

УДК 550.34.016

ИЗМЕНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

В.С. Селезнев¹, А.В. Лисейкин¹, И.В. Коковкин¹, В.М. Соловьев²

¹СФ ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²АСФ ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

Работа посвящена развитию метода инженерно-сейсмического мониторинга, разработанного в ФИЦ ЕГС РАН. В предыдущие годы был создан и внедрен в практику «метод стоячих волн», позволяющий выделять собственные моды колебаний зданий и других инженерных сооружений. Были изучены и определены собственные колебания сотен различных объектов (здания, мосты, плотины и др.). Предполагалось, что по изменению значений частот собственных колебаний удастся контролировать физическое состояние изучаемых строений в процессе эксплуатации, а именно своевременно обнаруживать появление дефектов в конструкциях, предупреждая риск их разрушения. Но оказалось, что не так все просто: колебания значений частот закономерно связаны с изменениями в среде вокруг изучаемых объектов. В статье приводятся примеры этих связей, изучается влияние на частоты собственных колебаний изменение температуры окружающей среды, массы объектов, осадков.

Сейсмический мониторинг, мониторинг зданий, частоты собственных колебаний, дистанционный мониторинг, температурные изменения, здания и сооружения

CHANGE IN NATURAL OSCILLATION FREQUENCIES OF BUILDINGS AND STRUCTURES DEPENDING ON EXTERNAL FACTORS

V.S. Seleznev, A.V. Liseikin, I.V. Kokovkin, V.M. Soloviev

This work is devoted to the development of the engineering seismic monitoring method created in Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS). In previous years, the “method of standing waves” was created and put into practice. It helps to separate natural oscillation modes of buildings and other engineering structures. The natural oscillations of hundreds of various objects (buildings, bridges, dams, etc.) had been studied and identified. We assumed that the physical condition of studied constructions could be controlled during exploitation by measuring the changes of natural oscillation frequencies. That would help to identify the appearance of defects in constructions, to prevent the risk of their destruction. However, it turned out that not everything is that simple: changes in frequency values are logically affected by changes in the environment around the studied objects. This article provides examples of these relations, influence of changes in environmental temperature, mass of objects and precipitation on the frequencies of natural oscillations.

Seismic monitoring, building monitoring, natural frequencies, remote monitoring, temperature influence, buildings and constructions

ВВЕДЕНИЕ

Любое здание, мост, плотина, крупный строительный объект можно охарактеризовать набором мод собственных колебаний. В сейсмологии эти параметры используются, когда нужно определить сейсмостойчивость сооружения. Чтобы понять, какие колебания сооружение может испытывать при землетрясении и не разрушиться при этом, необходимо определить акселерограмму (т. е. узнать, какие ускорения при землетрясении будут наблюдаться в месте, где находится сооружение), провести сейсмическое микрорайонирование (понять, как верхняя часть разреза будет усиливать пришедшие от землетрясения колебания). Теперь, зная эти характеристики и моды колебаний объекта, можно решить поставленную задачу.

Известны два способа определения амплитудно-частотной характеристики зданий и сооружений. Первый — детально зная конструкцию сооружения, теоретически рассчитать эти параметры; второй — определить экспериментально. Для реализации второго способа был разработан и прошел большие практические испытания на различных объектах «метод стоячих волн» [Еманов и др., 2002]. С помощью него можно определять моды собственных колебаний до достаточно высоких порядков. Например, на плотине Саяно-Шушенской ГЭС (СШ ГЭС) при разных уровнях заполнения водохранилища определялись порядка десяти мод колебаний. Определение этих мод — непростая задача и требует наблюде-

© Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Коковкин И.В., Соловьев В.М., 2024

✉ e-mail: titanoks1@yandex.ru

ний сейсмических колебаний в сотнях (иногда в тысячах) точек. При этом мы получим данные во временном срезе. Это в момент измерений моды колебаний были такими, а что будет через некоторое время? Строителям хорошо известно [Hsu et al., 2020], что моды колебаний (и их частоты) могут измениться, если объект покроется трещинами. Именно так в магазине проверяют целостность хрустальных бокалов, ударяя по бокалу карандашом и слушая, как он звенит. Если в бокале есть трещина, то частота звука уменьшится из-за потери структурной целостности материала. Аналогично хотелось бы разработать систему мониторинга зданий и сооружений, отслеживающую изменения собственных частот во времени. Здесь тоже можно выбрать два пути: первый — проводить с какой-то периодичностью определение мод собственных колебаний и сравнивать их с расчетными, определяя места наибольших расхождений и более детально изучать их различными методами; второй — начать наблюдать за изменением частот разных мод собственных колебаний. Отметим особо, что сразу следить за изменениями каких-то частот, не доказав, что это частоты собственных колебаний, нельзя ни в коем случае. Не имея достаточного опыта, очень легко ошибиться, приняв какие-то частоты монохроматических колебаний за собственные.

Обычно при наблюдении на объектах и рядом с ними выделяются десятки таких колебаний, иногда с высокой, а иногда и с низкой добротностью. Первый подход, к сожалению, достаточно дорогой и может использоваться скорее для уникальных и весьма дорогих объектов. Второй — проще и его можно применять, если размещать регистраторы не только внутри сооружения, но и на каком-то разумном расстоянии [Селезнев и др., 2012]. При этом можно рассматривать объект изучения как источник сейсмических колебаний. Представим, что это вибратор, но излучающий не одно монохроматическое колебание, а несколько, с частотами, равными частотам собственных колебаний. Исходя из большого накопленного опыта экспериментальных и теоретических исследований с мощными вибраторами в течение более 40 лет [Алексеев и др., 1982], такое предположение существенно может облегчить решение поставленной задачи, зная, как распространяются сейсмические колебания от вибратора, от чего они зависят и как накапливаются эти колебания.

Прежде всего, накапливая монохроматические колебания в соседних точках, можно получить существенно разные по амплитуде колебания, так как волны от источника до приемника в двух разных точках идут по разным путям. Второе, характеристика направленности вибратора, излучающего монохроматические сигналы, сильно зависит от приповерхностных условий, и виброграмма, полученная вдали от источника в одной и той же точке, может радикально отличаться даже при промерзании грунта на 10 см [Соловьев и др., 2017]. И наконец, если колебания от источника по амплитуде значительны и можно допустить нелинейное взаимодействие источника с грунтом, могут появиться кратные, полукратные и полуторакратные частоты [Seleznov et al., 2019]. При излучении на неоднородных грунтах амплитуда кратных гармоник может превосходить в несколько раз амплитуду основной гармоники [Seleznov et al., 2019].

Главный вывод из этого: следить за изменениями амплитуд собственных колебаний по сигналам, идущим от объекта исследования, малоперспективно, так как необходимо будет учитывать множество факторов, включая и тот, что изучаемый объект это все же не управляемый вибратор, и в зависимости от ветровой нагрузки работающих рядом механизмов и других шумов, амплитуда излучаемого сигнала может сильно меняться. Остается возможность изучения колебаний собственных частот. Отчего они могут изменяться?

ТЕОРИЯ/РАСЧЕТ

Любой объект можно описать как набор элементов, включающий в себя массу, демпфер и пружину [Белостоцкий и др., 2014; Белостоцкий, 2014], тогда изменения в собственных частотах, излучаемых объектом, также будут зависеть от изменения значений этих параметров. Отметим, однако, что существенное изменение частот, особенно скачкообразное, будет сигнализировать о разрушении объекта. Ниже представлено несколько примеров инженерно-сейсмического мониторинга крупных объектов, показывающих, как могут изменяться собственные частоты во времени.

На рисунке 1 представлена плотина СШ ГЭС, изучением которой специалисты ФИЦ ЕГС РАН занимаются не один десяток лет. Это огромное сооружение. Вес плотины около 20 млн т, гидростатический напор на плотину около 18 млн т. Кроме того, уровень воды в водохранилище меняется на величину до 40 м и, следовательно, изменяется и присоединенная масса самого сооружения. ФИЦ ЕГС РАН неоднократно изучал методом стоячих волн собственные моды колебаний при разном заполнении водохранилища. В теле плотины исследовались колебания в сотнях точек трехкомпонентными приборами (велосиметрами). Теперь известно, какие частоты соответствуют каким модам колебаний (рис. 2).

В 4.5 км от плотины СШ ГЭС расположена сейсмологическая станция, на которой проводится цифровая регистрация сейсмического поля уже более 20 лет. Была исследована возможность выделения и прослеживания во времени частот первых семи мод собственных колебаний плотины и установлено,



Рис. 1. Плотина Саяно-Шушенской ГЭС (<https://gelio.livejournal.com/>).

плотины СШ ГЭС (как наиболее информативной), а также изменения уровня воды в водохранилище. Хорошо видно, что в этом случае главным элементом (из триады масса, демпфер, пружина), влияющим на значения частоты, является присоединенная масса воды. Более мелкие изменения также связаны с массой льда, который намерзает и откалывается от плотины [Лисейкин и др., 2023]. Зачем нужно детальное изучение изменений собственной частоты? В книге «Плотина Саяно-Шушенской ГЭС. Состояние, процессы, прогноз» В.В. Тетельмин пишет: «Актуальность проблемы безопасности плотины СШ ГЭС год от года обостряется. Перемещения плотины не затухают, разуплотнение основания продолжается, контактный шов раскрывается, арочные напряжения в бетоне растут, трещинообразование в бетоне напорной грани не остановлено, напряжение в турбинных водоводах и спиральных камерах увеличивается. При этом специалистами до сих пор не названы причины подобного неравновесного состояния плотины» [Тетельмин, 2011, с. 6].

Отметим, что все, о чем пишет В.В. Тетельмин, влияет на значения собственной частоты. Чтобы следить и изучать такие изменения надо повысить точность измерений. Это вполне возможно, необходимо лишь увеличить интервал анализа на сейсмограмме, а регистрирующую станцию поставить ближе к ГЭС, чтобы увеличить отношение сигнал/помеха. Обратим внимание, что ставить станцию на самой ГЭС нет необходимости, так как используемый нами метод подразумевает дистанционный анализ, помимо этого она является режимным объектом, с ограниченным доступом.

Другой пример изменения собственных частот получен при инженерно-сейсмическом обследовании 14-этажного кирпичного дома в Новосибирске. На верхнем этаже дома в течение двух лет осуществлялась непрерывная сейсмическая регистрация сейсмологической станцией с трехкомпонентным 4.5 Гц сейсмоприемником. Направления осей сейсмоприемника следующие: X — направлена вдоль узкой части сооружения, Y — вдоль длинной части сооружений, Z — вертикально. Проведя анализ данных по всем компонентам, наиболее представительной оказалась X -компонента, которую далее и будем рассматривать. На рисунке 4 приведена спектрограмма за июнь 2022 г. и январь 2023 г., а на рис. 5 осредненный за 12 ч (с 22 ч 07.01.2023 г. до 10 ч 08.01.2023 г.) спектр.

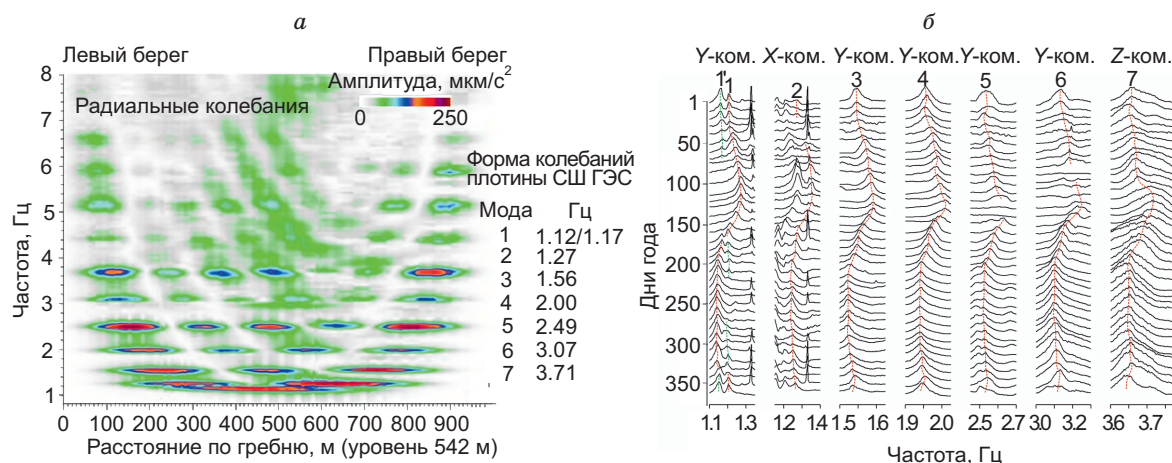


Рис. 2. Спектральное представление поля стоячих волн в плотине СШ ГЭС (а) и усредненные спектры резонансных частот на плотине СШ ГЭС за 2018 г. (б).

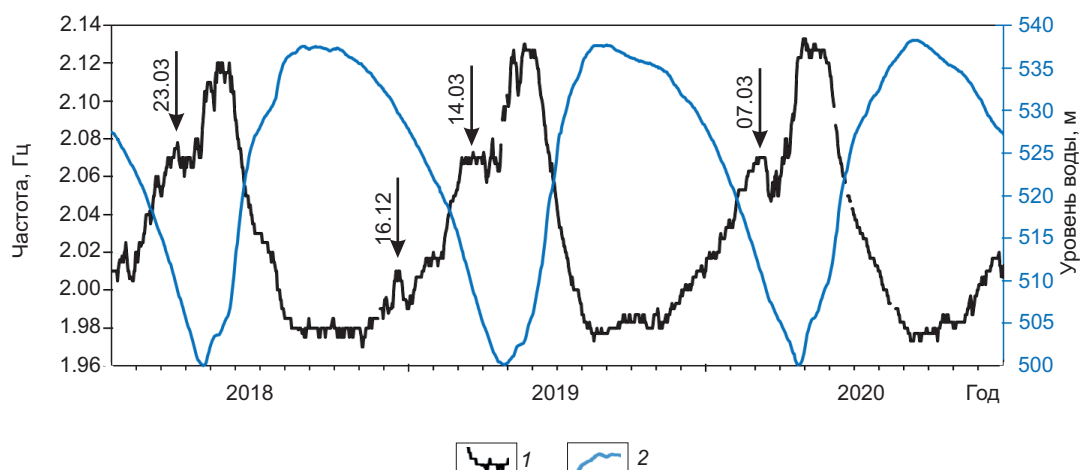


Рис. 3. Изменение во времени частоты четвертой моды собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС (1) с изменением уровня воды в водохранилище (2).

Датумаи (23.03) выделены изменения собственной частоты, не связанные с изменениями уровня воды.

Специальное определение мод колебаний методом стоячих волн здесь не проводилось, однако доказательством того, что выделенные частоты являются собственными частотами колебания дома, может служить одновременное увеличение амплитуд колебаний именно на этих частотах при сильных порывах ветра (см. рис. 4) или землетрясении с $M = 7.8$, произошедшем на юге Турции 06.02.2023 г. (рис. 6). Землетрясение было очень сильное и удалось его выделить, применяя деконволюцию, даже при использовании для регистрации сейсмоприемника с собственной частотой 4.5 Гц. Ввиду того, что землетрясение проявляется только на первых частотах, рассмотрим спектрограмму лишь до 3 Гц. Из рисунка 6 видно, что в начальной части записи землетрясения, где присутствуют волны с частотой около 1 Гц, происходит резонансное возбуждение на частотах собственных колебаний дома и их амплитуда возрастает примерно в 3 раза.

Изучение частот собственных колебаний здания показало, что их значения практически постоянно меняются во времени, что хорошо видно на рис. 4.

В спектрограммах на рис. 4 по записям, полученным в летний и зимний месяцы, хорошо видны шесть первых частот собственных колебаний и их изменения во времени, а также на осредненном спектре на рис. 5, где наибольшие амплитуды имеют лишь первые четыре. В работе [Cai et al., 2021] показано, что собственные частоты могут меняться при изменении температуры. Чтобы разобраться, с чем это связано, были построены графики изменений частоты четвертой моды собственных колебаний (она имеет высокую амплитуду и достаточные колебания), вариации температуры воздуха и уровня выпавших осадков, представленные на рис. 7 и 8.

Обработка полученных записей производилась с использованием программного обеспечения «SpectrumSeism», разработанного в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН [Селезнев и др., 2021], которое позволяет преобразовывать запись сейсмических трасс в спектрограммы. Это дает возможность определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени и выделить из всей записи источники колебаний определенной частоты. Для получения количественных оценок строятся графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах по формуле оконного преобразования Фурье, следующего вида:

$$A(\omega, t) = \frac{1}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|, \quad (1)$$

где $f(\tau)$ — зарегистрированный сейсмический сигнал, ω — частота, для которой строится график, t — текущее время, T — интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда, $|\dots|$ — обозначает модуль комплексного числа. В данной методике важным параметром является длина окна (T), от которой напрямую зависит разрешенность графика по времени. Но сильно уменьшать длину окна нельзя, так как при этом уменьшается разрешенность построения по частоте.

Поскольку частоты здания определяются по сейсмическим шумам, то чтобы выделить из них полезный сигнал с достаточно высокой точностью, полученная сейсмическая запись разбивается на фрагменты (окна), для каждого из них строится амплитудный спектр, которые усредняются, в результате

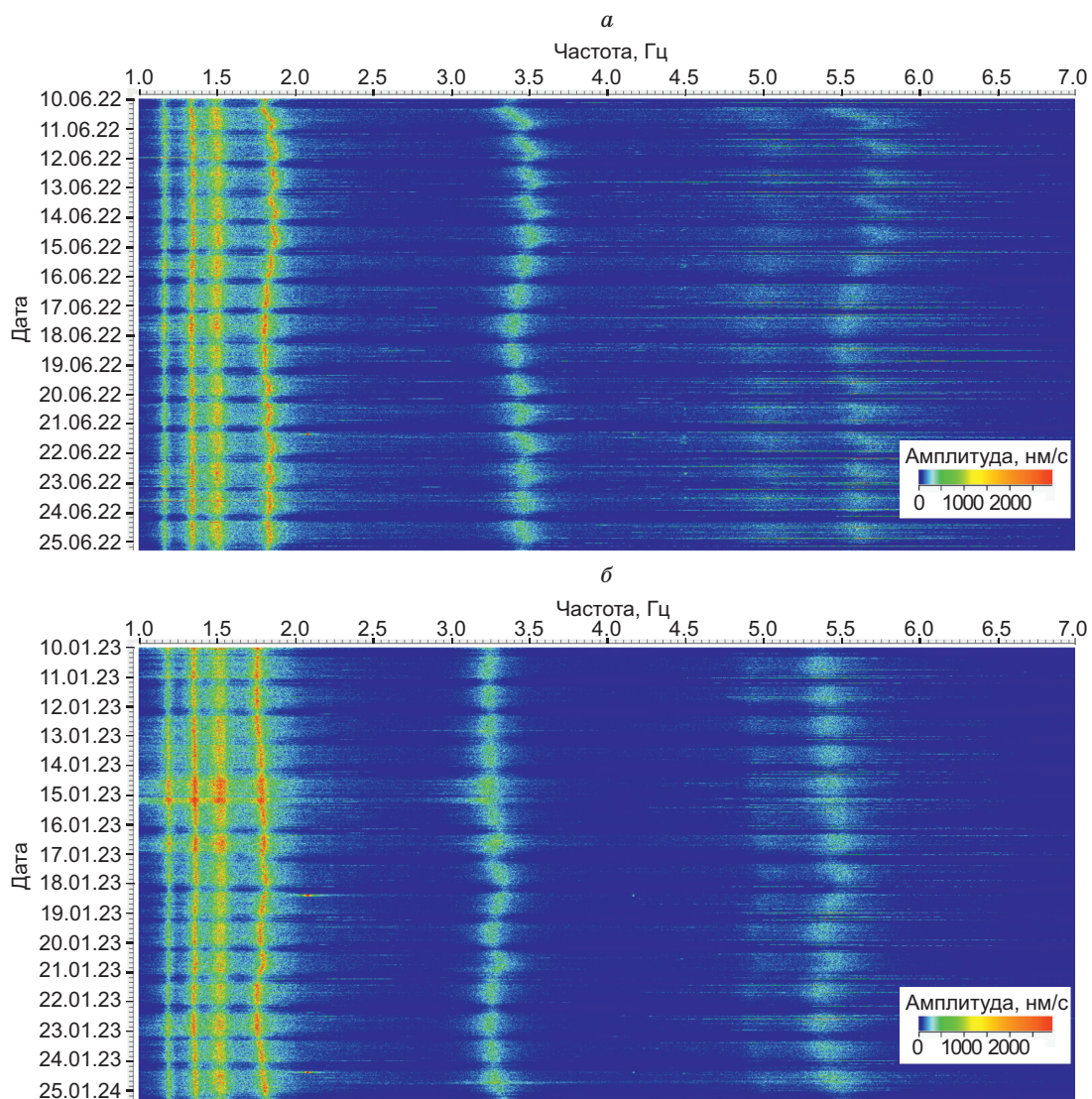


Рис. 4. Фрагменты спектрограмм за июнь 2022 г. (а) и январь 2023 г. (б), Х-компонента.

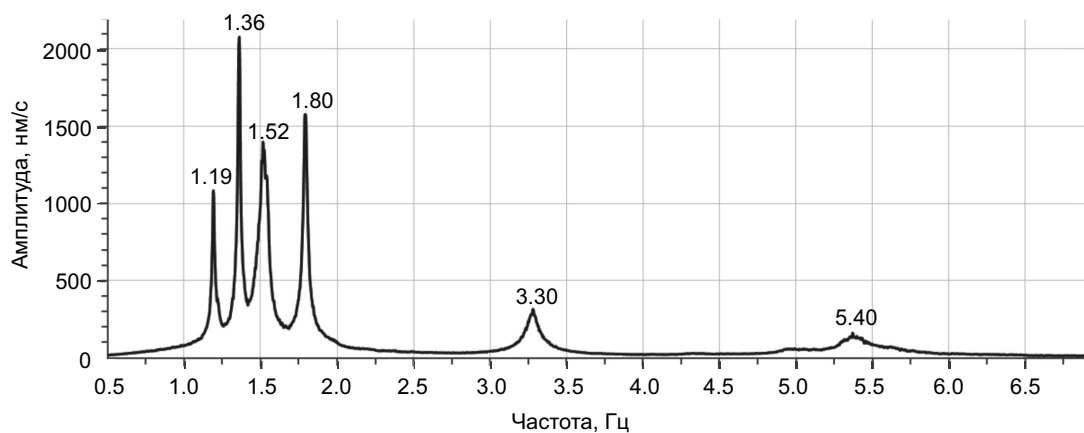


Рис. 5. Осредненный спектр за 12 ч. (с 22 ч 07.01.2023 г. до 10 ч 08.01.2023 г.), Х-компонента.

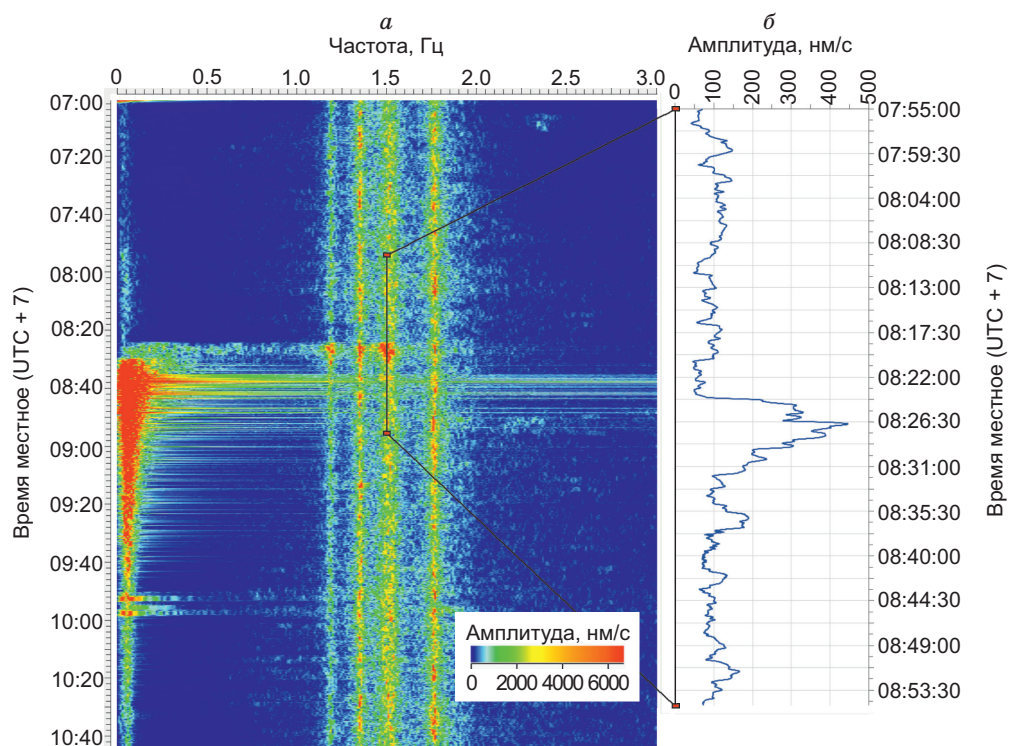


Рис. 6. Спектрограмма землетрясения в Турции 6 февраля 2023 г., X-компонента (а) и график изменения амплитуды колебания на частоте 1.45 Гц во времени (б).

чего получаем усредненный спектр, освобожденный от помех, где присутствуют только регулярные сигналы.

На рисунках 7 и 8 приводятся данные по X-компоненте, т. е. поперечные колебания здания, со следующими параметрами для формулы (1): $T = 100$ с, шаг окна 50 с. Это значит, что сигналы длительностью менее 100 с мы изучать не можем. Но при этом разрешенность по частоте составляет 0.01 Гц, следовательно, любые сигналы на сейсмограмме с частотами, отстоящими от частоты изучаемого сигнала более чем на 0.01 Гц, не будут влиять на результат определения амплитуд по формуле (1). Нами был выбран интервал от 1.5 до 2.0 Гц, где хорошо прослеживается один из локальных максимумов на частоте 1.8 Гц, принятый за частоту собственных колебаний здания четвертой моды, и были построены графики его текущих значений по усредненному спектру каждые 4 ч за январь 2023 г. (см. рис. 7) и июнь 2022 г. (см. рис. 8).

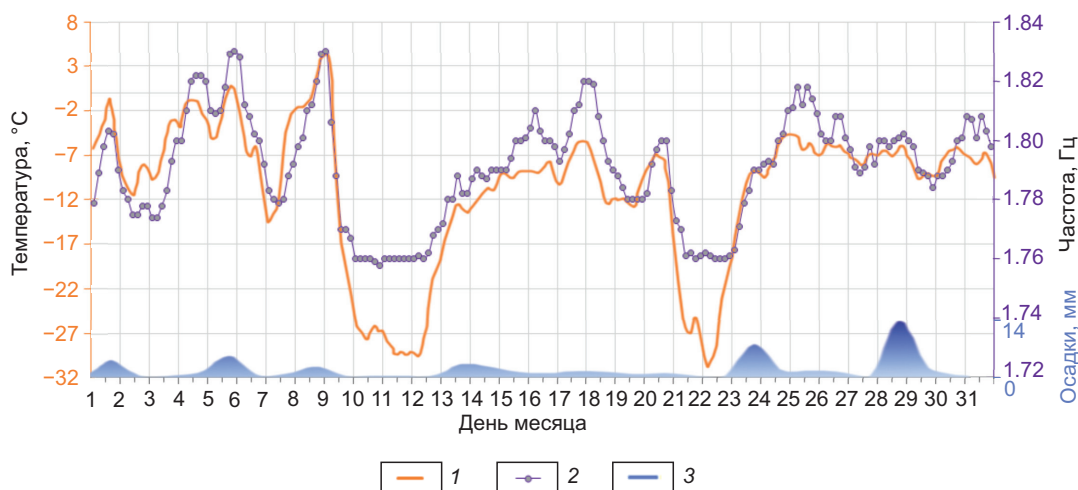


Рис. 7. Графики изменения температуры (1), частоты четвертой моды собственных колебаний дома (2) и уровня выпавших осадков (3) в январе 2023 г., X-компонента.

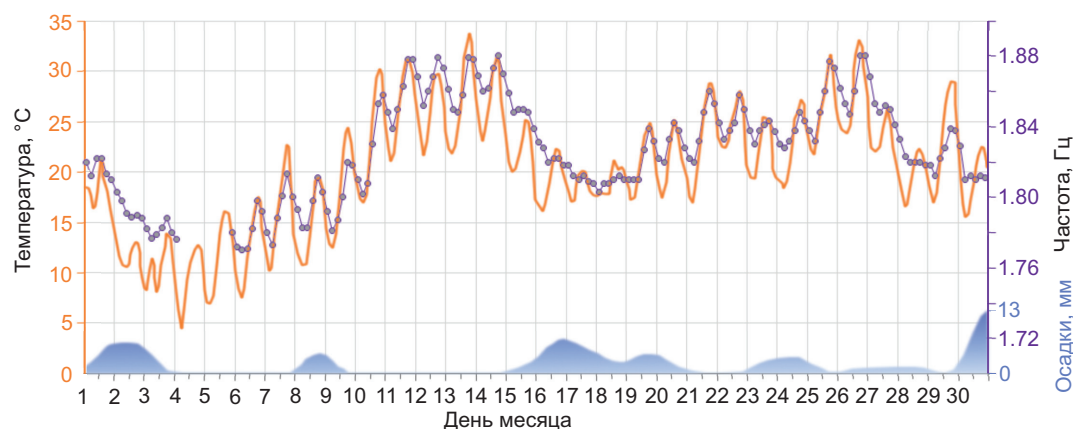


Рис. 8. Графики изменения температуры, частоты четвертой моды собственных колебаний дома и уровня выпавших осадков в июне 2022 г., X-компонента.

Усл. обозн. см. на рис. 7.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализируя вариации кривых, представленных на рис. 7, можно отметить следующее: осадки практически не влияют на изменения собственных частот, даже когда 28—29 января 2023 г. выпало около 40 см снега (при площади крыши дома около 600 м² общий вес снега около 10 т, а вес дома при периметре 100 м, толщине стен 1 м и высоте около 40 м, составляет примерно 10 тыс. т.). Кроме того, его периодически убирают с крыши. Масса меняется незначительно, а вот демпфер и пружина меняются существенно и это связано с промерзанием кирпичной стены. Устройство стены дома схематически показано на рис. 9. Внутренняя часть наружной стены до 6-го этажа имеет толщину три кирпича, выше — два. Утеплитель пенопласт толщиной 10 см, далее внешняя облицовочная часть стены в один кирпич. Размер кирпича в длину 25 см.

В январе 2023 г. были сильные морозы, и по мере промерзания стены (см. рис. 7) изменялась и собственная частота здания, но, когда промерзла вся внешняя кладка до пенопласта, изменение в частоте прекратилось. Далее частота снова стала изменяться до момента, когда температура опустилась до -20° . Заметим, что зимой в доме работает центральное отопление, чем холоднее на улице, тем мощнее происходит обогрев. Этот факт, несомненно, влияет на частоту собственных колебаний в виде локальных искажений, но существенного воздействия на саму картину не оказывает, так как температура внутри помещений остается практически той же. Но для панельного дома такое влияние гораздо значительней.

В летний период изменение частоты собственных колебаний также тесно связано с изменением температуры (см. рис. 8), причем заметно небольшое отставание в изменении частоты от изменения температуры. Это объясняется тепловой инертностью строительных материалов здания.

Теплоизолирующая способность кирпичного дома самая низкая, именно поэтому его всегда рекомендуют утеплять, а аккумулирующая — самая большая (рис. 10).

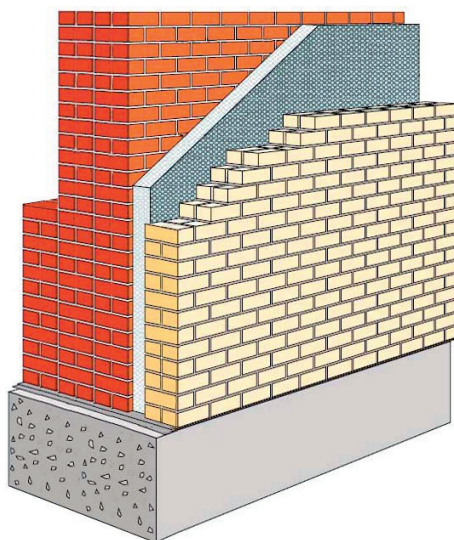


Рис. 9. Схема кирпичной стены дома.

Описание см. в тексте.

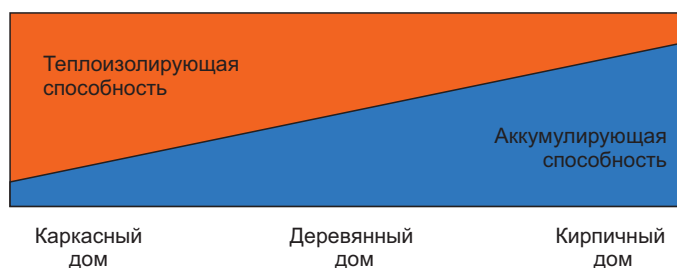


Рис. 10. Теплоизолирующая и аккумулирующая способность разных домов.

Для нагрева кирпичного дома уйдет много энергии и времени, но и остывать он будет дольше всех [Харитонов, 2017]. Именно поэтому на рис. 8 видно, что на интервалах с 1-го по 4-е июня и с 15-го по 19-е июня собственные частоты уменьшаются более плавно, чем температура, и дневные колебания температуры менее заметны в изменениях частот. Следует отметить, что данные по температуре брались с метеостанции Новосибирского государственного университета, расположенной примерно в 600 м от 14-этажного здания по просп. Академика Коптюга, 7, а данные по осадкам — с метеостанции, находящейся в 12 км от объекта, и это могло внести некоторую ошибку в конечный результат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ полученных результатов исследования показывает, что частоты собственных колебаний зданий и сооружений не постоянные величины и могут изменяться в некоторых границах. Установлено, что в исследованном кирпичном здании с возрастанием температуры окружающей среды происходит увеличение частоты собственных колебаний, а с ее уменьшением — понижение.

Спектрально-временной анализ данных многолетнего мониторинга на Саяно-Шушенской ГЭС показывает, что на реальных материалах можно следить за изменениями собственных частот с точностью не хуже 0.01 Гц и детальностью порядка одного измерения в полсуток. Такая точность и детальность измерений открывает путь для решения многих мониторинговых задач, связанных с изменением собственных частот плотины, зависящим не только от плавного повышения или снижения уровня воды в водохранилище, но и от изменения температуры, обледенения плотины, изменения в структуре осадков, подмывания основания плотины и другими причинами.

Отметим, что такая точность и детальность измерений получена по данным сейсмологической станции, находящейся в 4.5 км от плотины.

Авторы выражают признательность коллегам из Алтае-Саянского и Сейсмологического филиалов ФИЦ ЕГС РАН за ценные замечания при обсуждении статьи.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24) 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».

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев А.С., Ряшенцев Н.П., Чичинин И.С. Как заглянуть в глубь планеты // Наука в СССР, 1982, № 3, с. 31—37.

Белостоцкий А.М. Опыт расчетного обоснования состояния уникальных (высотных и большепролетных) зданий и сооружений // Высотные здания, 2014, № 2, с. 106—109.

Белостоцкий А.М., Каличава Д.К., Новиков П.И., Островский К.И. Адаптивные конечно-элементные модели в основе систем мониторинга несущих конструкций уникальных зданий // Строительная механика и расчет сооружений, 2014, т. 257, № 6, с. 17—23.

Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика, 2002, т. 43 (2), с. 192—207.

Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кречетов Д.В. Определение частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сейсмическим сигналам (на примере плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным мониторинга 2001—2021 гг.) // Российский сейсмологический журнал, 2023, т. 5, № 2, с. 32—50, doi: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.03>.

Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления // Изобретения (патенты), 2012, № 26 (II ч.), 2 с., Пат. 2461847 RU, МПК G01V1/28, G01M7/02.

Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А. SpectrumSeism // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021666241, 11.10.2021. Заявка № 2021665611 от 11.10.2021.

Соловьев В.М., Кашун В.Н., Елагин С.А., Сережников Н.А., Галева Н.А., Антонов И.А. О влиянии сезонных изменений среды под вибратором ЦВ-40 на характеристики его излучения (при вибросейсмическом мониторинге Алтае-Саянского региона) // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2017, т. 2, № 4, с. 34—39.

Тетельмин В.В. Плотина Саяно-Шушенской ГЭС: состояние, процессы, прогноз. М., Либроком, 2011, 234 с.

Харитонов А.В. Как быстро замерзнет дом при –20° мороза, если котел сломался? // Инструменты + все для стройки и ремонта + GardenTools серии Потребитель, объединенный выпуск, 2017, осень—зима, с. 159.

Cai Y., Zhang K., Ye Z., Liu C., Lu K., Wang L. Influence of temperature on the natural vibration characteristics of simply supported reinforced concrete beam // *Sensors*, 2021, v. 21, p. 4242, doi: 10.3390/s21124242.

Hsu T.Y., Valentino A., Liseikin A., Krechetov D., Chen C.C., Lin T.K., Wang R.Z., Chang K.C., Seleznev V. Continuous structural health monitoring of the Sayano-Shushenskaya Dam using off-site seismic station data accounting for environmental effects // *Meas. Sci. Technol.*, 2020, v. 31 (1), p. 015801, doi: 10.1088/1361-6501/ab393c.

Seleznev V.S., Solovyev V.M., Emanov A.F., Kashun V.N., Elagin S.A. Features of radiation of powerful vibrators on inhomogeneous soils // *Active geophysical monitoring* (second edition), 2019, p. 405—423, doi: 10.1016/B978-0-08-102684-7.00019-4.