technical sciences, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9510-3808**,** e-mail: khokholov@igds.ysn.ru

Valery V. Kiselev, senior researcher, Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, (677980, Russian Federation, Yakutsk, Lenin Ave., 43), Ph.D., ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0555-1453

Dmitrii E. Solovev, leading researcher, Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, (677980, Russian Federation, Yakutsk, Lenin Ave., 43), Ph.D., ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2562-5368, e-mail: solovjevde@igds.ysn.ru,

Dorzho V. Hosoev, junior researcher, Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, (677980, Russian Federation, Yakutsk, Lenin Ave., 43), ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1466-8509, e-mail: dkhosoyev@mail.ru

Contribution of the authors:

Alexandr S. Kurilko – formulation of the research problem, review of relevant literature, conceptualization of the study, formulation of conclusions, writing the text

Yuri A. Khokholov – scientific management, formulation of the research problem, review of relevant literature, conceptualization of the study, formulation of conclusions, writing the text.

Valery V. Kiselev – review of relevant literature, conceptualization of the study, data collection and analysis, conclusions, writing the text.

Dmitrii E. Solovev – data collection and analysis, conclusions, writing the text.

Dorzho V. Hosoev – processing of results, formatting of text and graphic information

All authors have read and approved the final manuscript.