

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В КРИОЛИТОЗОНЕ

*М.Ю. Филимонов<sup>1,2</sup>, Н.А. Ваганова<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

<sup>2</sup>Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского, Екатеринбург

fmy@imm.uran.ru, vna@imm.uran.ru

**Аннотация.** Эксплуатация железнодорожных путей в зоне распространения вечной мерзлоты связана с определенными требованиями к безопасности. Например, железнодорожные опоры мостов испытывают влияние климатических и динамических нагрузок, которые необходимо учесть при эксплуатации железнодорожных путей в таких условиях. Рассматривается конкретная аварийная опора железнодорожного моста через реку около Нового Уренгоя, которая опирается на 12 бетонных свай большого диаметра. Просадка этой опоры превышает допустимые параметры, что может привести к аварийной ситуации при движении поездов через такой железнодорожный мост, а последствиями могут стать экологические проблемы и большие экономические потери.

На несущую способность свай влияет динамика изменения температурного режима грунта вокруг свай. Для описания динамики изменения температурных полей в грунте в предложенной математической модели учитывается предыстория изменения температуры грунта, начиная с 1983 г., с учетом температурного тренда потепления климата, характерного для этого региона. Также в модели учтены показатели солнечного излучения в летние месяцы и наличие снежного покрова в зимний период.

Проведенные численные расчеты позволили дать долгосрочный прогноз по развитию аварийных ситуаций, а также выработать рекомендации для их предотвращения и минимизации последствий.

**Ключевые слова:** вечная мерзлота, изменение климата, математическое моделирование, несущая способность.

**Постановка задачи.** Термин «вечная мерзлота» был введен в научное обращение в 1927 г. основателем школы советских мерзловедов М.И. Сумгиным. Многолетнемерзлыми породами (ММП) называются породы, сохраняющие отрицательную температуру не менее двух лет. Криолитозона в России занимает более 60 % всей территории [1]. Эти территории чрезвычайно важны для экономики России, т.к. здесь добывается около 93 % российского природного газа и 80 % нефти. В стратегии развития северных территорий значительное место отводится сбалансированному развитию экономики, промышленности, социальной инфраструктуры с сохранением природных экосистем. Так, для территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) потепление климата на основании многолетнего мониторинга продолжается с конца 1970-х гг. со скоростью 2,4–2,8 °С за 50 лет [2], что приводит к деградации ММП, опусканию кровли мерзлоты и повышению ее температуры [3]. Максимальная скорость повышения температуры наблюдается в тундре и составляет в год 0,06 °С.

Влияние техногенного воздействия также оказывает на изменение границ залегания ММП. Более 75 % всех зданий и инженерных сооружений в зоне вечной мерзлоты построены и эксплуатируются по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов оснований. В соответствии со строительными нормами это называется первым принципом проектирования и строительства в условиях вечной мерзлоты. Выбор оптимальных способов строительства для конкретного географического места, связанных с выполнением этого принципа, будет связан с моделированием нестационарных тепловых полей в грунте под этими сооружениями.

Меняющийся климат [4–6] и возрастающая антропогенная нагрузка на окружающую среду приводят к изменению границ залегания вечной мерзлоты, составляющей около 25 % поверхности Северного полушария [7]. Особенно эти изменения актуальны в зонах применения свайных фундаментов жилых зданий [8], опор железнодорожных мостов [9–11] и других инженерных сооружений [12], расположенных в северных регио-

нах, поскольку такие изменения могут приводить к серьезным авариям из-за деградации вечной мерзлоты [13; 14]. Поэтому организация температурного мониторинга (ТМ) и прогнозирование температурных изменений грунта под такими капитальными сооружениями являются актуальными проблемами [8; 15; 16].

В работе рассматривается металлический мостовой переход длиной 88 м линии железной дороги Коротчаево – Новый Уренгой, опирающийся на левом берегу реки Тыдыльяха на опору (Опора № 1), состоящую из группы свай (12 газовых труб диаметром 1024 мм, заполненных бетоном с армированием), расположенных в три ряда на расстоянии 1,6–1,5 м друг от друга и объединенных наверху железобетонным ростверком (рис. 1).

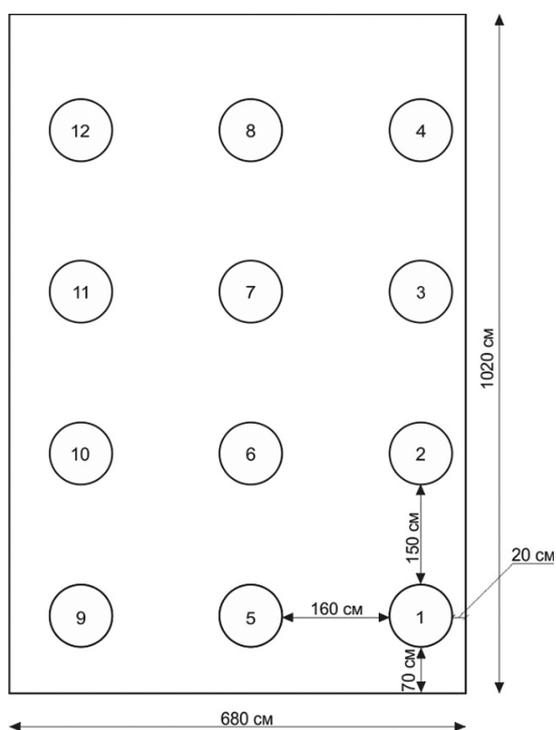


Рис. 1. Схема расположения на поверхности свай в основании опоры № 1

Наблюдения за опорой № 1 выявили, что ее просадка за 6 месяцев составляет 15 мм, что может привести к авариям при движении поездов по этому мосту, испытывающему как динамические нагрузки, так и воздействие меняющегося климата, который приводит к увеличению температуры грунта в основании опоры № 1 и изменению несущих способностей грунта, окружающего 12 свай. Новый Уренгой расположен на берегу реки Евояха в 579 км восточнее Салехарда

и находится в области умеренного резко континентального климатического пояса с географическими координатами 66°05′05″ с. ш. 76°40′44″ в. д. Теплый сезон в Новом Уренгое длится 2,9 месяца, с 9 июня по 5 сентября, с максимальной среднесуточной температурой выше 12 °С. Самый жаркий месяц в году в Новом Уренгое – июль, со средним температурным максимумом 19 °С и минимумом 10 °С. Холодный сезон длится 4 месяца, с 13 ноября по 14 марта, с минимальной среднесуточной температурой ниже –12 °С. Самый холодный месяц в году в Новом Уренгое – январь, со средним температурным минимумом –27 °С и максимумом –20 °С. Из-за экстремальной широты в Новом Уренгое летом наступает полярный день. Так, в 2023 г. летом солнце постоянно находилось над горизонтом в течение 3,1 недели, с 11 июня по 2 июля. Поэтому инсоляция южной части опоры № 1, особенно свай 1, 2, 5, 6 (см. рис. 1) будет выше, чем ее северной части, что необходимо будет также учесть в математической модели.

#### Математическая модель и метод решения.

Пусть  $T = T(t, x, y, z)$  – температура грунта в точке  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$ . В общем случае моделирование процессов распространения тепла в мерзлом грунте сводится к решению следующего уравнения:

$$\rho(c_v(T) + k\delta(T - T^*)) \frac{\partial T}{\partial t} = (\text{div}(\lambda(T) \text{grad} T)), \quad (1)$$

с учетом начального условия

$$T(t_0, x, y, z) = T_0(x, y, z), \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность [кг/м<sup>3</sup>],  $T^*$  – температура фазового перехода,

$$c_v(T) \begin{cases} c_1 \text{ при } T < T^*, \\ c_2 \text{ при } T > T^*, \end{cases} \text{ – удельная теплоемкость [Дж/(кг К)],}$$

$$\lambda_v(T) \begin{cases} \lambda_1 \text{ при } T < T^*, \\ \lambda_2 \text{ при } T > T^*, \end{cases} \text{ – коэффициент теплопроводности [Вт/(м К)],}$$

$k$  – теплоемкость фазового перехода,  $\delta$  – дельта-функция Дирака.

Расчетная область  $\Omega$  для уравнения (1) представляет собой трехмерный параллелепипед, в котором оси  $x$  и  $y$  расположены параллельно поверхности грунта, а ось  $z$  направлена вниз (рис. 2). В центре  $\Omega$ , в плоскости  $\{x, y\}$ , расположен ростверк опоры № 1.

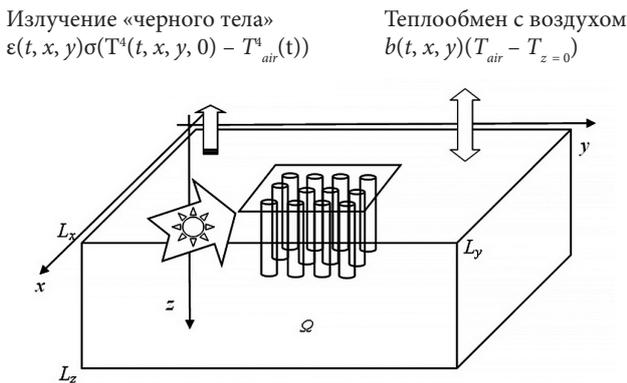


Рис. 2. Расчетная область  $\Omega$  и тепловые потоки на поверхности  $z = 0$

Применимость уравнения (1) для решения задач типа Стефана обосновано в монографии [17]. Коэффициенты, входящие в уравнение (1), могут меняться в различных точках расчетной области ввиду неоднородности грунта. В качестве граничного условия на поверхности грунта – основной зоне формирования естественных тепловых полей – используется уравнение баланса потоков, приносящих и уносящих энергию, с учетом основных климатических факторов: среднесуточной температуры воздуха и мощности солнечного излучения в основном в весенние и летние месяцы. Составление теплового баланса на поверхности грунта  $z = 0$  приводит к нелинейному граничному условию

$$aq + b(T_{air} - T|_{z=0}) = \varepsilon\sigma(T^4 - T_{air}^4) + \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}. \quad (3)$$

Здесь через  $T_{air} = T_{air}(t, x, y, t_0)$  обозначена температура воздуха в приповерхностном слое в точке  $(x, y, t_0) \in \Omega$ .  $T_{air}$  изменяется в соответствии с годичным температурным циклом и меняется 4 раза в сутки в соответствии с данными метеостанции Новый Уренгой с учетом тренда на потепление  $0,04 \text{ }^\circ\text{C}$  в год, выбор которого обоснован в работе [10]. В зимний сезон в  $T_{air}(t, x, y, t_0)$  учитывается также и снежный покров. В уравнение (1) также входят следующие параметры:  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K}^4)$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $b = b(t, x, y)$  – коэффициент теплообмена,  $\varepsilon = \varepsilon(t, x, y)$  – коэффициент серости. Коэффициенты теплообмена и серости зависят от типа и состояния поверхности грунта. Поверхность грунта поглощает только часть суммарной радиации равной  $aq(t)$ , где  $a = a(t, x, y)$  – доля энергии, ушедшая на нагрев грунта и в общем случае

зависящая от состояния атмосферы, угла падения солнечных лучей, т.е. широты местности и времени суток.

На боковых границах расчетной области используются граничные условия:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L_x} &= 0, \\ \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=L_y} &= 0, \\ \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L_z} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

которые при больших размерах  $\Omega$  не будут оказывать существенного влияния на решение. Здесь очень важной задачей является правильное определение размеров  $L_x$  и  $L_y$ , поскольку с увеличением этих размеров происходит и увеличение числа узлов расчетной сетки, что может привести к нехватке машинной памяти, а при малых числах  $L_x$  и  $L_y$  краевое условие (4) может оказывать существенное влияние на результаты численного моделирования. В ходе численных расчетов было установлено, что расчетную область можно выбрать следующим образом:  $L_x = 32$ ;  $L_y = 30$ ;  $L_z = 25$ . В качестве начального момента для компьютерного моделирования  $t_0$  возьмем февраль 1983 г., когда были получены первые температурные данные в термометрической скважине (рис. 3).

С использованием этих данных и выбором среднегодового тренда на потепление была проведена в работе [10] калибровка разработанного программного обеспечения по нахождению температурных полей в области  $\Omega$  для решения задачи (1)–(4). При численном решении использовалась экономичная схема сквозного счета [17] со сглаживанием разрывных коэффициентов в уравнении теплопроводности по температуре в окрестности фазового превращения. Схема сквозного счета характеризуется тем, что граница раздела фаз явно не выделяется и используются однородные разностные схемы. При этом теплота фазового превращения вводится с применением дельта-функции Дирака как сосредоточенная теплоемкость фазового перехода в коэффициент теплоемкости. Получаемая таким образом разрывная функция затем «распределяется» по температуре и не зависит от числа измерений и фаз.



Рис. 3. Температура в термометрической скважине в феврале 1983 г.

Несущая способность свай определялась с использованием российских строительных правил строительства на вечной мерзлоте, с учетом литологии грунта и температуры окружающего грунта.

**Результаты численных расчетов.** Для проведения численных расчетов была построена ортогональная расчетная сетка, сгущающаяся по определенному закону. Число узлов в расчетной сетке составило  $149 \times 193 \times 51 = 1\,466\,607$  узлов, шаг по времени – 4 ч. Счет 10 лет моделирования динамики изменения температурных полей в грунте в области Опоры № 1 на суперЭВМ занимает около четырех часов машинного времени. Таким образом, прогнозирование динамики температурного режима и несущей способности грунта до 2033 г. составляет около 16 ч машинного времени на суперЭВМ. На рисунке 4–5 приведены графики распределения температур на поверхности самой «проблемной» сваи 1, находящейся в южной части ростверка (рис. 1), в феврале и в августе соответственно.

На рисунке 6 приведен прогноз до 2033 г. изменения несущей способности сваи 1 в тс ( $1\text{ тс} = 9806,65\text{ Н}$ ). Динамика несущей способности представлена для одного годичного цикла в каждое десятилетие, красная линия – линия тренда снижения несущей способности. С начала экс-

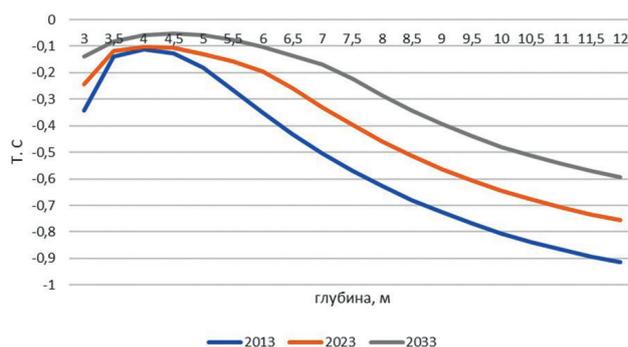


Рис. 4. Температура на поверхности сваи 1 в феврале 2013, 2023 и 2033 гг.

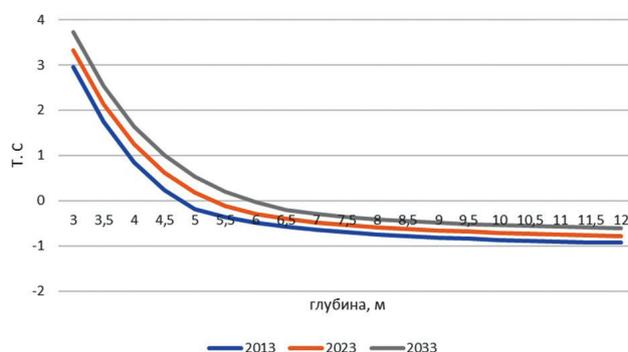


Рис. 5. Температура на поверхности сваи 1 в августе 2013, 2023 и 2033 гг.

плуатации моста в 1983 г. несущая способность снизилась в среднем на 55,6 % к 2023 г., а к 2033 г. предполагается снижение на 68,8 %.

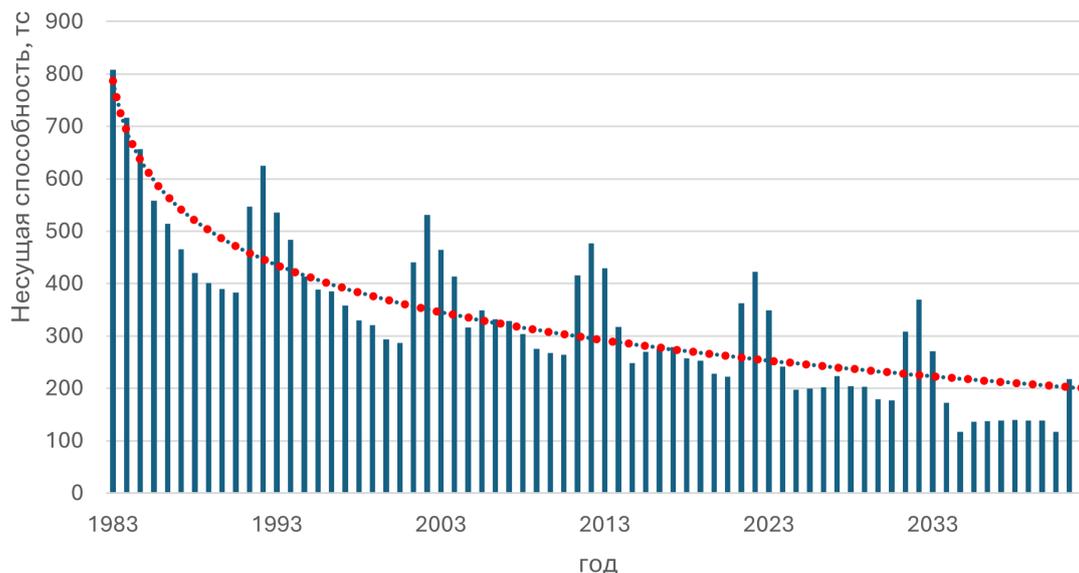


Рис. 6. Изменение несущей способности сваи 1 с 1983 по 2033 г.

**Заключение.** Были получены следующие результаты:

1. Разработаны модель и программное обеспечение для расчета температурных полей и несущей способности свай для опоры железнодорожного моста с учетом географических особенностей региона, климатических параметров, литологии грунта, предыстории развития температурных процессов в грунте с февраля 1983 г. и ежегодного тренда на потепление климата.

2. При компьютерном моделировании учитывалось расположение опоры относительно сто-

рон света для более адекватного учета солнечного излучения, а также учитывался снежный покров в зимнее время.

3. Проведены расчеты по определению динамики изменения несущей способности всех свай опоры до 2033 г. Высокая скорость снижения несущей способности свай требует проведения экстренных мероприятий, связанных с термостабилизацией грунта в основании аварийной опоры, или принятия решения о прекращении эксплуатации данного моста.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 24–21–00160.

#### Список литературы

1. Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G. et al. Thermal state of permafrost in Russia // *Permafrost Periglac. Process.* 2010. No. 21. P. 136 – 155.
2. Васильев А.А., Дроздов Д.С., Гравис А.Г., Никитин К.А. Дegradaция мерзлоты в ЯНАО. Результаты многолетнего мониторинга // *Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике: сб. тез. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Салехард, 8–12 ноября 2021 г.). Салехард, 2021. С. 78–80.*
3. Vasiliev A.A. [et al.] Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // *Environmental Research Letters.* 2020. Vol. 5. No. 4. P. 045001.
4. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Climate Change and Hazard Zonation in the Circum-Arctic Permafrost Regions // *Natural Hazards.* 2002. No. 26. P. 203–225.
5. Shiklomanov N.I. et al. Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: prognostic assessment based on GCM climate projections // *Geographical review.* 2017. Vol. 107. No. 1. P. 125–142.
6. Streletskiy D.A., Suter L.J., Shiklomanov N.I., Porfiriev B.N., Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // *Environmental Research Letters.* 2019. Vol. 14. No. 2. P. 025003.
7. Obu J. How much of the Earth's surface is underlain by permafrost? // *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2021. Vol. 126. No. 5. P. 2169–9003.
8. Filimonov M.Yu., Kamnev Y.K., Shein A.N., Vaganova N.A. Modeling the temperature field in frozen soil under buildings in the city of Salekhard taking into account temperature monitoring // *Land.* 2022. Vol. 11. No. 7. P. 1102.

9. Hongting Z., Yandong H., Guanli J., Qingbai W. Risk assessment of the crushed rock structure embankments of the Qinghai-Tibet Railway under a warming climate // *Cold Regions Science and Technology*. 2022. No. 196. P. 103509.
10. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Computer modelling of thermal interaction in the pile foundation system of a railway bridge support structure in permafrost // *Applied Mathematics, Modeling and Computer Simulation*. 2023. No. 42. P. 1057–1062.
11. Melnikov A., Gavrilov I., Zhang Z. Permafrost railroads of Eastern Siberia and the Russian far east: types and causes of contemporary deformations // *Innov. Infrastruct. Solut.* 2024. No. 9. P. 155.
12. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Thawing of permafrost during the operation of wells of North-Mukerkamyl oil and gas field // *J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys.* 2021. Vol. 14. No. 6. P. 795–804.
13. Raynolds MK. et al. Cumulative geoecological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska // *Glob. Change Biol.* 2014. No. 20. P. 1211–1224.
14. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V.E. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // *Nature communications*. 2018. Vol. 9. No. 1. P. 1–9.
15. Gryaznova E. Geotechnical monitoring to ensure reliability of construction and operation of buildings and structures // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. No. 365. P. 052014.
16. Kamnev Yu.K., Filimonov M.Yu., Shein A.N., Vaganova N.A. Automated monitoring the temperature under buildings with pile foundations in Salekhard: (Preliminary results) // *Geography. Environment. Sustainability*. 2021. Vol. 14. No. 4. P. 75–82.
17. Samarsky A.A., Vabishchevich P.N. *Computational Heat Transfer/ Vol. 2. The Finite Difference Methodology*. New York, Chichester: Wiley, 1995. 432 p.

## INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON THE SUSTAINABILITY OF CAPITAL CONSTRUCTION FACILITIES IN THE CRYOLITHOZONE

M.Yu. Filimonov<sup>1,2</sup>, N.A. Vaganova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University, Ekaterinburg

<sup>2</sup> Krasovskii institute of mathematics and mechanics, Ekaterinburg

fmy@imm.uran.ru, vna@imm.uran.ru

**Abstract.** The operation of railways in the permafrost zone is associated with certain safety requirements. For example, railway bridge supports are influenced by climatic and dynamic loads, which have to be considered when operating railways in such conditions. We consider a specific emergency support for a railway bridge across a river near Novy Urengoy city, which rests on 12 large-diameter concrete piles. The subsidence of this support exceeds the permissible parameters, which can lead to an emergency when trains move across the bridge, the consequences of which can be both environmental problems and large economic losses.

The bearing capacity of piles is affected by the dynamics of changes in the temperature regime of the soil around the piles. To describe the dynamics of changes in temperature fields in the soil, the proposed mathematical model considers the history of changes in soil temperature, starting from 1983, taking into account the temperature trend of climate warming characteristic of this region. The model also includes consideration of solar radiation in the summer months and the presence of snow cover in winter.

The numerical calculations carried out made it possible to give a long-term forecast for the development of emergency situations at such facilities, as well as to develop recommendations for their prevention and minimization of consequences.

**Keywords:** permafrost, climate change, mathematical modeling, bearing capacity.

### References

1. Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G. et al. 2010. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost Periglac. Process.* 21: 136–155.
2. Vasiliev A.A. et al. 2021. Permafrost degradation in YANAO. Results of the long-term monitoring. *Modern studies of cryosphere transformation and geotechnical safety, issues for construction in the Arctic.* Salekhard: 78–80.
3. Vasiliev A.A. et al. 2020. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic. *Environmental Research Letters.* 5(4): 045001.
4. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov, N.I. 2002. Climate Change and Hazard Zonation in the Circum-Arctic Permafrost Regions. *Natural Hazards.* 26: 203–225.
5. Shiklomanov N.I. et al. 2017. Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: prognostic assessment based on GCM climate projections. *Geographical review.* 107(1): 125–142.
6. Streletskiy D.A., Suter L.J., Shiklomanov N.I., Porfiriev B.N., Eliseev D.O. 2019. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environmental Research Letters.* 14(2): 025003.
7. Obu J. 2021. How much of the Earth's surface is underlain by permafrost? *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 126(5): 2169–9003.
8. Filimonov M.Yu., Kamnev Y.K., Shein A.N., Vaganova N.A. 2022. Modeling the temperature field in frozen soil under buildings in the city of Salekhard taking into account temperature monitoring. *Land.* 11(7): 1102.
9. Hongting Z., Yandong H., Guanli J., Qingbai W. 2022. Risk assessment of the crushed rock structure embankments of the Qinghai-Tibet Railway under a warming climate. *Cold Regions Science and Technology.* 196: 103509.
10. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. 2023. Computer modelling of thermal interaction in the pile foundation system of a railway bridge support structure in permafrost. *Applied Mathematics, Modeling and Computer Simulation.* 42: 1057–1062.
11. Melnikov A., Gavrilov I., Zhang Z. 2024. Permafrost railroads of Eastern Siberia and the Russian far east: types and causes of contemporary deformations. *Innov. Infrastruct. Solut.* 9: 155.
12. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. 2021. Thawing of permafrost during the operation of wells of North-Mukerkamyl oil and gas field. *J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys.* 14(6): 795–804.
13. Reynolds M.K. et al. 2014. Cumulative geocological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska. *Glob. Change Biol.* 20: 1211–1224.
14. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V.E. et al. 2018. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. *Nature communications.* 9(1): 1–9.
15. Gryaznova E. 2018. Geotechnical monitoring to ensure reliability of construction and operation of buildings and structures. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 365: 052014.
16. Kamnev Yu.K., Filimonov M. Yu., Shein A.N., Vaganova N.A. Automated monitoring the temperature under buildings with pile foundations in Salekhard: (Preliminary Results). *Geography. Environment. Sustainability.* 2021. 14(4): 75–82.
17. Samarsky A.A., Vabishchevich P.N. 1995. *Computational Heat Transfer. Vol. 2. The finite difference methodology.* New York, Chichester; Wiley: 432 p.