

Развитие автоматизированной системы температурного мониторинга мёрзлых грунтов в основании капитальных объектов в г. Салехард

Шейн А.Н.^{1,2}, Филимонов М.Ю.^{3,4}, Ваганова Н.А.^{3,4}, Камнев Я.К.¹*

¹ ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», г. Салехард, Российская Федерация

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³ Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН,
г. Екатеринбург, Российская Федерация

⁴ Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

* e-mail: a.n.shein@yandex.ru

Аннотация. В работе описана разрабатываемая с 2018 года система автоматизированного контроля температуры мёрзлых грунтов в основании капитальных объектов в г. Салехард. Совместно с Кураков С.А. (г. Томск) разработано термометрическое оборудование, позволяющее удалённо управлять регистрацией и передающее температуру грунтов со скважин на сервер. Создан портал сбора и визуализации данных, а для последующей обработки температурных показаний разработана программа для компьютерного моделирования трехмерных нестационарных тепловых полей в грунте во всей области свайного фундамента с учётом геологического строения. Сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными показали хорошее совпадение. Разработанное программное обеспечение позволяет оценить изменения температуры грунтов при различных сценариях изменения климата. Такие позволят предупредить возможные аварийные ситуации.

Ключевые слова: мерзлота, температурный мониторинг, компьютерное моделирование, потепление климата

Development of an automated system for temperature monitoring of permafrost at the base of buildings in Salekhard

Shein A.N.^{1,2}, Filimonov M.Yu.^{3,4}, Vaganova N.A.^{3,4}, Kamnev Ya.K.¹*

¹ Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, Salekhard, Russian Federation

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

³ Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russian Federation;

⁴ Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

* e-mail: a.n.shein@yandex.ru

Abstract. A system of automatic temperature monitoring of permafrost at the base of capital facilities in Salekhard, which has been developed since 2018 are described in the paper. Together with Kurakov S.A. (Tomsk), thermometric equipment has been developed that allows remote control of registration and transmits soil temperature from wells to the server. A data collection and visualization portal has been created. To process temperature data, a program has been developed for computer modeling of three-dimensional non-stationary thermal fields in the ground in the entire area of the pile foundation,

considering the geological structure. The developed software makes it possible to estimate changes in soil temperature under various climate change scenarios. Such estimates allow us to prevent possible emergencies.

Keywords: permafrost, thermometry monitoring, computer modelling, climate warming

Введение

Большее четверти верхнего слоя земной коры Северного полушария находится в мёрзлом состоянии. Многолетнемёрзлые грунты в России занимают 60–65% территории или 11 млн. км² [1, 2]. При этом сегодня российская Арктика развивается быстрыми темпами. Большинство жилых зданий и промышленных сооружений в зоне вечной мерзлоты возводятся по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов оснований. Однако, при строительстве объектов и дальнейшей эксплуатации используются устаревшие нормы и правила [3-5]. Кроме того, эксплуатационные нормы носят рекомендательный характер и зачастую не выполняются эксплуатирующими организациями. В первую очередь это касается температуры, контроль которой необходим для подтверждения требуемой несущей способности грунтов основания и предотвращения опасных мерзлотных геологических процессов (термокарст, просадка, пучение и др.).

Для безопасной эксплуатации зданий и сооружений в зоне многолетних мерзлых грунтов в ЯНАО с 2018 г. разрабатывается система автоматизированного температурного мониторинга [6, 7]: термометрическое оборудование, портал сбора и визуализации данных и программа для расчёта нестационарных тепловых полей под зданиями со свайными фундаментами. С 2018 г. для отработки и оптимизации методики под объектами капитального строительства в г. Салехард было пробурено и оборудовано термометрическими косами около 80 скважин. Плотная сеть термометрических скважин позволяет получить уникальные данные, которые можно использовать для численного моделирования и прогнозирования температуры грунта во всей области расположения свайного фундамента.

Методика и оборудование

Мониторинга за температурой грунтов осуществляется с использованием оборудованных термометрических скважин в вентилируемом подполье на глубину не менее фактической длины сваи под данным жилым сооружением (10 метров и более). Бурение проходило с отбором образцов пород для анализов и геологическим описанием, что позволило с некоторым приближением восстановить теплофизические характеристики грунта в областях свайных фундаментов и построить трёхмерные физико-геологические модели оснований исследуемых объектов. Построенные модели необходимы для дальнейших расчётов температурных полей.

Пробуренные по равномерной сетке скважины оборудованы термодатчиками (шаг термодатчиков 0.5 м до глубины 5 м, далее 1 м), подключёнными к системам автоматического мониторинга температуры САМ-мерзлота (производство ИП Кураков Сергей Анатольевич, город Томск). Оборудование контролируется удалённо, в том числе настраивается период записи показаний температуры и передачи их на сервер. Установленные комплекты успешно прошли тестирование

и были запрограммированы на период измерения 3 ч, в соответствии с периодом измерения ближайшей метеостанции в аэропорту г. Салехард. Период передачи данных на сервер – 12 ч. Погрешность калибровки датчиков измерения температуры: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. Разрешающая способность измерения температуры: 0.07°C .

Настроенное оборудование регистрирует и передаёт температуру грунтов основания здания в единую базу на удалённый сервер при помощи GSM модуля. Данные дублируются на специально разработанный портал <https://monitoring.arctic.yanao.ru> [8] для сбора и визуализации данных. Для специалистов и всех заинтересованных лиц предусмотрен полный доступ к ресурсу, где на базе Яндекс.Карт отображаются объекты мониторинга с информацией по расположению скважин, возможностью отображения в виде графиков и экспорта полученных данных.

Результаты мониторинга под зданием I

Рассмотрим результаты мониторинга температуры грунтов под зданием I в г. Салехард, который оснащён термометрическим оборудованием в 2020 г. Под зданием I пробурено 16 скважин и установлено 4 станции САМ-мерзлота (№49-52). Схема расположения термометрического представлена на Рисунок 1.

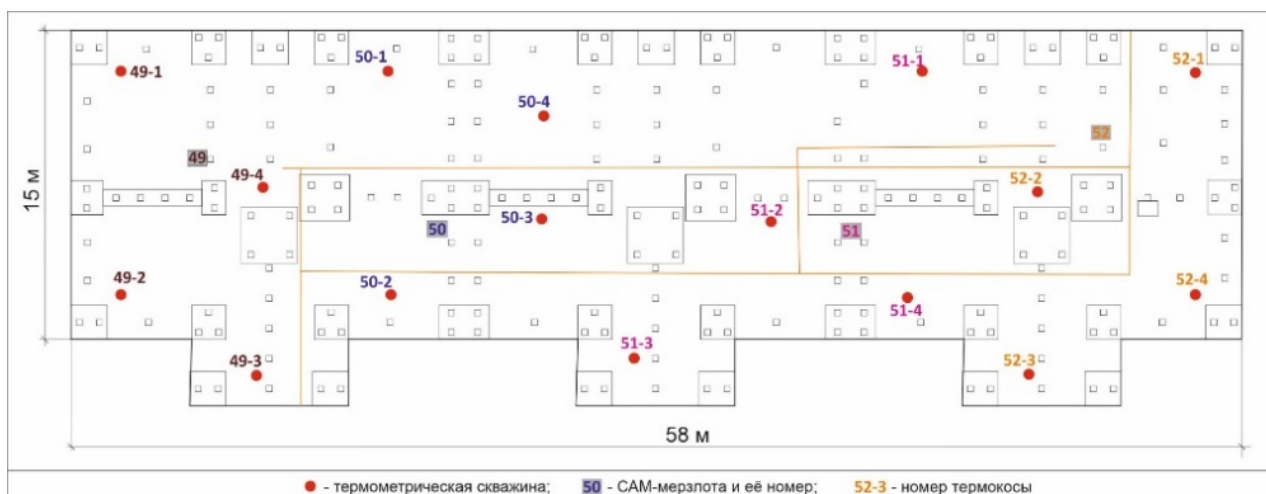


Рис. 1. Схема расположение термометрического оборудования в скважинах под зданием I

На рисунке 2 представлены средненедельные температуры грунтов, полученные в основании фундамента здания I в мае и ноябре 2021 г. (рисунок 2, сплошные и пунктирные линии соответственно). Май соответствует началу нагревания грунтов основания, ноябрь – охлаждения. За зимний период температура мерзлоты понизилась во всех скважинах на всех глубинах, но значительное промерзание произошло до 6 м: минус 6-8 $^{\circ}\text{C}$ (рисунок 2, сплошные линии). Летнее тепло прогрело породы в основании здания I до минус 1-2 $^{\circ}\text{C}$.

Можно констатировать, что промерзание происходило по всей длине свай (заложенные проектом 10 м). Причём промерзание/нагревание происходит прак-

тически по всей площади равномерно: минус 6-8 °С зимой и минус 1-2 °С летом. Анализ всех данных говорит о том, что в разные месяцы наблюдается однородная слоистая картина. В основании фундамента здания I проблемных/тёплых зон не выявлено. Исходя из полученных температурных данных, можно сделать вывод, что, грунты находятся в мёрзлом состоянии.

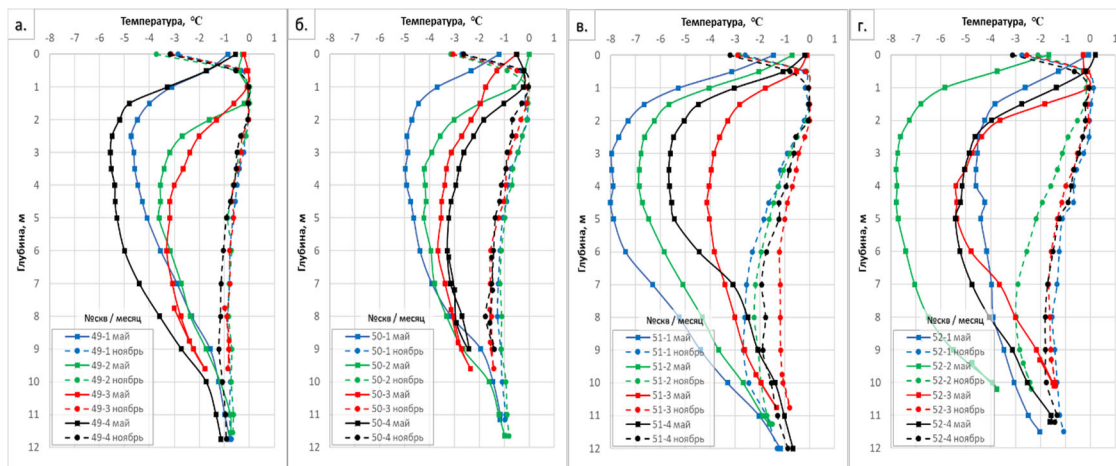


Рис. 2. Средненедельные температуры грунтов, полученные в основании фундамента здания I в мае и ноябре 2021 г.

Отметим, что на данном объекте произошло за наблюдаемый период несколько коммунальных аварий (прорывы канализации и труб водоснабжения), которые хорошо идентифицируются на температурных данных (рисунок 1.24, эллипсы): происходит резкий скачок температуры на датчиках, установленных на уровне земли (поверхности подполья). Таким образом, сеть мониторинга позволяет фиксировать подобные температурные скачки, а совершенствование программного обеспечения позволит настроить автоматическое оповещение заинтересованных сторон о таких авариях.

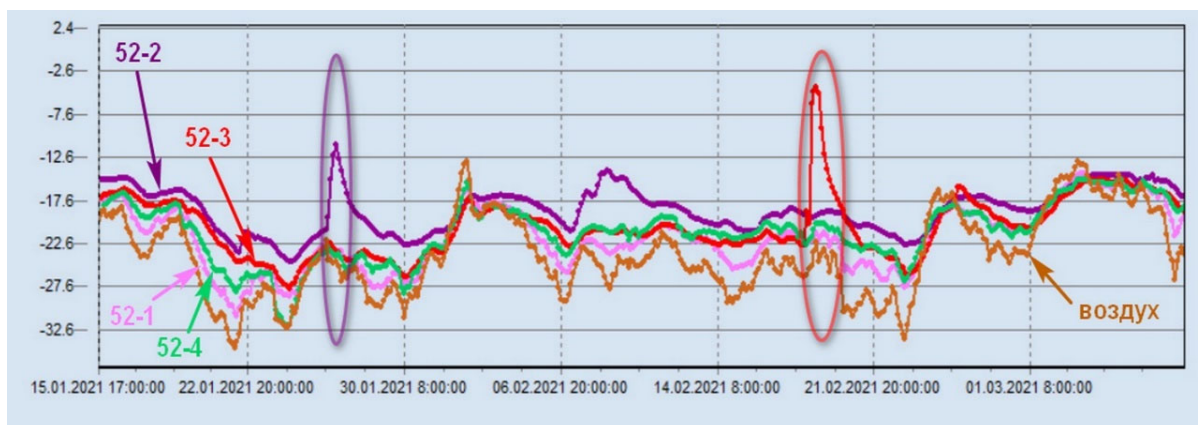


Рис. 3. Пример выявления коммунальных аварий по нулевым датчикам термокос, установленных в основании фундамента здания I. Места аварий обозначены эллипсами

Численное моделирование

Для моделирования тепловых полей в мерзлых грунтах в основании свайных фундаментов зданий в северных городах, следует учитывать различные климатические и физические факторы. К первой группе факторов относится, сезонное изменение температуры воздуха, приводящее к периодическому протаиванию (промерзанию) грунта, снежный покров, учет солнечного излучения в случае необходимости и т.п. Ко второй группе факторов относятся теплофизические параметры грунтов, которые могут меняться при изменении температуры. Для полного моделирования тепловых полей в расчетной области, содержащей свайный фундамент, следует учитывать геометрические места расположения свай, их размеры, наличие сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ) и возможные источники тепла, выявляемые в ходе мониторинга с помощью термометрических скважин.

На основе известных алгоритмов и моделей [9-11] реализована программа TИPFIS для расчета нестационарных тепловых полей под зданиями со свайными фундаментами в зоне распространения многолетнемёрзлых грунтов [7, 12, 13]. Численный алгоритм, реализованный в программе, учитывает данные мониторинга температуры грунта и технические особенности конкретного свайного фундамента. Данные, получаемые при мониторинге, были использованы для тестирования разработанной программы [13].

В результате численных экспериментов установлено, что при проведении расчетов температурных полей необходимо использовать среднесуточную температуру воздуха на основании данных температурного мониторинга и учитывать всю историю эксплуатации свайного фундамента, в первую очередь работу СОУ. При перечисленных условиях результаты численных расчетов с хорошей точностью совпадают с экспериментальными данными.

Зная тепловое поле во всей области свайного фундамента можно определить температуру на поверхности свай и используя действующий свод строительных правил [3], можно получить в некотором приближении несущую способность элементов фундамента. Кроме того, разработанное программное обеспечение позволяет оценить изменения температуры грунтов при различных сценариях изменения климата, что позволит предупредить возможные аварийные ситуации.

Заключение

Разработана система автоматизированного контроля температуры грунтов оснований объектов капитального строительства в г. Салехард, включающая приборную базу, портал сбора и визуализации данных и программу для расчета нестационарных тепловых полей под зданиями со свайными фундаментами в зоне распространения многолетнемёрзлых грунтов.

За 2021 г. в основании фундамента здания I проблемных/тёплых зон не выявлено. Исходя из полученных температурных данных, можно сделать вывод, что, грунты находятся в мёрзлом состоянии.

Система мониторинга позволяет фиксировать температурные скачки, связанные с коммунальными авариями, а совершенствование программного обеспечения позволит настроить автоматическое оповещение заинтересованных сторон о таких авариях.

Установлено, что при компьютерном моделировании необходимо использовать среднедневную температуру и учитывать не менее 3 предшествующих лет функционирования сезоннодействующих охлаждающих устройств в зоне свайного фундамента.

Благодарности

Авторы благодарят Куракова С.А. за разработку, совершенствование и обслуживание термометрического оборудования станций САМ-мерзлота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brown J., Ferrians O.J., Heginbottom J.A. and Melnikov E.S. International Permafrost Association Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions. // U.S. Geological Survey Circum-Pacific Map Series, Map CP-45. Scale 1:10,000,000. – 1997.
2. Brown, J., O.J. Ferrians, Jr., J.A. Heginbottom, and E.S. Melnikov. 1998, revised February 2001. Circum-arctic map of permafrost and ground ice conditions. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology. Digital media.
3. СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659326> (дата обращения 15.03.2022 г.)
4. Постановление Госстроя РФ от 27.09.2003 N 170 «Об утверждении Правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда» [Электронный ресурс] / КонсультантПлюс: <http://www.consultant.ru/> URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_44772/ (дата обращения 15.03.2022)
5. Шеин, А. Н. Обзор научных и производственных работ по изучению многолетнемёрзлых пород в естественных и антропогенных условиях / А. Н. Шеин, Я. К. Камнев // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2020. – № 3(108). – С. 42–50. DOI: 10.26110/ARCTIC.2020.108.3.007
6. Громадский А.Н. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномёрзлых грунтов под зданиями г. Салехард / А.Н. Громадский, С.В. Арефьев, Н.Г. Волков, Я.К. Камнев, А.И. Синицкий // Научный вестник ЯНАО. – 2019. – №3. – С. 17–21. DOI: 10.26110/ARCTIC.2019.104.3.003
7. Kamnev Y.K., Filimonov M.Y., Shein A.N., Vaganova N.A. Automated Monitoring The Temperature Under Buildings With Pile Foundations In Salekhard (Preliminary Results). GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. 0; <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-021>
8. System of automated geocryological monitoring [online] – 2021. Available at: <https://monitoring.arctic.yanao.ru/> (Accessed 15 Feb. 2021 in Russian).
9. Samarsky, A.A.; Vabishchevich P.N. Computational Heat Transfer // The Finite Difference Methodology; New York: Chichester, Wiley, 1995. – Vol. 2.
10. Vaganova, N.A.; Filimonov, M.Yu. Simulation of Cooling Devices and Effect for Thermal Stabilization of Soil in a Cryolithozone with Anthropogenic Impact. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2019. – Vol. 11386, – P. 580–587. DOI: 10.1007/978-3-030-11539-5_68
11. Vaganova, N.; Filimonov, M. Simulation of freezing and thawing of soil in Arctic regions. IOP Conf. Ser.: Earth Environ, 2017. – Vol. 72. – 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/72/1/012005
12. Н.А. Ваганова, М.Ю. Филимонов, Я.К. Камнев, А.Н. Шеин Расчет нестационарных температурных полей в зоне свайного фундамента зданий с учетом температурного мониторинга // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Под ред. В.П. Мельникова и М.Р. Садуртдинова. – Салехард, 2021. – С. 75–77.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660516. – М.: Роспатент, 28.06.2021. URL: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2021660516&TypeFile=html (дата обращения 17.09.2021).