КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 1, с. 3–13 **https://www.sibran.ru**

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.345
DOI: 10.15372/KZ20250101
EDN: JPHNKH

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В ГЛУБОКИХ СКВАЖИНАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ГОРОДА НОРИЛЬСКА

П.И. Котов*, А.В. Прямицкий, Г.М. Кунчулия

Заполярный филиал ПАО ГМК "Норильский никель", 663305, Норильск, Гвардейская пл., 2, Россия

**Автор для контакта; e-mail: kotovpi@nornik.ru*

Повышение температуры воздуха в Арктической зоне происходит гораздо быстрее по сравнению с центральной частью России. Это приводит к росту температуры мерзлых грунтов оснований зданий и инженерных сооружений, понижению их несущей способности и к риску их разрушения. При этом температурный режим грунтов в городе зависит от многих факторов (микроклиматических особенностей, состава и свойств грунтов, техногенного влияния, особенностей застройки). В 2022 г. в рамках программы создания элемента единой системы мониторинга состояния многолетней мерзлоты на территории муниципального образования города Норильска и Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района Заполярный филиал ПАО ГМК "Норильский никель" начал программу обустройства глубоких скважин на территории ответственности компании как в природных условиях (в рамках проведения фонового мониторинга мерзлоты), так и в городе. В статье сделана оценка динамики температурного режима мерзлых грунтов в центре города Норильска. На указанной территории собраны архивные материалы (начиная с 1959 г.), проведены инженерно-геологические изыскания для изучения геологического строения, состава и свойств грунтов, пробурена новая термометрическая скважина взамен ранее существовавшей, начаты мониторинговые измерения в скважине. Полученные данные свидетельствуют о значительном изменении геокриологических условий в городе. За последние 65 лет (1959–2024) произошло повышение температуры грунта на глубине 10 м на 4.3 °С на участке расположения глубоких скважин. Значительные колебания температур за все время наблюдений зафиксированы до глубины 90 м, а ниже по разрезу, до глубины 200 м, температура изменилась в среднем на 0.3 °С.

***Ключевые слова**: многолетнемерзлые грунты, криолитозона, температурный режим грунтов, изменение климата, город в Арктике, Норильск.*

Ссылка для цитирования: Котов П.И., Прямицкий А.В., Кунчулия Г.М. Динамика температурного режима многолетнемерзлых грунтов в глубоких скважинах центральной части города Норильска // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 1, с. 3–13. DOI: 10.15372/KZ20250101. EDN: JPHNKH.

DYNAMICS OF PERMAFROST TEMPERATURE REGIME IN DEEP BOREHOLES IN THE CENTRAL PART OF NORILSK

P.I. Kotov*, A.V. Pryamitskiy, G.M. Kunchuliya

Polar division PJSC MMC "Norilsk Nickel", Gvardeyskaya Sq. 2, Norilsk, 663305 Russia

**Corresponding author; e-mail: kotovpi@nornik.ru*

In the Arctic zone, the current rise in air temperatures is much faster than in the central part of Russia. This leads to an increase in the temperature of frozen ground of the foundations of buildings and engineering structures, a decrease in their bearing capacity, and an increasing risk of their destruction. At the same time, the temperature regime of frozen ground in the city depends on many factors (microclimatic features, composition and properties of soils, technogenic influence, maintenance practices). In 2022, as part of the program to create an element of a unified system for monitoring the state of permafrost in the municipality of the city of Norilsk and the Taimyr Dolgano-Nenets municipal district, the Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel began a program for constructing deep boreholes in the territory of the company's responsibility both in the natural environment (as part of the background permafrost monitoring) and the city. This article aims to assess the dynamics of the temperature regime of permafrost in the center of Norilsk. Archival materials (since 1959) and the results of geotechnical surveys conducted in Norilsk to study the geological structure, composition, and properties of frozen rocks have been analyzed, and monitoring measurements in a new thermometric borehole drilled to replace the previous one, have begun. The data obtained indicate a significant change in the geocryological conditions in the city. Over the past 65 years (from 1959 to 2024), the ground temperature at a depth of 10 m in the area of the deep thermometric borehole increased by 4.3 °C. Significant temperature fluctuations have been recorded down to a depth of 90 meters, and further down the section to a depth of 200 meters the temperature has changed by an average of 0.3 °C.

***Keywords**: frozen ground, permafrost, temperature regime of soil, climate change, Arctic city, Norilsk.*

© П.И. Котов, А.В. Прямицкий, Г.М. Кунчулия, 2025

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на территории Арктики имеется 1162 поселения, расположенных в криолитозоне, в которых проживают 5 млн жителей. Большинство поселений являются небольшими, со средней численностью жителей 622 человека. Около 85 % крупных поселений находится в Российской Арктике [*Ramage et al., 2021*]. Норильск с его агломерацией является одним из крупнейших городов, расположенных в Арктической зоне, где проживает свыше 183 тыс. человек. Основные проблемы жизнеобеспечения города обусловлены суровыми климатическими условиями, дальностью расположения, особенностями эксплуатации зданий и инженерных сооружений [*Shiklomanov et al., 2017*].

Геокриологические условия в Норильском промышленном районе чрезвычайно неоднородны. Мощность многолетнемерзлых пород (ММП) изменяется от 5 до 800 м и более, а в межгорных долинах значительные пространства (до 40 %) заняты таликами даже на севере региона. Среднегодовая температура пород варьирует в широком диапазоне – от –7 до +2 °С [*Геокриология..., 1989*].

Изменение климата на арктических территориях становится одной из важных и глобальных проблем всего мира. Тренд потепления в Арктике превосходит глобальный более чем в 2.5 раза. Практически все прогнозы показывают, что площадь многолетнемерзлых грунтов будет сокращаться [*Третий... доклад..., 2022*]. Во всем мире температура ММП с 2007 г. повысилась на (0.29 ± 0.12) °С [*Biskaborn et al., 2019*].

Потепление климата приводит к оттаиванию ММП как ключевого компонента арктических территорий, что представляет значительную угрозу целостности полярной инфраструктуры. В настоящее время проведены исследования по изменению климата и воздействиям, которые этот процесс может оказать на инженерные сооружения [*Гребенец, Садовский, 1993; Гребенец, Ухова, 2008; Порфирьев и др., 2019; Фалалеева и др., 2023; Hjort et al., 2018, 2022; Streletskiy et al., 2019; Melnikov et al., 2022*]. Однако указанные оценки являются общими и не опираются на фактический материал о геологическом строении, геокриологических условиях, принципах строительства, а ведь эти характеристики могут различаться даже в пределах одной городской территории. В связи с этим наиболее достоверными являются результаты математического моделирования, выполненного на основе данных фактических измерений для конкретного объекта [*Schneider von Deimling et al., 2021; Hjort et al., 2022*].

Так, например, значительная часть производственных зданий и инженерных сооружений Заполярного филиала ПАО ГМК “Норильский никель” находится на скальных или талых грунтах, поэтому изменение климата не скажется на их устойчивости. Однако городская территория г. Норильска исторически застраивалась с использованием технических решений для строительства на многолетнемерзлых грунтах [*Гребенец, Садовский, 1993; Макаров и др., 2001; Сетков и др., 2005; Shiklomanov et al., 2017*].

Строительство комплекса многоэтажных жилых и общественных зданий в южной части города было осуществлено в основном в 1940–1950-е годы. Все эти здания возведены на скальных грунтах с использованием их в качестве естественных оснований фундаментов. Одной из главных особенностей работ являлось достаточное заглубление фундаментов в скальные грунты, так как их верхняя часть была сильно разрушена процессами выветривания. В таких массивах скальных пород трещины иногда заполнены ледяными включениями, которые при переходе из мерзлого состояния в талое могут вызвать смещения конструкций и просадки оттаивающих грунтов на прилегающей территории. Величина заглубления в скальный грунт в зависимости от мощности разрушенной зоны варьирует от 0.1 до 2.0 м и более [*Макаров и др., 2001*]. Опыт эксплуатации показывает, что если заглубление было сделано качественно и ниже трещиноватой зоны, то здание в настоящее время эксплуатируется без существенных проблем.

В условиях более глубокого залегания скальных грунтов (более 10 м) в Норильске использовали бетонные столбчатые фундаменты с опорой на крупнообломочные грунты малой льдистости. Большинство зданий, расположенных в районе Никелевого завода (первого металлургического завода), построено на таких грунтах [*Сетков и др., 2005*].

В конце 1950-х годов для дальнейшего строительства города начали применяться свайные фундаменты, которые были предложены М.В. Кимом [*Ким, 1964, 1967*]. Эти площадки были сложены преимущественно мерзлыми дисперсными грунтами и характеризовались сложными геокриологическими условиями со среднегодовыми температурами –2...–4 °С, наличием таликовых зон и сильнольдистых грунтов.

В связи с наличием таких сложных условий с 1959 г. на еще незастроенной территории была пробурена 200-метровая скважина, в которой в дальнейшем проводились температурные измерения. В настоящее время эти измерения после длительного перерыва продолжились, что позволяет оценить динамику температурного режима многолетнемерзлых грунтов в центре города Норильска с 1959 по 2024 г.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

Территория муниципального образования город Норильск находится севернее Полярного круга, в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов и относится к континентальной части Арктики.

Климат в районе суровый и субарктический. Среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции г. Норильска составляет –9 °С (1934–2023 гг.). Зима долгая и суровая, абсолютная минимальная температура воздуха составляет –57 °С. Лето с положительной средней температурой воздуха длится всего 4 месяца, а средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца равна 18.5 °С.

Изучаемая территория является застроенной площадью в центральной части г. Норильска (по адресу: Ленинский проспект, д. 25А), в непосредственной близости от участка расположены действующие здания и сооружения различного назначения (рис. 1).

В этой части города находилась глубокая 200-метровая скважина (D-1284, см. рис. 2), в которой измерения начались еще в 1959 г., но в начале 2000-х годов она была уничтожена. В 2022 г. в рамках программы создания элемента единой системы мониторинга состояния многолетней мерзлоты на территории муниципального образования город Норильск и Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района Заполярным филиалом ПАО ГМК "Норильский никель" были продолжены мониторинговые исследования температурного режима на территории города. В связи с этим была пробурена 200-метровая скважина в 30 м от ее первоначального расположения (скв. ТН-1, см. рис. 2), а также проведены инженерно-геологические работы для определения изменчивости геологического строения и свойств грунтов на территории (скважины Н-1–Н-4, см. рис. 2).

Инженерно-геологические изыскания выполнялись ООО "Норникель технические сервисы" и включали следующие виды работ.

– Бурение скважин. Выполнялось механическим колонковым способом "всухую" с укороченным рейсом и при минимальной скорости вращения бурового снаряда с полным отбором керна. При проведении проходки горных выработок выполнялось последовательное описание грунтов.

– Лабораторные работы. Определялись физические и теплофизические свойства грунтов согласно действующим нормативным документам.

– Измерения температуры грунтов в скважине. Измерения температур в скважинах выполнялись в соответствии с ГОСТ 25358-2020 [*2020*]. Комплект для полевого измерения грунтов состоит из термокосы и цифрового электрометра ЭТЦ-0,1/10. Замеры температуры производились с шагом 0.5 м до глубины 5 м, с шагом 1 м – до глубины 10 м, далее – с шагом 2 м, а также на забое скважины. Нулевой датчик расположен у поверхности земли. Перед замером скважина выстаивалась 14 дней.



Рис. 1. Расположение участка работ (обозначено красным цветом).

1 – скважина ТН-1.

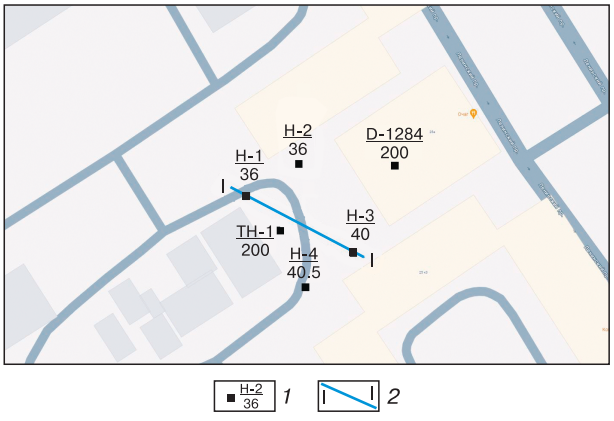


Рис. 2. Расположение скважин на территории исследований.

1 – номер инженерно-геологической скважины и ее глубина;
2 – линия инженерно-геологического разреза.

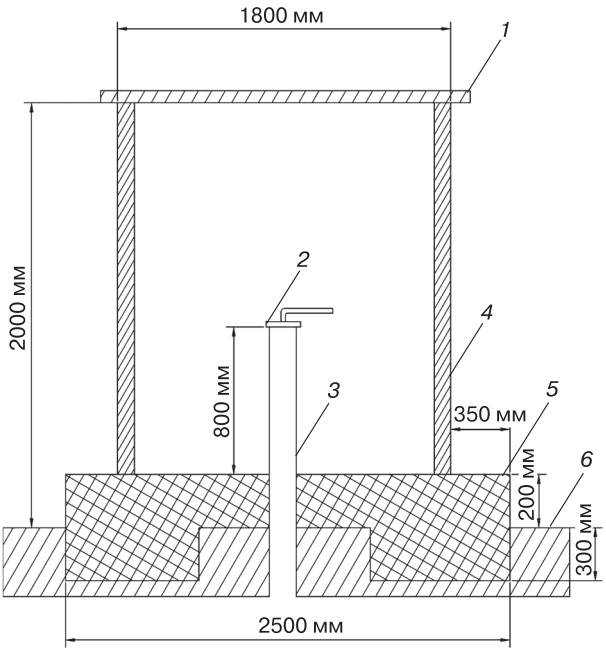


Рис. 3. Схема надкаптажного сооружения.

1 – крышка люка; *2* – прибор для автоматической передачи данных; *3* – оголовок; *4* – стенки; *5* – бетонная плита; *6* – грунт.

В октябре 2022 г. начались работы по обустройству 200-метровой скважины. Диаметр бурения в интервале залегания рыхлых четвертичных отложений 122.6 мм, в интервале залегания коренных пород – 96 мм. В процессе бурения велась геологическая документация и фотодокументация керна.

По окончании буровых работ устанавливалась обсадная колонна диаметром 89 мм и выполнялась цементация затрубного пространства с ожиданием затвердевания цемента в течение 48 ч. По окончании монтажа скважина спрессовывалась сжатым воздухом.

После бурения и подготовки скважины устанавливалось надкаптажное сооружение (рис. 3) для защиты от негативного влияния факторов окружающей среды и исключения возможности сноса.

В марте 2023 г. были проведены первые измерения температуры грунтов в новой 200-метровой скважине, а с декабря 2023 г. начались постоянные мониторинговые измерения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геологическое строение скважины ТН-1 представлено нижнетриасовыми интрузивными породами ($\nu\beta T_1$) и четвертичными аяклинскими озерными отложениями (lIII–Hak). Сверху залегают техногенные грунты, представленные крупнообломочными и песчано-глинистыми разностями. Толща техногенного грунта была сформирована в ходе строительно-планировочных работ при застройке территории, путем подсыпки привозного грунта до уровня планировочных отметок.

На момент изысканий (сентябрь 2022 г.) подземные воды на участке работ вскрыты не были.

Анализ полевых и лабораторных данных инженерно-геологических изысканий позволил выделить на этой территории до глубины 200 м всего 13 инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (табл. 1).

Таблица 1. **Характеристика инженерно-геологических элементов**

Номер ИГЭ	Индекс	Описание
1.1	tIV	Насыпной грунт: дресвяный грунт, мерзлый, с заполнителем (30.4 %) в виде суглинка слабозасоленного, в талом состоянии – твердого, средней степени водонасыщения
1.2т	tIV	Насыпной грунт: песок гравелистый, средней степени водонасыщения, средней плотности, с примесью органического вещества
1.3т	tIV	Насыпной грунт: песок мелкий, средней степени водонасыщения, средней плотности
2	lIII–Hak	Песок пылеватый мерзлый, льдистый, в талом состоянии – водонасыщенный, рыхлый
3	lIII–Hak	Суглинок легкий песчанистый, мерзлый, льдистый, в талом состоянии – текучий
4	lIII–Hak	Суглинок легкий песчанистый, мерзлый, слабольдистый, в талом состоянии – текучепластичный
5	lIII–Hak	Песок крупный, мерзлый, слабольдистый, в талом состоянии – средней степени водонасыщения, рыхлый
6	lIII–Hak	Супесь песчанистая, мерзлая, слабольдистая, в талом состоянии – пластичная
7	lIII–Hak	Песок средней крупности, мерзлый, слабольдистый, в талом состоянии – средней степени водонасыщения, рыхлый
8	lIII–Hak	Суглинок легкий, песчанистый с гравием и галькой, мерзлый, нельдистый, в талом состоянии – полутвердый
9	lIII–Hak	Песок средней крупности, мерзлый, слабольдистый, в талом состоянии – средней степени водонасыщения, средней плотности
10	lIII–Hak	Песок пылеватый, мерзлый, слабольдистый, в талом состоянии – водонасыщенный, средней плотности
11	$\nu\beta T_1$	Скальный грунт (габбро-диабаз), очень прочный, очень плотный, непористый, неразмягчаемый

Геологический разрез, полученный на основе инженерно-геологических изысканий, приведен на рис. 4. На рисунке видно, что на расстоянии 25 м геологический разрез различается и в районе скв. Н1 появляются прослои ИГЭ 4, ИГЭ 6 и ИГЭ 7. Габбро-диабаз (ИГЭ 11) простирается до 200 м.

Далее была проведена статистическая обработка свойств грунтов согласно ГОСТ 20522-2012 [*2020*] и определены нормативные и расчетные характеристики физических и теплофизических свойств грунтов, которые определялись лабораторными методами (табл. 2).

В верхней части разреза (ИГЭ 1.1–ИГЭ 1.3т) до глубины 1–3 м залегают техногенные грунты, преимущественно в пределах сезонноталого слоя. Толща техногенных грунтов характеризуется как самоуплотнившаяся, по времени возведения – как

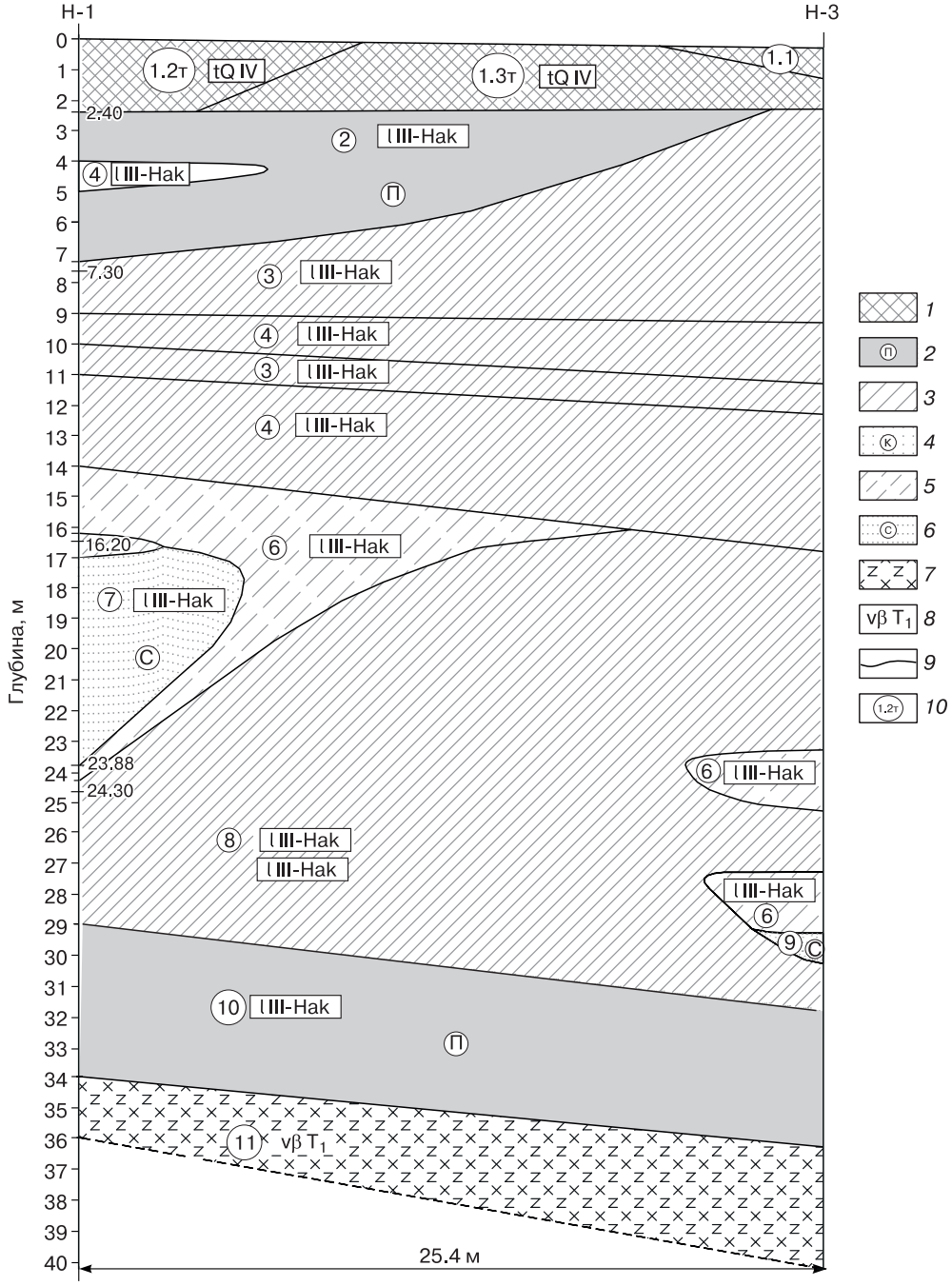


Рис. 4. Геологический разрез по линии I–I.

1 – насыпной грунт; *2* – песок пылеватый; *3* – суглинок; *4* – песок крупный; *5* – супесь; *6* – песок средней крупности; *7* – скальный грунт; *8* – геологический индекс; *9* – граница ИГЭ; *10* – обозначение номера ИГЭ (см. табл. 1).

Таблица 2. **Расчетные характеристики свойств грунтов площадки**

Номер ИГЭ	ρ	ρ_s	w	w_L	w_p	i_{tot}	i_i	D_{sal}, %	T_{bf}, °C	λ_{th}	λ_f
	г/см^3		д.е.			д.е.				Вт/(м·°C)	
1.1	2.33	2.81	0.06	0.21	0.13	0	0	0.22	–	–	–
1.2т	1.98	2.78	0.14	–	–	–	–	–	–	1.12	–
1.3т	2.02	2.82	0.17	–	–	–	–	–	–	2.07	–
2	1.83	2.81	0.30	–	–	0.46	0	0.08	–0.19	1.65	1.95
3	1.77	2.82	0.36	0.26	0.16	0.40	0.23	0.09	–0.19	1.21	1.60
4	1.87	2.84	0.26	0.27	0.17	0.31	0.10	0.10	–0.20	1.37	1.59
5	1.94	2.83	0.20	–	–	0.36	0	0.08	–	1.81	2.22
6	1.96	2.84	0.19	0.18	0.12	0.26	0.06	0.11	–0.20	1.29	1.54
7	1.89	2.82	0.22	–	–	0.37	0.01	0.07	–0.17	1.71	2.10
8	2.03	2.83	0.14	0.23	0.14	0.15	0	0.09	–0.20	1.25	1.63
9	1.95	2.83	0.17	–	–	0.31	0	0.06	–	1.90	2.46
10	1.94	2.81	0.23	0	0	0.39	0	0.07	–0.21	2.25	2.25
11	2.9	2.97	0.01	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание: ρ – плотность грунта; ρ_s – плотность частиц грунта; w – суммарная влажность грунта для мерзлого, природная для талого грунта; w_L – влажность верхнего предела пластичности; w_p – влажность нижнего предела пластичности; i_{tot} – суммарная льдистость; i_i – льдистость за счет видимых ледяных включений; D_{sal} – засоленность; T_{bf} – температура начала замерзания грунта; λ_{th} – коэффициент теплопроводности талого грунта; λ_f – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта.

слежавшаяся. Ввиду хаотичности отсыпки и невыдержанности по составу техногенных грунтов отмечается анизотропия физических и теплофизических свойств данных грунтов.

Различие в геологическом строении, режиме инсоляции территории, тепловыделении близлежащих зданий влияет на температурный режим в скважинах. При этом наблюдается значительное различие температур для скважин Н-1 и Н-2, находящихся с одной стороны площадки, и скважин Н-3 и Н-4 – с другой (рис. 5). На глубине 10 м различие достигает 1 °C, а на 30 м его уже практически нет, что говорит о значительном техногенном влиянии в верхней части. Наличие систем подземных тепловыделяющих коллекторов для санитарно-технических коммуникаций на данном участке может являться одной из причин столь значительного различия в температуре между скважинами Н-1, Н-2 и Н-3, Н-4. Однако обследований коммуникаций не проводилось.

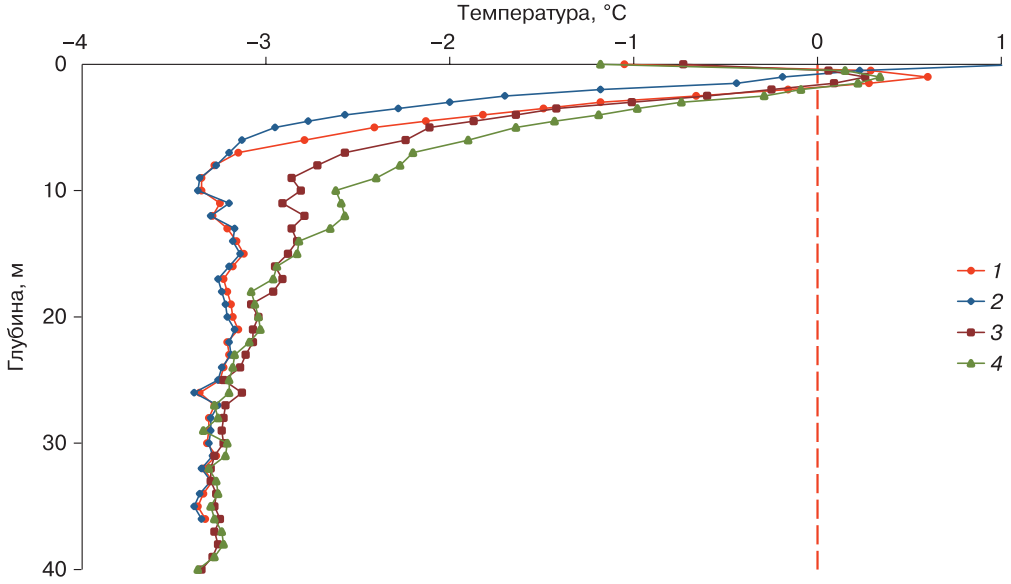


Рис. 5. Температура грунтов в районе глубокой скважины в сентябре 2022 г.

1 – скв. Н-1; *2* – скв. Н-2; *3* – скв. Н-3; *4* – скв. Н-4.

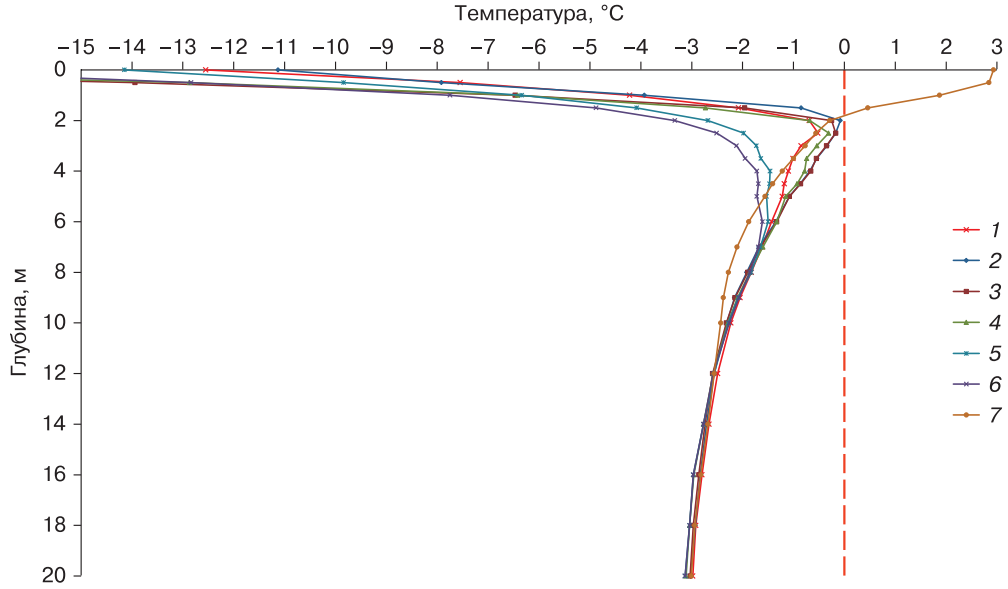


Рис. 6. Температурный режим грунтов в скважине ТН-1.

1 – 27.03.2023 г.; *2* – 22.12.2023; *3* – 15.01.2024; *4* – 15.02.2024; *5* – 15.03.2024; *6* – 27.03.2024; *7* – 15.09.2024 г.

В марте 2023 г. были произведены первые измерения температуры в новой 200-метровой скважине, а с декабря начались постоянные мониторинговые измерения. В течение 1.5 лет колебания температуры наблюдаются до глубины 12 м, а ниже они практически не меняются (рис. 6). Наблюдения будут продолжены для подтверждения стабилизации температурного режима вокруг новой скважины.

ДИСКУССИЯ

Данные, полученные на метеостанции г. Норильска, показывают, что начиная с середины 1980 г. наблюдается рост среднегодовой температуры воздуха (рис. 7). В частности, в Норильском промышленном районе выявлен общий рост температуры воздуха, равный 0.7 °C за десятилетие. При этом в последние годы фиксируется аномально теплая среднегодовая температура воздуха, например, в 2020 г. она составляла –3.78 °C. А многолетнее среднегодовое значение температуры воздуха за период с 1934 по 2023 г. было –8.98 °C. Темпы потепления различаются по сезонам, наибольший рост отмечен весной.

В целом климат на исследуемой территории в последние несколько десятилетий стал более влажным за счет увеличения количества осадков и изменения режимов их выпадения.

Вариации количества осадков и температуры воздуха привели к изменениям в режиме снегонакопления. Увеличение температуры воздуха привело к смещению дней с устойчивым снежным покровом: снежный покров стал формироваться на 5–10 дней позже, однако и разрушаться стал также примерно на 5 дней позже.

При анализе температурного режима по стационарным наблюдениям важной особенностью является необходимость учета эффекта городского острова тепла – разность температуры воздуха в городе и в окрестностях (связанная с локальным влиянием городской застройки и источников тепла в городе). Одной из основных причин возникновения городского острова тепла считается более эффективное поглощение и сохранение городом солнечного тепла [*Ryu, Baik, 2012*]. Для условий полярной ночи зимой в северных городах России результаты численного моделирования городско-

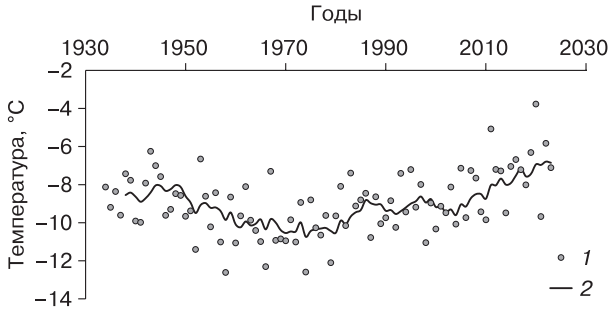


Рис. 7. Изменение среднегодовой температуры воздуха по данным метеостанции г. Норильска с 1934 по 2023 г.

1 – фактические значения температуры; *2* – семилетние средние.

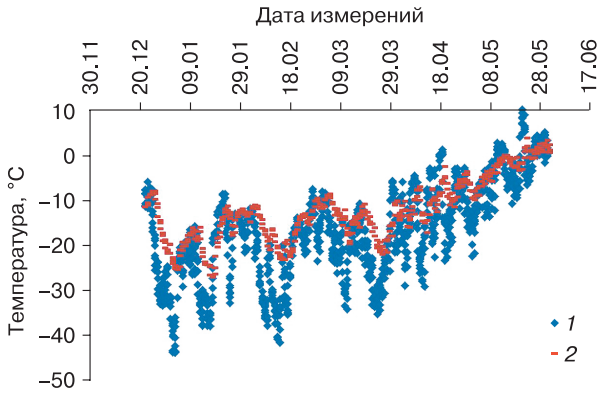


Рис. 8. Температура воздуха *T* на метеостанции г. Норильска и температура земной поверхности в скважине в центре города.

1 – метеостанция; *2* – скважина.

го острова тепла показали значительный вклад антропогенного фактора (за счет прямого нагрева) в формирование данного явления [*Varentsov et al., 2018*].

В работе [*Esau et al., 2021*] представлен анализ характеристик городского острова тепла для населенных пунктов в Заполярье с населением более 3 тыс. человек. Для Норильска средняя интенсивность городского острова тепла в последние десятилетия составила в среднем за год +2.7 °C летом и +3.2 °C зимой. Интенсивность городского острова тепла в этом случае рассчитывалась как разность между максимальной температурой в городе и средней температурой в области за пределами города [*Miles, Esau, 2017; Esau et al., 2021*]. Однако суточные значения интенсивности острова тепла могут сильно отличаться от средних значений и достигать 7–8 °C [*Варенцов и др., 2014*].

Для выполнения расчетов важной задачей является оценка влияния городского острова тепла на температурный режим грунтов в городе. Для оценки этого фактора проведено сравнение данных температуры нулевого датчика в скв. ТН-1 (расположен на уровне земной поверхности) в центре г. Норильска (измерения проводятся 3 раза в сутки) и температуры воздуха по метеостанции г. Норильска (расположена в 2.5 км на запад от скважины, измерения проводятся каждые 3 часа) с 22 декабря 2023 г. по 31 мая 2024 г. (рис. 8). В результате установлено, что в скважине наблюдается некоторый сдвиг фаз изменения температуры и ее амплитуда гораздо меньше, но значения находятся в пределах разброса данных температуры воздуха и не превышают их. Исследования будут продолжены для выявления различий в годовом цикле, в том числе с использованием автоматических метеорологических станций на территории исследований.

За последние 65 лет (1959–2024) произошло повышение температуры грунта на глубине 10 м на 4.3 °C в районе глубоких скважин. Значительные колебания температуры зафиксированы до глубины 90 м, а ниже по разрезу, до глубины 200 м, температура изменилась в среднем на 0.3 °C. При этом за период с 1959 по 1985 г. произошло повышение температуры грунта на глубине 10 м всего на 1.9 °C (рис. 9).

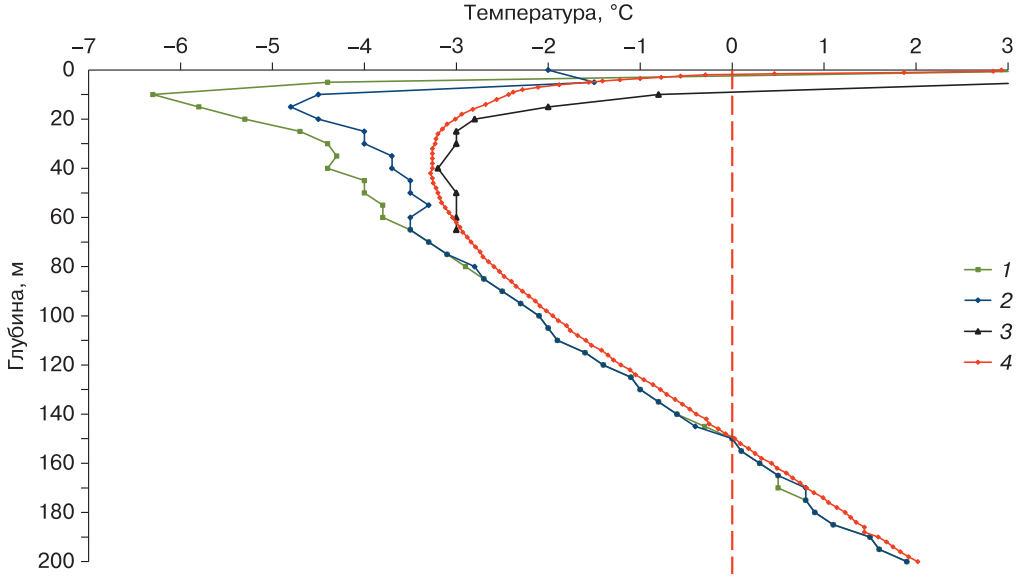


Рис. 9. Динамика температурного режима грунтов центральной части г. Норильска.

1 – июль 1959 г.; *2* – декабрь 1985 г.; *3* – июль 2006 г.; *4* – сентябрь 2024 г.

При этом геотермический градиент практически не изменился, остался равным 3.7 °С на 100 м.

При этом важно учитывать, что измерения в 1960-х и 1980-х годах производились с помощью инерционных термометров, а в настоящее время полупроводниковыми датчиками, точность которых гораздо выше. Это может быть одной из причин расхождений температурных кривых ниже 90 м, где влияние техногенного фактора минимально. Кроме того, только в следующем году возможно оценить: завершилась ли выстойка новой скважины после ее разогрева при бурении и не влияет ли это на температурный режим.

Результаты измерений показывают, что в верхней части разреза наблюдается резкое увеличение температуры до 2006 г. (температура на глубине 10 м составляла –0.8 °С), что связано со строительством магазина рядом, а также с аварийными ситуациями в коммуникациях домов. В начале 1990-х годов было зафиксировано несколько аварий, связанных с тепло- и водоснабжением города, что привело к необходимости слива воды под здания. Техногенное подтопление и засоление грунтов (по результатам лабораторных исследований засоленность грунтов в слое сезонного оттаивания больше в 3 раза по сравнению с грунтами, расположенными ниже) привело к повсеместному росту глубин сезонного оттаивания, изменению температуры грунтов и гидрогеологических условий. В период 1997–2002 гг. в Норильске произошло наибольшее закрытие домов по причине необратимых деформаций из-за оттаивания мерзлых грунтов [*Котов, Авилов, 2023*].

Следует также учитывать, что в 2023–2024 гг. измерения проводились уже в другой скважине, так как восстановить скважину в том же месте невозможно. В месте расположения новой скважины (ТН-1) проводилась снегоуборка, что привело к понижению температуры грунтов на территории. Сейчас скважина находится в надкаптажном сооружении, поэтому там нет снежного покрова, а снег в Норильском промышленном районе оказывает наибольшее влияние на температурный режим грунтов [*Гребенец, Толманов, 2021*].

Таким образом, для Норильска, как и для других городов в Арктической зоне, основными причинами повышения температуры грунтов являются неправильная эксплуатация зданий и сооружений, неучет геокриологических условий, состава и свойств грунтов [*Брушков и др., 2023; Kotov, Khilimonyuk, 2021*].

На сентябрь 2024 г. мощность мерзлоты на площадке сократилась незначительно – на 2.3 м за 65 лет под действием теплового потока из недр (в 1959 г. она составляла 150 м, сейчас 147.7 м). Однако эти данные являются предварительными и могут измениться в связи с дальнейшей выстойкой глубокой скважины после бурения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работ установлены температурные показатели и изменение мощности мерзлоты, состава и свойства грунтов в районе расположения глубоких скважин центральной части г. Норильска.

- Геологическое строение района исследований представлено нижнетриасовыми магматическими интрузивными породами ($\nu\beta T_1$) и четвертичными аяклинскими озерными отложениями (lIII–Hak). Сверху залегают техногенные грунты, представленные крупнообломочными и песчано-глинистыми разностями. На данной территории выделено 13 инженерно-геологических элементов, а самую большую мощность (более 150 м) имеет габбро-диабаз. Геологическое строение на площадке размером 25 × 25 м в значительной степени различается.
- Для каждого ИГЭ определены расчетные показатели физических и теплофизических свойств мерзлых грунтов.
- Различия в геологическом строении, режиме инсоляции территории, тепловыделении близлежащих зданий влияют на температурный режим грунтов. При этом наблюдается сильное различие значений температуры, полученных в сентябре 2022 г. для скважин Н-1 и Н-2, находящихся с одной стороны площадки, и для скважин Н-3 и Н-4 с другой стороны. На глубине 10 м различие достигает 1 °С, а на 30 м его уже практически нет, что говорит о значительном техногенном влиянии в верхней части на данном участке.
- За последние 65 лет (1959–2024) произошло повышение температуры грунта на глубине 10 м на 4.3 °С в районе расположения глубоких скважин. Значительные колебания температуры зафиксированы до глубины 90 м, а ниже по разрезу до глубины 200 м температура изменилась в среднем на 0.3 °С.
- Геотермический градиент равен 3.7 °С на 100 м.

Полученные данные могут использоваться для оценок влияния природных и техногенных факторов на температурный режим грунтов, для создания обоснованных прогнозных моделей, верифицированных на основе фактических измерений, а также для принятия научно-обоснованных управленческих решений по функционированию городской инфраструктуры в г. Норильске.

Литература

Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В. и др. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне // Зап. Горн. ин-та, 2023, № 263, с. 742–756.

Варенцов М.И., Константинов П.И., Самсонов Т.Е. Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и

дистанционного зондирования на примере Норильска // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса, 2014, т. 11, № 4, с. 329–337.

Геокриология СССР: Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 413 с.

ГОСТ 25358-2020. Грунты. Метод полевого определения температуры. М., Стандартинформ, 2020, 13 с.

ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М., Стандартинформ, 2020, 16 с.

Гребенец В.И., Садовский А.В. Потепление климата и тепловой режим оснований северного города // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1993, № 5, с. 27–30.

Гребенец В.И., Толманов В.А. Влияние специфического режима снежных отложений на вечномерзлые основания в городах криолитозоны (на примере Норильского региона) // Лед и снег, 2021, т. 61, № 3, с. 457–470.

Гребенец В.И., Ухова Ю.А. Снижение геотехнической надежности при ухудшении мерзлотных условий оснований // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2008, № 5, с. 24–29.

Ким М.В. Строительство крупнопанельных зданий на высокотемпературных вечномерзлых грунтах (из опыта в Норильске) // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1964, № 6, с. 13–15.

Ким М.В. Рациональные способы фундаментостроения на вечномерзлых грунтах (из опыта строительства Норильского комбината) // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1967, № 5, с. 31–34.

Котов П.И., Авилов Д.А. Динамика температурного режима мерзлых грунтов в центре города Норильск // Материалы 16 Междунар. науч. школы молодых ученых и специалистов (Москва, 23–27 окт. 2023). М., ИПКОН РАН, 2023, с. 35–38.

Макаров В.И. Норильск (Опыт строительства) / В.И. Макаров, В.П. Пикулев, Э.Л. Кадкина, О.В. Колесникова. М., МГСУ, 2001, 216 с.

Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестн. РАН, 2019, т. 89, № 12, с. 1228–1239.

Сетков В.Ю. Техническая эксплуатация зданий и сооружений на севере Красноярского края / В.Ю. Сетков, Т.Р. Гамидов, Н.А. Губина. Норильск, Изд-во Норил. индустр. ин-та, 2005, 229 с.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб., Наукоемкие технологии, 2022, 124 с.

Фалалеева А.А., Шелков Я.Ю., Чеверев В.Г., Брушков А.В. Оценка изменения несущей способности мерзлых грунтов при возможном изменении температуры и оттаивании вечной мерзлоты в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология, 2023, № 5, с. 105–116.

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nat. Commun., 2019, vol. 10, No. 264, p. 1–11.

Esau I., Miles V., Soromotin A. et al. Urban heat islands in the Arctic cities: An updated compilation of in situ and remote-sensing estimations // Adv. Sci. Res., 2021, vol. 18, p. 51–57.

Hjort J., Karjalainen O., Aalto J. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // Nat. Commun., 2018, vol. 10 (5147), p. 1–9.

Hjort J., Streletskiy D., Dore G. et al. Impacts of permafrost degradation on infrastructure // Nat. Rev. Earth & Environ., 2022, vol. 3, No. 1, p. 24–38.

Kotov P.I., Khilimonyuk V.Z. Building stability on permafrost in Vorkuta, Russia // Geogr., Environ., Sustainabil., 2021, No. 14 (4), p. 67–74.

Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050 // Nat. Hazards, 2022, No. 112, p. 231–251.

Miles V., Esau I. Seasonal and spatial characteristics of urban heat islands (UHIs) in northern West Siberian cities // Remote Sens., 2017, vol. 9, No. 989, p. 1–15.

Ramage J., Jungsberg L., Wang S. et al. Population living on permafrost in the Arctic // Populat. Environ., 2021, vol. 43, p. 22–38.

Ryu Y.H., Baik J.J. Quantitative analysis of factors contributing to urban heat island intensity // J. Appl. Meteorol. Climatol., 2012, vol. 51, No. 5, p. 842–854.

Schneider von Deimling T., Lee H., Ingeman-Nielsen T. et al. Consequences of permafrost degradation for Arctic infrastructure – bridging the model gap between regional and engineering scales // Cryosphere, 2021, No. 15, p. 2451–2471.

Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Grebenets V.I., Luis S. Conquering the permafrost: urban infrastructure development in Norilsk, Russia // Polar Geogr., 2017, No. 40 (4), p. 273–290.

Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I. et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environ. Res. Lett., 2019, vol. 14 (025003), p. 1–15.

Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A. et al. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city // Atmos. Chem., Phys., 2018, vol. 18, No. 23, p. 17573–17587.

References

Brushkov A.V., Alekseev A.G., Badina S.V. et al. Structure maintenance experience and the need to control the soils thermal regime in permafrost areas. Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute], 2023, No. 263, p. 742–756.

Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E. Study of the urban heat island phenomenon in polar night conditions using experimental measurements and remote sensing using the example of Norilsk. Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from Space], 2014, vol. 11, No. 4, p. 329–337.

Geokriologiya SSSR: Srednyaya Sibir' [Geocryology of the USSR: Central Siberia], E.D. Ershov (ed.). Moscow, Nedra, 1989, 413 p. (in Russian).

GOST 25358-2020. Grunty. Metod polevogo opredeleniya temperatury [Soils. Method for field determination of temperature]. Moscow, Standartinform, 2020, 13 p. (in Russian).

GOST 20522-2012. Grunty. Metody statisticheskoy obrabotki rezul'tatov ispytaniy [Soils. Methods for statistical processing of test results]. Moscow, Standartinform, 2020, 16 p. (in Russian).

Grebenets V.I., Sadovsky A.V. Climate warming and thermal regime of foundations of a northern city. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Bases, foundations and soil mechanics], 1993, No. 5, p. 27–30.

Grebenets V.I., Tolmanov V.A. The influence of a specific regime of snow deposits on permafrost in cities of the permafrost zone (using the example of the Norilsk region). Led i sneg [Ice and Snow], 2021, vol. 61, No. 3, p. 457–470.

Grebenets V.I., Ukhova Yu.A. Reduction in geotechnical reliability with deterioration of permafrost conditions of foundations. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Bases, foundations and soil mechanics], 2008, No. 5, p. 24–29.

Kim M.V. Construction of large-panel buildings on high-temperature permafrost soils (from experience in Norilsk). Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Bases, foundations and soil mechanics], 1964, No. 6, p. 13–15.

Kim M.V. Rational methods of foundation construction on permafrost soils (from the experience of construction of the Norilsk plant). Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Bases, foundations and soil mechanics], 1967, No. 5, p. 31–34.

Kotov P.I., Avilov D.A. Dynamics of the temperature regime of frozen soils in the center of the city of Norilsk. In: Materials of the 16th Int. Scientific School of Young Scientists and Specialists (Moscow, Oct. 23–27, 2023). Moscow, IPKON RAS, 2023, p. 35–38 (in Russian).

Makarov V.I., Pikulev V.P., Kadkina E.L., Kolesnikova O.V. Noril'sk (Opyt stroitel'stva) [Norilsk (Construction experience)]. Moscow, MGSU, 2001, 216 p. (in Russian).

Porfiryev B.N., Eliseev D.O., Streletsky D.A. Economic assessment of the consequences of permafrost degradation under the influence of climate change for the sustainability of road infrastructure in the Russian Arctic. Vestnik Rossiyskoy akademii nauk [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2019, vol. 89, No. 12, p. 1228–1239.

Setkov V.Yu., Gamidov T.R., Gubina N.A. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya zdaniy i sooruzheniy na severe Krasnoyarskogo kraya: monografiya [Technical maintenance of buildings and structures in the north of the Krasnoyarsk Territory]. Norilsk, Norilsk. industr. in-t, 2005, 229 p. (in Russian).

Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshcheye rezyume [Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary]. St. Petersburg, Naukoemkie tekhnologii, 2022, 124 p. (in Russian).

Falaleeva A.A., Shelkov Ya.Yu., Cheverev V.G., Brushkov A.V. Assessment of changes in the bearing capacity of frozen soils with a possible change in temperature and thawing of permafrost in the Arctic zone of the Russian Federation by the middle of the 21st century. Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4. Geologiya [Bulletin of Moscow University. Ser. 4. Geology], 2023, No. 5, p. 105–116.

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale. Nat. Commun., 2019, vol. 10, No. 264, p. 1–11.

Esau I., Miles V., Soromotin A. et al. Urban heat islands in the Arctic cities: An updated compilation of in situ and remote-sensing estimations. Adv. Sci. Res., 2021, vol. 18, p. 51–57.

Hjort J., Karjalainen O., Aalto J. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. Nat. Commun., 2018, vol. 10 (5147), p. 1–9.

Hjort J., Streletskiy D., Dore G. et al. Impacts of permafrost degradation on infrastructure. Nat. Rev. Earth & Environ., 2022, vol. 3, No. 1, p. 24–38.

Kotov P.I., Khilimonyuk V.Z. Building stability on permafrost in Vorkuta, Russia. Geogr., Environ., Sustainabil., 2021, No. 14 (4), p. 67–74.

Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. Nat. Hazards, 2022, No. 112, p. 231–251.

Miles V., Esau I. Seasonal and spatial characteristics of urban heat islands (UHIs) in northern West Siberian cities. Remote Sens., 2017, vol. 9, No. 989, p. 1–15.

Ramage J., Jungsberg L., Wang S. et al. Population living on permafrost in the Arctic. Populat. Environ., 2021, vol. 43, p. 22–38.

Ryu Y.H., Baik J.J. Quantitative analysis of factors contributing to urban heat island intensity. J. Appl. Meteorol. Climatol., 2012, vol. 51, No. 5, p. 842–854.

Schneider von Deimling T., Lee H., Ingeman-Nielsen T. et al. Consequences of permafrost degradation for Arctic infrastructure – bridging the model gap between regional and engineering scales. Cryosphere, 2021, No. 15, p. 2451–2471.

Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Grebenets V.I., Luis S. Conquering the permafrost: urban infrastructure development in Norilsk, Russia. Polar Geogr., 2017, No. 40 (4), p. 273–290.

Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I. et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. Environ. Res. Lett., 2019, vol. 14 (025003), p. 1–15.

Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A. et al. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city. Atmos. Chem. Phys., 2018, vol. 18, No. 23, p. 17573–17587.

Поступила в редакцию 15 июля 2024 г.,
после доработки – 16 октября 2024 г.,
принята к публикации 3 декабря 2024 г.