

О резонансном эффекте в здании от работы промышленной установки

И. В. Коковкин^{1}, В. С. Селезнев¹*

¹ Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: titanoks1@yandex.ru

Аннотация. Для долгосрочной эксплуатации зданий и сооружений необходим их технический контроль, в силу влияния различных факторов, как естественных, так и техногенных. Данная работа направлена на развитие способов контроля состояния жилого здания, путем мониторинга, основанного на изучении частот его собственных колебаний (СК). В работе использовались сейсмологические данные, полученные на десятиэтажном доме, расположенном в Новосибирском Академгородке, определены первые три моды колебаний и их частоты. Выявлено наложение на одну из частот СК здания монохроматического сигнала от работы крупного промышленного компрессора, расположенного в километре от него. Оценена возможность вхождения здания в резонанс. Несмотря на то, что наблюдаемые в данном случае резонансные колебания является не столь значительными по амплитуде, необходимо отслеживать такие влияния для предотвращения возможных разрушений.

Ключевые слова: частота собственных колебаний, техногенные воздействия, сейсмический мониторинг, мониторинг зданий, компрессор

On the resonance effect in the building from an industrial installation

I. V. Kokovkin^{1}, V. S. Seleznev¹*

¹ Seismological Department of GS RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: titanoks1@yandex.ru

Abstract. For the long-term operation of buildings and structures, their technical control is necessary, due to the influence of various factors, both natural and man-made. This work is aimed at developing ways to control the state of a residential building, by monitoring based on the study of the natural frequencies. The work used seismological data obtained on a ten-story building located in the Novosibirsk Academgorodok, determined the first three vibration modes and their frequencies. The imposition of a monochromatic signal from the operation of a large industrial compressor located a kilometer from the building on one of its natural frequencies was revealed. The possibility of the building entering resonance is estimated. Despite the fact that the resonant oscillations observed in this case are not so significant in amplitude, it is necessary to monitor such influences to prevent possible damage.

Keywords: natural frequency, man-made impacts, seismic monitoring, building monitoring, compressor

Введение

Настоящая работа посвящена развитию метода инженерно-сейсмического мониторинга, разработанного в ФИЦ ЕГС РАН [1], который позволяет определять значения частот СК сооружений, используя записи сейсмостанции работающей непрерывно. Данные частоты зависят от структуры самих зданий и физи-

ческих свойств материалов, из которых они построены, тем самым любые серьезные отклонения от статистических значений будут давать представление о каких-либо изменениях, происходящих в постройке.

Предметом исследования является трехподъездный десятиэтажный жилой дом по адресу: г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 28, на десятом этаже которого установлен регистратор «Байкал-8» с трехкомпонентным сейсмоприемником GD-4.5. Направление компонент: X – вдоль длинной части сооружения, Y – вдоль узкой части сооружения, Z - вертикально.

Отметим, что чем выше здание, тем большим колебаниям оно подвержено. Эти колебания вызваны множеством факторов, таких как ветровые нагрузки, различного рода микросейсмы, промышленные установки, которые находятся как в самом здании, так и рядом с ним, тем самым датчики необходимо устанавливать как можно выше, для фиксации максимальных возмущений.

Ввиду того, что наверху сооружения колебания максимальны, а у основания здания они практически отсутствуют, то для их изучения, за нижнюю опорную точку возьмем сеймостанцию «Ключи», которая расположена в посёлке Каменушка Новосибирской области, в 9 км от объекта исследования, где находится аналогичная аппаратура, установленная на десятиметровую трубу скважины со следующей ориентацией осей: X – север, Y – запад и Z – вертикально. Расположение всех станций показано на рис. 1.

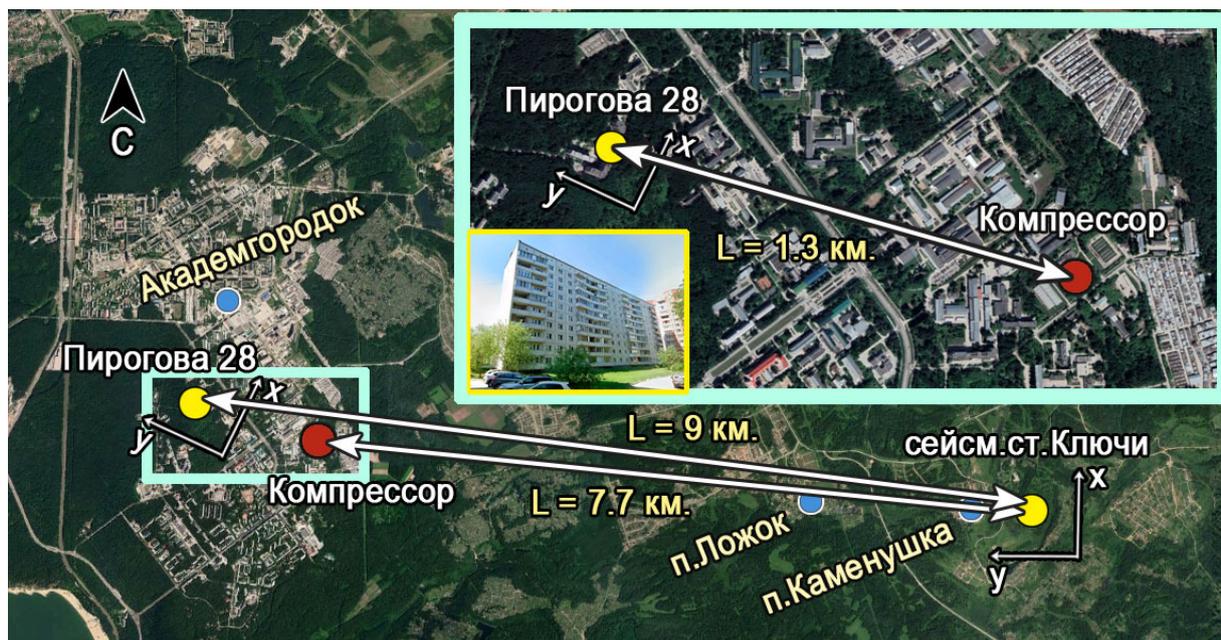


Рис. 1. Схема расположения объектов наблюдений

Методы и материалы

Для обработки полученных данных использовалось программное обеспечение «SpectrumSeism» [2], разработанное в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, которое позволяет преобразовывать запись сейсмических трасс в спектрограммы. Это дает возможность определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с те-

чением времени и выделить из всей записи источники определенной частоты. Для получения количественных оценок строятся графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах по формуле:

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

где $f(\tau)$ – зарегистрированный сейсмический сигнал, ω – частота, для которой строится график, t – текущее время, T – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда (в нашем случае окно $T = 120$ с, шаг окна 20 с).

Прежде всего, по крыше здания в нескольких десятках точек расставили станции и определили собственные моды колебаний методом стоячих волн [1, 3]. Затем по данным установленной на длительное время станции определили частоты собственных колебаний изучаемого объекта, которые совпали по частоте с модами колебаний. На рис. 2 построены амплитудно-частотные спектры. Мы видим три пика, в интервале от 0 до 5 Гц, где амплитуды сигнала максимальны.

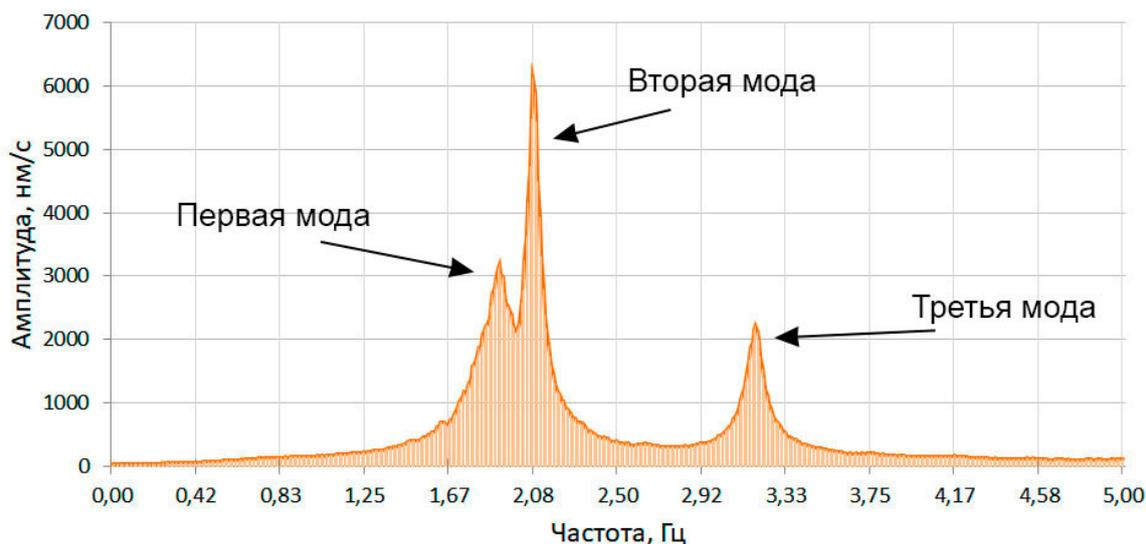


Рис. 2. Амплитудно-частотный спектр сейсмической записи для дома поул. Пирогова д. 28, в интервале от 0 до 5 Гц, Y-компонента

Результаты

Установлено, что на одну из собственных частот (а именно, 2-ю моду) накладывается сигнал от компрессора, принадлежащего Институту физики полупроводников им. академика А.В. Ржанова СО РАН (рис. 1), который осуществляет накачку ёмкостей сжатым воздухом. Он излучает монохроматический сигнал, частотой 2.0833 Гц, что хорошо видно на спектрограммах, в частности за 05.10.2021 г., во временном интервале с 3:00 по 15:00 по местному времени (рис. 3).

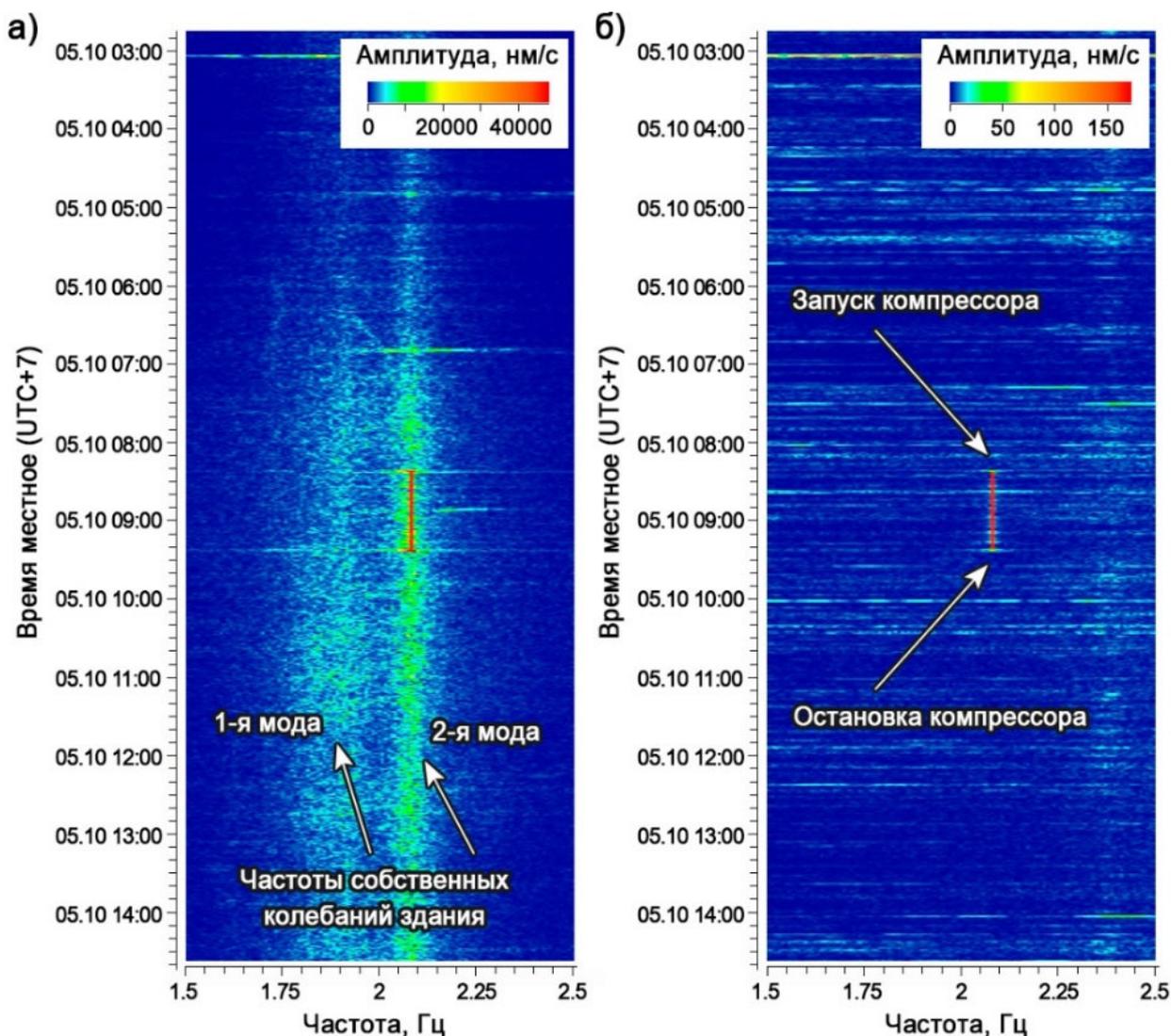


Рис. 3. Спектрограммы сейсмических записей за 05.10.21 г., в вырезке от 1.5 до 2.5 Гц. (а) по ул. Пирогова д. 28, Y-компонента (б) сейсмостанция Ключи, X-компонента

На рис. 3а видны две вертикальные полосы в районе 1.9 и 2.08 Гц, прослеживающиеся на всем протяжении спектрограммы, это первая и вторая частота СК здания. Помимо этого, видно, что на записи присутствует часовой сигнал (примерно с 8:22 до 9:22) с очень высокой амплитудой, совпадающий со временем работы компрессора. На рис. 3б представлена спектрограмма со станции «Ключи», на которой также хорошо прослеживается данный сигнал.

Известно, что если частота колебаний, передающихся от работающего механизма фундаменту здания, совпадает с собственной частотой колебаний отдельных частей здания, особенно верхних этажей и перекрытий, то, в результате его длительной работы, могут возникнуть значительные амплитуды колебаний. В ряде случаев это приводит к постепенному разрушению здания, оно

оседает и даёт трещины. Это явление называется резонансом и может быть причиной разрушения машин, зданий, мостов и других сооружений, если собственные частоты их колебаний совпадут с частотой периодически действующей силы.

Изучив имеющиеся по сейсмостанциям записи, было определено, что данный компрессор включается с периодичностью несколько раз в месяц, в среднем около четырех-пяти, длительностью в районе часа, всегда в утренние часы. Установлено, что интересная для нас частота СК дома, а именно, вторая мода, может колебаться в пределах от 2.05 до 2.2 Гц, вероятнее всего, это происходит из-за внешнего температурного влияния, в ряде работ отмечается подобная зависимость конструкций от температуры [4, 5, 6]. Необходимо отметить, что такое исследование также проводилось и была выявлена хорошая корреляция частот СК дома от температуры среды. Выявлено, что с возрастанием температуры, частота увеличивается и соответственно наоборот, с понижением убывает. Особенно хорошо эту связь описывает третья мода (рис. 4). Данные по температуре брались с метеостанции, установленной в сооружении Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, примерно в километре от места исследования.

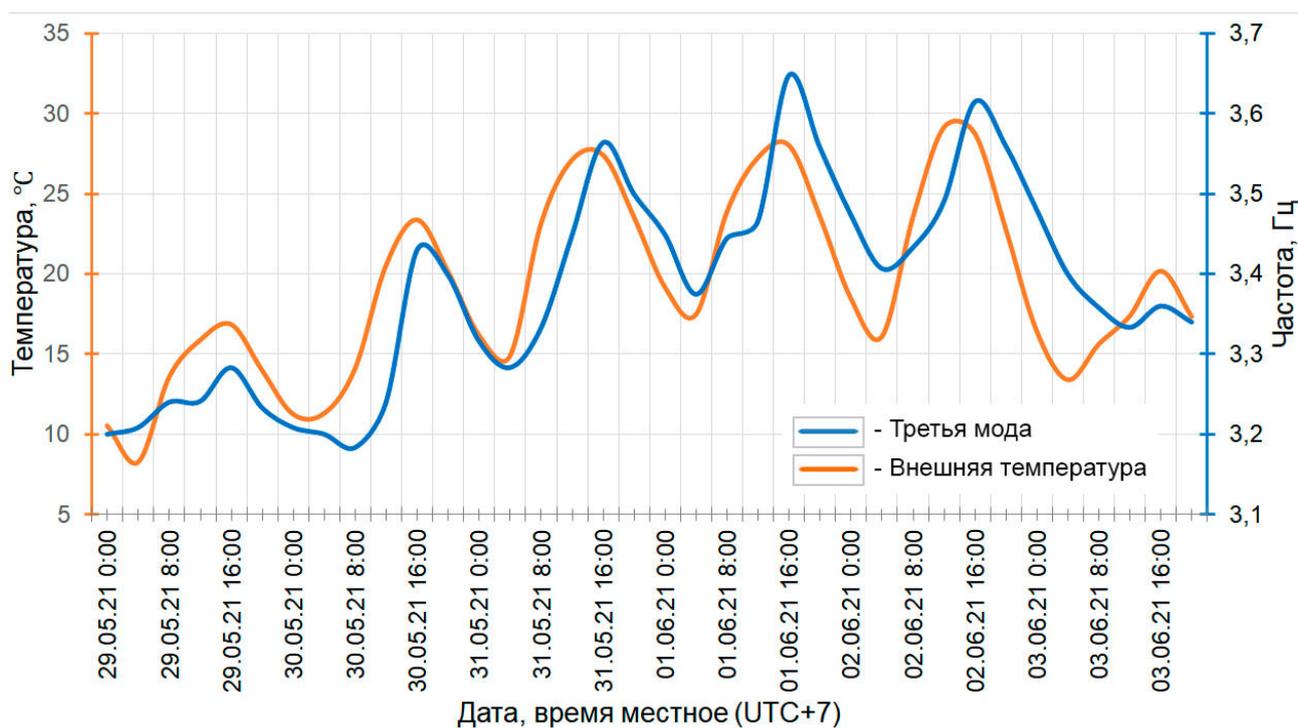


Рис. 4. Графики изменения температуры среды (оранжевый) и третьей моды собственных колебаний дома по ул. Пирогова 28, Е-компонента (синий) во временном интервале с 29.05.21 г. по 03.06.21 г.,

Ввиду вышеизложенного, т.к. частота может изменяться, совпадение частоты СК дома с частой работы компрессора происходит не всегда (рис. 5, 6).

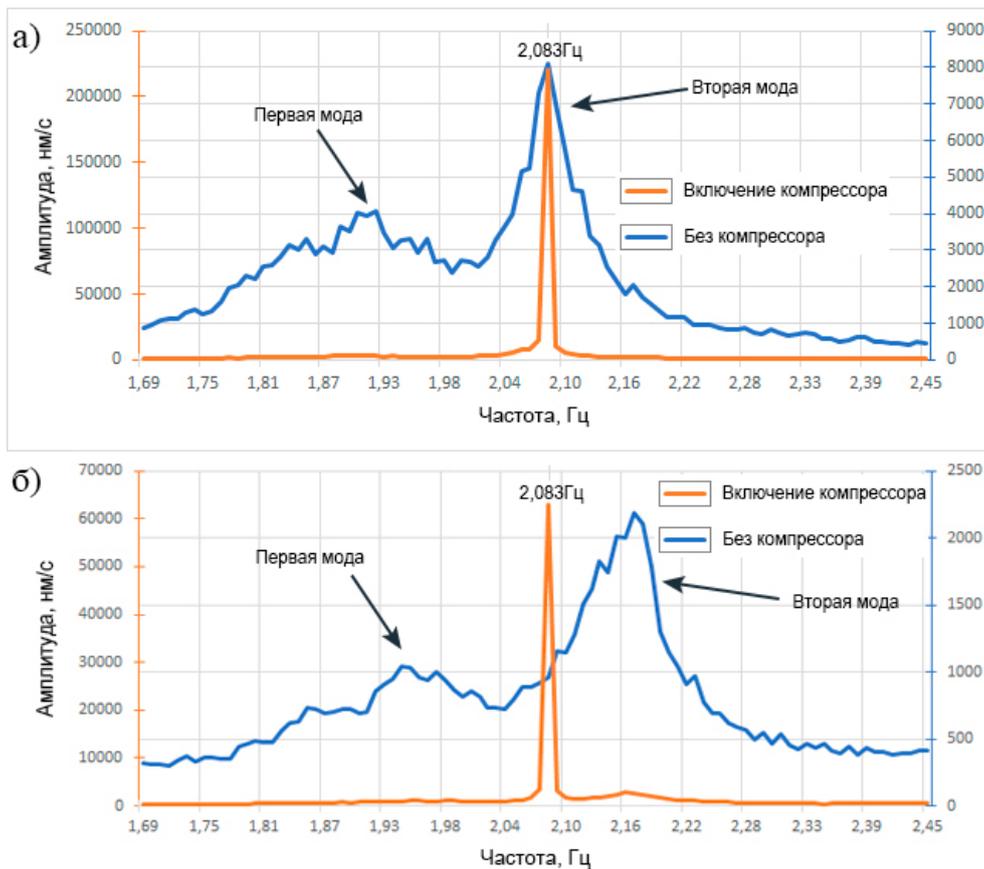


Рис. 5. Графики изменения амплитуд частот СК здания в интервале от 1.69 до 2.45 Гц, при включении компрессора (оранжевый) и после выключения (синий) (а) излучаемая компрессором частота совпадает с частотой СК здания, 05.10.21 г., Y-компонента (б) не совпадает с частотой СК здания. 10.02.21 г., Y-компонента

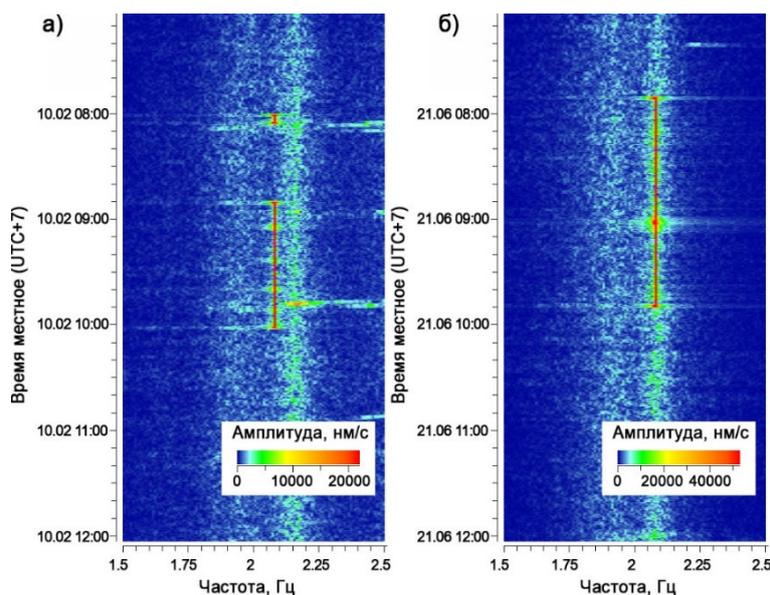


Рис. 6. Спектрограммы сигналов для здания по ул. Пирогова д. 28, (а) когда излучаемая компрессором частота не совпадает с частотой СК дома (10.02.21 г.), (б) когда совпадает (21.06.21 г.)

Обсуждение

Из графиков на рис. 5 видно, что когда излучаемая компрессором частота совпадает с частотой СК здания, а именно, второй модой, амплитуда сигнала намного выше, чем когда она не совпадают. Чтобы в этом убедиться, произведем численный расчет для двух описанных выше вариантов.

Таблица 1

Максимальные амплитуды сигнала при работе компрессора

Дата	10.02.2021 г. (несовпадение частоты)				21.06.2021 г. (совпадение частоты)			
Координата	X	Y	Z	Модуль	X	Y	Z	Модуль
Амплитуда сигнала на Пирогова	38759	62873	4031	73969.74	52592	198795	2937	205655
Амплитуда сигнала на ст. Ключи	112	66.83	52.57	140.62	150	60.1	25.9	163.65

Для того, чтобы не изучать каждую координату отдельно, будем находить модуль вектора координат, по следующей формуле:

$$|xyz| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2)$$

Данные по координатам получены путем часового усреднения спектра сигнала по каждой компоненте, в момент работы компрессора, и нахождения его максимальной амплитуды.

Из табл. 1 берем отношение модуля числа на верхнем этаже исследуемого здания к нижнему этажу, в роле которого выступает ст. «Ключи», так для 10.02.21 г., когда у нас собственная частота дома не совпадает с частотой компрессора:

$$\begin{aligned} & \text{|несовпадение|} \\ & = |\text{ст. «Пирогова»}|/|\text{ст. «Ключи»}| = |73969.74|/|140.62| = 526 \end{aligned}$$

для 21.06.21 г., где уже происходит совпадение частоты получаем:

$$\begin{aligned} & \text{|совпадение|} \\ & = |\text{ст. «Пирогова»}|/|\text{ст. «Ключи»}| = |205655|/|163.65| = 1256.6 \end{aligned}$$

Отсюда следует, что при совпадении частоты компрессора с частотой СК дома, происходит усиление амплитуды сигнала более, чем в два раза.

Заключение

Проведенные исследования выявили неблагоприятное влияние на общее состояние дома работу компрессора, находящегося на расстоянии 1.3 км от объекта исследования и излучающего монохроматический сигнал частотой 2.083 Гц, который в определенные интервалы времени может совпадать с собственной частотой здания, вызывая резонансное явление. Конечно, можно полагать, что столь кратковременные воздействия не оказывают большого влияния на конструкцию дома, к тому же собственная частота не всегда попадает в резонанс, но для дальнейшего определения рисков для других объектов, необходимо продолжать изучать это явление. Определить начало необратимых изменений конструкции, мы можем, когда увидим резкое скачкообразное изменение в частоте собственных колебаний. В этом случае следует проводить более детальные исследования для выявления подвергшихся разрушению деталей здания и их укрепление.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) 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»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент No 2461847 Российская Федерация, МПК G01V1/28 (2006.01), G01M7/02 (2006.01). Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления : No 2010128394/28 : заявл. 08.07.2010 : опубл. 20.09.2012 / Селезнев В. С., Лисейкин А. В., Брыксин А. А. – 10 с. : ил. – Текст : непосредственный.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021666241. SpectrumSeism / Селезнев В. С., Лисейкин А. В., Севостьянов Д. Б., Брыксин А. А. – Заявка №2021665611. Дата поступления 11 октября 2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 октября 2021 г.
3. Еманов А. Ф., Селезнёв В. С., Бах А. А., Гриценко С. А., Данилов И. А., Кузьменко А. П., Сабуров В. С., Татьков Г. И. Пересчёт стоячих волн при детальных инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. –2002. –Т. 43. – № 2. – С. 192–207.
4. 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. – Vol. 2014 – P. 1–19.
5. Cheynet E., Snæbjörnsson J., Bogunović Jakobsen J. Temperature effects on the modal properties of a suspension bridge // Dynamics of Civil Structures. Proceedings of the 35th IMAC. A Conference and Exposition on Structural Dynamics. –2017. –Vol. 2. –P. 87–93.
6. Moser P., Moaveni B. Environmental Effects on the Identified Natural Frequencies of the Dowling Hall Footbridge // Mechanical Systems and Signal Processing. –2011. –Vol. 25. –Iss. 7. – P. 2336–2357

© И. В. Коковкин, В. С. Селезнев, 2022