

A. N. Shein¹✉, A. I. Siniцкий¹, A. A. Башкова^{1,2}

Проблемы и перспективы использования термостабилизации оснований зданий в г. Салехард при современных климатических трендах

¹Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Российская Федерация

²Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Российская Федерация
e-mail: A.N.Shein@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматриваются перспективы использования термостабилизации оснований зданий в г. Салехард в условиях современных климатических изменений. В результате анализа температуры воздуха на метеостанции г. Салехард показано, что за последние 30 лет благоприятный для работы сезонных охлаждающих устройств период с температурами ниже минус 7°C уменьшился почти на месяц. На практическом примере показано наличие положительного тренда температуры грунтового основания действующего объекта, возведённого по I принципу строительства. Всё это может привести к снижению эффективности термостабилизации грунтов оснований зданий, возведённых на мерзлоте по I принципу строительства. В связи с чем возникает необходимость в предъявлении повышенных требований к принятию проектных решений при строительстве на мерзлых грунтах и особенно вблизи южной границы криолитозоны.

Ключевые слова: термостабилизация, сезонное охлаждающее устройство, мерзлота, климатические изменения

A. N. Shein¹✉, A. I. Sinitsky¹, A. A. Bashkova^{1,2}

Problems and prospects of using thermostabilization of building bases in Salekhard under current climatic changes

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

²Institute of the Earth's Cryosphere of the Tyumen Scientific Center SB RAS,
Tyumen, Russian Federation
e-mail: A.N.Shein@yandex.ru

Abstract. The paper considers the prospects of using thermal stabilization of the foundations of buildings in Salekhard in the conditions of modern climatic changes. As a result of the analysis of the air temperature at the Salekhard meteorological station, it is shown that over the past 30 years, the period favorable for the operation of the seasonal cooling device with temperatures below minus 7°C has decreased by almost a month. A practical example shows the presence of a positive trend in the temperature of the soil base of an existing facility built according to the I principle of building. All this can lead to a decrease in the efficiency of thermal stabilization of the soils of the foundations of buildings erected on permafrost according to the I principle of construction. In this regard, there is a need for increased requirements for making design decisions during construction at the permafrost and especially near the southern border of the cryolithozone.

Keywords: thermostabilization, seasonal cooling device, permafrost, climate change

Введение

Мерзлота занимает значительную (60-65%) часть территории РФ, которая продолжает активно осваиваться и развиваться. Помимо труднодоступности северных территорий, мёрзлые породы осложняют их освоение из-за возникающих проблем при возведении и дальнейшей эксплуатации инфраструктуры в таких условиях [1]. Проблемы возникают не только из-за сложного строения пород, но и ускорившихся в последнее время процессов деградации мерзлоты ввиду потепления климата. При строительстве сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) по I принципу (с сохранением основания в мерзлом состоянии) широкое распространение получила технология термостабилизации грунтов (ТСГ). Основным способом обеспечения требуемого температурного режима фундамента для сохранения мерзлого состояния грунтов является сооружение проветриваемого (вентилируемого) подполья (ПП) и применение сезонно действующих охлаждающих устройств (СОУ). Среди различных типов таких устройств наиболее часто в ПП используются вертикальные двухфазные естественно-конвективные устройства с испарителем и оребренным конденсатором [2-5]. При наличии градиента температур между стабилизируемыми грунтами и наружным воздухом хладагент конденсируется в ребристом радиаторе-конденсаторе, расположенном в верхней части СОУ, затем естественным путем стекает в нижнюю, испарительную часть, где отбирает теплоту грунта, охлаждая его, испаряется и поднимается вверх. Однако разница между температурой грунтов и температурой воздуха на юге Арктики – уменьшается ввиду климатических изменений, как следствие поддержание нормативных температур мёрзлых грунтов в основании зданий становится всё сложнее. В связи с чем, нормативы и правила строительства, особенно вблизи изменяющейся южной границы криолитозоны требуют постоянной актуализации. Необходим системный, научно-методический подход применения принципов строительства в районах распространения ММП, в том числе с обоснованием долгосрочной перспективы использования СОУ.

На южной границе криолитозоны располагаются почти все крупные города Ямала, в том числе окружная столица – г. Салехард, который в 2024 году был одним из лидеров по вводу жилья в округе. Строительство здесь ведётся по I принципу с применением СОУ, за редким исключением. Как следствие взрывными темпами растёт количество охлаждающих систем (термосифонов). Вместе с тем геокриологическая обстановка вблизи г. Салехард значительно изменилась: температура мёрзлых грунтов за последние 40 лет с -1°C повысилась до около нулевых значений, а её кровля с 1,5-2 м опустилась до 7-8 м [6-7]. Основные климатические показатели тоже говорят не в пользу устойчивости ММП: по данным Салехардской метеостанции с 1990 года величина линейного тренда повышения среднегодовой температуры воздуха составила $+0,09^{\circ}\text{C}/\text{год}$, вместе с температурой увеличивается количество осадков [8]. В связи с вышеизложенным возникает необходимость в проведении оценок современной и перспективной эффективности СОУ и использования I принципа строительства в г. Салехард.

Исходя из технических характеристик современных СОУ [4-5] можно принять, что теплообмен между грунтами, где установлены СОУ, и атмосферным воздухом начинается при температуре ниже -7°C . Но нужно понимать, что существует ещё множество факторов, влияющих на теплообмен: культура эксплуатации ПП; ветровые показатели; температура грунтов в основании здания – разница между температурой грунтов и температурой воздуха уменьшается к концу зимнего периода и др. Тем не менее, проведём оценки изменения продолжительности работы СОУ в годовом цикле опираясь на изменение температуры воздуха. Рассмотрим практические примеры работы термостабилизации под несколькими зданиями в г. Салехард на основе данных мониторинга температуры грунтовых оснований объектов.

Методы и материалы

Для анализа температуры воздуха использовались специализированные массивы для климатических исследований [9]. После выгрузки данных по метеостанции г. Салехард, где наблюдения ведутся с 1982 г., была проведена их статистическая обработка: рассчитано количество дней, когда средняя температура воздуха превышала значения: -7°C , -10°C и -15°C , построены линейные тренды для каждого набора данных для разных временных отрезков.

Практические данные получены в основании капитальных зданий г. Салехард, где с 2018 года развивается система автоматизированного контроля температуры грунтов оснований объектов капитального строительства и является составляющей региональной сети наблюдения за мерзлотой. Получаемая информация о мёрзлых грунтах под зданием позволит определить текущее состояние грунтового основания и прогнозировать развитие ситуации. В настоящий момент к системе подключено 40 объектов, где пробурено и оборудовано более 300 термометрических скважин. Для мониторинга используется оборудование производителей ИП Кураков (г. Томск), ООО «Русгеотех», ООО НТП «Горизонт», ООО «Криолаб» (г. Москва). Установленные комплекты термометрической аппаратуры прошли тестирование и были запрограммированы на период измерения 3 ч, в соответствии с периодом измерения ближайшей метеостанции в г. Салехард. Погрешность калибровки датчиков измерения температуры – 0.1°C . Данные с приборов поступают на сервер в автоматическом режиме и собираются в единую систему хранения и визуализации геокриологической информации ГИС «ЯМАЛ-АРКТИКА» (<https://monitoring.arctic.yanao.ru>) [10; 11]. Для специалистов и всех заинтересованных лиц предусмотрен полный доступ к ресурсу, где отображаются объекты мониторинга с информацией по расположению скважин, возможностью отображения в виде графиков и экспорта полученных данных.

Для анализа практических данных были выбраны несколько объектов, подключённых к система автоматизированного контроля температуры грунтов оснований, с рядами мониторинга не менее 4 лет. Информация анализировалась на характерных глубинах после чего проводилось вычисление средних значений и расчёт линейного тренда для сравнительного анализа вычисленных статистических характеристик температурных данных на разных объектах.

Результаты

Используя данные метеостанции Салехард за последние 100 лет, установим количество дней, когда средняя температура воздуха превышала значения: -7°C , -10°C и -15°C (рис. 1, сплошные линии). Анализируя полученные данные, можно заметить, что на рубеже 20-21 веков происходит смена тренда. Чтобы оценить, как быстро сокращается количество благоприятных для эффективной работы СОУ дней были рассчитаны линейные тренды для 1930-1990 гг. и 1990-2023 гг. (рис. 1, пунктирные линии). Видно, что если до 1990 г. ситуация была относительно стабильной и количество дней со средней температурой меньше -10°C колебалось вблизи пяти месяцев (140-150 дней), то за последние 30 лет благоприятный для работы СОУ период уменьшился почти на месяц (120 дней). Схожая ситуация наблюдается для двух других случаев -7°C и -15°C (рис. 1).

В дополнение к отрицательному тренду можно заметить резкие скачки на графиках: в 2020 г. количество дней со средней температурой меньше -10°C упало до трёх месяцев (рис. 1, красная стрелка). Такие резкие колебания климатических показателей могут негативно сказаться на несущей способности грунтов ввиду отклонения от расчётного режима работы систем ТСГ.

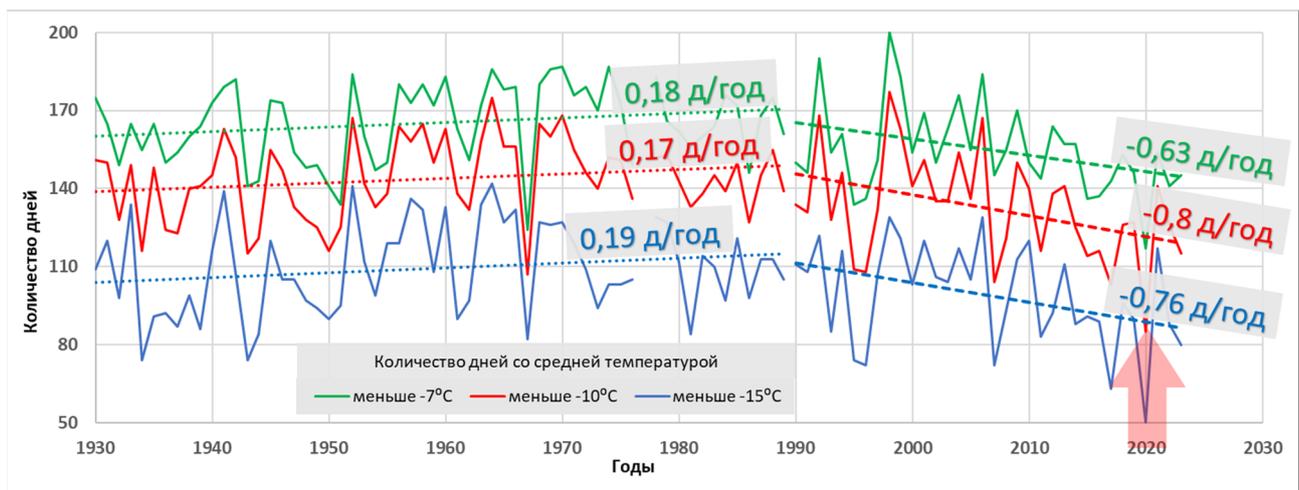


Рис. 1. Количество дней со среднесуточной температурой меньше -7°C (зелёная), -10°C (красная) и -15°C (синяя кривая) по данным метеостанции Салехард

Для анализа практических данных были выбраны два объекта капитального строительства, где проводится мониторинг температуры грунтового основания с 2018 г. Объект I введён в эксплуатацию в 2017 г., объект II – в 2004 г. К системе мониторинга здания подключены в 2018 и 2019 гг. соответственно, но при этом в данных есть пропуски в 2020 г., поэтому этот год был исключён из анализа. Проведён анализ данных температурного мониторинга в четырёх скважинах для объектов I и II за период 2019-2024 гг.: построены кривые на глубинах 6 и 9 м для каждой скважины (рис. 2, цветные кривые), рассчитано среднее значение в

каждый момент времени для рассмотренной выборки, вычислен линейный тренд для полученной средней температуры грунта с 2019 по 2024 гг. и с 2021 по 2024 гг.

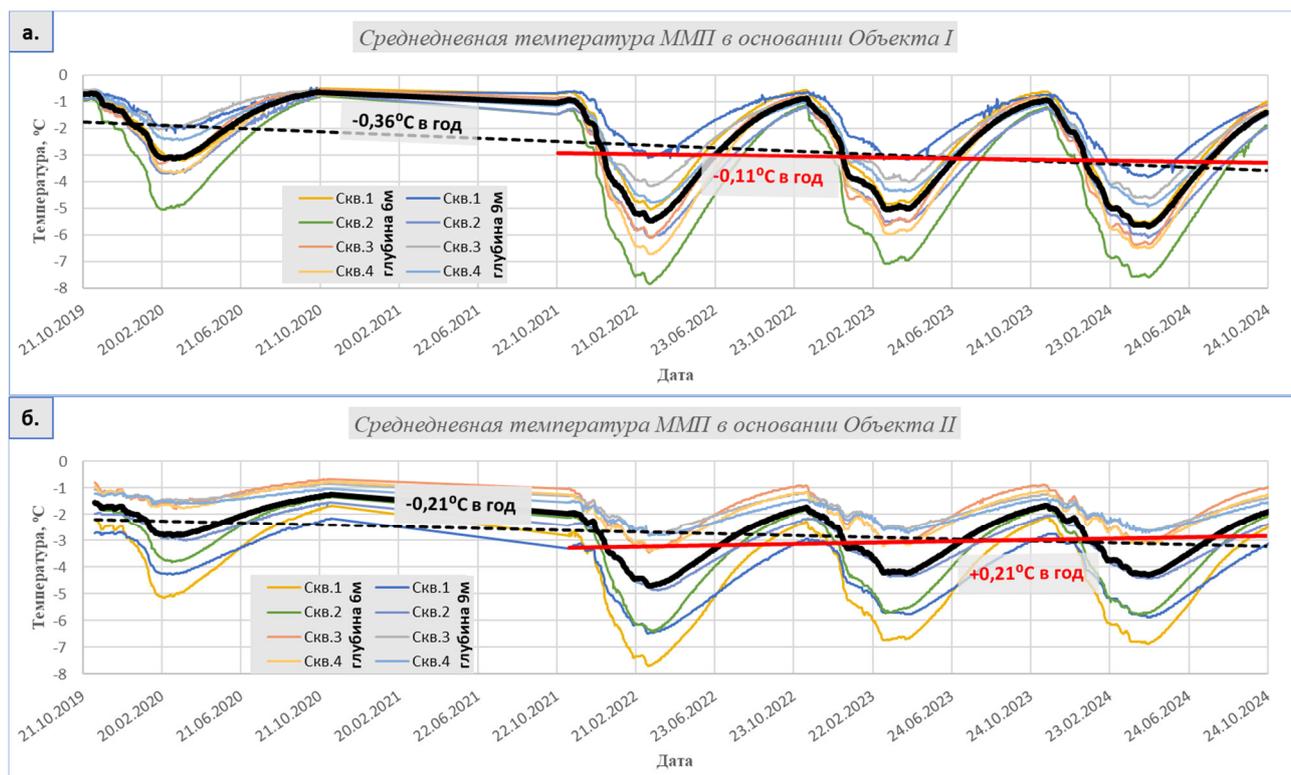


Рис. 2. Температура грунтов в основании объектов I (а) и II (б) в скважинах на глубинах 6 и 9 м за период октябрь 2019 г. - октябрь 2024 г. (цветные кривые); среднее значение по всем кривым для рассмотренной выборки (чёрная кривая); линейный тренд для полученной средней с 2019 по 2024 гг. (чёрная пунктирная прямая) и с 2021 по 2024 гг. (красная прямая)

Обсуждение

В результате анализа температуры воздуха на метеостанции г. Салехард (рис. 1) можно констатировать, что в обозримом будущем и при текущих темпах потепления эффективность ТСГ будет уменьшаться. Как следствие, в будущем потребуется либо наращивание количества термосифонов, либо вывод их из работы с сопутствующими мероприятиями по сохранению объектов. Любой сценарий влечёт значительные социально-экономические риски. В этой связи вызывает опасение повсеместное применение СОУ в городах с околонулевыми температурами мёрзлых грунтов и заглублённой кровлей. Необходима непрерывная актуализация нормативов и правил строительства вблизи южной границ криолитозоны, а также системный, научно-методический подход применения СОУ при строительстве, а дальнейшая их эксплуатация должна быть строго регламентирована.

При рассмотрении конкретных объектов, возведённых по I принципу строительства с применением СОУ, также можно заметить, что на эффективность ра-

боты термостабилизации влияет не только климатические данные, но и возраст здания. На рис. 2 линейный тренд, построенный по средней температуре на 6 и 9 м за 2019-2024 годы, в обоих случаях – отрицательный, что связано с аномально тёплым 2019 годом. Тем не менее, скорость понижения средней температуры на глубинах 6 и 9 м на более старом объекте II почти в два раза ниже по сравнению с объектом I: 0.21°C в год и 0.36°C соответственно.

Если исключить из расчётов тёплый 2019 год, то на объекте I температура уменьшается в три раза (рис. 2а, красная кривая) 0.11 вместо 0.36°C в год, но всё равно остаётся отрицательной. На объекте II температура изменяется на положительную (рис. 2б, красная кривая) с приростом 0.21°C в год, средняя температура грунтов на рассмотренных глубинах повышается. Продолжающееся охлаждение основания объекта I связано, прежде всего, с возрастом объекта – менее 10 лет, где основная часть СОУ ещё находятся в рабочем. На объекте II по пришествию 20 лет эксплуатации объекта термостабилизирующие устройства начинают выходить из строя или работать менее эффективно, что сказывается на поддержании температуры грунтового основания.

Ещё одним критерием эффективности работы термостабилизации под рассмотренными объектами является годовая амплитуда колебаний температуры – чем сильнее охлаждаются грунты, тем эффективней работает технология. На объекте I в 2024 году грунты охладились за зимний период на 4.5°C (с -1 до -5.5°C), на объекте II в два раза слабже – на 2.5°C (-1.7 до -4.3).

Выявленные отличия состояния грунтов в основании рассмотренных объектов можно объяснить рядом причин – возраст здания, количество и разные характеристики используемых СОУ, культура эксплуатации объекта. Независимо от причин и факторов, полученный на втором объекте тренд может говорить о том, что заложенные проектом технологические решения могут не справиться с термостабилизацией грунтов в основании данного здания в перспективе современных климатических трендов.

Заключение

В результате анализа температуры воздуха на метеостанции г. Салехард показано, что за последние 30 лет благоприятный для работы СОУ период с температурами ниже минус 7°C уменьшился почти на месяц. Это может привести к снижению эффективности термостабилизации грунтов оснований зданий, возведённых на мерзлоте по I принципу строительства.

На практическом примере показано наличие положительного тренда температуры грунтового основания действующего объекта, возведённого по I принципу строительства с применением ТСГ. Средняя температура на глубинах 6 и 9 м за последние три года возрастает со скоростью 0.21°C в год.

Таким образом, при современных климатических трендах и в сложившихся инженерно-геокриологических условиях необходимо предъявлять повышенные требования к принятию проектных решений при строительстве на ММГ и особенно вблизи южной границы криолитозоны.

В будущем планируется провести более точные оценки эффективности работы СОУ для различных объектов, определить количественные критерии их эффективности. В том числе для решения этой задачи Научный центр изучения Арктики с 2018 года развивает в г. Салехард систему температурного мониторинга грунтов в основаниях объектов капитального строительства [12-13].

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального НОЦ «Прогноз деградации мерзлоты и технология автоматизированного контроля несущей способности мерзлых грунтов под объектами капитального строительства» при поддержке правительства Ямало-Ненецкого автономного округа. Авторы благодарны специалистам участка инженерных изысканий ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики за создание мониторинговой инфраструктуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шеин А. Н., Камнев Я. К. Обзор научных и производственных работ по изучению многолетнемерзлых пород в естественных и антропогенных условиях // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. – 2020. – № 3 (108). – С. 42-50.
2. Лаврик А.Ю., Буслаев Г.В., Куншин А.А. [и др.] Системы термостабилизации грунта: опыт и перспективы // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2022. – №12 (132). – С. 88-91.
3. Горелик Я.Б., Хабитов А.Х. Об эффективности применения термостабилизаторов при строительстве на многолетнемерзлых грунтах // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2019. – Т. 5. № 3. – С. 25-46.
4. Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне: тр. ученых и специалистов ООО НПО «Фундаментстройаркос» за 2010-2014 гг. / под ред. Г.М. Долгих. – Новосибирск: Гео, 2014. – 218 с.
5. Галкин М.Л., Рукавишников А.М., Генель Л.С. Термостабилизация вечномерзлых грунтов // Холодильная техника. – 2013. – № 10. – С. 44-49.
6. Королева Е.С., Шеин А.Н., Исаев В.С., Башкова А.А. Развитие сети регионального мониторинга в Ямало-Ненецком автономном округе // Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии: Материалы VII Всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием, посвященного 150-летию и 100-летию со дня рождения ученых-мерзловедов Михаила Ивановича Сумгина и Кирилла Фабиановича Войтковского. – Якутск: Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2023. – С. 98-101.
7. Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A. [et al.]. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic // Energies. – 2022. – Vol. 15. – № 7.
8. Демидов Н.Э., Гунар А.Ю., Балихин Е.И. [и др.] Строение, газосодержание и термическое состояние многолетних бугров пучения (булгунняхов) в долине р. Вась-Юган (окрестности г. Салехард, Западная Сибирь) // Геофизические процессы и биосфера. – 2022. – Т. 21. – № 3. – С. 27-38.
9. Специализированные массивы для климатических исследований. – URL: <http://www.aisori-m.meteo.ru/waisori/index1.shtml> (дата обращения: 04.02.2025).
10. Громадский А.Н., Арефьев С.В., Волков Н.Г., Камнев Я.К., Синицкий А.И. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномерзлых грунтов под зданиями г. Салехард // Научный вестник ЯНАО. – 2019. – №3. – С. 17-21.

11. System of automated geocryological monitoring (2025). – URL: <https://monitoring.arctic.yanao.ru/> (Accessed 10 March 2025 in Russian).
12. Шеин А. Н., Башкова А. А. Статистические характеристики данных температурного мониторинга грунтовых оснований фундаментов зданий города Салехарда за 2018–2023 годы как основа для автоматизации процесса первичной обработки данных // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2024. – Т. 30. – № 3. – С. 58–69.
13. Башкова А.А., Шеин А.Н., Горелик Я. Б. Мониторинг грунтов основания здания на искусственном новообразовании мерзлоты // Промышленное и гражданское строительство. – 2025. – № 2. – С. 41-51.

© А. Н. Шеин А. Н., А. И. Синицкий, А. А. Башкова, 2025