

УДК 550.34.016

Контроль технического состояния зданий и сооружений на многолетнемёрзлых грунтах по изменению частот собственных колебаний (по данным сейсмического мониторинга здания свайного типа – Дворца культуры г. Норильска)

© 2023 г. Е.Э. Косякина, А.В. Лисейкин, П.В. Громыко, В.С. Селезнев

СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 20.04.2023 г.

Аннотация. Исследуется связь температурных колебаний и изменений собственных частот инженерного сооружения свайного типа, находящегося на многолетнемёрзлых грунтах, в связи с развитием методики контроля технического состояния аналогичных сооружений. Объект исследования – Дворец культуры ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель», расположенный в г. Норильске, где в последние годы оттаивание грунтов несёт потенциальную угрозу устойчивости инженерных сооружений. Базовые значения частот собственных колебаний здания определены в августе 2021 г. методом когерентного восстановления полей стоячих волн и составляют 3.0, 3.7, 4.7 Гц по короткой оси и 3.5 и 5.2 Гц по длинной оси. Текущие (ежедневные) значения частот определяются с погрешностью не более 0.01 Гц по амплитудным спектрам записей сейсмического шума (без активных источников), которые были получены при непрерывном сейсмическом мониторинге с конца августа 2021 г. по начало сентября 2022 г. Из сопоставления изменения частот собственных колебаний с колебаниями температуры окружающей среды следует, что в течение года частоты существенно изменяются (в зимний период их значения выше на 11–12%, чем в летний), предположительно, из-за оттаивания/промерзания верхней части грунта. На фоне этого изменения выявлены локальные колебания значений частот в связи с охлаждением/прогревом строительного материала здания преимущественно при положительной температуре окружающего воздуха (частоты растут прямо пропорционально температуре в пределах 5–7%). Согласно результатам анализа данных мониторинга, после годового цикла собственные частоты здания в августе 2021 г. и 2022 г. не равны (разница составляет до 1.7%), что объясняется, предположительно, разной глубиной оттаивания грунта в летний период. Для оценки воздействия этого явления на техническое состояние здания необходимо продолжать мониторинг, в первую очередь, с получением данных об изменении собственных частот здания зимой 2022–2023 гг. в период полного промерзания грунта.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, контроль технического состояния сооружений, влияние температуры на частоту собственных колебаний.

Для цитирования: Косякина Е.Э., Лисейкин А.В., Громыко П.В., Селезнев В.С. Контроль технического состояния зданий и сооружений на многолетнемёрзлых грунтах по изменению частот собственных колебаний (по данным сейсмического мониторинга здания свайного типа – Дворца культуры г. Норильска) // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 3. – С. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.3.03>. – EDN: JDMRRY

Введение

Исследование посвящено развитию способа контроля технического состояния сооружений по изменению частот собственных колебаний с целью предупреждения рисков их разрушения и обеспечения безопасной эксплуатации. Динамический мониторинг технического состояния сооружений по собственным частотам

в режиме реального времени является актуальной задачей, поскольку может позволить заблаговременно предупреждать о разрушительных процессах, происходящих в конструкции здания. Основой для развития способа являются результаты детальных исследований собственных колебаний сооружений.

В последнее время в северных регионах отмечается значительное повышение температуры

воздуха, в связи с чем происходит оттаивание многолетнемерзлых пород, что приводит к уменьшению несущей способности грунтов и потере устойчивости любых инженерных сооружений в Заполярье. Одним из ярких примеров неустойчивости грунта из-за таяния вечной мерзлоты является авария на дочернем предприятии «Норильский никель» ТЭЦ-3 в г. Норильске [Коновалова, 2020]. В мае 2020 г. из-за проседания свай фундамента произошла разгерметизация одного из резервуаров и вылилось более 21 тыс. т топлива.

В настоящее время в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН разрабатывается способ контроля технического состояния инженерных сооружений, основанный на мониторинге частот их собственных колебаний. Изменение мод и частот собственных колебаний может свидетельствовать о разрушительных процессах как в основании, так и в конструкции сооружения. Однако изменение частот собственных колебаний сооружения может быть вызвано как разрушительными процессами, так и изменением факторов окружающей среды [Liseikin et al., 2020]. Предлагаемый способ определения частот собственных колебаний по спектрам микросейсмического шума позволяет обнаружить возникновение в конструкции сооружения аномальных напряжений, возможных дефектов, а также исследовать влияние сезонных изменений на объект исследования.

Инженерные сооружения выдерживают многочисленные воздействия окружающей среды, такие как перепады температуры, ветровая нагрузка, изменение влажности, изменение граничных условий (контакт с породами) и старение материала. Указанные эффекты приводят к ухудшению технического состояния сооружений, снижению их устойчивости и риску разрушения. Одним из немногих факторов окружающей среды, который можно легко измерить, является изменение температуры. Существуют многочисленные исследования влияния температуры на собственные частоты инженерных сооружений, где на основе данных мониторинга получают зависимость собственных частот исследуемого объекта от изменения температур и/или времени года. Так, для изучения влияния температуры на динамические характеристики в течение многих лет проводились наблюдения за различными мостами в широком диапазоне температур [Alampalli, 2000; Lloyd et al., 2004; Moser, Moaveni, 2011; Magalhaes et al., 2012; Moaveni, Behmanesh, 2012; Guang-Dong, Ting-Hua, 2014; Cheynet et al., 2017; Nguyen et al., 2017]. Также проводился мониторинг различных типов

зданий [Yuen, Kuok, 2010; Ubertini et al., 2017; Kita et al., 2019; Ceravolo et al., 2021; Larsson et al., 2022; Sun et al.; 2022, Alarcon et al., 2023], результаты которого свидетельствуют о сезонных изменениях собственных частот и показывают их различные зависимости от колебаний температуры. Как правило, они близки к линейным, но в ряде случаев имеют нелинейную форму со скачкообразным изменением в точке перехода температуры окружающей среды через 0°C [Moaveni, Behmanesh, 2012]. Результаты различных исследований могут отличаться друг от друга, но несомненно, что разброс и наклон графиков частотно-температурных зависимостей в значительной степени отличаются для различных типов сооружений, а также для их географического положения, от которого напрямую зависят условия окружающей среды.

Объект исследования и методики наблюдений

Объект исследования – Дворец культуры ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель» (г. Норильск, Ленинский проспект, д. 9). Городской центр культуры (рис. 1) открылся в 1965 г. и являлся одним из ведущих учреждений культурно-досуговой деятельности на территории г. Норильска, в 2021 г. здание было закрыто. Дворец представляет собой возведённое в зоне вечной мерзлоты четырёхэтажное здание шириной 48 м и длиной около 70 м, установленное на свайный фундамент. Вследствие сезонных колебаний температуры происходит пучение грунта при замерзании и проседание при оттаивании, что может привести к потере устойчивости сооружения, разрушительным процессам как в сваях, так и в здании в целом, и спровоцировать аварийную ситуацию.

В процессе эксплуатации сооружения (более 50 лет) возможно образование как внутренних (скрытых), так и внешних дефектов конструкции. Так, во время проведения сейсмического исследования были обнаружены трещины внутри здания, что свидетельствует о разрушительных процессах в конструкции сооружения. Стоит отметить, что исследуемое здание временно приостановило свою деятельность, начиная с 2021 г.

С целью достоверного определения базовых значений собственных частот исследуются собственные колебания здания методом когерентного восстановления полей стоячих волн [Селезнев и др., 1999; Emanov et al., 2002]. Метод основан на выделении стоячих волн исследуемого объекта из микросейсмического шума и позволяет определять основные динамические параметры

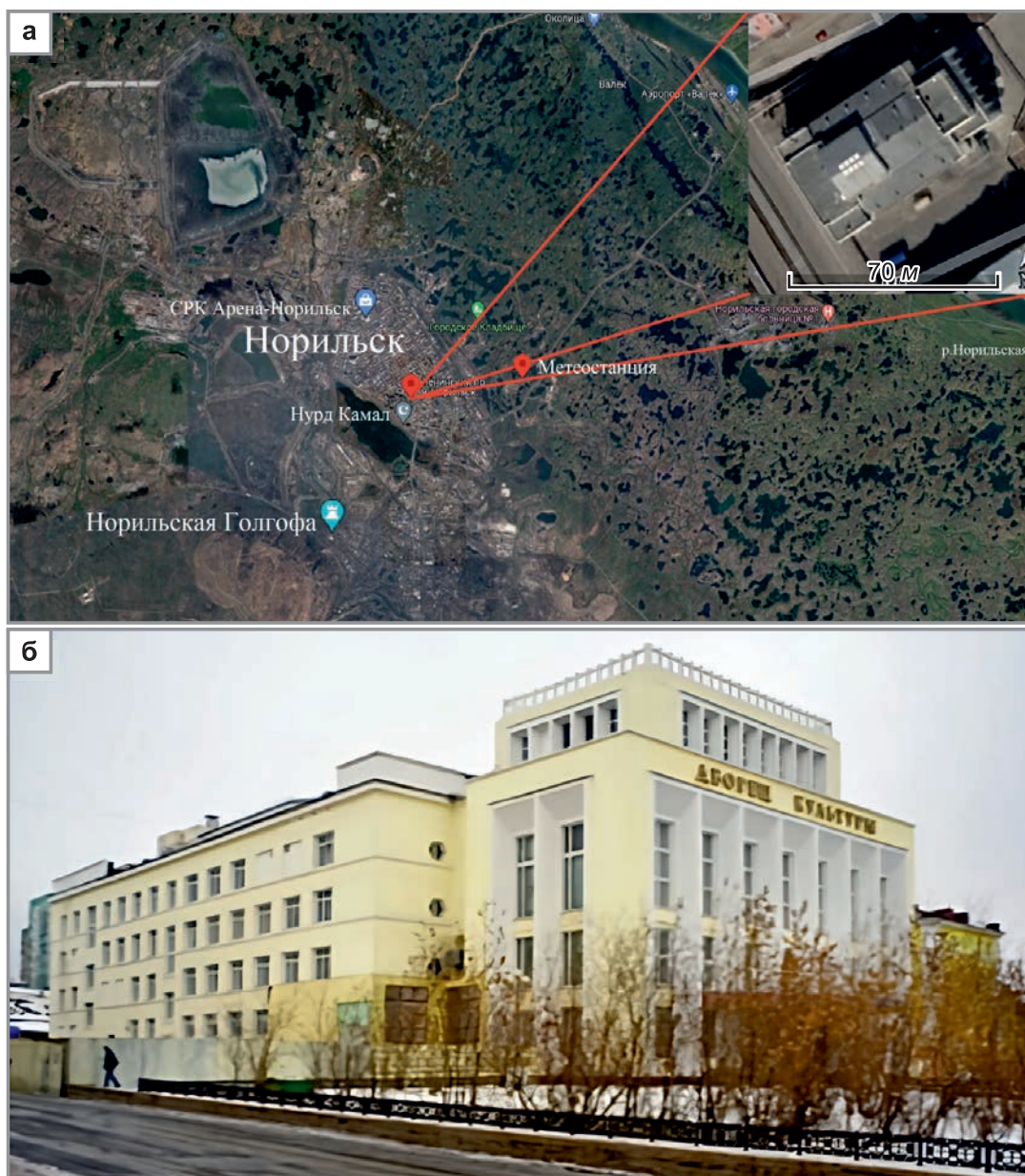


Рис. 1. Схема расположения исследуемого здания (а) и его внешний вид (б)

колебаний здания или сооружения — частоты и моды собственных колебаний. Суть его состоит в следующем. Регистрация колебаний здания или сооружения под воздействием микросейсм ведётся одновременно в опорной группе и группе перемещаемых точек. Такими наблюдениями исследуемый объект можно детально изучить плотной сеткой регистраций с малокаанальной аппаратурой. Далее осуществляется преобразование разновременных наблюдений в разных точках здания в одновременную запись стоячих волн на всей сетке наблюдений.

В качестве регистрирующей аппаратуры использовались комплекты 3-канальных авто-

номных регистраторов «Байкал-7», оснащённых велосиметрами GD-4.5 или GD-10, разработанными и произведёнными в ФИЦ ЕГС РАН. Регистрация микросейсмических колебаний проводилась 21 августа 2021 г. на четвёртом этаже здания по схеме, изображённой на рис. 2. Длительность записи в каждой точке наблюдения составляла 10 минут. После регистрации производилась цифровая обработка согласно методике [Селезнев и др., 1999; Епанов et al., 2002] с расчётом усреднённых спектров когерентных колебаний.

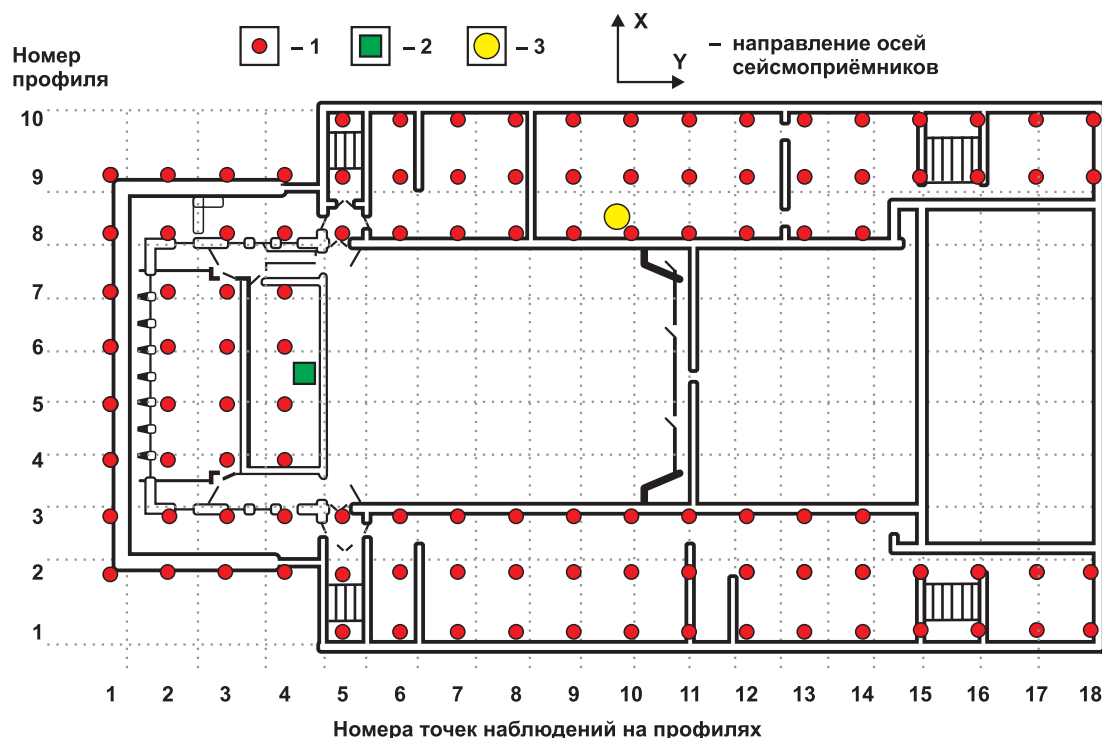


Рис. 2. Схема наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний на четвёртом этаже здания.

1 — временные места установки датчиков; 2 — опорная точка; 3 — место постоянной регистрации для регулярного определения собственных частот с августа 2021 г. по сентябрь 2022 г.

На рис. 3 приведено спектральное представление когерентных колебаний вдоль профиля «2» (рис. 2) по данным регистрации микросейсмического шума на четвёртом этаже здания по трём компонентам. Устойчивое положение вдоль профиля чередующихся максимумов (пучностей) и минимумов (узлов) амплитуды на частотах 3.0, 3.7 и 4.7 Гц (для X-компоненты) и 3.5, 5.2 Гц (для Y-компоненты) свидетельствует о том, что эти колебания являются стоячими волнами, сформировавшимися в сооружении. При этом по вертикальной Z-компоненте стоячие волны не выявлены. В таблице приведены частоты выделенных собственных колебаний по данным 21.08.2021 г. Всего выделено пять собственных частот: три — для X-компоненты и две — для Y-компоненты, в вертикальном направлении (Z) стоячие волны не формируются. Следует отметить, что погрешность определения частот собственных колебаний методом когерентного восстановления полей стоячих волн зависит напрямую от параметров регистрации и обработки записей микросейсмического шума. Так, при расчёте усреднённых спектров когерентных колебаний, представленных на рис. 3, размер блока, по которому рассчитывались спектры, участвующие в усреднении, составлял 10 с. Этим размером определялась разрешённость спектра

и, соответственно, погрешность определения частот в 0.1 Гц. В данном случае не учитывается воздействие шумов, поскольку они не оказывают серьёзного влияния.

Метод когерентного восстановления полей стоячих волн даёт возможность определять детальные моды для каждой из частот собственных колебаний сколь угодно сложного инженерного объекта. Это исключает ошибки в их идентификации. Однако такой метод требует, прежде всего, больших временных, а также материальных затрат на регистрацию колебаний на плотной сети наблюдений, на обработку цифровых данных и интерпретацию результатов. Соответственно, он не подходит для оперативного и регулярного (например, ежедневного) определения значений частот собственных колебаний сооружений. Поэтому дальнейшее определение значений частот выполнялось более простым способом — по амплитудным спектрам записей микросейсмического шума, непрерывно регистрируемого на объекте.

Суть способа сводится к усреднению большого числа амплитудных спектров шумовых записей, в результате чего на спектрах проявляются последовательности локальных максимумов, соответствующие набору частот стоячих волн.

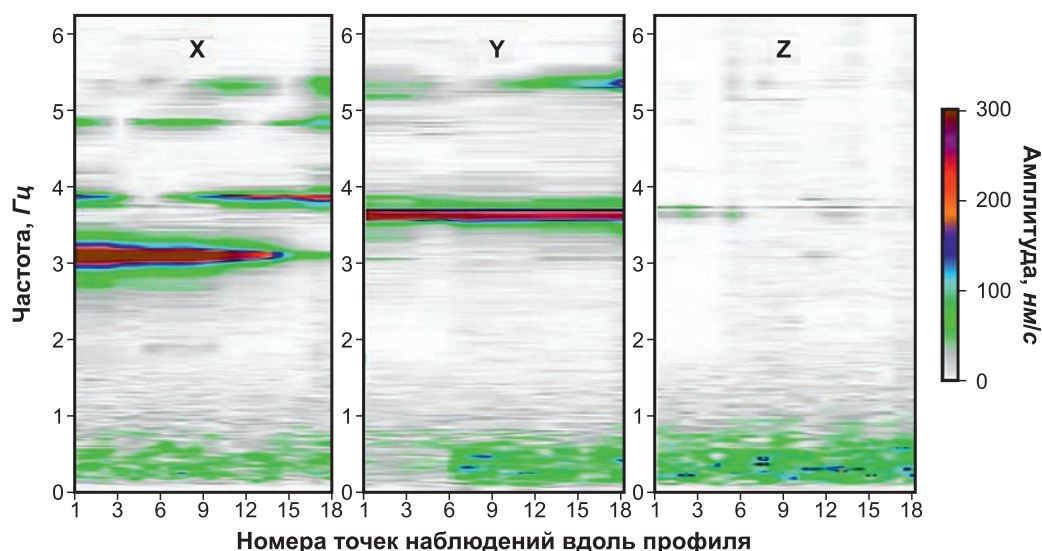


Рис. 3. Спектральное представление поля стоячих волн вдоль профиля «2» на четвёртом этаже здания по трём компонентам

Таблица. Частоты собственных колебаний здания Дворца культуры в г. Норильске

	Номер моды	Частота по данным от 21.08.2021 г., Гц (метод когерентного восстановления полей стоячих волн)	Частота по данным от 27.08.2021 г., Гц (по амплитудным спектрам записей микросейсмического шума, непрерывно регистрируемого на объекте)
X (поперёк здания)	1	3.0	2.96
	2	3.7	3.68
	3	4.7	4.60
Y (вдоль здания)	1	3.5	3.46
	2	5.2	4.98

В описываемом эксперименте регистрация микросейсмического шума на исследуемом объекте проводится, начиная с 27 августа 2021 г.

Используется мобильный сейсморегирующий комплекс [Брыксин и др., 2022], содержащий в себе:

- регистратор «БАЙКАЛ-8»;
- трёхкомпонентный сейсмоприёмник GD-4.5 (2 шт.);
- микро-ПК RaspberryPi;
- защитный кейс;
- роутер Zexel Keenetic Extra II;
- антенна GPS.

Сейсмоприёмники располагаются на первом и четвёртом этажах здания (рис. 2). Местоположение пунктов регистрации выбрано в местах, отличных от узлов стоячих волн, в соответствии с методикой [Селезнев и др., 2015]. Регистрация ведётся непрерывно (за исключением сбоев в системе или выхода аппаратуры из строя) с шагом дискретизации 500 Гц, а передача дан-

ных производится в режиме реального времени на сервер СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в г. Новосибирск.

Обработка полученных записей микросейсмического шума проводится при помощи программного обеспечения «SpectrumSeism» [Селезнев и др., 2021], разработанного специалистами СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Данное программное обеспечение позволяет рассчитывать и визуализировать в заданных окнах спектр и спектрограмму по сейсмическим записям регистрируемого сигнала.

Алгоритм обработки записей сейсмического шума состоит в следующем. Исходная (суточная) запись разбивается на блоки, для каждого из которых производится преобразование Фурье (совершается переход в частотную область значений), затем вычисляется его модуль, тем самым получается спектрограмма. Далее, производя усреднение всех шумовых данных в каждой точке, получается амплитудный спектр. При этом длина блока задаётся равной 100 с для получения

высокой разрешённости спектра в 0.01 Гц . После этого по локальным максимумам усреднённых спектров определяются значения частот.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 4 приведён пример усреднённых за сутки амплитудных спектров записей микросейсмических колебаний на первом и четвёртом этажах здания. Так как частоты их локальных максимумов совпадают, можно сделать вывод о том, что в этих пунктах наблюдения регистрируются одни и те же сигналы. Набор частот, определённых по локальным максимумам амплитудных спектров по данным 27.08.2021 г., также приведённый в таблице, согласуется (в пределах точности измерений и с учётом временных вариаций) с частотами, полученными ранее методом когерентного восстановления полей стоячих волн. Это свидетельствует о том, что выделяемые частоты являются собственными для исследуемого сооружения. Их различие (в пределах $0.1\text{--}0.2 \text{ Гц}$) объясняется, во-первых, погрешностью определения частот методом когерентного восстановления полей стоячих волн (как отмечалось выше, она составляла 0.1 Гц) и, во-вторых, тем, что измерения проводились в разные даты. Кроме этого видно, что амплитуда колебаний верхней части здания в несколько раз выше, чем нижней. Это объясняется известным фактом из практики инженерно-сейсмологических исследований, согласно которому усиление колебаний при сейсмических воздействиях от низа здания к верхней его части происхо-

дит преимущественно на частотах собственных колебаний [Селезнев и др., 1999; Emanov et al., 2002].

Сравнение значений частот первых мод собственных колебаний (по длинной и короткой оси здания), зарегистрированных в точках наблюдения на первом и четвёртом этажах сооружения, приведено на рис. 5. Из графиков видно практически полное совпадение значений частот за двухмесячный период мониторинга. Систематическое смещение разностей частот, определённых при регистрации на четвёртом и первом этажах здания (рис. 6), находится в пределах дискретизации, поскольку спектральное разрешение в данном случае составляет 0.01 Гц (размер окна 100 с). Такие незначительные отличия в частотах подтверждают вывод о том, что на нижнем и верхнем этажах здания регистрируются одни и те же стоячие волны, причём погрешность определения частот не превышает 0.01 Гц . Разница частот первого и четвёртого этажей в тысячные доли Гц объясняется тем, что при определении частот (в процессе обработки записей микросейсмического шума) часто берутся промежуточные значения между дискретами.

Исследование годовых изменений частот собственных колебаний Дворца культуры проведено на примере данных четвёртого этажа, поскольку амплитуды собственных колебаний на нём выше (рис. 4), поэтому результаты обработки данных представляются более надёжными. Результаты обработки записей микросейсмического шума на четвёртом этаже представлены на рис. 7.

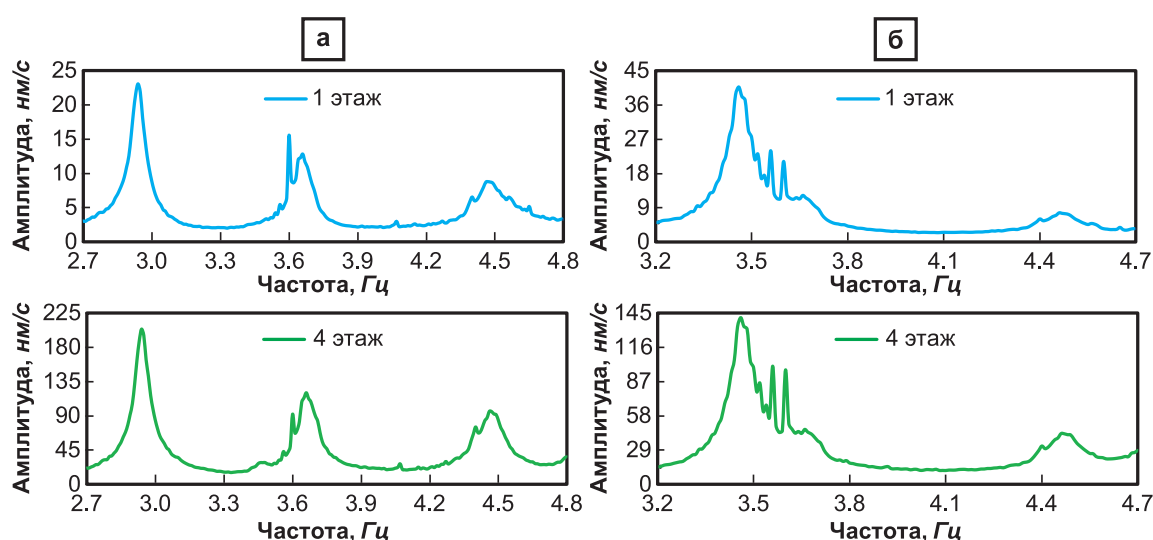


Рис. 4. Усреднённые за сутки амплитудные спектры записей микросейсмического шума на первом и четвёртом этажах здания по компонентам X (а) и Y (б) при одновременной регистрации 01.07.2022 г.

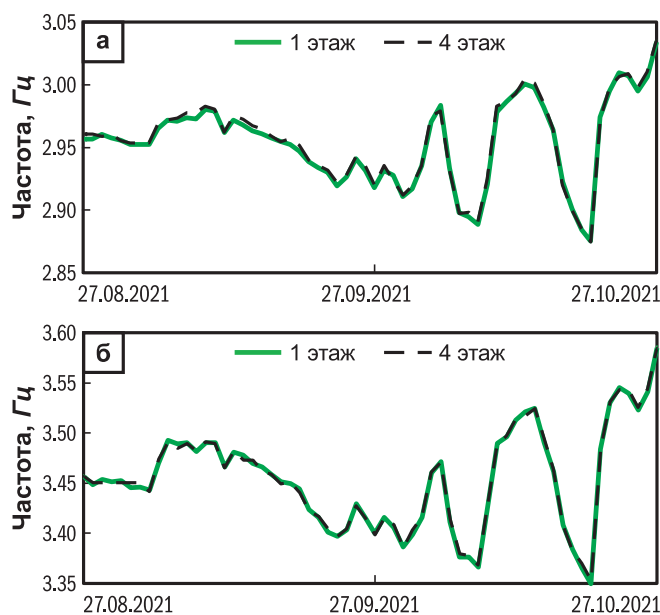


Рис. 5. Сравнение частот первых мод собственных колебаний по компонентам X (а) и Y (б) на первом и четвёртом этажах здания

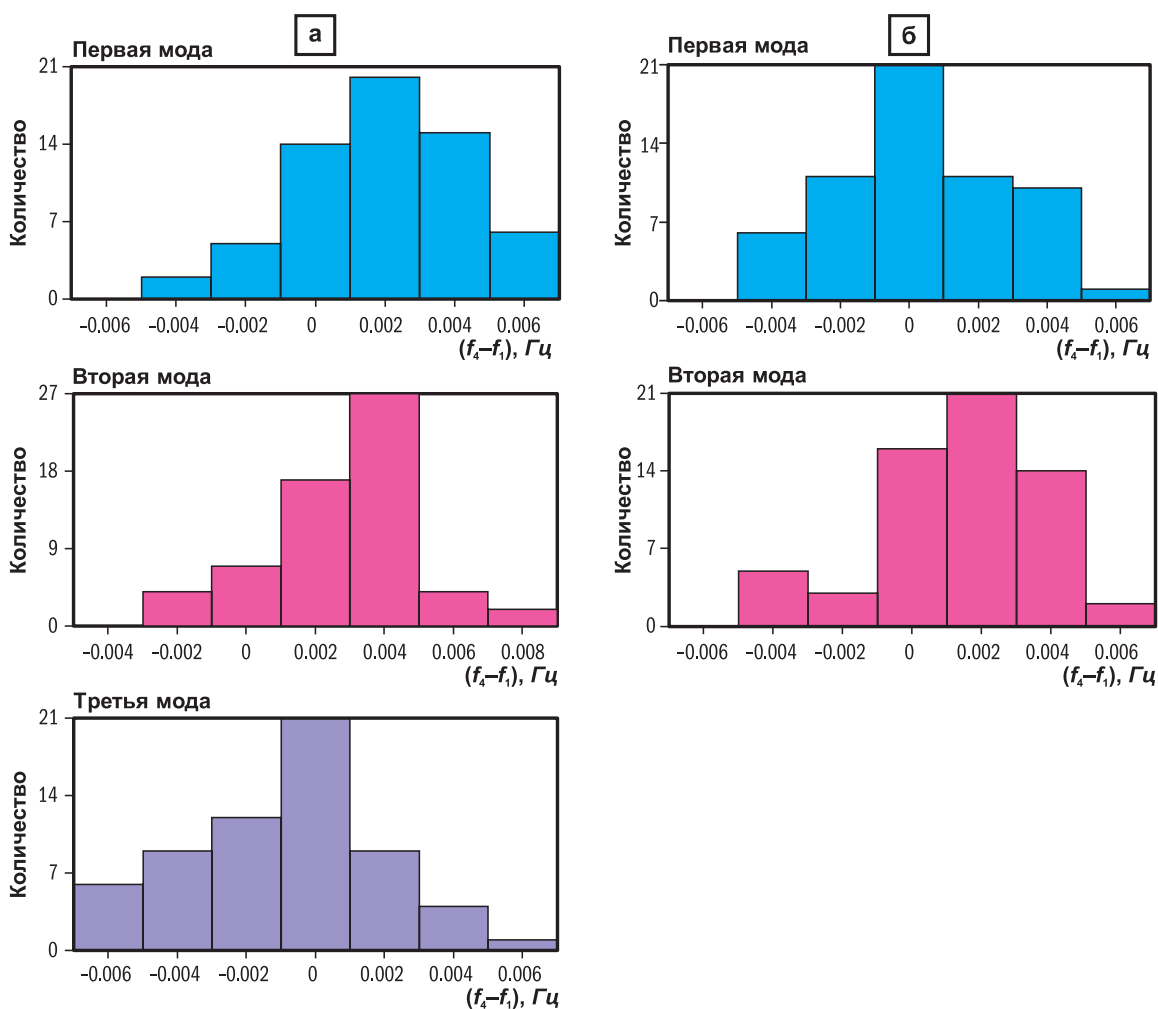


Рис. 6. Гистограммы разностей частот, определённых на четвёртом и первом этажах по компонентам X (а) и Y (б) микросейсмических шумов при одновременной регистрации с 27.08.2021 г. по 27.10.2021 г.

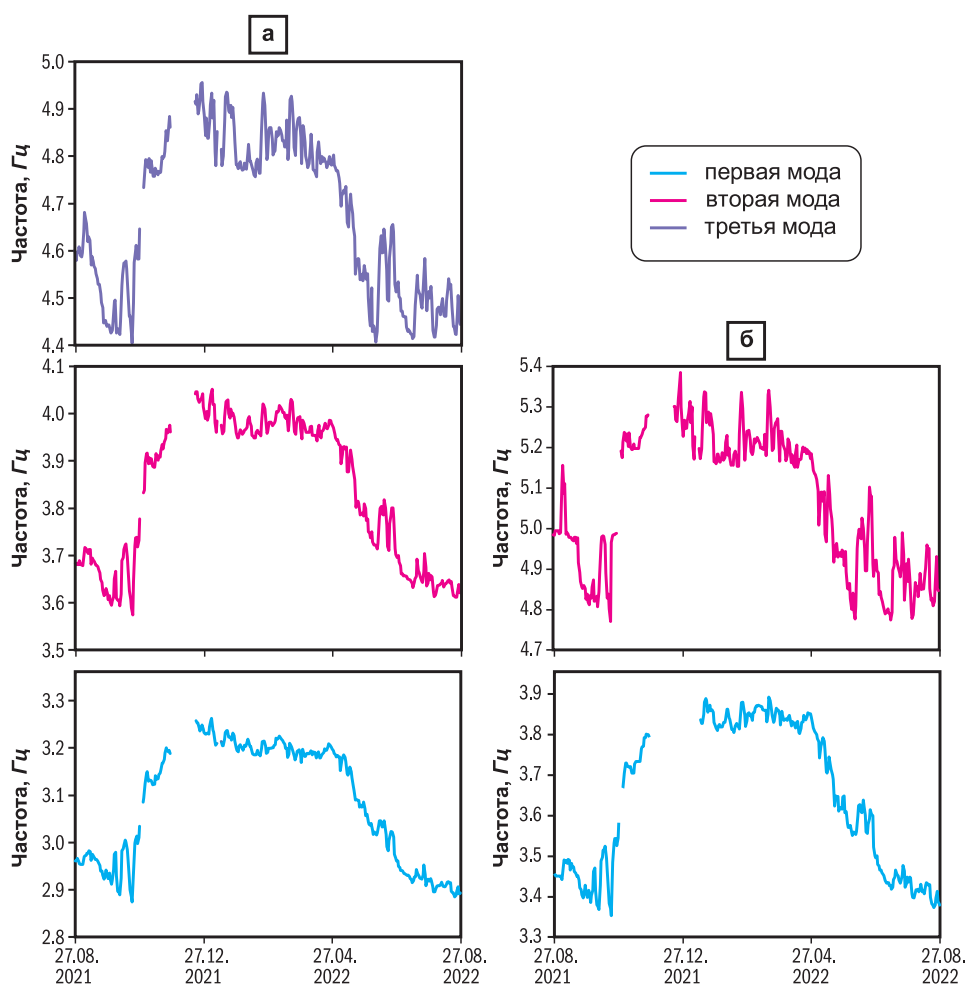


Рис. 7. Изменение частот собственных колебаний по компонентам X (а) и Y (б) во времени

Собственные частоты первых трёх видимых мод следующие. По компоненте X : первая мода — от 2.87 до 3.26 Гц, вторая мода — от 3.57 до 4.05 Гц, третья мода — от 4.40 до 4.96 Гц (рис. 7а). По компоненте Y : первая мода — от 3.35 до 3.93 Гц, вторая мода — от 4.77 до 5.38 Гц (рис. 7б).

Из графиков изменения во времени частот низших мод собственных колебаний здания видно, что частоты повторяют характер изменения друг друга. Заметен значительный разброс частот между зимой и летом (в зимний период частоты выше на 11–12%, чем в летний период), а также рост частот в осенне-зимний период 2021 г. и их спад в весенне-летнем периоде 2022 г. Эти периоды соответствуют времени промерзания и оттаивания грунта.

Изменение температуры воздуха влечёт за собой изменение температуры многолетнемерзлых пород, что вызывает их оттаивание и может привести к уменьшению несущей способности грунтов и, при катастрофическом сценарии, к потере устойчивости здания. Несомненно, оттаивание даже верхней части грунта, в котором

закреплены сваи здания, приводит к изменению жёсткости конструкции, а значит и к изменению частот собственных колебаний. В связи с этим сопоставляются изменения частот первых мод (поскольку последующие моды имеют аналогичный характер изменения) по X и Y осям здания и температуры в г. Норильске с течением времени (рис. 8). Метеостанция, данные которой использовались [Климатический ..., 2022], находится приблизительно в 2.15 км от исследуемого объекта (рис. 1а). Отмечается, что частоты собственных колебаний здания, пройдя годовой цикл, не вернулись к исходной точке, а сместились и стали на 1.7% меньше. Указанное смещение также отмечается на графиках годовой зависимости частот собственных колебаний здания по компонентам X и Y от температуры (рис. 9).

Из графиков зависимости частоты собственных колебаний здания от температуры (рис. 9) видно, что в течение года частота изменяется обратно пропорционально температуре. При понижении температуры среды в зимнее время грунт, в котором расположены сваи, полностью

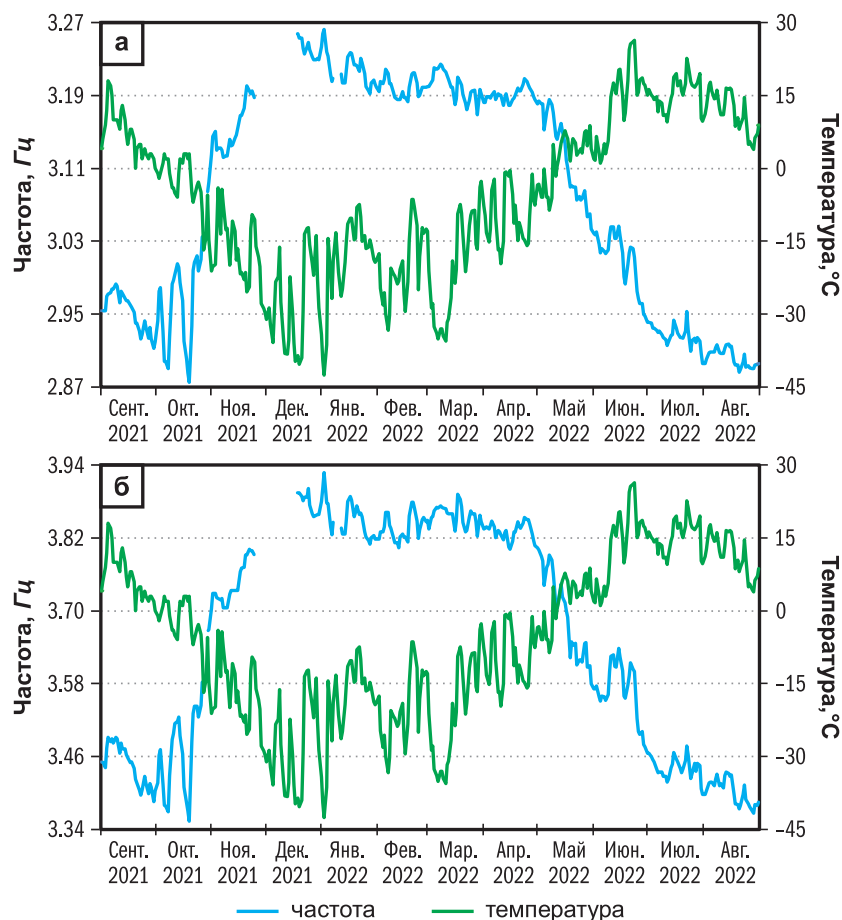


Рис. 8. Сравнение частоты первой моды собственных колебаний по компонентам X (а) и Y (б) со среднесуточной температурой в течение года

промерзает. Как следствие, увеличивается жёсткость конструкции здания, следовательно, увеличивается и частота. Из анализа графиков следует, что промерзание грунта приводит к резкому изменению жёсткости конструкции, поскольку вид зависимости частоты от температуры в точке перехода через 0°C существенно изменяется. На графиках цветными маркерами отмечены значения частот в тёплое и холодное время года, исключая переходные периоды частичного промерзания (с 01.10.2021 г. по 18.12.2021 г.) и оттаивания (с 12.05.2022 г. по 12.07.2022 г.) верхней части грунта, для более наглядного различия частотно-температурных зависимостей в эти периоды. На графиках годовой зависимости частот собственных колебаний от среднесуточной температуры видно, что преимущественно при положительной температуре окружающего воздуха частоты растут прямо пропорционально температуре (в пределах 5–7%). Наиболее вероятно, что эти локальные колебания значений частот связаны с охлаждением/прогревом строительного материала здания.

Заключение

Проведённое исследование направлено на развитие способа контроля технического состояния зданий и инженерных сооружений, расположенных на многолетнемёрзлых грунтах. Целью такого контроля является предупреждение рисков разрушения по изменениям частот собственных колебаний.

В последние годы в северных регионах проблема оттаивания многолетнемёрзлых пород приводит к уменьшению несущей способности грунтов и несёт потенциальную угрозу устойчивости любых инженерных сооружений. По данным сейсмического мониторинга на примере здания Дворца культуры в г. Норильске исследуется связь температурных колебаний с изменением собственных частот сооружения свайного типа, находящегося на многолетнемёрзлых грунтах. Базовые значения частот собственных колебаний здания определены в августе 2021 г. методом когерентного восстановления полей стоячих волн и составляют 3.0, 3.7, 4.7 Гц по короткой

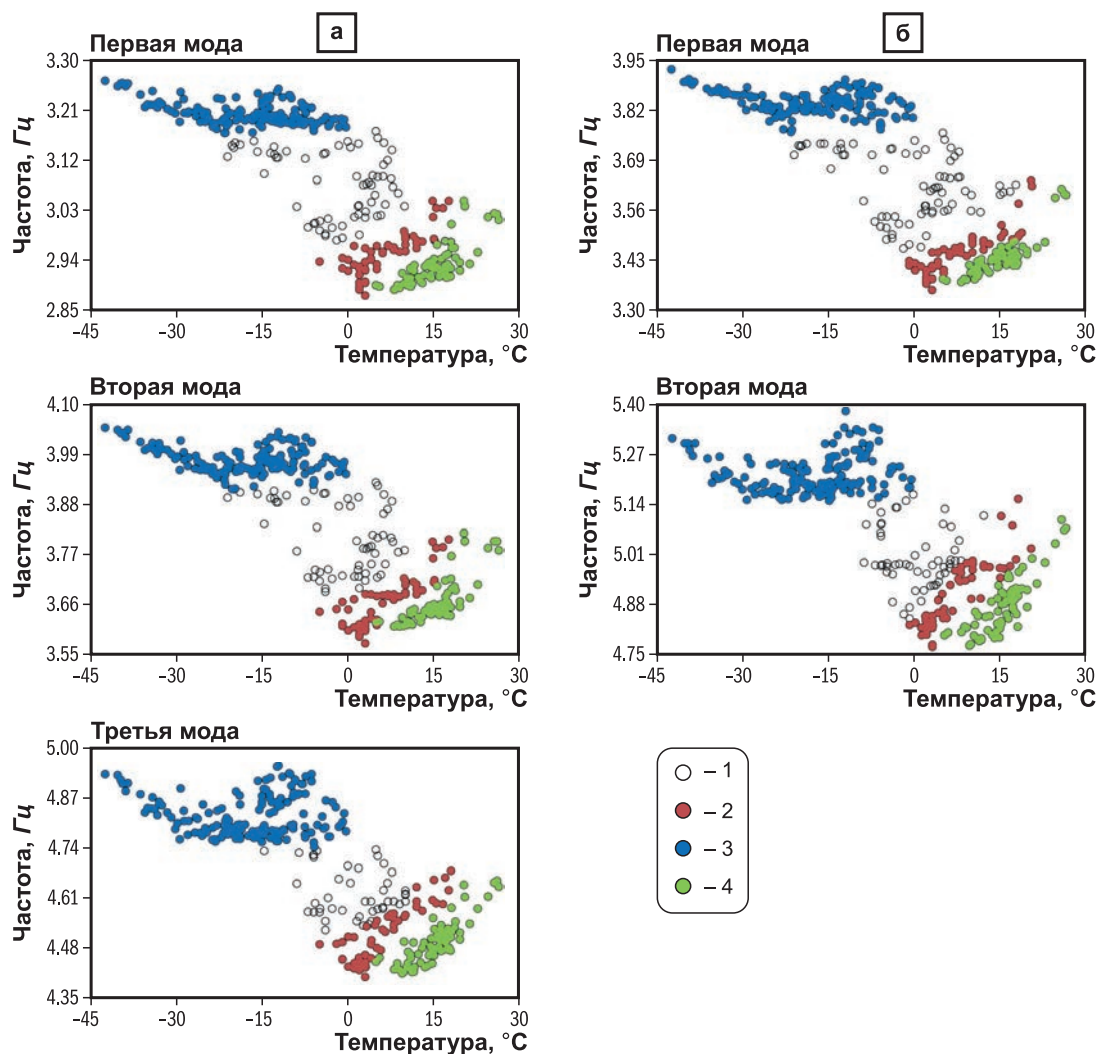


Рис. 9. Годовая зависимость частот собственных колебаний здания по компонентам X (а) и Y (б) от среднесуточной температуры при регистрации с 27.08.2021 г. по 27.08.2022 г.

1 – весь период; 2 – осень 2021 г.; 3 – зима 2021–2022 гг.; 4 – лето 2022 г.

оси и 3.5 и 5.2 Гц по длинной оси. Метод когерентного восстановления полей стоячих волн даёт возможность определять детальные моды для каждой из частот собственных колебаний сколь угодно сложного инженерного объекта. Это исключает ошибки в их идентификации. Однако такой метод требует, прежде всего, больших временных, а также материальных затрат на регистрацию колебаний на плотной сети наблюдений, на обработку цифровых данных и интерпретацию результатов. Соответственно, он не подходит для оперативного и регулярного (например, ежедневного) определения значений частот собственных колебаний сооружений. Поэтому дальнейшее определение значений частот выполнялось более простым способом – по амплитудным спектрам записей микросейс-

мического шума, непрерывно регистрируемого на объекте.

Детально (ежедневно) определены частоты низших мод собственных колебаний конструкции здания и сопоставлены с температурными колебаниями за годовой период мониторинга. Установлено, что в течение года собственные частоты существенно изменяются (в зимний период их значения выше на 11–12%, чем в летний), предположительно, из-за оттаивания/промерзания верхней части грунта. На фоне этого изменения выявлены локальные колебания их значений в связи с охлаждением/прогревом строительного материала здания преимущественно при положительной температуре окружающего воздуха (частоты растут прямо пропорционально температуре в пределах 5–7%).

Поскольку после годового цикла собственные частоты здания в августе 2021 г. и 2022 г. оказались не равны (разница составляет до 1.7%), что объясняется, предположительно, разной глубиной оттаивания грунта в летний период, необходимо продолжить исследования для оценки воздействия этого явления на техническое состояние здания. В первую очередь, с получением данных об изменении собственных частот здания зимой 2022–2023 гг. в период полного промерзания грунта.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Литература

- Брыксин А.А., Громыко П.В., Севостьянов Д.Б.* Использование регистраторов «Байкал-8» для сейсмического мониторинга зданий и сооружений в режиме реального времени в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН // *Российский сейсмологический журнал*. – 2022. – Т. 4, № 3. – С. 68–80. DOI: 10.35540/2686-7907.2022.3.06. – EDN: SWBQC
- Климатический монитор температуры воздуха в г. Норильске* // *Погода и климат* [сайт]. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (даты обращений 27.08.2021–01.09.2022).
- Коновалова В.М.* Норильский разлив // *Молодой учёный*. – 2020. – № 46. – С. 71–72. – EDN: JZAWGB
- Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Барышев В.Г., Кузьменко А.П.* Способ определения физического состояния зданий и сооружений / Патент на изобретение RU 2140625 C1 от 27.10.1999. – EDN: EZZJKH
- Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Альжанов Р.Ш., Громыко П.В.* Способ организации непрерывного сейсмометрического мониторинга инженерных сооружений и устройство для его осуществления // Патент на изобретение RU 2546056 C2 от 10.04.2015. – EDN: UJUMXP
- Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А.* SpectrumSeism / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021666241 от 11.10.2021. – EDN: JKKTEX
- Alampalli S.* Effects of testing, analysis, damage and environment on modal parameters // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2000. – V. 14, N 1. – P. 63–74. DOI: 10.1006/mssp.1999.1271
- Alarcon M., Soto P., Hernandez F., Guindos P.* Structural health monitoring of South America's first 6-Story experimental light-frame timber-building by using a low-cost Raspberry Shake seismic instrumentation // *Engineering Structures*. – 2023. – V. 275, N B. – Art. 115278. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115278
- Ceravolo R., Coletta G., Miraglia G., Palma F.* Statistical correlation between environmental time series and data from long-term monitoring of buildings // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2021. – V. 152. – Art. 107460. DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.107460
- Cheyne E., Snaebjornsson J., Jakobsen J.B.* Temperature effects on the modal properties of a suspension bridge // *Dynamics of Civil Structures. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. V. 2 / Caicedo J., Pakzad S. (eds.). – Cham: Springer, 2017. – P. 87–93. DOI: 10.1007/978-3-319-54777-0_12
- Emanov A.F., Seleznev V.S., Bakh A.A., Gritsenko S.A., Danilov I.A., Kuzmenko A.P., Saburov V.S., Tatkov G.I.* Standing waves in engineering seismology // *Russian Geology and Geophysics*. – 2002. – V. 43, N 2. – P. 181–196. – EDN: TNSYOL
- Guang-Dong Z., Ting-Hua Y.* A summary review of correlations between temperatures and vibration properties of long-span bridges // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2014. – V. 2014. – P. 1–19. DOI: 10.1155/2014/638209
- Kita A., Cavalagli N., Ubertini F.* Temperature effects on static and dynamic behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – V. 120. – P. 180–202. DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.10.021
- Larsson C., Abdeljaber O., Bolmsvik A., Dorn M.* Long-term analysis of the environmental effects on the global dynamic properties of a hybrid timber-concrete building // *Engineering Structures*. – 2022. – V. 268. – Art. 114726. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114726
- Liseikin A.V., Seleznev V.S., Adilov Z.A.* Seasonal changes in the parameters of the normal modes of the Chirkey Hydroelectric Power Plant Dam according to the standing waves method // *Power Technology and Engineering*. – 2020. – V. 53, N 6. – P. 681–686. DOI: 10.1007/s10749-020-01138-6. – EDN: XRBNYB
- Lloyd G.M., Wang M.L., Wang X.* Thermomechanical analysis of long-term global modal and local deformation measurement of the Kishwaukee bridge using the bootstrap // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. – 2004. – V. 3. – P. 107–115. DOI: 10.1007/BF02668856
- Magalhaes F., Cunha A., Caetano E.* Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2012. – V. 28. – P. 212–228. DOI: 10.1016/j.ymsp.2011.06.011

- Moaveni B., Behmanesh I.* Effects of changing ambient temperature on finite element model updating of the Dowling Hall Footbridge // *Journal of Engineering Structures*. – 2012. – V. 43. – P. 58–68. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.05.009
- Moser P., Moaveni B.* Environmental effects on the identified natural frequencies of the Dowling Hall Footbridge // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2011. – V. 25, N 7. – P. 2336–2357. DOI: 10.1016/j.ymsp.2011.03.005
- Nguyen V.H., Mahowald J., Schommer S., Maas S., Zuerbes A.* A study of temperature and aging effects on eigenfrequencies of concrete bridges for health monitoring // *Engineering*. – 2017. – V. 9. – P. 396–411. DOI: 10.4236/eng.2017.95023
- Sun M., Li Q., Han X.* Investigation of long-term modal properties of a supertall building under environmental and operational variations // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – V. 62. – Art. 105439. DOI: 10.1016/j.job.2022.105439
- Ubertini F., Comanducci G., Cavalagli N., Pisello A.L., Materazzi A.L., Cotana F.* Environmental effects on natural frequencies of the San Pietro bell tower in Perugia, Italy, and their removal for structural performance assessment // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2017. – V. 82. – P. 307–322. DOI: 10.1016/j.ymsp.2016.05.025
- Yuen K.-V., Kuok S.-C.* Ambient interference in long-term monitoring of buildings // *Engineering Structures*. – 2010. – V. 32, N 8. – P. 2379–2386. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.04.012

Сведения об авторах

Косякина Елизавета Эдуардовна, мл. науч. сотр. Сейсмологического филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: lilavati21@mail.ru

Лисейкин Алексей Владимирович, канд. геол.-мин. наук, директор СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: avl@gs.nsc.ru

Громыко Павел Владимирович, науч. сотр. СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: gromykov@mail.ru

Селезнев Виктор Сергеевич, д-р геол.-мин. наук, гл. науч. сотр. СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: svsv0428@mail.ru

Control of the technical condition of buildings and structures on permafrost soils by the changes in the frequencies of natural vibrations (according to seismic monitoring of a pile-type building – the Palace of culture of Norilsk)

© 2023 E.E. Kosyakina, A.V. Liseikin, P.V. Gromyko, V.S. Seleznev

SED GS RAS, Novosibirsk, Russia

Received April 20, 2023

Abstract The relationship between temperature fluctuations and changes in natural frequencies of a pile-type engineering structure located on permafrost soils is investigated in connection with the development of methods for monitoring the technical condition of similar structures. The object of the study is the Palace of Culture of the polar branch of PJSC MMC Norilsk Nickel, located in Norilsk, where in recent years the thawing of the soils has a potential threat to the stability of engineering structures. The basic values of the frequencies of natural oscillations of the building were determined in August 2021 by the method of coherent reconstruction of the fields of standing waves and are 3.0, 3.7, 4.7 Hz on the short axis and 3.5 and 5.2 Hz on the long axis. The current (daily) frequency values are determined with an error of no more than 0.01 Hz from the amplitude spectra of seismic noise recordings (without active sources), which were obtained during continuous seismic monitoring from the end of August 2021 to the beginning of September 2022. From comparing the changes in the frequencies of natural oscillations with fluctuations in ambient temperature, it follows that during the year the frequencies change significantly (in winter their values are 11–12% higher than in summer), presumably due to defrosting/ freezing of the upper part of the soil. Against the background of this change, local fluctuations in frequency values were revealed due to cooling/heating of the material of the building mainly at a positive ambient temperature (frequencies increase in direct proportion to temperature within 5–7%). According to the analysis of monitoring data after the annual cycle, the natural frequencies of the building in August 2021 and 2022 are not equal (the difference is up to 1.7%), which is presumably explained by the different depth of ground defrosting in the summer. To assess the impact of this phenomenon on the technical condition of the building, it is necessary to continue monitoring, first of all, to obtain data on changes in the natural frequencies of the building in the winter of 2022–2023 during the period of complete freezing of the ground.

Keywords Seismic monitoring, monitoring of the technical condition of structures, the influence of temperature on the frequency of natural oscillations.

For citation Kosyakina, E.E., Liseikin, A.V., Gromyko, P.V., & Seleznev, V.S. (2023). [Control of the technical condition of buildings and structures on permafrost soils by the changes in the frequencies of natural vibrations (according to seismic monitoring of a pile-type building – the Palace of culture of Norilsk)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(3), 45–58. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.3.03>. EDN: JDMRRY

References

- Alampalli, S. (2000). Effects of testing, analysis, damage and environment on modal parameters. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14(1), 63–74. DOI: [10.1006/mssp.1999.1271](https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1271)
- Alarcon, M., Soto, P., Hernandez, F., & Guindos, P. (2023). Structural health monitoring of South America's first 6-Story experimental light-frame timber-building by using a low-cost Raspberry Shake seismic instrumentation. *Engineering Structures*, 275(B), art. 115278. DOI: [10.1016/j.engstruct.2022.115278](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115278)
- Bryksin, A.A., Gromyko, P.V., & Sevost'ianov, D.B. (2022). [Use of «Baikal-8» recorders for real-time seismic monitoring of buildings and structures in the SED GS RAS]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Seismological Journal], 4(3), 68–80. (In Russ.). DOI: [10.35540/2686-7907.2022.3.06](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.3.06). EDN: SWBQC
- Ceravolo, R., Coletta, G., Miraglia, G., & Palma, F. (2021). Statistical correlation between environmental time series and data from long-term monitoring of buildings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 152, art. 107460. DOI: [10.1016/j.ymsp.2020.107460](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107460)
- Cheyne, E., Snæbjörnsson, J., & Jakobsen, J.B. (2017). Temperature effects on the modal properties of a suspension bridge. In Caicedo, J., Pakzad, S. (Eds.). *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*.

- Dynamics of Civil Structures*, V. 2 (pp. 87-93). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-54777-0_12
- Emanov, A.F., Seleznev, V.S., Bakh, A.A., Gritsenko, S.A., Danilov, I.A., Kuzmenko, A.P., Saburov, V.S., & Tatkov, G.I. (2002). Standing waves in engineering seismology. *Russian Geology and Geophysics*, 43(2), 181-196. EDN: TNSYOL
- Guang-Dong, Z., & Ting-Hua, Y. (2014). A summary review of correlations between temperatures and vibration properties of long-span bridges. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-19. DOI: 10.1155/2014/638209
- Kita, A., Cavalagli, N., & Ubertaini, F. (2019). Temperature effects on static and dynamic behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 180-202. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.10.021
- Konovalova, V.M. (2020). [Norilsk spill]. *Molodoi uchenyi* [Young scientist], 46, 71-72. (In Russ.). EDN: JZAWGB
- Larsson, C., Abdeljaber, O., Bolmsvik, A., & Dorn, M. (2022). Long-term analysis of the environmental effects on the global dynamic properties of a hybrid timber-concrete building. *Engineering Structures*, 268, art. 114726. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114726
- Liseikin, A.V., Seleznev, V.S., & Adilov, Z.A. (2020). Seasonal changes in the parameters of the normal modes of the Chirkey Hydroelectric Power Plant Dam according to the standing waves method. *Power Technology and Engineering*, 53(6), 681-686. DOI: 10.1007/s10749-020-01138-6. EDN: XRBNYB
- Lloyd, G.M., Wang, M.L., & Wang, X. (2004). Thermomechanical analysis of long-term global modal and local deformation measurement of the Kishwaukee bridge using the bootstrap. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 3, 107-115. DOI: 10.1007/BF02668856
- Magalhaes, F., Cunha, A., & Caetano, E. (2012). Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28, 212-228. DOI: 10.1016/j.ymssp.2011.06.011
- Moaveni, B., & Behmanesh, I. (2012). Effects of changing ambient temperature on finite element model updating of the Dowling Hall Footbridge. *Journal of Engineering Structures*, 43, 58-68. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.05.009
- Moser, P., & Moaveni, B. (2011). Environmental effects on the identified natural frequencies of the Dowling Hall Footbridge. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(7), 2336-2357. DOI: 10.1016/j.ymssp.2011.03.005
- Nguyen, V.H., Mahowald, J., Schommer, S., Maas, S., & Zuerbes, A. (2017). A study of temperature and aging effects on eigenfrequencies of concrete bridges for health monitoring. *Engineering*, 9, 396-411. DOI: 10.4236/eng.2017.95023
- Pogoda i klimat* [Weather and climate]. [Climatic air temperature monitoring in Norilsk]. (2022). Retrieved from <http://www.pogodaiklimat.ru> (dates of access 27.08.2021–01.09.2022). (In Russ.).
- Seleznev, V.S., Emanov, A.F., Baryshev, V.G., & Kuz'menko, A.P. (1999). [Method for determining the physical condition of buildings and structures]. Patent RF for invention, No. 2140625 C1. (In Russ.). EDN: EZZJKH
- Seleznev, V.S., Liseikin, A.V., Al'zhanov, R.Sh., & Gro-myko, P.V. (2015). [Method for organizing continuous seismometric monitoring of engineering structures and a device for its implementation]. Patent RF for invention, No. 2546056 C2. (In Russ.). EDN: UJUMXP
- Seleznev, V.S., Liseikin, A.V., Sevost'ianov, D.B., & Bryksin, A.A. (2021). [SpectrumSeism]. Certificate of state registration of the computer program, No. 2021666241. (In Russ.). EDN: JKKTEX
- Sun, M., Li, Q., & Han, X. (2022). Investigation of long-term modal properties of a supertall building under environmental and operational variations. *Journal of Building Engineering*, 62, art. 105439. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105439
- Ubertaini, F., Comanducci, G., Cavalagli, N., Pisello, A.L., Materazzi, A.L., & Cotana, F. (2017). Environmental effects on natural frequencies of the San Pietro bell tower in Perugia, Italy, and their removal for structural performance assessment. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 82, 307-322. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.05.025
- Yuen, K.-V., & Kuok, S.-C. (2010). Ambient interference in long-term monitoring of buildings. *Engineering Structures*, 32(8), 2379-2386. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.04.012

Information about author

Kosyakina Elizaveta Eduardovna, Junior Researcher of the Seismological Division of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (SED GS RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: lilavati21@mail.ru

Liseikin Aleksey Vladimirovich, PhD, Director of the SED GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: avl@gs.nsc.ru

Gromyko Pavel Vladimirovich, Researcher of the SED GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: gromykopy@mail.ru

Seleznev Viktor Sergeevich, Dr., Chief Researcher of the SED GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: svsv0428@mail.ru