

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-16

**ПОСТРОЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТОК ДЛЯ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ****Н. А. Ваганова^{1,2,a}, И. М. Филимонова^{2,b}**¹ *Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского, г. Екатеринбург, Российская Федерация*² *Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Российская Федерация*^a *ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6966-9050>, vna@imm.uran.ru*^b *ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2800-9237>, irina.filimonova4@mail.ru*

Аннотация: в работе предложен новый подход к построению элементно-адаптивных расчетных сеток, сгущающихся к элементам конструкций свайного фундамента. Построенные расчетные сетки ориентированы на использование в численных алгоритмах для проведения компьютерного моделирования температурных полей в грунте в области свайных фундаментов зданий северных городов, находящихся в криолитозоне. Особенностью таких свайных фундаментов является наличие в них разномасштабных элементов, таких как сваи и сезонно-действующие охлаждающие устройства. Присутствие таких элементов создает проблемы, связанные с построением расчетной сетки. Качество новой расчетной сетки проверялось путем сравнения численных данных компьютерного моделирования с данными температурного мониторинга в термометрической скважине для конкретного жилого здания в городе Салехарде. Построенная расчетная сетка также сравнивалась с использованной ранее геометрически-адаптивной сеткой с выделенными зонами сгущения узлов. Результаты численных экспериментов выявили преимущество новой расчетной сетки перед старой. Было показано, что сетки, построенные с помощью нового подхода, позволяют повысить точность численных расчетов по нахождению тепловых полей в грунте в области свайного фундамента, уменьшить используемую машинную память и время счета.

Ключевые слова: моделирование, свайный фундамент, вечная мерзлота, несущая способность.**Благодарности:** работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-21-00160.

Для цитирования: Ваганова Н. А., Филимонова И. М. Построение и оптимизация сеток для расчета несущей способности свайных фундаментов зданий в зоне вечной мерзлоты. *Успехи кибернетики*. 2024;5(4):116–121. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-16.

Поступила в редакцию: 15.10.2024.**В окончательном варианте:** 20.11.2024.**MESH CONSTRUCTION AND OPTIMIZATION FOR THE CALCULATION OF THE
BUILDING FOUNDATION BEARING CAPACITY IN PERMAFROST AREAS****N. A. Vaganova^{1,2,a}, I. M. Filimonova^{2,b}**¹ *Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Yekaterinburg, Russian Federation*² *Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation*^a *ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6966-9050>, vna@imm.uran.ru*^b *ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-2800-9237>, irina.filimonova4@mail.ru*

Abstract: this study proposes a new approach to constructing element-adaptive numerical meshes that refine around the pile foundation components. The meshes are used in numerical algorithms for the simulation of temperature fields in the soil around pile foundations in the permafrost area. Such pile foundations include multi-scale elements, such as the piles and coolers. It poses challenges with the mesh construction. The mesh quality was tested by comparing the simulation results with the temperature monitoring in a thermometric well for a specific residential building in Salekhard. The mesh was also compared with the previously used adaptive mesh with selected refinement areas. The simulation results showed the advantages of the new mesh. It improves the accuracy of simulating soil thermal fields around pile foundations while reducing the requirements for computer memory and computation time.

Keywords: simulation, pile foundation, permafrost, bearing capacity.**Acknowledgements:** the paper is supported by the RSF, project no. 24-21-00160.

Cite this article: Vaganova N. A., Filimonova I. M. Mesh Construction and Optimization for the Calculation of the Building Foundation Bearing Capacity in Permafrost Areas. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(4):116–121. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-16.

Original article submitted: 15.10.2024.

Revision submitted: 20.11.2024.

Введение

Большую часть территории России занимает вечная мерзлота. Это преимущественно северные и северо-восточные районы, а также Восточная Сибирь и Забайкалье [1, 2]. Эту особенность важно учитывать при проведении строительных, геологоразведочных и других работ на Севере. Строительство зданий и инженерных сооружений, в частности, возведение свайных фундаментов в этих местах, имеет свою специфику из-за свойств мерзлого грунта, испытывающего техногенные и климатические воздействия [3, 4]. Мерзлыми называются грунты с отрицательной температурой, в которых часть поровой воды находится в замерзшем состоянии (в виде кристаллов льда). Если грунт находится в мерзлом состоянии в течение трех лет и более, то его называют вечномерзлым. Вечномерзлые грунты представляют собой ярко выраженные структурно-неустойчивые грунты, так как при их оттаивании происходят просадки в результате нарушения природной структуры [5–8]. Различные сценарии изменения климата показывают, что глобальное потепление может усилиться в арктических приполярных регионах, что может привести к значительной деградации вечной мерзлоты, чему способствуют и техногенные воздействия на территориях северных городов [9] или на различных объектах инфраструктуры [10]. Большинство объектов криолитозоны строятся и эксплуатируются по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов основания, в частности, с использованием свайных фундаментов. При строительстве жилых домов для уменьшения теплового влияния зданий на многолетнемерзлые породы применяется технология проветриваемого подполья. Проветриваемое подполье — это открытое пространство под зданием между поверхностью грунта и перекрытием первого (цокольного, технического) этажа. Кроме свай, в проветриваемом подполье могут располагаться технические коммуникации, система температурного мониторинга и сезонно-действующие охлаждающие устройства (СОУ), используемые для поддержания несущих свойств грунта. Таким образом, проблема моделирования устойчивости свайных фундаментов и долгосрочное прогнозирование температурных изменений являются актуальными задачами и имеют особое значение для развития инфраструктуры северных городов, решения проблемы охраны окружающей среды, безопасности, экономии затрат и улучшения эксплуатационной надежности инженерных сооружений.

Методы математического моделирования широко используются при проектировании зданий и инженерных сооружений в криолитозоне [9, 11]. Для моделирования тепловых полей в грунте эффективными методами являются численные методы, в частности метод конечных разностей [12, 13]. Важным этапом моделирования является дискретизация расчетной области и подготовка данных. Особенность зоны свайного фундамента в том, что он состоит из множества (несколько сотен) различных объектов: свай и сезонно-действующих охлаждающих устройств [14], которые должны быть адекватно отражены в модели всего проветриваемого подполья. В статье предложен алгоритм построения расчетных сеток и их оптимизация для задач, связанных с моделированием тепловых полей под жилыми домами в северных городах, расположенных в криолитозоне. Отладка методики построения расчетной сетки проводится на конкретном жилом здании (здание I) в городе Салехарде. В работах [11, 15] дискретизация расчетной области для моделирования здания I производилась вручную. Разработка алгоритма и программы для автоматизации построения расчетной сетки позволила эффективнее обрабатывать большие объемы данных, увеличить точность вычислений и сократить время вычислений.

Постановка задачи

Для прогнозирования динамики изменения несущей способности грунта в области свайного фундамента требуется определить динамику изменения температуры этого грунта с помощью метода компьютерного моделирования. В работе [11] представлена математическая модель распространения тепловых полей в области свайного фундамента с учетом данных температурного мониторинга и особенностей свайного фундамента здания I. План прямоугольной поверхности (18 м × 42 м) проветриваемого подполья (ПП) представлен на рис. 1.

В свайный фундамент здания I входит 238 квадратных бетонных свай (300 мм) длиной 10 метров (фиолетовые квадраты на рис. 1) и 190 СОУ, являющихся трубами диаметром 38 мм и длиной

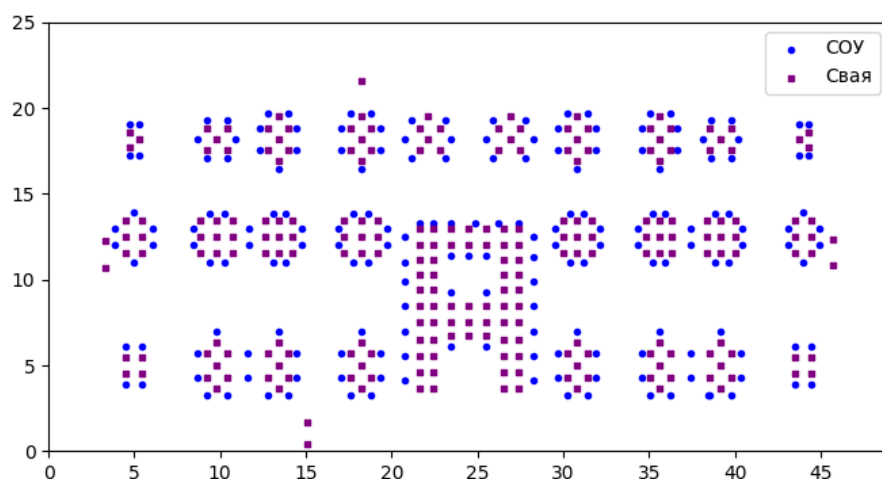


Рис. 1. Расположение свай и СОУ на поверхности ПП здания I

10 метров (синие кружки на рис. 1). Такие разномасштабные элементы свайного фундамента вносят определенную трудность, связанную с построением расчетной сетки и проведением на ней численных расчетов. Если строить расчетную сетку (РС) без предварительной обработки исходных данных (без оптимизации), то получается РС, представленная на рис. 2.

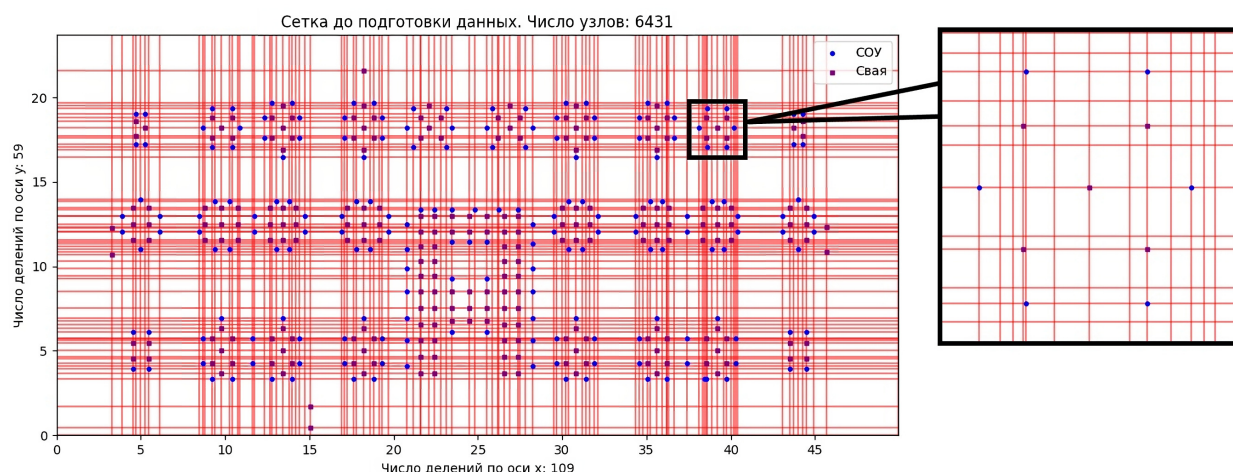


Рис. 2. РС на поверхности ПП здания I без оптимизации

Элементы свайного фундамента, находящиеся на очень близком расстоянии, будут задавать несколько линий, что приведет к увеличению числа узлов и расчетного времени при компьютерном моделировании. Поэтому необходимо подвинуть некоторые СОУ на более выгодное положение, но так, чтобы это не привело к существенной погрешности. Сваи не перемещаются, из предположения, что их координаты должны оставаться точными. Существует множество способов задания РС. Равномерная РС не подходит для этой задачи, так как, чтобы достичь необходимой точности в зонах изменения тепловых полей, в частности, вблизи источников тепла или холода, нужно уменьшать шаг сетки, тем самым увеличивая или перераспределяя число узлов в зонах, не представляющих такого интереса, что, в свою очередь, приведет к увеличению времени расчета.

Построение РС

Чтобы подготовить данные для дальнейшей работы, нужно выбрать максимальное расстояние, на которое можно передвигать СОУ (в примере 0.3 метра). Далее находятся группы СОУ, которые стоят достаточно близко по одной из координат. Все СОУ из выбранной группы передвигаются на одну линию. Эта линия задана либо средним значением координат СОУ из группы, либо, если есть достаточно близкая свая, координатой этой сваи. Для здания I из сетки, представленной на рис. 2, полученный алгоритм строит следующую РС (рис. 3):

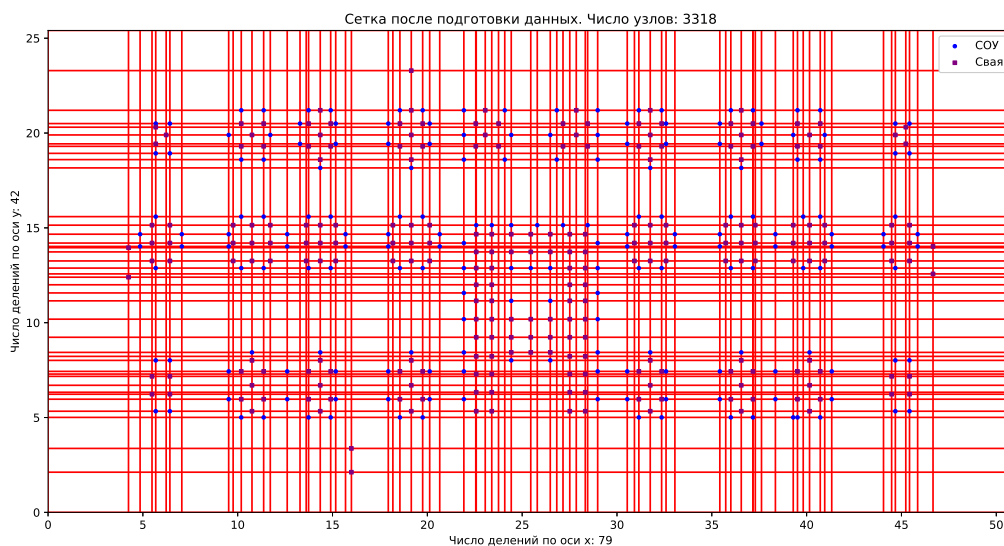


Рис. 3. РС на поверхности ПП здания I с оптимизацией

На рис. 3 общее число узлов уменьшилось на 3113 (17 узлов по вертикали, 30 — по горизонтали). Для увеличения точности расчетов требуется более подробная РС. Новые деления сетки формируются с помощью вспомогательной функции. Для каждого отрезка осей применяется функция, которая преобразует равномерное разбиение данного отрезка в неравномерное, при этом обеспечивая сгущение точек разбиения ближе к его концам. На рис. 4 представлена РС, построенная данным методом.

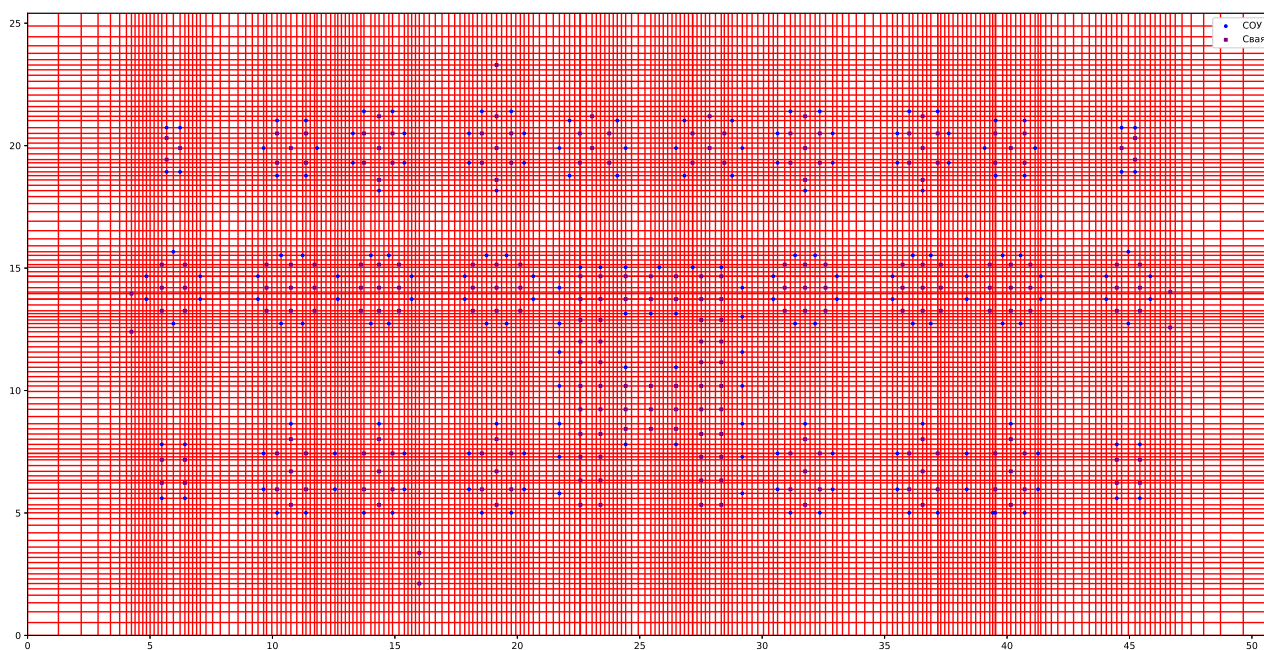


Рис. 4. РС с 101242 узлами на поверхности ПП здания I

Качество построенной РС было протестировано при проведении численных расчетов по моделированию температурных полей в грунте в области свайного фундамента здания I.

Результаты численных расчетов

На рис. 5 для тестирования РС рис. 4 приведены результаты сравнения температурного мониторинга в термометрической скважине в осенний и летний периоды под зданием I с результатами компьютерного моделирования с использованием этой РС.

На рис. 6 для тестирования РС рис. 4 приведены результаты сравнения температурного мониторинга в термометрической скважине в весенний и летний периоды под зданием I с результатами компьютерного моделирования с использованием этой РС.

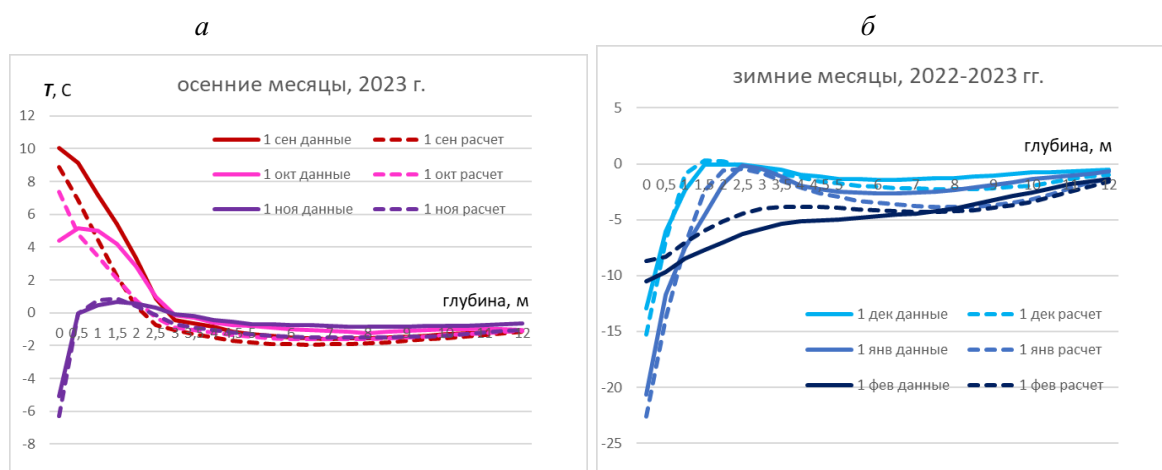


Рис. 5. Сравнение компьютерного моделирования с использованием РС рис. 4 с данными температурного мониторинга для здания I (а — осенью 2023 года, б — зимой 2023 года)

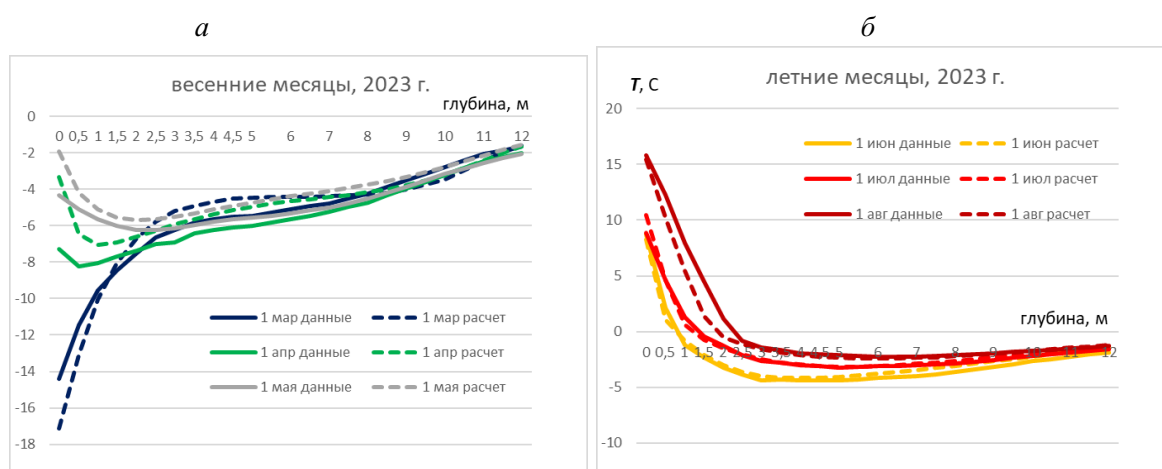


Рис. 6. Сравнение компьютерного моделирования с использованием РС рис. 4 с данными температурного мониторинга для здания I (а — весной 2023 года, б — летом 2023 года)

Заключение

В работе [11] численные расчеты проводились на геометрически-адаптивных сетках с выделенными зонами сгущения узлов. Новые РС, использованные в настоящей работе, являются элементарно-адаптивными сетками, сгущающимися к элементам конструкций свайного фундамента. Сравнение численных расчетов с использованием новой РС (рис. 4), приведенное на рис. 5 и рис. 6, с данными термометрического мониторинга в термометрической скважине под зданием I показало хорошее совпадение этих данных. Использование новых элементарно-адаптивных РС по сравнению с геометрически-адаптивными РС с выделенными зонами сгущения узлов при проведении компьютерного моделирования тепловых полей в грунте позволило:

1. Улучшить калибровку модели при оценке средних отклонений рассчитанных значений температур и данных измерений на глубине от 0 до 8 м в среднем по году на 20%, для периода с декабря по апрель на 23%, с июня по сентябрь на 4.8%.
2. Для расчета несущей способности свай на 27% сократить диапазон оценок для максимального и минимального значения несущих способностей свай.

Таким образом, предложенный подход к построению расчетных сеток в зоне свайного фундамента позволяет проводить более точные расчеты с более эффективным использованием вычислительных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Romanovsky V. E., Drozdov D. S., Oberman N. G., Malkova G. V. et al. Thermal State of Permafrost in Russia. *Permaf. Periglac. Process.* 2010;21:136–155. DOI: 10.1002/ppp.683.

2. Obu J., Westermann S. et al. Northern Hemisphere Permafrost Map Based on TTOP Modelling for 2000–2016 at 1 km² Scale. *Earth-Science Reviews*. 2019;193:136–155. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023.
3. Melnikov V. P., Osipov V. I., Brushkov A. V. et al. Development of Geocryological Monitoring of Natural and Technical Facilities in the Regions of the Russian Federation Based on Geotechnical Monitoring Systems of Fuel and Energy Sector. *Earth's Cryosphere*. 2022;26(4):3–18. DOI: 10.15372/KZ20220401.
4. 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;107(1):125–142. DOI: 10.1111/gere.12214.
5. Suter L., Streletskiy D., Shiklomanov N. Assessment of the Cost of Climate Change Impacts on Critical Infrastructure in the Circumpolar Arctic. *Polar Geography*. 2019;42(12):1–20. DOI: 10.1080/1088937X.2019.1686082.
6. Streletskiy D. A. et al. Assessment of Climate Change Impacts on Buildings, Structures and Infrastructure in the Russian Regions on Permafrost. *Environ Res Lett*. 2019;14(2):025003. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6.
7. Melnikov V. P., Osipov V. I., Brouchkov A. V. et al. Past and Future of Permafrost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure. *Energies*. 2022;15:3190. DOI: 10.3390/en15093190.
8. Scafetta N. Impacts and Risks of “Realistic” Global Warming Projections for the 21st Century. *Geosci Front*. 2024;15(2):101774. DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101774.
9. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J. et al. Degrading Permafrost Puts Arctic Infrastructure at Risk by Mid-Century. *Nat. Commun*. 2018;9:5147. DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4.
10. Filimonov M. Y., 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;42:1057–1062. DOI: 10.3233/ATDE231047.
11. Filimonov M. Y., 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;11(7):1102. DOI: 10.3390/land11071102.
12. Samarsky A. A., Vabishchevich P. N. *Computational Heat Transfer, Volume 2, The Finite Difference Methodology*. New York, Chichester: Wiley; 1995. 432 p.
13. Yanenko N. N. *The Method of Fractional Steps (The Solution of Problems of Mathematical Physics in Several Variables)*. Berlin: Springer-Verl.; 1971. 160 p.
14. Pustovoyt G. P. On the Potential of Seasonal In-Ground Cooling Devices. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2005;42(4):142–146. DOI: 10.1007/s11204-005-0040-9.
15. Filimonov M. Yu., Vaganova N. A., Shamugia D. Zh., Filimonova I. M. Computer Modeling of Temperature Fields in the Soil and the Bearing Capacity of Pile Foundations of Buildings on Permafrost. *J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys*. 2024;17(5):622–631. Режим доступа: <https://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/153259/Filimonov.pdf?sequence=1>.