

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. № 4. (121). С. 55-71.

Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. № 4. (121). P. 55-71.

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 550.822: 504.05: 624.131.3

doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.004

ИЗУЧЕНИЕ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОД ЗДАНИЯМИ НА ЗАСТРОЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

*Антон Сергеевич Губарев¹, Антон Иванович Сеницкий²,
Владимир Федорович Ребенков³*

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

^{2,3}Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

¹antongubareff@yahoo.com

²ASinitskii@yanao.ru

³VFRebenkov@yanao.ru

Аннотация. В статье представлены материалы геотехнического обследования аварийного капитального здания тира, который является важным спортивным сооружением для города Салехарда. Сооружение построено в 2000 г. с использованием грунтов основания в мерзлом состоянии. В процессе эксплуатации объекта были выявлены существенные деформации строительных конструкций, в т.ч. массовое распространение продольных, диагональных трещин с раскрытием как в свайном фундаменте, так и в самом здании. В работе проведен ретроспективный анализ возможных инженерно-геокриологических условий в период строительства сооружения, а также рассмотрены причины, повлиявшие на их изменения.

Ключевые слова: многолетнемерзлый грунт, температура грунтов, свайный фундамент, проветриваемое подполье, геотехнический мониторинг.

Цитирование: Губарев А.С., Синицкий А.И., Ребенков В.Ф. Изучение специфических факторов формирования температурного поля под зданиями на застроенной территории// Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (121). № 4. С. 55–71. Doi 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.004.

Original article

INVESTIGATION OF SPECIFIC FACTORS FORMING FROZEN GROUND TEMPERATURE FIELDS UNDER BUILDINGS IN THE URBAN TERRITORY

Anton S.Gubarev¹, Anton I.Sinitsky², Vladimir F.Rebenkov³

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^{2,3}*Arctic Research Center, Salekhard, Russia*

¹*antongubareff@yahoo.com*

²*AISinitskii@yanao.ru*

³*VFRebenkov@yanao.ru*

Abstract. The article presents results of geotechnical observations in shooting range building which is a vital sport facility for Salekhard. The building was completed in 2000 with using soil according. However in building have been appearing deformations in construction during the its exploration period. The article provides a long-term analysis of possible permafrost conditions before building and reasons which affected on its changes.

Keywords: permafrost, frozen ground temperature, pile foundation, ventilated underground, geotechnical monitoring.

Citation: Gubarev A.S., Sinitsky A.I., Rebenkov V.F. Investigation of specific factors forming frozen ground temperature fields under buildings in the urban territory// Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug. 2023. (121). No. 4. P. 55–71. Doi 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.004.

Введение

Обследуемое здание «Спортивное сооружение ТИР» построено в 2000 году на свайном фундаменте. Согласно материалам технического заключения, сооружение представляет собой одноэтажное здание с размерами в плане 7,35×67,9 м с проветриваемым техническим подпольем, высота которого изменяется от 1,2 до 2,6 м в северном направлении. Проветриваемое подполье оборудовано термосваями, заполненными керосином в качестве хладагента, в рамках предусмотренных мер технической мелиорации по регулированию мерзлотной обстановки грунта на объекте. Наружные и внутренние несущие стены выполнены из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе. Водоотвод с кровли наружный, неорганизованный. Здание с холодным чердаком и неотапливаемым проветриваемым подпольем. Поверхность земли вблизи здания спланированная, выдержанная, без существенных перепадов абсолютных отметок.

Конструктивная схема здания – однопролётное с продольными несущими стенами. Перекрытие над проветриваемым подпольем выполнено из сборных многопустотных железобетонных плит размерами 6000×1200×220 мм и 6000×1500×220 мм с утеплением из керамзита толщиной 330 мм. Фундамент из свай С120.30 серии 1.011.1-10 в. 1, объединенных сверху ж/б ростверком, состоящим из 24 монолитных балок ($l=6,23$ м). Грунты основания используются по I принципу, согласно п. 6.1. СП 25.13330.2020. Свод правил. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах [1].

В период визуального осмотра (сентябрь 2023 года) в конструкциях здания зафиксированы деформации (рис. 1), влияющие на дальнейшую безаварийную эксплуатацию сооружения. Для определения текущего состояния и свойств грунтового массива под объектом в августе 2023 года были оборудованы четыре горные выработки с отбором образцов грунта в процессе бурения. Все скважины имеют глубину чуть более 12 метров, которые равномерно распределены под зданием и на сегодня подключены к системе автоматизированного контроля температуры мерзлых грунтов под объектами капитального строительства (система автоматизированного геокриологического мониторинга ГИС Ямал-Арктика).



Рис. 1. Раскрытие деформационного шва в ростверке фундамента здания ТИРа (фото из архивов Научного центра изучения Арктики)

Методика исследования

Методика работы, проводившейся в рамках данной статьи, состояла из следующих этапов:

1. Визуальный осмотр сооружения «ТИР» и прилегающей к нему территории на предмет наличия негативных конструктивных проявлений в здании и инженерно-геологических процессов и явлений.

2. Обеспечение здания сетью геотехнического мониторинга, представленной термометрическими скважинами, глубиной до 12 м с установлением в них термометрических кос с логгерами, записывающими данные каждые 3 часа, с фиксацией данных в единой базе «САМ-Мерзлота» (ИП Кураков С.А.).

3. Изучение инженерно-геологических изысканий, технического заключения по результатам комплексного инструментального обследования грунтов основания и конструктивных элементов здания, проводившихся непосредственно для данного здания в зимний период 2020 года; инженерно-геологических изысканий по близлежащим зданиям Преображенского собора и МБУК ЦКиС «Геолог» с целью уточнения геологических и мерзлотных условий данных объектов. Изучение топографических карт местности прошлых лет для уточнения изначальных ландшафтно-мерзлотных условий.

4. Проведение теплотехнических расчетов посредством программы «QFrost» для рассмотрения различных комбинаций факторов, формирующих температурное поле, при различных изначальных геокриологических условиях на изучаемой площадке (тип распространения пород, среднегодовые температуры пород, тип покровов).

Инженерно-геокриологические условия и температурный анализ территории объекта

Ознакомившись с топографическими картами города Салехарда начала 2000-х годов, удалось выяснить, что здание находилось вблизи оврага, имевшего сток в р. Преображенку (ранее – Шайтанка, рис. 2). Опираясь на региональные мерзлотные закономерности [2], можно сказать, что здесь был участок недр, характеризующийся наличием талых грунтов или наличием несливающейся мерзлоты.

Анализ повторных инженерно-геологических изысканий [3], которые проводились в январе 2020 года, показал, что основание сооружения сложено преимущественно песками пылеватыми и мелкими с естественной влажностью в пределах 0,07-0,29 д.ед. и коэффициентом водонасыщения до 1,19 д.ед. При этом наблюдается повышение этих параметров с глубиной.

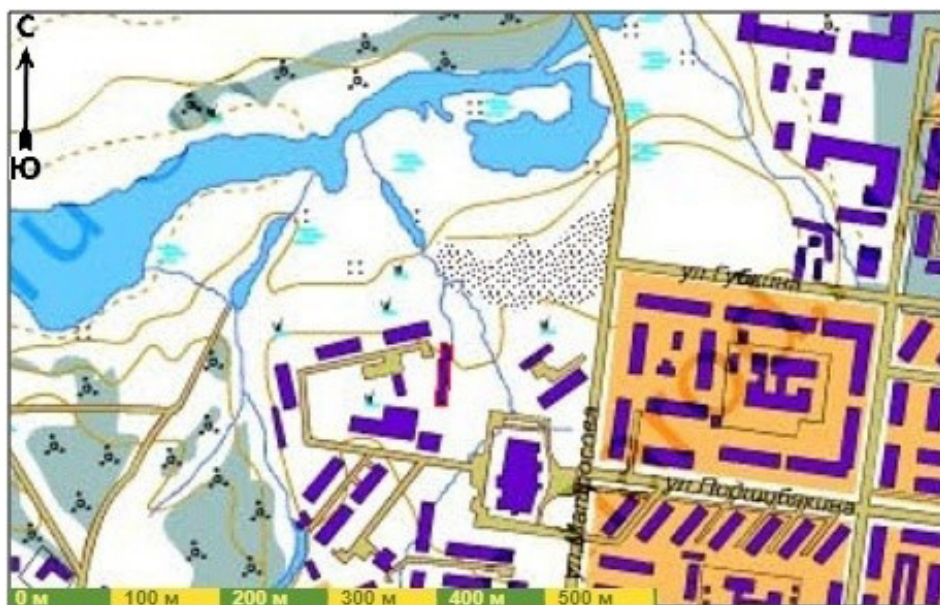


Рис. 2. Фрагмент карты г. Салехарда из начала 2000-х годов. Красным выделено здание ТИР (источник: <http://map-site.narod.ru>)

На объекте «Спортивное сооружение ТИР» в период обследования во всех четырех дополнительно пробуренных скважинах было установлено измерительное оборудование (термокосы) ООО «РУСГЕОТЕХ» и ИП Кураков С.А. Термометрические данные со скважин в режиме онлайн передавались в систему автоматизированного геокриологического мониторинга ГИС Ямал-Арктика в период с 15 августа по 11 сентября 2023 года и с интервалом 6 часов.

Температурный мониторинг грунтов оснований показал, что наиболее высокие значения наблюдаются в термометрической скважине 4 (далее – ТС 4), расположенной возле юго-западного угла здания. Три остальные скважины, расположенные в центральной и северной частях проветриваемого подполья, имеют схожие между собой показания температуры грунтов (рис. 3-6, табл. 1).

По результатам проводившихся температурных замеров выяснилось, что использование грунтов по I принципу согласно СП 25.13330.2020 на объекте в дальнейшем не целесообразно. Грунты оснований по всей глубине инженерных изысканий (более 12 метров) находятся в талом состоянии ($T > T_{bf}$) с незначительными прослоями, где отмечаются отрицательные температуры. Существует вероятность, что в данных интервалах грунты также немерзлые, так как их температура отличается от 0 на значения, не превышающие инструментальную погрешность термометрических кос.

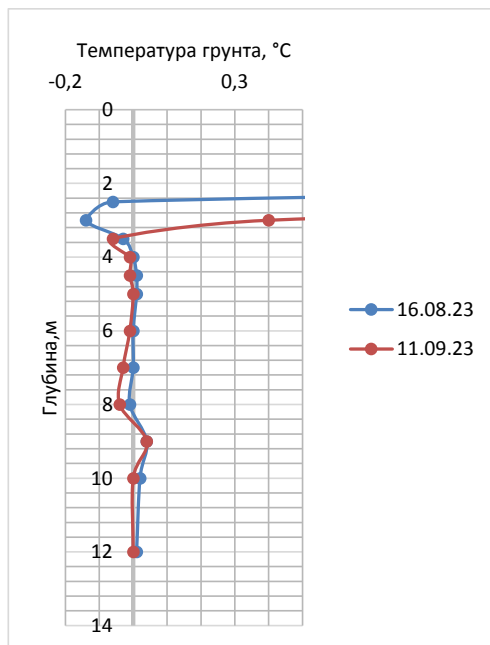


Рис. 3. Температура грунтов в ТС 1 16.08.23 и 11.09.2023 г.

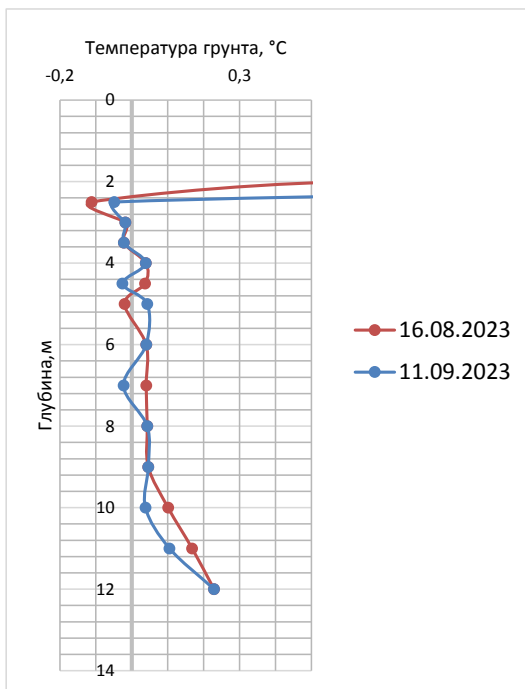


Рис. 4. Температура грунтов в ТС 2 16.08.23 и 11.09.2023 г.



Рис. 5. Температура грунтов в ТС 3 16.08.23 и 11.09.2023 г.

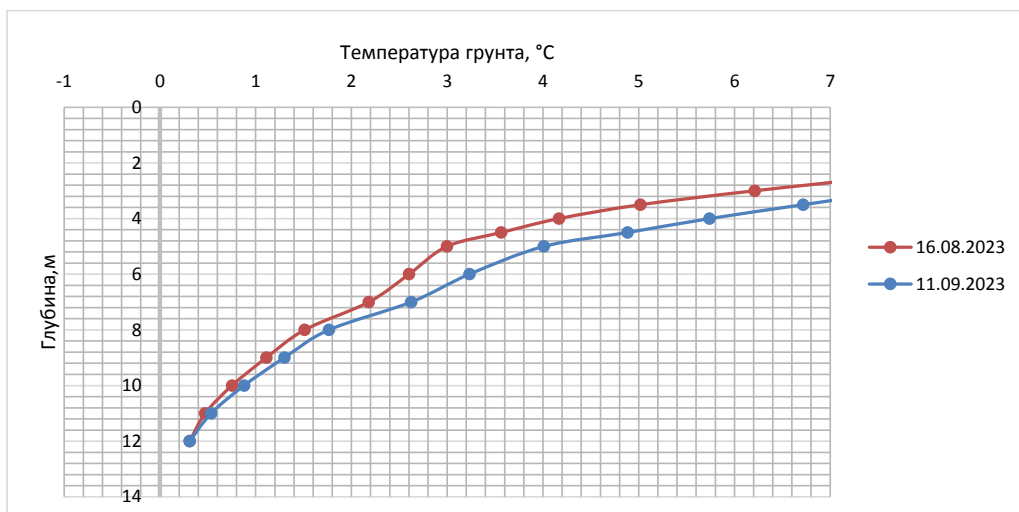


Рис. 6. Температура грунтов в ТС 4 16.08.23 и 11.09.2023 г.

Таблица 1. Значения средней температуры грунтов в интервале глубин 3-10 м для каждой из 4 термометрических скважин согласно замерам температуры грунта в 2023 г.

	16.08.2023	11.09.2023
ТС 1	-0,01	0,03
ТС 2	0,03	0,02
ТС 3	0,05	0,37
ТС 4	3,01	3,89

Если сравнить среднюю температуру грунтов в интервале глубин 3-10 м (табл. 1), можно установить, что она неотрицательная и, соответственно, выше любых проектных величин, принятых для свайного фундамента с использованием грунтов оснований по I принципу.

Одной из возможных причин повышенной температуры в скважине ТС 4 может являться снегонакопление, появляющееся здесь каждую зиму. Мощные снегоотвалы в городской застройке имеют существенное влияние на рост температуры мерзлых грунтов [4]. Однако данный фактор не является основным в формировании температурного режима в рассматриваемом случае, так как на значительных глубинах (5-7 м) температура грунта также гораздо выше +1 °С.

Теплотехнические расчеты

Для выявления факторов, влияющих на температурный режим грунтов под зданием, были проведены теплотехнические расчеты. К сожалению, информация об инженерно-геологических изысканиях, проводившихся на предпроектном этапе, у авторов отсутствует. Целью выполнения теплотехнических расчётов было выявление изначальных геокриологических условий, а также каким образом поверхностные условия могли повлиять на температурный режим грунтов оснований сооружения.

Первоначально была рассмотрена ситуация, при которой грунты на обследуемую мощность (30 м) находились в мерзлом состоянии при наиболее вероятных параметрах среднегодовой температуры для района г. Салехарда: с $T_0 = -0,2 \dots -1,0$ °С. Ниже представлены параметры условий на поверхности, использованные при расчетах (табл. 2). Температура воздуха до строительства объекта рассчитывалась средней за период 1970-2000 год, а при последующей эксплуатации принималась уже средняя величина за период 2000-2020 годы [5]. Климатическая норма толщины снежного покрова взята из научно-прикладного справочника по климату СССР [6], теплопроводность снежного покрова рассчитывалась по формуле $\lambda_s = 9.165 \cdot 10^{-2} - 3.814 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_s + 2.905 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_s^2$ [7].

Рассмотрена задача, где на первом этапе в качестве толщины снегоотвала была принята толщина в 3 раза больше среднемесячных показателей (максимальное значение 2,85 м, значение подкрепляется свидетельствами очевидцев). В двумерной модели выбрано расчетное поле размером 17х30 м, где по краям участка по 5 метров представлены с повышенным снегонакоплением (снегоотвалами), а посередине расположено здание с проветриваемым подпольем. Температура для подполья $-0,8$ °С от среднемесячной температуры наружного воздуха, коэффициент теплообмена $2,57$ Вт/м² °С. Была рассмотрена сторона сооружения, где расположена наиболее теплая скважина ТС 4. Данные по геологическому строению в модели заложены на основе инженерно-геологических изысканий, проведенных на объекте в январе 2020 года.

Таблица 2. Характеристики граничных условий третьего рода на поверхности моделируемого грунтового массива при различных предпостроечных инженерно-геокриологических условиях

	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.
Тв до 2000 года, °С	-24,2	-23,3	-15,2	-9,3	-1,2	8,4	14,3	10,9	5,2	-4,5	-15,6	-20,6
Коэф. теплообмена (Вт/м ² *К) для грунта с $T_0 = -0,2$ °С	0,40	0,36	0,33	0,38	0,62	5	5	5	5	1,34	0,62	0,44
Коэф. теплообмена (Вт/м ² *К) для грунта с $T_0 = -0$ °С (талики на глубине 4-9 м)	0,4	0,37	0,33	0,38	0,62	7	7	7	7	1,41	0,64	0,44

В результате расчётов было определено, что даже при максимально экстремальной постановке задачи ($T_0 = -0,2$ °С, мощность снегоотвала до 3 м, период эксплуатации 20 лет) невозможно образование таликовой зоны с параметрами (мощность несквозного талика, температура грунтов), полученными как в результате замеров грунта в августе-сентябре 2023 года, так и при изысканиях, выполненных в 2020 году (рис. 7).

Изучая результаты замеров температуры грунта по материалам изысканий 2020 года, можно обнаружить следующие закономерности (рис. 8). Значения температуры грунтов в талой зоне (0-10 м) достигают максимально $+5$ °С, и она уменьшается с юга на север, т.е. от инженерно-геологической скважины ТС 4 к ТС 1. Кроме того, сами значения температуры грунтов высоки, для того чтобы талый горизонт мог быть сформирован только лишь снегоотвалами.

Сравнивая показания замеров температуры грунта в августе-сентябре 2023 года и при инженерно-геологических изысканиях на угловой скважине ТС 4 (рис. 9), можно обнаружить тенденцию к увеличению мощности талой зоны. Аналогичная ситуация наблюдается и на примере термометрической скважины ТС 1 (рис. 10).

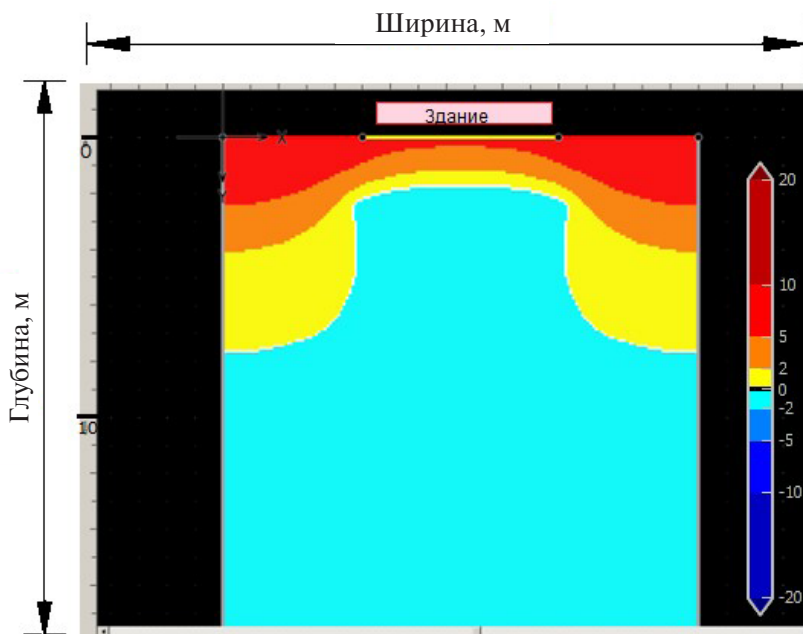


Рис. 7. Визуализация теплотехнических расчетов на 01.09.2020 при изначальных параметрах среднегодовой температуры грунтов равной $-0,2^{\circ}\text{C}$ и больших по мощности снегоотвалов

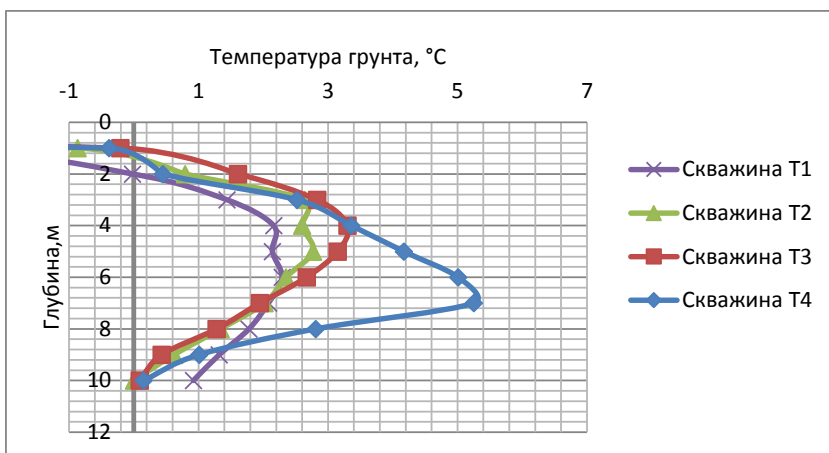


Рис. 8. Температура грунтов по результатам инженерно-геологических изысканий в январе 2020 г.

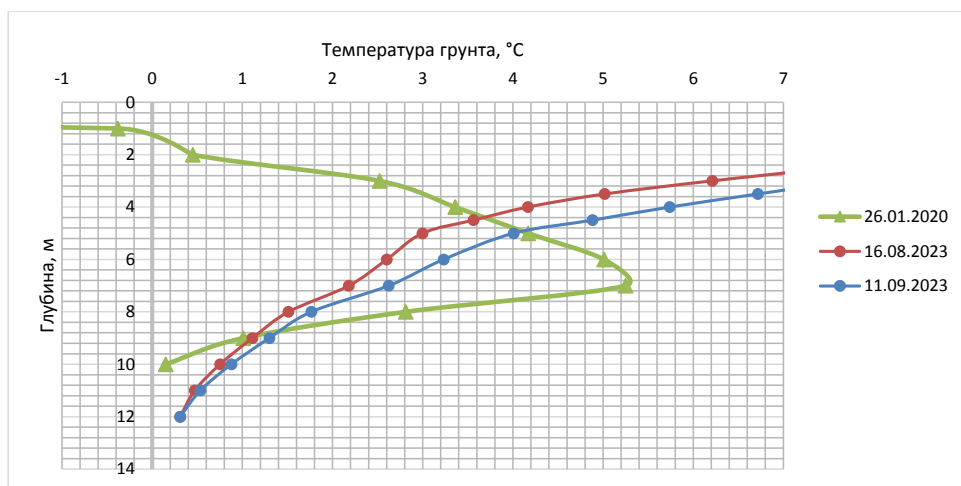


Рис. 9. Сравнительный график значений температуры грунтов в термометрической скважине 4 по результатам инженерно-геологических изысканий января 2020 года и замеров температуры грунтов 16 августа и 11 сентября 2023 г.

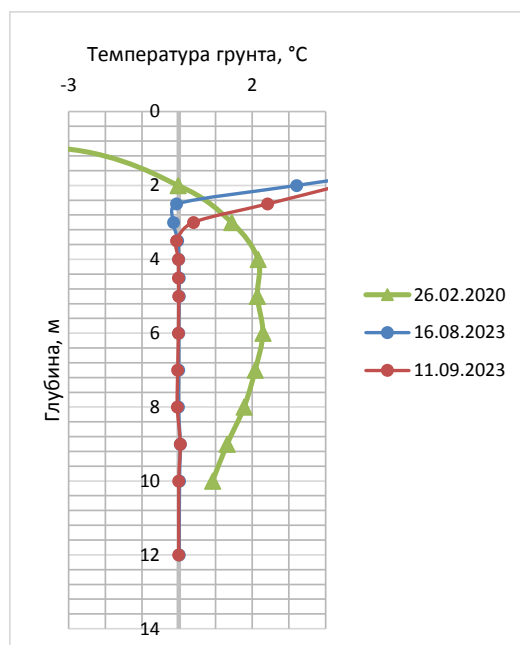


Рис. 10. Сравнительный график значений температуры грунтов в термометрической скважине 1 по результатам инженерно-геологических изысканий января 2020 года и замеров температуры грунтов 16 августа и 11 сентября 2023 г.

Изучив температурный режим и свойства грунтов, а также материалы изысканий по расположенным в непосредственной близости другим объектам капитального строительства – Преображенскому собору и МБУК ЦКиС «Геолог» [8], пришли к выводу, что к моменту постройки здания в геологическом разрезе было двухслойное строение мерзлых пород, и вероятнее всего, на глубинах 3-9 метров мог находиться некий источник тепла, предположительно водный горизонт с температурой $+4..+5$ °С. Также его можно рассмотреть как талик водно-теплого типа [9]. Надмерзлотные воды в южной части распространения криолитозоны, где мерзлота часто может быть несливающегося типа, могут играть весомую роль в формировании температурных полей грунтов. Так, например, зафиксировано, что в Воркуте, где мерзлотные условия вполне сопоставимы с Салехардом, под зданием, построенным ранее по I принципу, были обнаружены пласты надмерзлотных вод с температурой $+27$ °С, что привело к формированию чаши оттаивания мощностью 15 м [10]. Гипотеза о тепловом влиянии надмерзлотных вод для сооружения «ТИР» была проверена теплотехническими расчетами (рис. 11, 13). Выполнен сравнительный анализ 2 сценариев вероятной тепловой обстановки: первый вариант с талым горизонтом на глубине 4-9 м, но без дополнительного бокового источника тепла (Прогноз 1), и второй вариант с талым горизонтом на глубине 4-9 м, но с дополнительным боковым источником тепла с постоянной температурой $+4$ °С (Прогноз 2; рис. 13, 14).

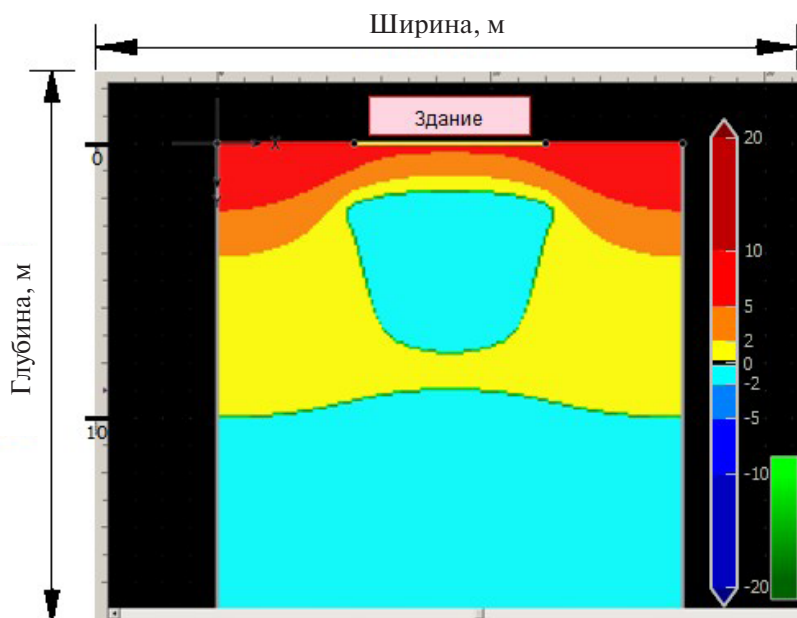


Рис. 11. Результаты теплотехнических расчетов на 01.09.2020 при Прогнозе 1

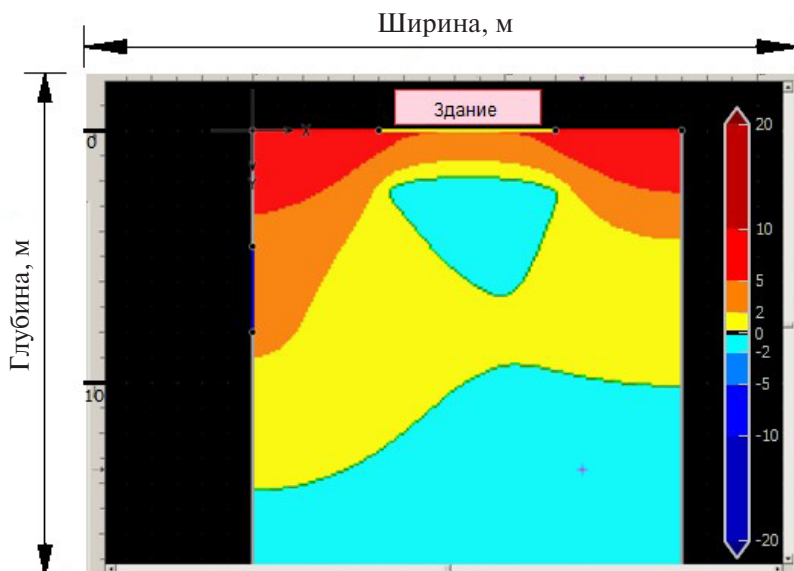


Рис. 12. Результаты теплотехнических расчетов на 11.09.2023 при Прогнозе 2

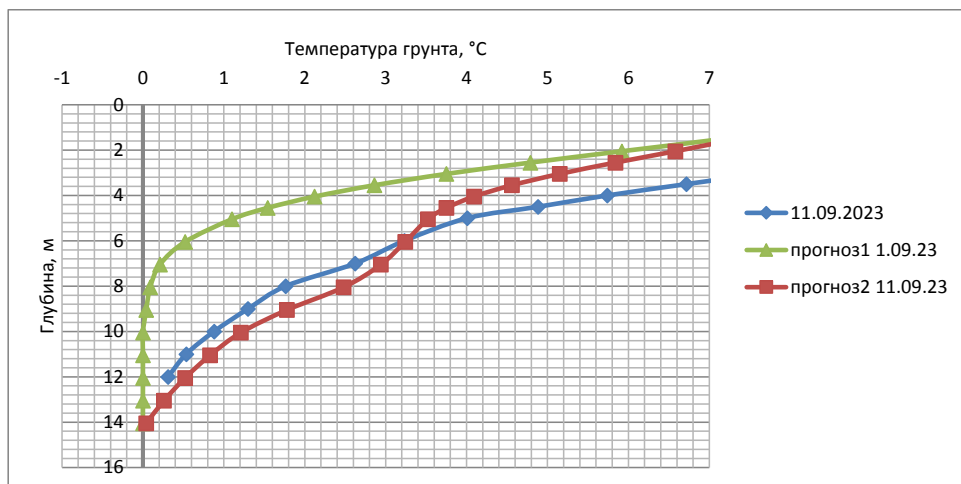


Рисунок 13. Сравнительный график значений температуры грунтов в ТС 4 по результатам замеров температуры грунта 11.09.2023 года и по результатам рассмотренных 2 вариантов теплотехнических расчетов. Прогноз 1, 01.09.23 (зеленая линия)

Как видим на графике, наиболее вероятны к реальности были условия Прогноза 2.

Аналогично, сопоставив значения, полученные в ходе инженерных изысканий и по результатам теплотехнических расчетов, получена хорошая сходимость результатов, из чего следует, что предположение о наличии источника вод с положительными температурами в окрестности сооружения вполне реалистично (рис. 14).

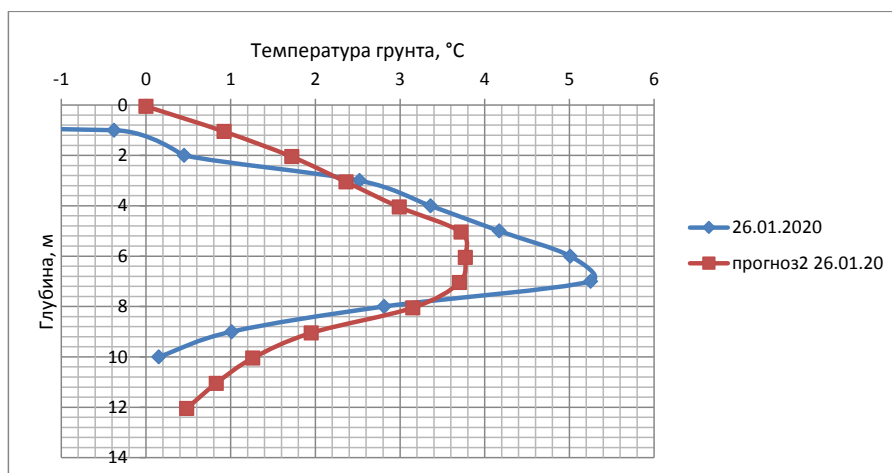


Рис. 14. Сравнительный график значений температуры грунтов в ТС 4 по результатам инженерно-геологических изысканий 26.01.2020 и по результатам теплотехнических расчетов согласно Прогнозу 2

Отметим, что согласно предположению о факторах, формирующих температурное поле под зданием «Спортивное сооружение ТИР», были проведены аналогичные расчеты для случая, когда изначально грунты основания могли быть в мерзлом состоянии со среднегодовой температурой $-0,2^{\circ}\text{C}$. В результате более чем за 20-летний период при стороннем источнике тепла могло сформироваться температурное поле под объектом исследований, аналогичное зафиксированному инструментально. Однако, ориентируясь на ландшафтные условия площадки, наиболее вероятным кажется изначально двухслойное строение многолетнемерзлых пород (далее – ММП).

Заключение и рекомендации

На основе анализа архивных материалов по объекту, полученных в результате инженерно-геологических изысканий, технических осмотров, натурных работ по геотехническому мониторингу, проведенных теплофизических расчетов удалось выяснить следующее:

1. Перед постройкой здания «ТИР» в 2000 году территория характеризовалась сложными для строительства геокриологическими условиями в связи с близостью оврага, расположенного в долинном комплексе р. Преображенки (ранее – р. Шайтанка). Очевидно, что здесь был участок с заглубленной кровлей ММП.

2. В настоящее время под зданием «Спортивное сооружение ТИР» наблюдается чаша оттаивания мощностью более 12 м, что, возможно, привело к конструктивным деформациям здания.

3. На основе анализа сравнения различных причин, повлиявших на оттаивание грунтов, удалось установить, что источник тепла находится на глубине более 4 м и предположительно может являться пластом надмерзлотных вод. Поверхностные условия, например, мощные снегоотвалы, не могли являться существенным источником оттаивания грунтов в окрестностях изучаемого объекта, как было рассмотрено выше.

Весьма спорным здесь является дальнейшее использование грунтов по I принципу, согласно п. 6.1. СП 25.13330.2020 [1], которые находятся в талом состоянии на всю глубину инженерных изысканий (до 12 метров и более).

Рекомендуется проведение комплекса изыскательских работ (колонковое бурение, статическое зондирование, геофизические работы) для установления свойств грунтов и гидрогеологической обстановки на текущее время.

Необходимо проводить регулярный геотехнический мониторинг, включающий в себя не только замеры температуры грунтов в оборудованных скважинах, но и установку деформационных марок на ростверки свайного фундамента для его геодезической нивелировки. Особенно это актуально по причине установки сезонноохлаждающих устройств в талых водонасыщенных грунтах по всему периметру здания, которые могут при промерзании неравномерно вспучиваться и приводить к новым деформациям здания.

Список источников

1. СП. 25.13330.2020. Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.
2. Фирсов Н.Г., Кашперюк П.И., Кудряшов В.Г., Трофимов В.Т., Геокриологическая характеристика Центральной зоны Континентального региона. Обь-Надымская область // Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – С. 278–284.
3. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на объекте «Спортивное сооружение ТИР» МАУ «Спортивная школа «Фаворит» по адресу: г. Салехард, ул. Губкина, 4а. – Владимир, 2020. – 27 с.

4. Гребенец В.И., Кизяков А.И., Маслаков А.А., Сократов С.А., Стрелецкая И.Д., Толманов В.А., Юров Ф.Д. Влияние опасных криогенных процессов на инфраструктуру городов в Арктике // Вестник Московского Университета. Серия 5: География, 2022, № 2, с. 25-36.
5. Научно-прикладной справочник «Климат России»: [электронный ресурс]. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/>.
6. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 17 / Омское территориальное упр. гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1998. – 702 с.
7. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 60–68.
8. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий «Храмовый комплекс в честь Преображения Господня в г. Салехарде. I этап. Храм в честь Преображения Господня». Том 2. – Омск, 2019. – 136 с.
9. Закономерности формирования таликов и прогноз их образования // Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях/ Под ред. Гарагули Л.С., Брушкова А.В. – М.: Издательство «Геоинфо», 2016. – С. 366-400.
10. Хрусталева Л.Н. Температурный режим вечномерзлых грунтов на застроенной территории. – М.: Наука, 1971. – 167 с.

Сведения об авторах

Губарев Антон Сергеевич, аспирант географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра криолитологии и гляциологии. Сфера научных интересов: геотехнический мониторинг, геотехника в криолитозоне, мерзлотные условия на застроенных территориях.

Синицкий Антон Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник сектора геотехники ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики». Сфера научных интересов: натурные испытания талых грунтов, технологии термостабилизации грунтов, геотехника в криолитозоне, изучение трансформации многолетнемерзлых пород под влиянием климатических изменений и антропогенной нагрузки, геокриологический мониторинг, проектное управление.

Ребенков Владимир Федорович, инженер по буровым работам участка инженерных изысканий ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики». Сфера научных интересов: геотехника, инженерные изыскания и мониторинг грунтовых условий в криолитозоне, вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике.

Участие авторов

Губарев А.С. – сбор, обработка данных инженерно-геологических изысканий, технического заключения по результатам комплексного инструментального обследования грунтов основания и конструктивных элементов здания, температурный мониторинг объекта, теплотехнические расчеты, написание текста статьи;

Синицкий А.И. – натурное обследование проветриваемого подполья и свайного фундамента здания, температурный мониторинг объекта, подготовка и предоставление необходимых аналитических материалов, редакторская правка текста статьи;

Ребенков В.Ф. – проведение визуального осмотра и термометрических работ на объекте, оборудование объекта сетью геотехнического мониторинга, подготовка аналитических документов по объекту изучения.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Статья поступила в редакцию 15.11.2023 г., принята к публикации 07.12.2023 г.

The article was submitted on November 15, 20223, accepted for publication on December 7, 2023.