

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2024. № 1. (122). С. 6-20.

Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2024. № 1. (122). P. 6-20.

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 624.139, 550.8

doi: 10.26110/ARCTIC.2024.122.1.001

ДИАГНОСТИКА УСТОЙЧИВОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ ДЕТСКИХ САДОВ В Г. САЛЕХАРДЕ, ПОСТРОЕННЫХ ПО ПРИНЦИПУ СОХРАНЕНИЯ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ

**Константин Владимирович Федин¹, Александр Николаевич
Шеин², Дмитрий Владимирович Грушкевич³**

^{1, 3}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука,
СО РАН, Новосибирск

²Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

¹FedinKV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9710-8944>

²A.N.Shein@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6520-0551>

³Create.pro@yandex.ru

Аннотация. В работе представлены результаты полевых экспериментов, демонстрирующих возможность обнаружения потери стабильности конструкций зданий по данным, полученным на сваях и основании зданий методом стоячих волн. Анализ вертикальных стоячих волн сжатия-растяжения в свае под действием шумов позволяет контролировать ее длину и качественное закрепление нижнего конца. В результате на обследуемых объектах обнаружено 49 висячих свай или 9,86%. Установлены зоны повышенных амплитуд, которые соответствуют скрытым трещинам и повышенным зонам напряжения в конструкциях. Показана эффективность метода для диагностики устойчивости конструкций зданий.

Ключевые слова: свайный фундамент, многолетнемёрзлые грунты, инженерная геофизика, собственные колебания здания.

Цитирование: К.В. Федин, А.Н. Шеин, Д.В. Грушкевич. Диагностика устойчивости конструкций зданий детских садов в г. Салехарде, построенных по принципу сохранения мёрзлых грунтов в основании // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2024. (122). № 1. С. 6–20. doi: 10.26110/ARCTIC.2024.122.1.001.

Original article

DIAGNOSTICS OF STABILITY OF CONSTRUCTIONS OF KINDERGARTEN BUILDINGS IN SALEKHARD, BUILT ON THE PRINCIPLE OF PRESERVATION OF PERMAFROST AT THE BASE

**Konstantin V. Fedin¹, Alexandr N. Shein²,
Dmitrii V. Grushkevich³**

^{1,3}*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russia*

²*Arctic Research Center, Salekhard, Russia*

¹*FedinKV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9710-8944>*

²*A.N.Shein@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6520-0551>*

³*Create.pro@yandex.ru*

Abstract. The paper presents the results of field experiments demonstrating the possibility of detecting loss of stability of building structures based on data obtained on piles and foundations of buildings by the standing wave method. The analysis of vertical standing compression-stretching waves in a pile under the influence of noise allows you to control its length and qualitatively fix the lower end. As a result, 49 hanging objects or 9.86% were found on the surveyed objects. Zones of increased amplitudes have been established, which correspond to hidden cracks and increased stress zones in structures. The effectiveness of the method for diagnosing the stability of building structures is shown.

Keywords: piling foundations, permafrost, engineering geophysics, natural oscillations of the building.

Citation: K.V. Fedin, A.N. Shein, D.V. Grushkevich. Diagnostics of stability of constructions of kindergarten buildings in Salekhard, built on the principle of preservation of permafrost at the base // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2024. (122). № 1. P. 6–20. doi: 10.26110/ARCTIC.2024.122.1.001.

Введение

Больше 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] и практически всю территорию Ямало-Ненецкого автономного округа. На ней воздвигнуто подавляющее большинство городов, посёлков и инфраструктурных объектов. При текущем тренде потепления климата к 2050 году несущая способность грунтов уменьшится ещё на 25% и более [3]. При строительстве объектов и дальнейшей эксплуатации используются устаревшие нормы и правила [4-6]. Кроме того, эксплуатационные нормы носят рекомендательный характер и зачастую не выполняются эксплуатирующими организациями.

Для безопасной эксплуатации зданий и сооружений в зоне многолетних мерзлых грунтов в ЯНАО с 2018 г. разрабатывается система автоматизированного температурного мониторинга [7-12]. Под объектами капитального строительства в г. Салехарде уже пробурено и оборудовано термометрическими косами больше 300 скважин, которые передают информацию на портал <https://monitoring.arctic.yanao.ru> [10], открытый для специалистов и всех заинтересованных лиц.

Температурный мониторинг грунтов в основании зданий характеризует состояние мерзлоты, её несущую способность, однако для безопасной эксплуатации инженерных сооружений необходимо периодически проверять состояние их конструкций. Такой контроль может осуществляться различными методами — с помощью визуального осмотра, измерением прогиба дефлектометрами, контролем верхней части разреза и т.д. Несмотря на разнообразие применяемых для контроля состояния инженерных сооружений и решаемых с их помощью задач, точность и достоверность получаемых результатов не всегда соответствует предъявляемым требованиям.

В то же время одна из актуальных проблем диагностики устойчивости свай связана именно с появлением потери устойчивости свай. Потеря устойчивости может возникать вследствие размыва грунта, сезонных изменений, вызванных пучением грунта при замерзании и проседанием при оттаивании, и т. д. Возникновение потери устойчивости может привести к разрушению как свай, так и здания в целом, что может спровоцировать аварийную ситуацию. С целью предотвращения таких ситуаций и для усовершенствования разрабатываемой в округе системы автоматизированного геотехнического мониторинга зданий и сооружений опробована методика определения напряженно-деформируемого состояния конструкций, объектов с помощью метода стоячих волн. Помимо несущих конструкций, исследованы сваи фундамента на предмет целостности, глубины погружения и характера закрепления.

Методика исследований

В ранее опубликованных работах [13-16] для обнаружения подземных пустот нами был предложен пассивный сейсмический метод, основанный на выделении из шумового поля стоячих волн, образующихся под воздействием микросейсм в пространстве между дневной поверхностью и ближайшей к ней резкой границей – верхней поверхностью полости или подошвой зоны малых скоростей (ЗМС). Как показали результаты физического моделирования и натурных экспериментов, накопление большого числа амплитудных спектров относительно коротких фрагментов шумовых записей приводит к появлению на осредненном спектре регулярных пиков, соответствующих стоячим волнам. Критерием того, что это именно стоячие волны, является регулярный характер этих пиков [17]. Для стоячих волн вертикального сжатия-растяжения, образующихся над свободной верхней границей полости, как на ней, так и на дневной поверхности должны наблюдаться пучности этих волн, а их частоты кратны частоте низшей моды:

$$f_n = \frac{nV_p}{2h}, \quad (1)$$

где n – номер моды стоячих волн, V_p – скорость продольных волн, h – расстояние от верхней границы полости до дневной поверхности.

Таким образом, если на каком-либо участке распределение регулярных пиков усредненных амплитудных спектров на оси частот соответствует формуле (1), то это свидетельствует о наличии в таком месте подземной полости или иного включения с существенно пониженной относительно вмещающей среды скоростью.

Однако в случае сваи, уложенной на более мягкое основание, очевидно, что при неизменных упругих свойствах частоты стоячих волн вертикального сжатия-растяжения в ней практически не должны зависеть от того, лежит она на грунте или под ней образовалась пустота. И в том, и в другом случае как на верхней, так и на нижней границе покрытия будут наблюдаться пучности стоячих волн, а их частоты определяются формулой (1).

Если же стоячие волны формируются вне полости, над подошвой зоны малых скоростей (ЗМС), то на нижней границе ЗМС с жесткими породами образуются узлы стоячих волн, и частоты последних равны нечетным числам частоты низшей моды:

$$f_n = \frac{(2n-1)V_p}{4h}, \quad (2)$$

где h – глубина до подошвы ЗМС. И в том, и в другом случае интервал между соседними собственными частотами $\Delta f = (f_{n+1} - f_n)$ равен $V_p/2h$.

В то же время по горизонтальным компонентам наблюдается формирование изгибных стоячих волн (в случае, если свая не закреплена). Свойства этих волн существенно отличаются от свойств стоячих волн вертикального сжатия-растяжения. Во-первых, частоты этих волн должны быть значительно ниже частот стоячих волн сжатия-растяжения из-за более низкой скорости изгибных волн и преобладания горизонтальных размеров незакрепленной части сваи над вертикальными. Во-вторых, в этом случае связанные со стоячими волнами квазирегулярные пики должны располагаться на оси частот осредненных спектров не на равном расстоянии друг от друга из-за сильной частотной зависимости (дисперсии) скорости изгибных волн.

Указанные свойства изгибных стоячих волн могут быть использованы для выявления потери устойчивости свай, а в некоторых случаях при потере устойчивости по вертикали наблюдается частотно-амплитудная зависимость согласно формуле (2). В случае же жесткого закрепления сваи по горизонтальной составляющей не наблюдается квазирегулярное распределение, а по вертикали наблюдается частотно-амплитудная зависимость согласно формуле (1).

Объект исследования, оборудование и методика наблюдений

В качестве объекта исследования рассматривались детские сады:

— г. Салехард, ул. Матросова, 18

(Центр развития ребенка-детский сад «Рябинка»);

— г. Салехард, ул. Маяковского, 14

(МДОУ детский сад № 17 «Золотая Рыбка»);

— г. Салехард, ул. Чапаева, 12 (Детский сад № 7 «Крылышки»).

Для исследования собственных колебаний свай зданий в данной работе применялся метод, основанный на выделении стоячих волн из сейсмоакустических шумов. Суть метода сводится к накоплению большого числа амплитудных спектров шумовых записей, в результате чего на усредненных (или накопленных) спектрах появляются последовательности пиков, соответствующие семействам стоячих волн разных типов.

В описываемой серии экспериментов регистрация сейсмоакустических шумов проводилась в октябре 2023 г. Для регистрации использовались горизонтальные и вертикальные геофоны GS20DX, трёхканальные автономные цифровые регистраторы SCOUT и экспериментальное оборудование D-REG с частотой дискретизации 1кГц (рис. 1).

Данные регистраторы были выбраны в силу того, что они обладают более низким уровнем внутреннего шума в сравнении с другими регистрирующими аппаратами, что подтверждено в прошлых работах [18], и уменьшенным временем, необходимым для регистрации данных.

Длительность непрерывной записи в каждой точке наблюдения (рис. 2) составляла 3 и более минут. Регистрация шумов производилась на внешних стенах свай, для наилучшего контакта в некоторых случаях датчик крепился жестким хомутом. Для повышения точности измерения длины свай параллельно проводились измерения прибором для определения длины свай Спектр 4.3 (рис. 3).



Рис. 1. Измерительная аппаратура, состоящая из горизонтальных и вертикальных геофонов GS20DX в едином корпусе (справа) и трехканальных автономных цифровых регистраторов D-REG с низким уровнем собственного шума (слева)



Рис. 2. Пример установки геофонов GS20DX и трехканальных автономных цифровых регистраторов D-REG на полу одного из объектов исследования

Алгоритм выделения стоячих волн из микросейсм состоит в следующем:

1. Регистрация когерентных «паразитных» шумов для последующего учета при обработке полученных данных.

2. Регистрация шумовых записей на исследуемом объекте для выделения в них стоячих волн с использованием двух датчиков — статично зафиксированного в одной точке и перемещаемого.

3. Нормировка уровня шумов перемещаемого датчика на уровень опорного для каждого измерения.
4. Разбиение шумовых записей на блоки.
5. Преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудных спектров путем их суммирования.
6. Построение карт амплитудно-частотного распределения на исследуемой площади или профиле.



Рис. 3. Пример работ по определению длины свай с использованием Спектра 4.3

При обработке экспериментальных данных зарегистрированные в каждой свае шумовые записи разбивались на фрагменты, вычислялись амплитудные спектры этих фрагментов, и проводилось их накопление. В результате на амплитудных спектрах появлялись резкие пики (рис. 4), которые в случае регистрации вертикальных компонент соответствовали модам типа сжатия-расширения согласно формулам (1) и (2).

На рис. 4 приведены наглядные примеры распределения частот мод по вертикальным составляющим (согласно формулам (1) и (2)), для наглядности приведены формы мод.

Результаты обработки данных на примере здания ДС «Рябинка»

Всего под зданием ДС «Рябинка» были изучены все 172 сваи (рис. 5). Определены длины свай, статусы свай: «висячая» (нижний конец не закреплён) или «стойка» (нижний конец закреплён). Из 172 свай 22 оказались висячие (рис. 5). Процент висячих свай составляет 12,79%. Средняя длина составила 7,16 м, максимальная – 8,2 м, минимальная – 4,6 м под технической пристройкой.

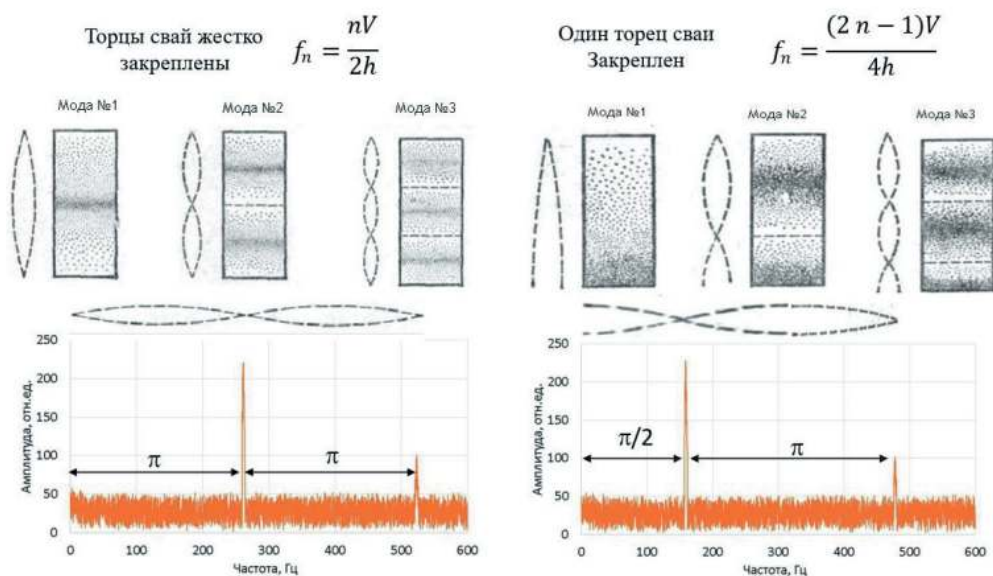


Рис. 4. Амплитудный спектр стоячих волн в сваях. Вертикальная составляющая. Номера мод типа сжатия-расширения и их формы с распределением согласно формулам (1) и (2)

В результате обработки полученных данных построена карта (рис. 5) распределения амплитуды колебаний (сумма X, Y, Z). При анализе данной карты можно выделить зоны повышенной амплитуды колебаний в центральной части вдоль ряда свай, расположенных посередине здания (рис. 5, оттенки красного). Установлено, что движение грунта направлено от центра здания в стороны, то есть от зоны повышенной амплитуды колебаний. Это с высокой вероятностью указывает на то, что центр здания закреплён более жёстко, чем его правая и левая части.

В околосвайном пространстве под зданием определяется зона повышенного коэффициента Пуассона (обводнённости) в его центральной части, в месте сочленения основного здания и пристройки (рис. 6, оттенки красного). Это может говорить о наличии длительного подтекания воды в данной зоне или интенсивного таяния грунтов.

С помощью триангуляции данных, полученных со свай, была построена карта распределения глубин границы ММП (расстояние от ростверка до границы ММП). На рис. 7 видно, что две основные зоны с наибольшей глубиной ММП совпадают с обводнёнными зонами (рис. 6).

Аналогичные исследования проведены на зданиях других социальных учреждений.

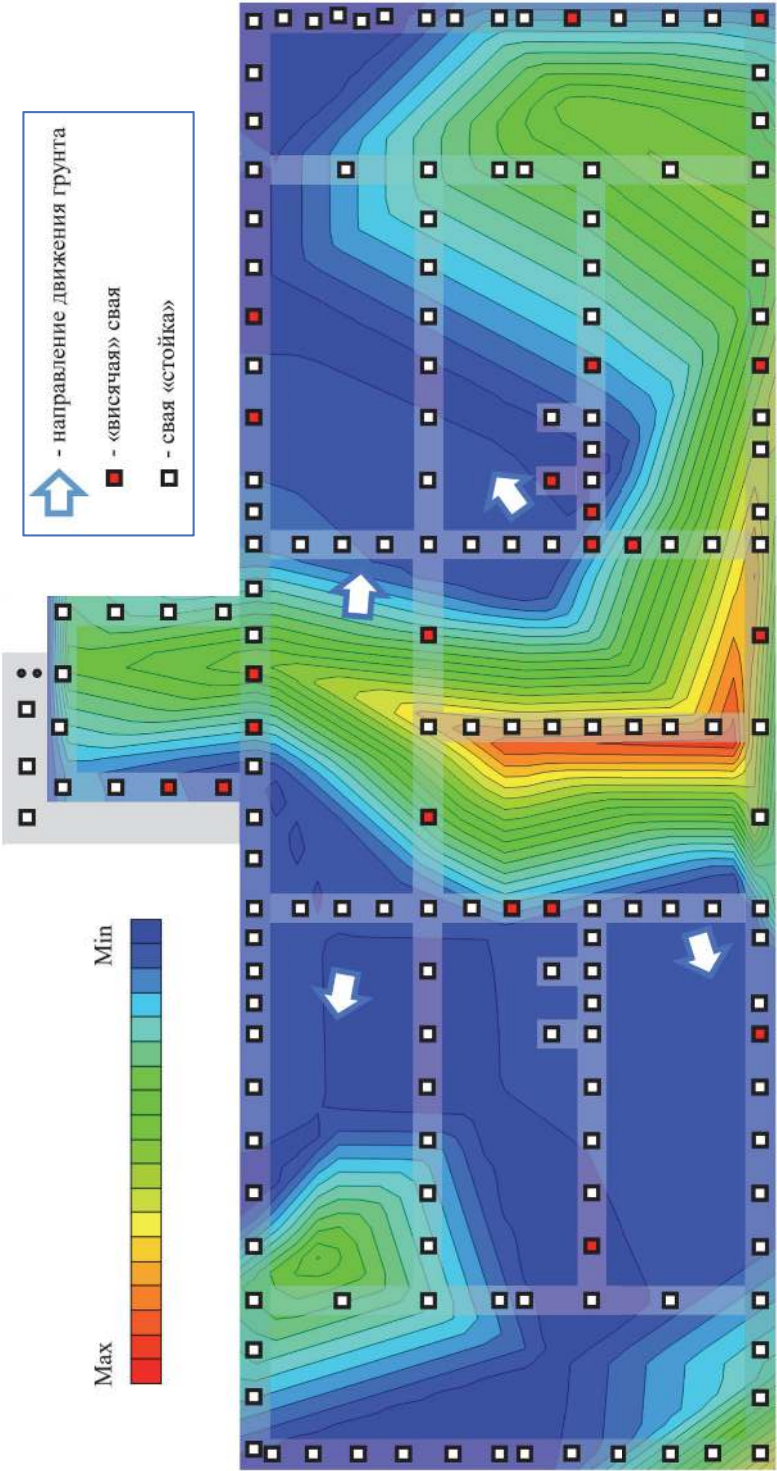


Рис. 5. План свайного поля ДС «Рябинка» с наложенной картой распределения амплитуды колебаний (сумма X, Y, Z)

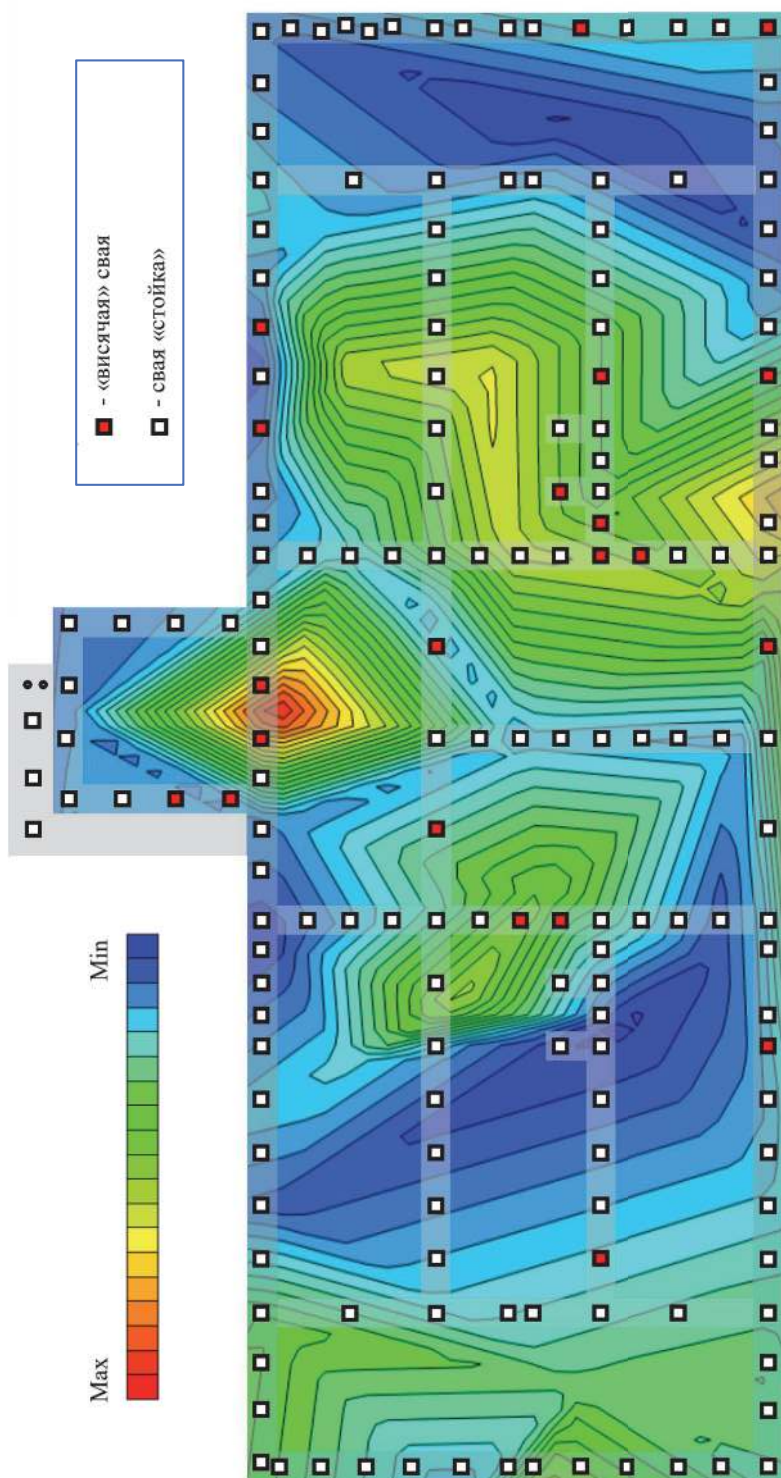


Рис. 6. Карта распределения коэффициента Пуассона, наложенная на схему свайного поля ДС «Рябинка»

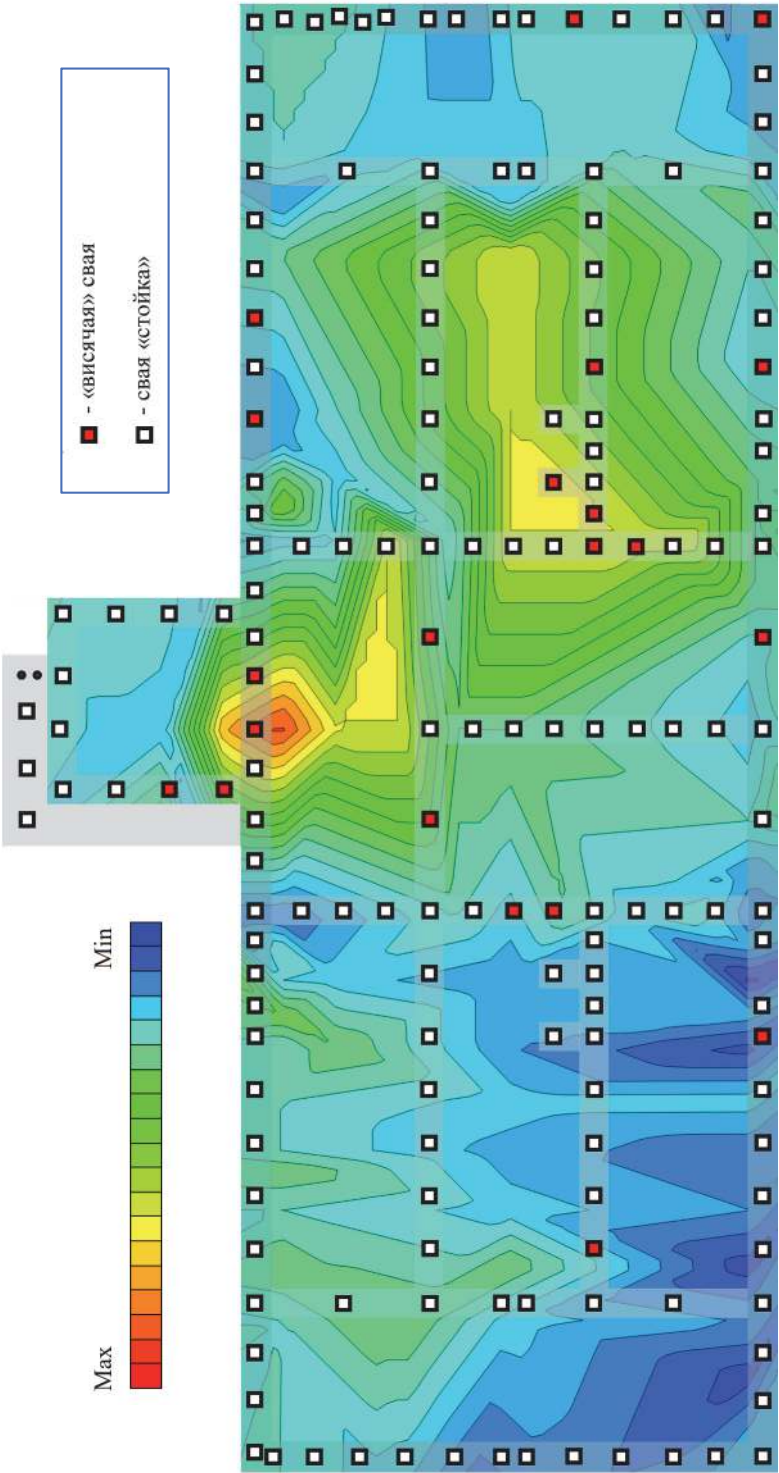


Рис. 7. План свайного поля ДС «Рябинка» с наложенной картой расстояния от ростверка до границы мерзлых грунтов в основании ДС «Рябинка»

Заключение

Температурный мониторинг грунтов в основании зданий характеризует состояние мерзлоты, её несущую способность, однако для безопасной эксплуатации инженерных конструкций необходимо периодически проверять состояние самих конструкций.

Показана эффективность метода стоячих волн для определения состояния конструкций капитальных объектов, что позволит усовершенствовать разрабатываемую систему автоматизированного геотехнического мониторинга зданий.

Проведены исследования зданий Центра развития ребенка-детского сада «Рябинка», детского сада № 17 «Золотая Рыбка», детского сада № 7 «Крылышки» с помощью метода стоячих волн. Определено напряженно-деформированное состояние конструкций объектов. Помимо несущих конструкций, исследованы сваи фундамента на предмет целостности, глубины погружения и характера закрепления.

В результате проведенных работ на объектах обследовано 507 из 584 свай, что составляет 86,82%. Среди обследованных 507 свай обнаружено 49 висячих и одна свая с дефектом, что составляет 9,86%. Определены длины у 507 свай. Определена глубина ММП у 502 свай. Определён коэффициент Пуассона, который характеризует степень увлажнения грунтов возле 500 свай.

Построены карты распределения амплитуды колебаний (сумма X , Y , Z) в двух вариантах: на плане свайного поля и на плане первого этажа каждого здания. Повышенные амплитуды на картах соответствуют скрытым трещинам и повышенным зонам напряжения в конструкциях. Помимо зон с повышенной амплитудой колебаний определены зоны повышенной увлажнённости грунта, в части случаев совпадающие с местами подтекания воды в подполье здания. Составлена карта распределения глубины ММП на плане свайного поля. Определена взаимосвязь между степенью закрепления свай, направлением движения грунта и напряжениями в конструкциях детских садов.

В зонах с повышенной амплитудой колебаний рекомендовано установить датчик постоянного мониторинга, позволяющий отслеживать колебания конструкции в реальном времени и регистрировать изменение амплитудно-частотных характеристик сооружения.

Работа выполнена в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального НОЦ «Прогноз деградации мерзлоты и технология автоматизированного контроля несущей способности мерзлых грунтов под объектами капитального строительства».

Список источников

1. Brown J., Ferrians Jr, O.J., Heginbottom J.A. and Melnikov E.S. (1997). Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions (p. 45). Reston, VA: US Geological Survey.
2. Brown J., Ferrians, Heginbottom J.A. and Melnikov E. (2002). Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. [online]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, DOI: 10.7265/skbg-kf16. (Accessed 20 Apr. 2023).
3. Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И. Изменение несущей способности мёрзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. — 2012. — Vol. XVI. — № 1. — С. 22-32.
4. СП 25.13330.2020. Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. СНиП 2.02.04-88 (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 30.12.2020 № 915/пр) (ред. от 31.05.2022).
5. Постановление Госстроя РФ от 27.09.2003 № 170 (с изм. от 22.06.2022) «Об утверждении Правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда» (зарегистрировано в Минюсте РФ 15.10.2003 № 5176) [электронный ресурс] / КонсультантПлюс: [http://www.consultant.ru/](http://www.consultant.ru/URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_44772/) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_44772/ (дата обращения: 03.11.2023).
6. 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.
7. Громадский А.Н. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномёрзлых грунтов под зданиями г. Салехарда / 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.
8. 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>.
9. 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. <https://doi.org/10.3390/land11071102>.
10. System of automated geocryological monitoring (2021) [online] Available at: <https://monitoring.arctic.yanao.ru/> (Accessed 20 Apr. 2021 in Russian).

11. Расширение сети автоматизированного температурного мониторинга грунтов под объектами капитального строительства на территории г. Салехарда в 2022 г. / В. А. Паламарчук, А. Н. Шеин, Е. С. Королева [и др.] // Строеение литосферы и геодинамика : Материалы XXX Всероссийской молодежной конференции, Иркутск, 16–21 мая 2023 года. — Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2023. — С. 212–215.
12. Шеин А.Н., Филимонов М.Ю., Ваганова Н.А., Леопольд Я.К. Теплотехнические расчёты для оснований двух зданий в г. Салехарде с учётом температурного мониторинга мёрзлых грунтов // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. — 2023. (121). — № 4. — С. 21–36. Doi: 10.26110/ARCTIC.2023.121.4.002.
13. Колесников Ю.И., Федин К.В. Прямое определение резонансных свойств верхней части разреза по микросейсам: натурный эксперимент // Технологии сейсморазведки. — 2017. — № 3. — С. 5–21.
14. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment // Geophys Prospect. 2018. Vol. 66. Iss. 2. P. 342–353.
15. Колесников Ю.И., Федин К.В., Нгомайезве Л.О. Влияние сезонных изменений резонансных свойств приповерхностных грунтов на сейсмобезопасность сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2019. — № 3. — С. 57–64.
16. Kolesnikov, Y. I. Direct determination of resonant properties of near-surface sediments using microtremor / Y. I. Kolesnikov, K. V. Fedin, L. Ngomayezwe // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 2019. — Vol. 125. — P. 105739. — DOI 10.1016/j.soildyn.2019.105739.
17. Хайкин С.Э. Физические основы механики. — М.: Наука, 1971. — 752 с.
18. Eponechnikova L., Dergach P., Duchkov A. Reducing the Cost of Microseismic Monitoring for Ensuring Safety in Mining // 82nd EAGE Annual Conference and Exhibition Workshop Programme (Amsterdam, The Netherlands, December 8–11, 2020): Abstracts. — Amsterdam, 2020. P. 1–5.

Сведения об авторах

Федин Константин Владимирович, 1986 г.р., окончил геолого-геофизический факультет НГУ в 2010 г., в 2015-м защитил кандидатскую работу. ИНГГ СО РАН, старший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики (Новосибирск, Россия), к.т.н. Читает курс лекций в НУГ и НГТУ. Сфера научных интересов: сейсмостойкость, определение несущей способности, нахождение полостей в грунте, дефектоскопия.

Шеин Александр Николаевич, 1981 г.р., окончил механико-математический факультет НГУ, в 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию. ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (Салехард, Россия), ведущий

научный сотрудник сектора криосферы, к.ф.-м.н., доцент. Сфера научных интересов: численное моделирование электромагнитных и температурных полей, криолитозона, геотехнический мониторинг, импульсная электроразведка, электротомография, георадиолокация, процессы вызванной поляризации.

Грушкевич Дмитрий Владимирович, 1992 г.р., окончил факультет автоматики и вычислительной техники НГТУ, в 2013 г. выполнил и защитил выпускную квалификационную работу, бакалавр техники и технологии по направлению «Информатика и вычислительная техника». ИНГГ СО РАН, инженер лаборатории динамических проблем сейсмики (Новосибирск, Россия).

Участие авторов

Федин К.В. — концепция исследования, обработка данных, написание текста, оформление графики;

Шеин А.Н. — концепция исследования, написание и редактирование текста;

Грушкевич Д.В. — концепция исследования, написание текста, оформление графики.

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

Статья поступила в редакцию 26.01.2024 г., принята к публикации 27.02.2024 г.

The article was submitted on January 26, 2024, accepted for publication on February 27, 2024.