


DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-2-182-194
УДК 550.34
EDN: DUABVN

Научная статья / Research article

Оптимальная длительность наблюдений при обследовании зданий сейсмическим методом

М.Н. Воскресенский , А.А. Курданова  Институт геофизики, Уральское отделение Российской академии наук, Екатеринбург, Россия
 a.truuuman@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 21 ноября 2023 г.
Доработана: 12 марта 2024 г.
Принята к публикации: 26 марта 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

Аннотация. Изучение природы возникновения и распространения микросейсмических колебаний не теряет своей актуальности последние несколько десятилетий. Анализ микросейсм является основой некоторых инженерно-геологических исследований, направленных в том числе на обследование строительных конструкций зданий и сооружений различного назначения. Порядок подготовки и проведения обследований регламентируется системой нормативных документов. Действующая нормативно-техническая документация является общим руководством для оценки эксплуатационных свойств строительных конструкций. Конкретные методики обследования нуждаются в уточнении и детализации. Авторами описан опыт обследования здания на предмет динамики частотных характеристик в течение 24 часов. Система наблюдений реализована в виде 16 точек, равномерно распределенных в объеме здания. Проведен анализ спектральных характеристик для выявления временных промежутков в суточном интервале с ярко выраженным максимальным и минимальным уровнем техногенного воздействия на изучаемый объект. В часы максимального воздействия спектры соотносятся по записям разной длительности на предмет соответствия частотных составляющих. Выведена необходимая и достаточная длительность регистрации микросейсмических колебаний для определения частоты собственных колебаний строительного объекта при расположении точек наблюдения на нижних и верхних этажах здания.

Ключевые слова: спектрограмма, микросейсм, динамические характеристики, здание, сооружение, частота, колебания, экспериментальные исследования, собственные колебания здания, скорость смещения

Для цитирования

Воскресенский М.Н., Курданова А.А. Оптимальная длительность наблюдений при обследовании зданий сейсмическим методом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 2. С. 182–194. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-2-182-194>

Воскресенский Михаил Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией сейсмометрии, Институт геофизики, Уральское отделение Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 4710-9710; ORCID: 0000-0002-6222-7265; E-mail: voskresenskiy.mn@gmail.com

Курданова Алёна Алексеевна, младший научный сотрудник лаборатории сейсмометрии, Институт геофизики, Уральское отделение Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 7695-6043; ORCID: 0000-0002-1582-8113; E-mail: a.truuuman@gmail.com

© Воскресенский М.Н., Курданова А.А., 2024

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Optimal Duration of Observations During Seismic Inspection of Buildings

Mikhail N. Voskresenskiy¹, Alena A. Kurdanova¹✉

Institute of Geophysics Ural Branch of the Russian Academy of Science, Yekaterinburg, Russia

✉ a.truuuman@gmail.com

Article history

Received: November 21, 2023

Revised: March 12, 2024

Accepted: March 26, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

Authors' contribution

Undivided co-authorship

Abstract. Studying the nature of the occurrence and propagation of microseismic tremors has not lost its relevance over the past few decades. Currently, the analysis of microseisms is the basis of some engineering and geological studies, including those aimed at the inspection of structures of various purposes. The procedure for preparing and conducting surveys is governed by a system of regulatory documents. However, the current codes and specifications represent a general guide for assessing the operational properties of building structures. Therefore, specific survey methods need to be clarified and detailed. Describes the experiment of examining the building regarding the dynamics of frequency characteristics within 24 hours. The observation system was implemented in the form of 16 points, evenly distributed over the volume of the building. Spectral analysis based on FFT was carried out to identify the time intervals within the 24-hour period with a pronounced maximum and minimum level of man-induced impact on the studied subject. During the hours of maximum exposure, the spectra were correlated according to records of different duration in terms of the correspondence of frequency components. The necessary and sufficient duration of registration of microseismic vibrations was derived to determine the frequency of natural vibration of a building when the observation points are located on the lower and upper floors.

Keywords: spectrogram, microseisms, dynamic characteristics, building, structure, frequency, vibrations, experimental studies, drift velocity

For citation

Voskresenskiy M.N., Kurdanova A.A. Optimal duration of observations during seismic inspection of buildings. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024;20(2):182–194. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-2-182-194>

1. Введение

Микросейсмические волны всегда присутствуют на поверхности Земли в каждой ее точке, постоянно вовлекают в колебания как верхние, так и более глубокие части Земной коры [1]. Микросейсм (микросейсмические колебания) представляют собой относительно слабые колебания Земли, вызванные суммарным воздействием множества сейсмических источников, характеристики которых являются случайными величинами [2]. В настоящее время некоторые иностранные авторы исследуют тему стационарности микросейсмических колебаний [3]. Активное изучение механизма излучения микросейсмических волн началось с середины XX в. [4–7]. На сегодняшний день метод регистрации микросейсм входит в перечень нормативных документов и широко распространен в силу своей доступности [8–13]. Однако этот факт не отменяет того, что другие методы [14–20] могут применяться для обследования строительных конструкций. Напротив, комплексный подход позволяет повысить качество решения задачи.

Mikhail N. Voskresenskiy, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Seismometry Laboratory, Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Science, Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 4710-9710; ORCID: 0000-0002-6222-7265; E-mail: voskresenskiy.mn@gmail.com

Alena A. Kurdanova, Junior Researcher at the Laboratory of Seismometry, Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Science, Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 7695-6043; ORCID: 0000-0002-1582-8113; E-mail: a.truuuman@gmail.com

Обследование зданий и сооружений сейсмическим методом, а именно посредством регистрации микросейсмических колебаний предполагает организацию системы точек наблюдения в объеме здания с целью выявления нарушения целостности и работоспособности конструкции [21]. Микросейсмы среднечастотного диапазона 0,5...20 Гц представляют собой достаточно сложный композит из волн различного происхождения [5]. Изучение микросейсм различной природы позволяет решать большое число инженерно-сейсмологических задач, в том числе и те, целью которых является проектирование или обследование существующих зданий и сооружений [7].

Методика обследований зданий и сооружений с использованием микросейсмических колебаний достаточно универсальна, однако некоторые критерии оценки технического состояния объектов нуждаются в дополнительном уточнении, в том числе и длительность регистрации колебаний в точке наблюдений. Установление конкретного диапазона времени наблюдений позволит исследователям и работникам строительной отрасли оптимизировать процесс мониторинга и обеспечить максимальную информативность измерений за минимально возможный временной промежуток.

Настоящая статья представляет собой исследование спектрограмм, полученных при проведении сейсмометрического мониторинга здания путем регистрации микросейсмических колебаний. Под спектрограммами понимается изменение спектральных характеристик во времени (на протяжении 24 часов, расчеты проведены за каждый час). Исследование проведено в здании Института геофизики (ИГФ) осенью 2022 г.

Информация о здании института. Объект исследования — здание ИГФ Уральского отделения Российской академии наук им. Ю.П. Булашевича. Здание ИГФ располагается в г. Екатеринбурге по адресу ул. Амундсена, 100. Это четырехэтажное кирпичное здание размером 107 на 20 метров, введенное в эксплуатацию в 1981 г. Здание расположено на пересечении ул. Академика Вонсовского и ул. Амундсена, движение транспорта, на которых является регулярным и оживлённым. На рис. 1 представлено расположение Института геофизики, полученное при помощи сервиса «Яндекс. Карты».

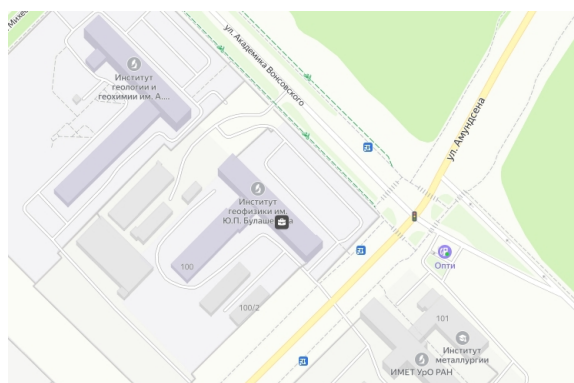


Рис. 1. Расположение здания ИГФ УрО РАН на карте

Источники: <https://yandex.ru/maps/-/CDRrzGyk> (дата обращения: 23.07.2023 г.)

Figure 1. Location of the building of the Institute of Geophysics (Ural Branch of the Russian Academy of Sciences) on the map

Source: <https://yandex.ru/maps/-/CDRrzGyk> (accessed: 23.07.2023)

2. Метод

В сентябре 2022 г. проведено обследование здания ИГФ сейсмическим методом. Выполнена регистрация микросейсмического фона в течение 24 ч в каждой точке наблюдений. Для часовых записей с помощью быстрого преобразования Фурье были рассчитаны амплитудные спектры по трём компонентам зарегистрированного сигнала. На основании системы амплитудных спектров скорости смещения сформированы спектрограммы. Под спектрограммами понимается изменение спектральных характеристик во времени. Результаты обследования позволяют выделить временные интервалы максимального воздействия на здание и определить оптимальную длительность наблюдения.

Измерения проведены с помощью мобильного регистратора сейсмических сигналов REFTEK DAS 130-1/6 в комплекте с короткопериодным велосиметром LE-3Dlite Mk III (рис. 2). Каналы регистратора ориентированы по трём взаимно перпендикулярным направлениям, где направления X (север – юг) и Y (запад – восток) — это горизонтальные составляющие, а Z — вертикальная [22]. Время регистрации в точке наблюдения составляет приблизительно 24 часа, частота дискретизации сигнала — 125 Гц, что позволяет обеспечить максимальную частоту сигнала в пределах 62,5 Гц. Дальнейшая обработка велосиграмм и вычисления реализованы отдельно по измерительным осям в ПО MicroSeisTool [24]. Для расчёта спектров применены следующие программные настройки: полосовой фильтр с нижней частотой $f_{\min} = 1$ Гц, верхней частотой $f_{\max} = 20$ Гц.

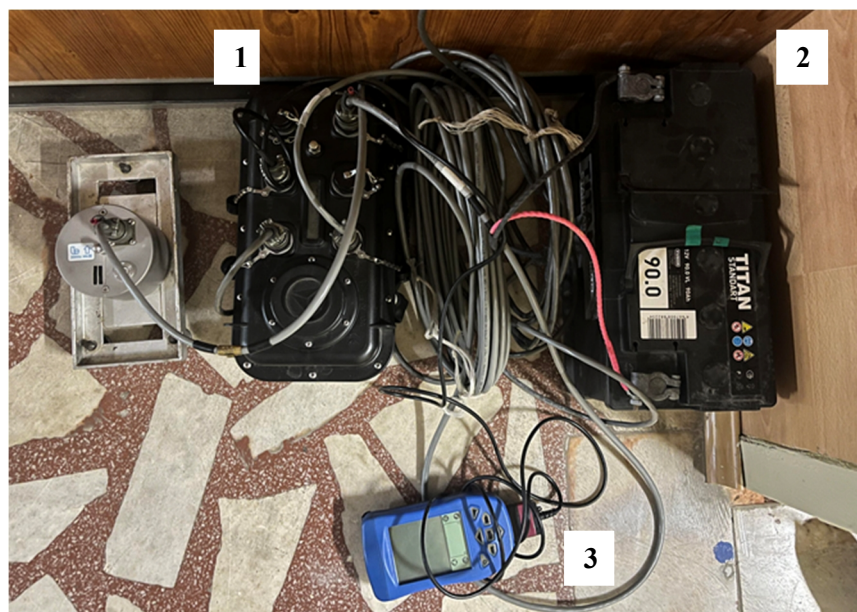


Рис. 2. Комплект оборудования в точке регистрации:

- 1 — велосиметр LE-3Dlite Mk III;
- 2 — регистратор сейсмических сигналов REFTEK DAS 130-1/6 и аккумулятор TITAN;
- 3 — пульт управления регистратором

И с т о ч н и к : фото М.Н. Воскресенского, А.А. Курдановой

Figure 2. A set of equipment at the observation site:

- 1 — LE-3Dlite Mk III velocimeter;
- 2 — REFTEK DAS 130-1/6 seismic signal recorder, TITAN battery;
- 3 — control panel of the recorder

S o u r c e : photo by M.N. Voskresenskiy, A.A. Kurdanova

Шестнадцать точек наблюдения равномерно расположены на каждом этаже здания, формируя (условно) четыре вертикальных и четыре горизонтальных профиля. Отклонение профилей от нормали к поверхности не превышало 30 см, что позволяло наблюдать изменение характера сейсмического сигнала в течение суток по двум взаимно перпендикулярным направлениям. На рис. 3 представлено схематичное изображение здания относительно автомобильных дорог. Пунктирными линиями на рисунке обозначены места расположения лестничных пролетов и шахты лифта, красные треугольники соответствуют расположению точек наблюдения.

В государственных стандартах, регламентирующих порядок действий при мониторинге зданий и сооружений, уделяется внимание горизонтальным компонентам, поэтому в настоящей работе не были рассмотрены значения, соответствующие вертикальной компоненте. На графиках ниже представлены спектрограммы, полученные на основании амплитудно-частотных характеристик в гори-

горизонтальной плоскости (X, Y) в верхней точке здания. Следует отметить, что при регистрации микро-сейсм ориентация регистратора в горизонтальной плоскости осуществлялась не по сторонам света, а в соответствии с ребрами жесткости конструкции. Направление горизонтальной составляющей X (рис. 4) было параллельным короткой стороне здания, а направление Y (рис. 5) — длинной. Соответствующие спектрограммы демонстрируют динамику спектральных характеристик здания в одной точке наблюдения в течение суток. Аналогичные операции проведены для каждой точки наблюдений, результирующие графики имеют одинаковый характер распределения спектров, поэтому графические изображения для остальных точек в публикации не приводятся.

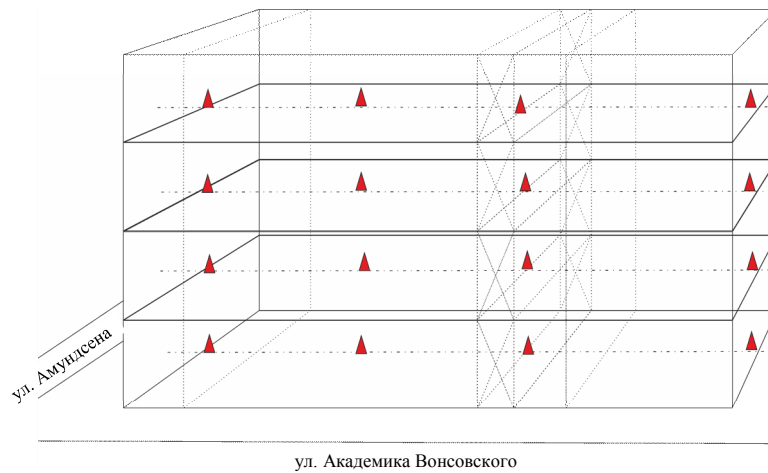


Рис. 3. Схема здания относительно близлежащих улиц с расположением точек наблюдений
И с т о ч н и к: выполнено М.Н. Воскресенским, А.А. Курдановой

Figure 3. Diagram of the building relative to nearby streets with the location of the monitoring points
S o u r c e: compiled by M.N. Voskresenskiy, A.A. Kurdanova

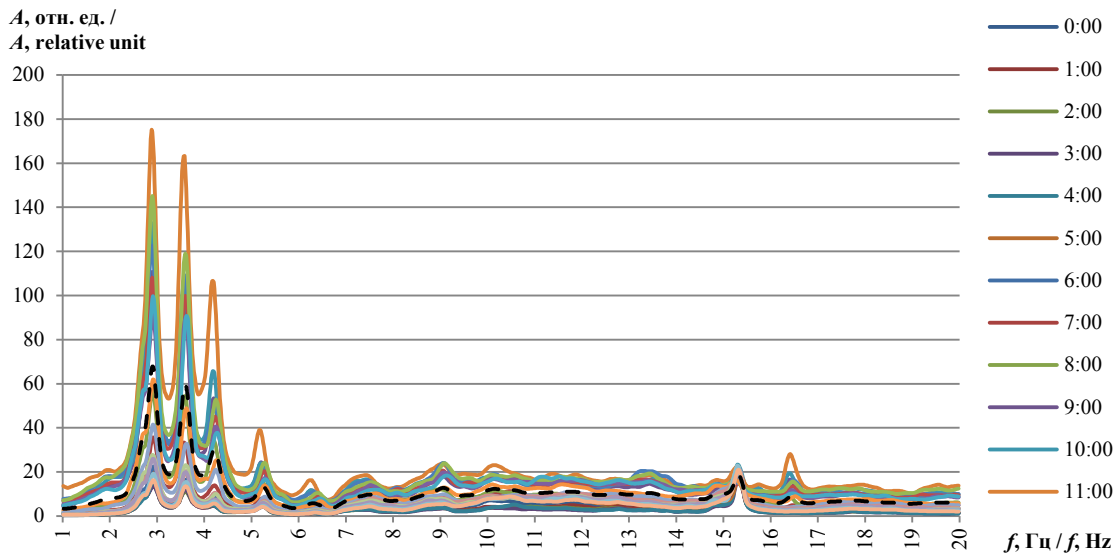


Рис. 4. Спектрограмма на основании системы амплитудных спектров скоростей, полученная для точки на верхнем этаже здания в направлении X
И с т о ч н и к: выполнено М.Н. Воскресенским, А.А. Курдановой

Figure 4. Spectrogram based on a system of velocity-amplitude spectra, obtained for the point on the top floor of the building in the direction X
S o u r c e: compiled by M.N. Voskresenskiy, A.A. Kurdanova

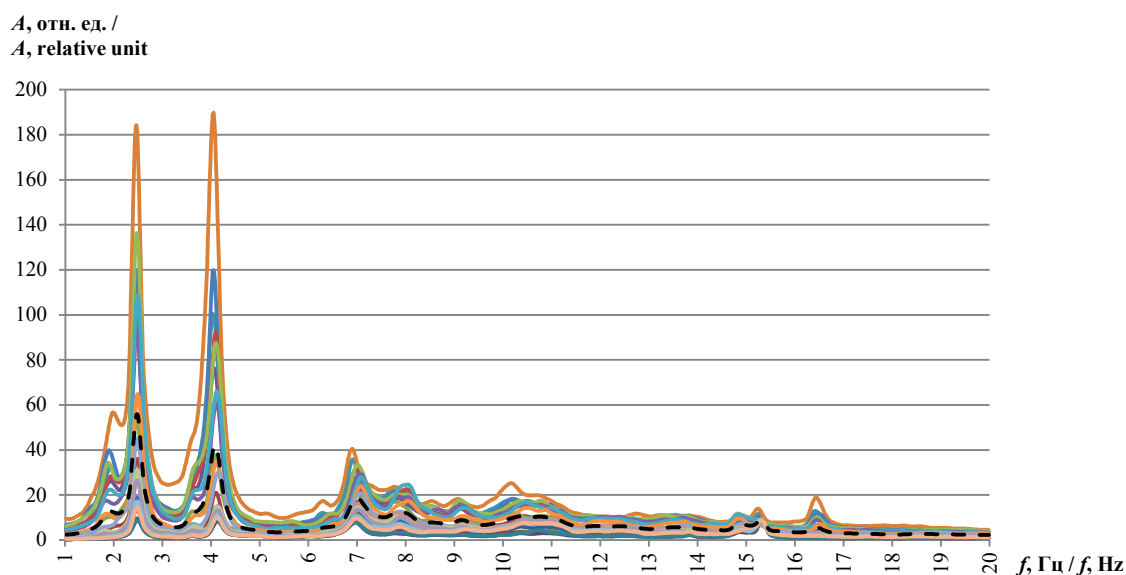


Рис. 5. Спектрограмма на основании системы амплитудных спектров скоростей, полученная для точки на верхнем этаже здания в направлении Y
 И с т о ч н и к: выполнено М.Н. Воскресенским, А.А. Курдановой
Figure 5. Spectrogram based on a system of velocity-amplitude spectra, obtained for the point on the top floor of the building in the direction of Y
 S o u r c e: compiled by M.N. Voskresenskiy, A.A. Kurdanova

3. Результаты и обсуждение

На всех графиках отмечается хорошая повторяемость частотных пиков вне зависимости от времени суток, но значительный разбег по амплитуде (до 9 раз). В легенде временные промежутки приведены по местному для Екатеринбурга времени (UTC +5:00).

Для X -компоненты первые явные максимумы спектральных кривых выделяются на частотах 2,9 и 3,6 Гц, для Y -компоненты пики выражены на частотах 2,5 и 4,1 Гц. Очевидно, что основные экстремумы, а соответственно, и частота собственных колебаний здания, находятся в диапазоне до 10 Гц, поэтому дальнейшее рассмотрение результатов исследования предлагается в диапазоне от 1 до 10 Гц. Такое решение позволит обеспечить более наглядное восприятие графических материалов.

На графиках черной пунктирной линией отмечен медианный спектр, рассчитанный как среднее арифметическое значений амплитуды за каждый час измерения. Таким образом, опираясь на спектрограммы, можно выделить две группы амплитудно-частотных характеристик. В первую группу можно отнести кривые с условно максимальной амплитудой, то есть те, которые на графике располагаются выше среднего спектра. Во вторую — с условно минимальной, которые располагаются ниже средней отметки.

Проанализировав выделенные группы, можно утверждать, что ко второй группе, с максимальными амплитудами, относятся спектры, полученные по записям микросейсмического шума, записанного в рабочее время (с 9:00 до 16:00). Спектры второй группы были рассчитаны для часов, соответствующих ночному, вечернему и утреннему времени. Для обеих горизонтальных компонент время максимальной и минимальной микросейсмической активности одинаково, 11:00 и 4:00 соответственно, поэтому дальнейшие графические изображения приведены для одной X -компоненты, полагая, что Y -составляющая ведет себя аналогичным образом. Ниже приведены максимальная, минимальная и медианная АЧХ (рис. 6).

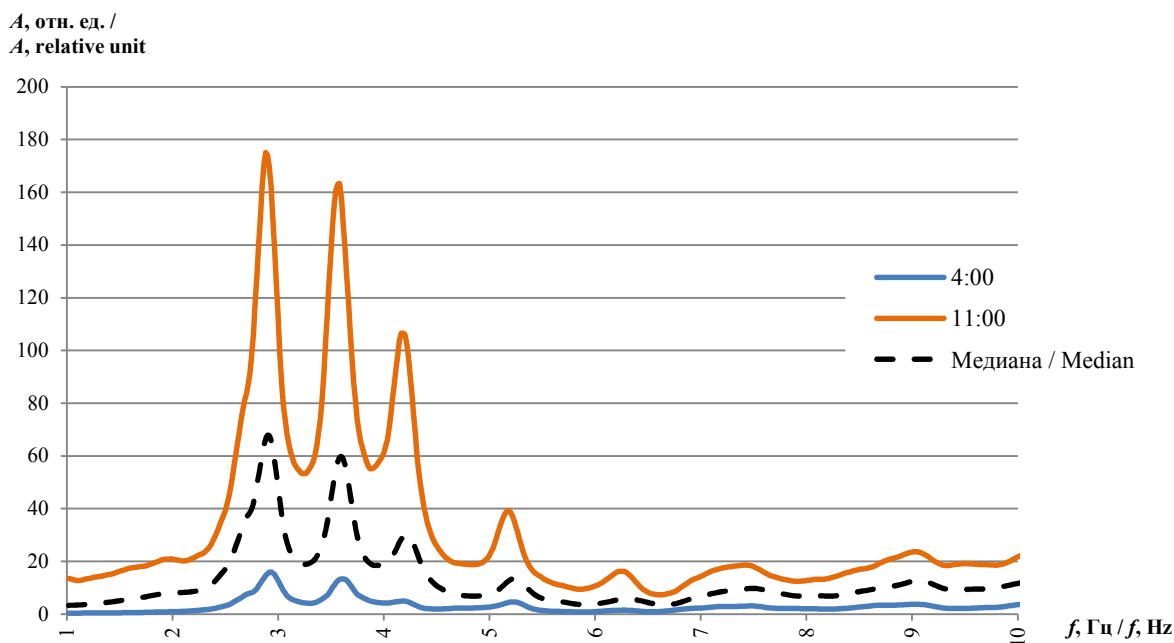


Рис. 6. Амплитудные спектры скорости, с максимальным и минимальным значением амплитуды за сутки, время UTC +5:00
И с т о ч н и к: выполнено М.Н. Воскресенским, А.А. Курдановой

Figure 6. Velocity-amplitude spectra, with maximum and minimum amplitude values within 24 hours, UTC +5:00
S o u r c e: compiled by M.N. Voskresenskiy, A.A. Kurdanova

Согласно Межгосударственному стандарту ГОСТ 34081-2017¹, колебания здания представляют собой суперпозицию собственных и вынужденных колебаний, вызванных различными внутренними (работой бытовой техники и различных технических систем здания) и внешними (городским транспортом, стройками и т.п.) воздействиями. Следовательно, стоит полагать, что в момент максимального воздействия на здание или сооружение, его отклик как системы также будет максимальным. Поэтому для получения объективных результатов рекомендуется проводить обследование в дневное время с 11:00 до 13:00.

В реальных условиях длительная регистрация микросейсмического фона в одной точке наблюдения не является необходимым условием и зачастую не представляется возможным. Следующий этап настоящего исследования — определение оптимальной длительности записи микросейсм [23]. Для этого из часового файла дневной группы, соответствующего максимальному значению амплитуды (11:00), были выделены участки длительностью 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 30 и 45 минут. Для этих участков аналогичным образом были рассчитаны амплитудные спектры, которые были соотнесены на одном графике с часовыми записями минимальной и максимальной амплитуды, а также с медианным значением исходных АЧХ (рис. 7).

По графику видно, что спектр для одноминутной записи значительно отличается от общей картины, имеет выраженный пик в районе 2 Гц, который не выражен на других кривых. Форма спектра для участка записи длиной в 2 минуты также имеет наглядные отличия, что может свидетельствовать о наличии случайной антропогенной помехи в момент регистрации. Начиная с трехминутной

¹ ГОСТ 34081-2017. Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний. М.: Стандартинформ, 2017. 15 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/65412/> (дата обращения: 21.04.2023).

записи, форма спектра перестает существенно меняться, и наблюдаются только амплитудные различия. Аналогичный вывод об экспериментальном исследовании формы получаемых спектров приведен и в работе В.А. Давыдова [25]. После увеличения длительности записи до 5 минут форма спектра становится практически идентичной форме часового спектра, однако сохраняется различие по амплитуде. В настоящем исследовании внимание уделяется не только частотной составляющей АЧХ, но и амплитудной, поэтому были выделены минимальные временные промежутки — 10 и 15 минут, которые наиболее схожи с исходной часовой записью по обоим параметрам (рис. 8).

АЧХ, полученная по десятиминутной записи, имеет меньшую амплитуду, чем пятнадцатиминутная запись. Из всех исследованных участков записи разной длительности пятнадцатиминутная запись является максимально приближенной к часовой и позволяет оптимально оценить спектральные характеристики в точке наблюдения. Кроме того, уменьшение длительности записи позволяет сократить время, затраченное на обследование зданий без ущерба для полезной информации.

Для объективности рассуждений о необходимой и достаточной длительности записи тем же порядком был организован расчёт амплитудных спектров для точки, находящейся на 1 этаже здания (максимально приближенной к грунту). Результат сравнения спектральных характеристик по X -компоненте представлен на рис. 9.

На рис. 10 выделены спектральные кривые, по форме наиболее соответствующие часовой записи. Однако на 15-минутной записи присутствуют некоторые отклонения в виде выступающих или отсутствующих пиков. Таким образом, при проведении обследования, которое включает в себя изучение общего объема здания, минимальную длительность записи на нижних этажах объекта рекомендуется увеличить до 20 минут. Это позволит исключить влияние случайных грунтовых и техногенных колебаний, способных влиять на частоту собственных колебаний объекта.

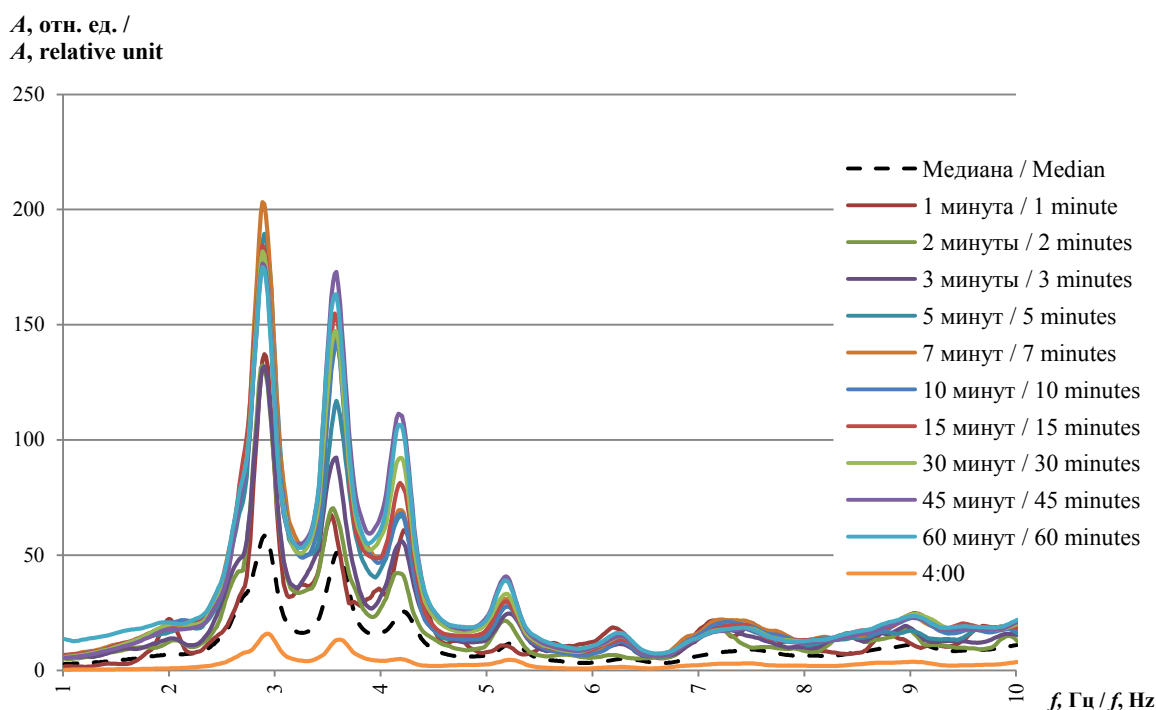


Рис. 7. Амплитудные спектры скорости, рассчитанные для участков записи с разной длительностью, для верхней точки здания

Источник: выполнено М.Н. Воскресенским, А.А. Курдановой

Figure 7. Velocity-amplitude spectra calculated for recording sections with different durations, obtained for the upper point of the building

Source: compiled by M.N. Voskresenskiy, A.A. Kurdanova

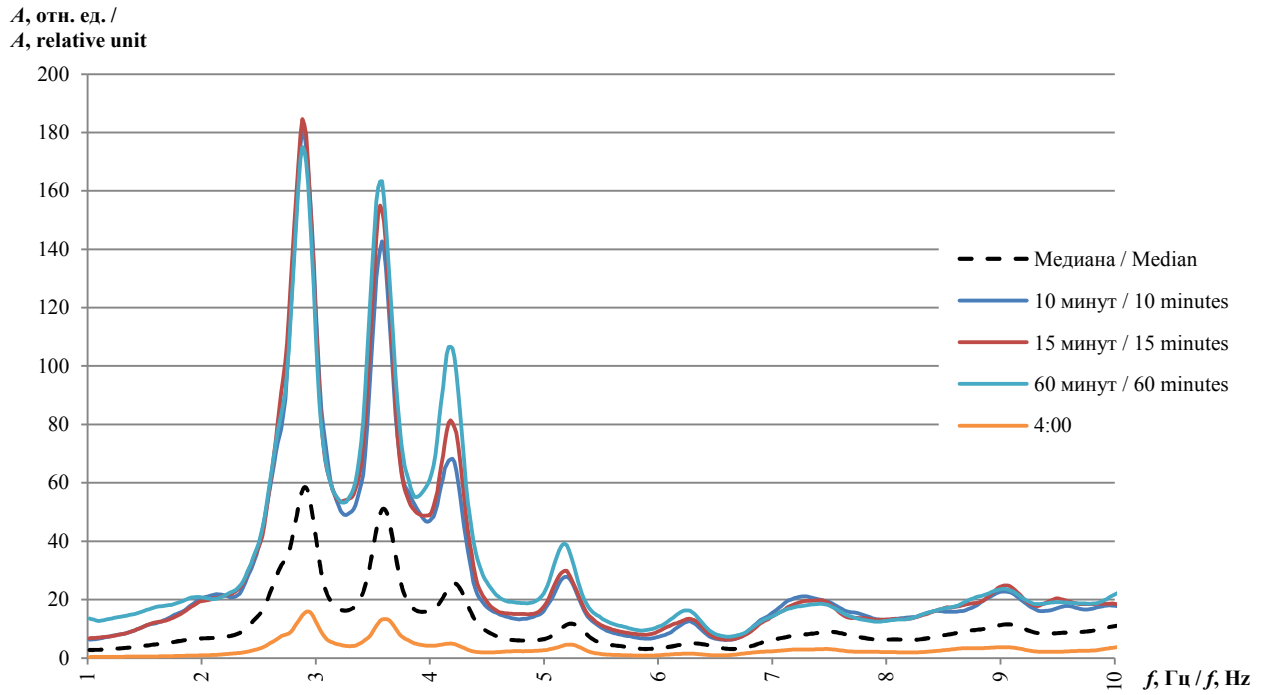


Рис. 8. Амплитудные спектры скорости, рассчитанные для участков записи с разной длительностью, имеющие наиболее идентичную форму
И с т о ч н и к: выполнено М.Н. Воскресенским, А.А. Курдановой
Figure 8. Velocity-amplitude spectra calculated for recording sections with different durations, having the most identical shape
S o u r c e: compiled by M.N. Voskresenskiy, A.A. Kurdanova

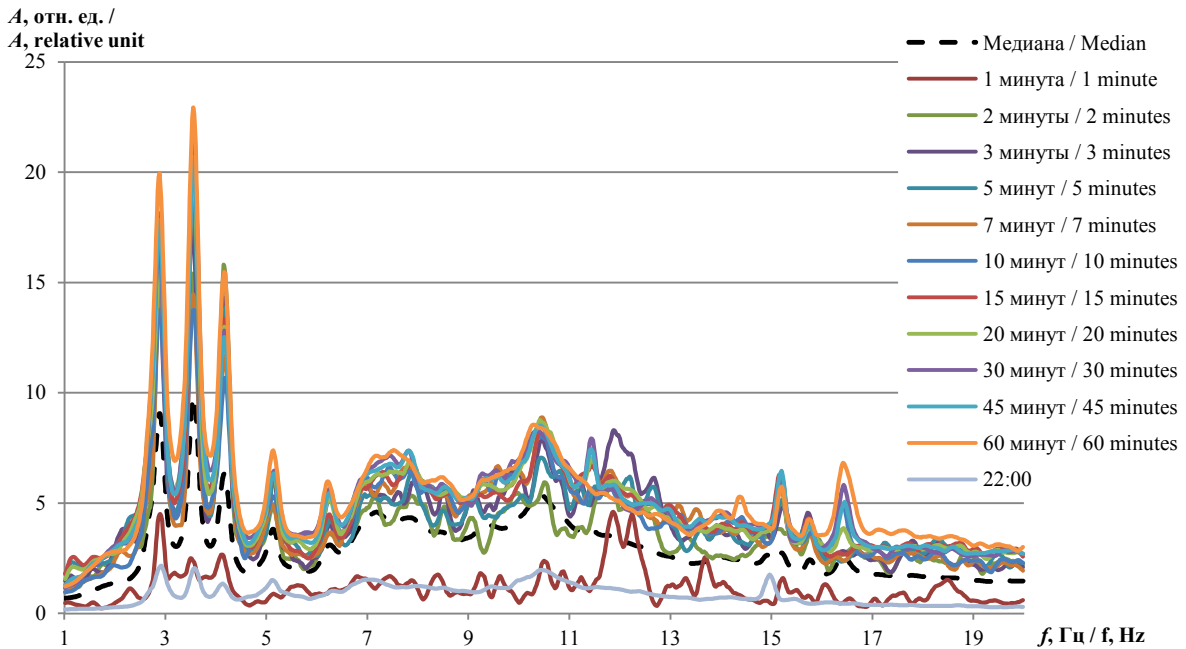


Рис. 9. Амплитудные спектры скорости, рассчитанные для участков записи с разной длительностью, для нижней точки здания
И с т о ч н и к: выполнено М.Н. Воскресенским, А.А. Курдановой
Figure 9. Velocity-amplitude spectra calculated for recording sections with different durations, obtained for the lower point of the building
S o u r c e: compiled by M.N. Voskresenskiy, A.A. Kurdanova

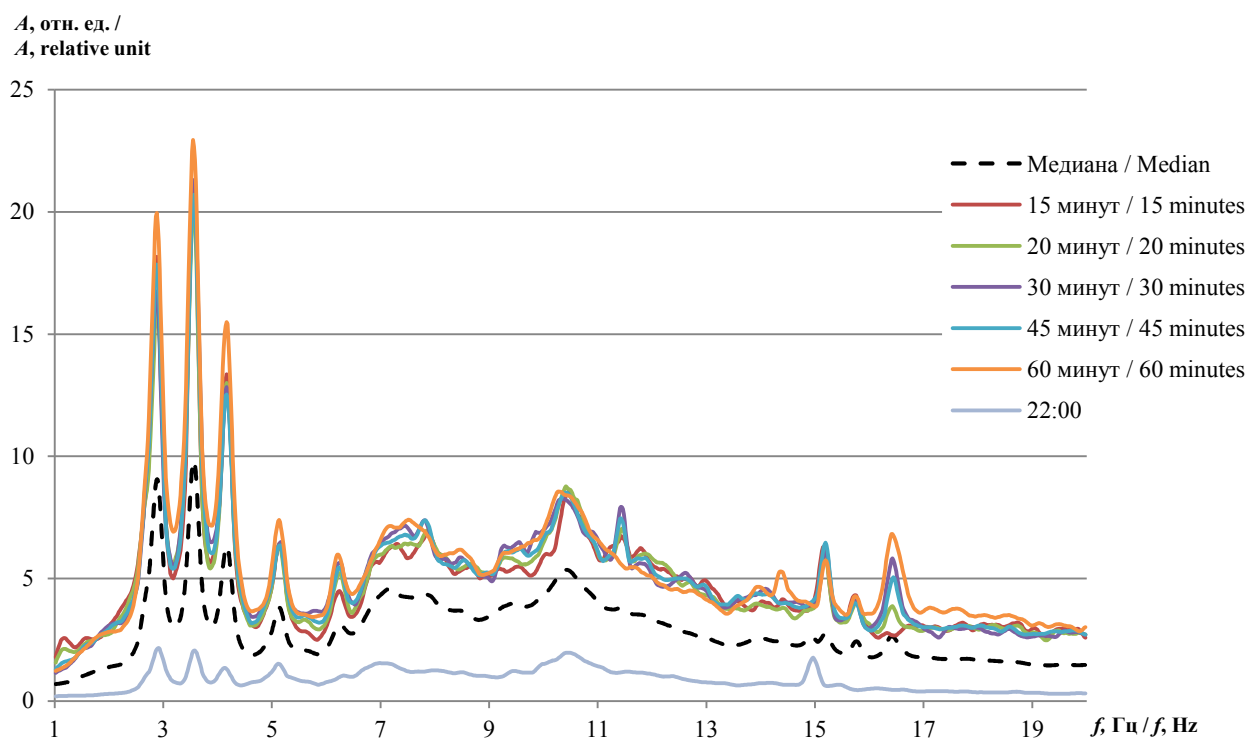


Рис. 10. Амплитудные спектры скорости, рассчитанные для участков записи с разной длительностью, имеющие наиболее идентичную форму
И с т о ч н и к: выполнено М.Н. Воскресенским, А.А. Курдановой

Figure 10. Velocity-amplitude spectra calculated for recording sections with different durations, having the most identical shape
S o u r c e: compiled by M.N. Voskresenskiy, A.A. Kurdanova

4. Заключение

Результаты исследования описывают несколько выводов:

1. На основании системы амплитудных спектров часовых велосиграммы получены спектрограммы, представляющие собой изменение спектральных характеристик микросейсм в течение 24 часов. При анализе спектрограмм были выделены две условные временные группы спектров: «дневная» и «ночная». Максимальное воздействие на здание приходится на дневные часы, а именно 11⁰⁰–13⁰⁰. Очевидно, что в зданиях похожего назначения часы максимальной активности будут аналогичными, поэтому обследование рекомендуется проводить в дневные часы.

2. Анализ «дневных» записей различной длительности (1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 30, 45 и 60 минут) наглядно демонстрирует повторяемость результата. Длительность записи микросейсмического фона 15 минут является достаточной для получения результата при обследовании частоты собственных колебаний объекта. При возникновении необходимости более детального обследования здания, с использованием точек на фундаменте или нижних этажах, длительность записи рекомендуется увеличить 20 минут.

3. В соответствии с нормативно-технической документацией при изучении колебаний строительных объектов рассматривают диапазон от 1 до 32 Гц. Рабочие частоты четырёхэтажного кирпичного здания в горизонтальной плоскости находятся в диапазоне 2,8...4,5 Гц. В текущем исследовании регистрируемый частотный диапазон ограничен 60 Гц, при обработке спектров использовался интервал от 1 до 20 Гц, а для наглядности результатов демонстрируется диапазон от 1 до 10 Гц

(см. рис. 6–8). Однако при возникновении необходимости более детального исследования конкретного сооружения в расширенном диапазоне частот (например, до 50 Гц) рекомендуется помимо дневной съёмки проводить ночную. Это позволит свести к минимуму вклад техногенных помех на общей картине микросейсм. По рис. 6 можно оценить техногенный вклад помех, которые явно отображены на дневных записях и практически отсутствуют на ночных АЧХ.

Список литературы

1. *Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Korablev G.E.* Microseismic field affected by local geological heterogeneities and microseismic sounding of the medium // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2008. Vol. 44, no. 7. P. 577–592. <https://doi.org/10.1134/S1069351308070082>
2. *Калинина А.В., Аммосов С.М., Татевосян Р.Э., Турчков А.М.* Об использовании микросейсм в задачах сейсмического микрорайонирования. *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2022. Vol. 49, no. 1. С. 5–17. <https://doi.org/10.21455/VIS2022.1-1>
3. *Neukirch M., García-Jerez A., Villaseñor A., Luzón F, Ruiz M., Molina L.* Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Ambient Vibration Obtained by Hilbert–Huang Transform // *Sensors*. 2021. Vol. 21. <https://doi.org/10.3390/s21093292>
4. *Putti S.P., Satyam N.* Evaluation of Site Effects Using HVSr Microtremor Measurements in Vishakhapatnam (India) // *Earth Systems and Environment*. 2020. Vol. 4. P. 439–454. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00158-6>
5. *Шаров Н.В., Маловичко А.А., Щукин Ю.К.* Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Книга 2: Микросейсмичность / под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. Петрозаводск, 2007. 94 с. EDN: QKGNRR
6. *Louie J.N.* Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2001. Vol. 91(2). P. 347–364. <https://doi.org/10.1785/0120000098>
7. *Neukirch M., García-Jerez A., Villaseñor A., Luzón F, Ruiz M., Molina L.* Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Ambient Vibration Obtained by Hilbert–Huang Transform // *Sensors*. 2021. Vol. 21. <https://doi.org/10.3390/s21093292>
8. *Mohamed A., Ali S.M., Mostafa A.* Estimation of seismic site effect at the new Tiba City proposed extension, Luxor, Egypt // *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 499–511. <http://doi.org/10.1080/20909977.2020.1784697>
9. *Давыдов В.А.* Изучение сейсмической реакции грунтов при микросейсмических зондированиях // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. 2023. № 2 (58). С. 90–100. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-2-58-90-100>
10. *Каранетян Дк.К., Айрапетян О.Ю., Матевосян Г.М., Каранетян Р.К.* Сравнительный анализ динамических характеристик зданий различных типов при микросейсмических колебаниях // *Геология и геофизика Юга России*. 2021. Т. 11 (3). С. 103–114. <http://doi.org/10.46698/VNC.2021.70.17.009>
11. *Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S., Dzeranov B.V., Shepelev V.D.* Application of microseismic and calculation techniques in engineering-geological zonation // *International Journal of Geomate*. 2016. Vol. 10, no. 19. P. 1690–1674. <http://doi.org/10.21660/2016.19.5312>
12. *Еремеев П.Г., Лебедева И.В.* Мониторинг и анализ нормативных документов по проектированию конструкций с учетом прогрессирующего обрушения // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 12. С. 15–21. <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.12.15-21>
13. *Аносов Г.И., Дробиз М.В., Коновалова О.А., Сотников Д.С., Чугаевич В.Я.* Оценка сейсмической устойчивости учебного корпуса № 3 Российского государственного университета им. И. Канта с применением методики Накамуры // *Вестник Краунц. Науки о Земле*. 2010. № 1(15). С. 223–231. EDN: MSVNNR
14. *Кужахметова Э.Р., Сутырин В.И.* Влияние грунтового основания на напряженно-деформированное состояние большепролетного здания с цилиндро-плитным покрытием // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. Т. 18, № 5. С. 444–457. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-5-444-457>
15. *Ehsan H., Tom L., Sreekanth B., Kifayullah M., Amir M.* Earthquake safety assessment of buildings through rapid visual screening // *Buildings*. 2020. Vol. 10, no. 3. <http://doi.org/10.3390/buildings10030051>
16. *Латидус А.А., Топчий Д.В.* Организация работ по обследованию зданий и сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 3. С. 12–15. <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.03.12-15>
17. *Ефремов А.М., Бойко В.Д., Сергеевцев Е.Ю., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А., Шмаков С.Д.* Определение срока безопасной эксплуатации производственных зданий и сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 10. С. 14–19. <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.10.14-19>
18. *Олейник П.П., Улитина А.Д.* Строительный контроль как стратегия повышения качества зданий и сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 4. С. 22–27. <http://dx.doi.org/10.33622/0869-7019.2020.04.22-27>

19. Ефремов А.М., Бойко В.Д., Сергеевцев Е.Ю., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А., Шмаков С.Д. Учет совместного влияния дефектов на несущую способность конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 8. С. 11–18. <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.08.11-18>
20. Олейник П.П., Куренков О.Г. Оценка степени отражения качества объекта в исполнительной документации // Строительное производство. 2019. № 1. С. 78–81. https://doi.org/10.54950/26585340_2019_1_78
21. Воскресенский М.Н., Парыгин Г.И., Сенина Т.Е., Сенин Л.Н. Экспозиционный динамический инженерно-сейсмометрический мониторинг здания Института геофизики УрО РАН с применением аппаратно-программного комплекса «Регистр-SD» // Вестник Пермского университета. Геология. 2019. Т. 18. № 1. С. 38–42. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.18.1.38>
22. Воскресенский М.Н., Парыгин Г.И., Косоротова Е.А., Курданова А.А. Исследование процесса регистрации, обработки и интерпретации сейсмических событий // Уральский геофизический вестник. 2021. № 3. С. 11–18. <https://doi.org/10.25698/UGV.2021.3.2.11>
23. Романов В.В., Мальский К.С. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2016615697.27.05.2016. MicroSeisTool – программа обработки записей микросейсмических колебаний. Заявка № 2016611234 от 16.02.2016
24. Романов В.В., Мальский К.С., Дронов А.Н. Выбор оптимальных параметров записи микросейсмических колебаний в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 101–107. EDN: WGBLZJ
25. Давыдов В.А. Малоуглубинное сейсмическое зондирование на основе изучения эллиптичности микросейсм // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 1. С. 78–85. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.78-85>

References

1. Gorbatiykov A.V., Stepanova M.Yu., Korablev G.E. Microseismic field affected by local geological heterogeneities and microseismic sounding of the medium. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2008;44(7):577–592. <https://doi.org/10.1134/S1069351308070082>
2. Kalinina A.V., Ammosov S.M., Tatevosjan R.Je., Turchkov A.M. On the use of microseisms for seismic microzonation. *Issues of engineering seismology*. 2022;49(1):5–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.21455/VIS2022.1-1>
3. Neukirch M., García-Jerez A., Villaseñor A., Luzón F, Ruiz M., Molina L. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Ambient Vibration Obtained by Hilbert–Huang Transform. *Sensors*. 2021;21:3292. <https://doi.org/10.3390/s21093292>
4. Putti S.P., Satyam N. Evaluation of Site Effects Using HVSr Microtremor Measurements in Vishakhapatnam (India). *Earth Systems and Environment*. 2020;4:439–454. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00158-6>
5. Sharov N.V., Malovichko A.A., Shcukin Y.K. *Earthquakes and microseismicity in modern geodynamics problems on the East European platform. Part 2. Microseismicity*. Petrozavodsk; 2007. (In Russ.) EDN: QKGNRR
6. Louie J.N. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2001;91(2):347–364. <https://dx.doi.org/10.1785/0120000098>
7. Neukirch M., García-Jerez A., Villaseñor A., Luzón F, Ruiz M., Molina L. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Ambient Vibration Obtained by Hilbert–Huang Transform. *Sensors*. 2021;21:3292. <https://doi.org/10.3390/s21093292>
8. Mohamed A., Ali S.M., Mostafa A. Estimation of seismic site effect at the new Tiba City proposed extension, Luxor, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2020;9(1):499–511. <http://doi.org/10.1080/20909977.2020.1784697>
9. Davydov V.A. Studying the seismic reaction of soils during microseismic sounding // *Herald of KRAUNTS. Series: Earth Sciences*. 2023;2(58):90–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-2-58-90-100>
10. Karapetjan Dk.K., Ajrapetjan O.Ju., Matevosjan G.M., Karapetjan R.K. Comparative analysis of the dynamic characteristics of various types of building during microseismic vibrations. *Geology and geophysics of Russian South*. 2021;11(3):103–114. (In Russ.) <http://doi.org/10.46698/VNC.2021.70.17.009>
11. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S., Dzeranov B.V., Shepelev V.D. Application of microseismic and calculation techniques in engineering-geological zonation. *International Journal of Geomate*. 2016;10(19):1690–1674. <http://doi.org/10.21660/2016.19.5312>
12. Eremeev P.G., Lebedeva I.V. Monitoring and Analysis of Regulatory Documents on the Design of Structures With Due Regard for the Progressive Collapse. *Industrial and Civil Engineering*. 2021;12:15–21. (In Russ.) <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.12.15-21>
13. Anosov G.I., Drobiz M.V., Konovalova O.A., Sotnikov D.S., Chugaevich V.Ja. Assessment of seismic stability of the Academic Building No. 3 of the I. Kant Russian State University using the Nakamura technique. *Bulletin of kamchatka regional association «Educational-Scientific Center»*. *Earth sciences*. 2010;1(15):223–231. (In Russ.) EDN: MSVNNR
14. Kuzhahmetova Je.R., Sutyryin V.I. Influence of the soil base on the stress-strain state of a large-span building with a cylinder-and-slab roof. *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*. 2022;18(5):444–457. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-5-444-457>

15. Ehsan H., Tom L., Sreekanth B., Kifaytullah M., Amir M. Earthquake safety assessment of buildings through rapid visual screening. *Buildings*. 2020;10(3):51. <http://doi.org/10.3390/buildings10030051>
16. Lapidus A.A., Topchij D.V. Organization of Works on Inspection of Buildings and Structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*. 2023;3:12–15. (In Russ.) <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.03.12-15>
17. Efremov A.M., Bojko V.D., Sergeevcev E.Ju., Trekin N.N., Kodysh Je.N., Terehov I.A., Shmakov S.D. Determination of the Period of Safe Operation of Industrial Buildings and Structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2022;10:14–19. (In Russ.) <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.10.14-19>
18. Olejnik P.P., Ulitina A.D. Construction Control as a Strategy for Improving the Quality of Buildings and Structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2020;4:22–27. (In Russ.) <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.04.22-27>
19. Efremov A.M., Bojko V.D., Sergeevcev E.Ju., Trekin N.N., Kodysh Je.N., Terehov I.A., Shmakov S.D. Taking Into Account the Joint Effect of Defects on the Bearing Capacity of Structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2022;8:11–18. (In Russ.) <http://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.08.11-18>
20. Olejnik P.P., Kurenkov O.G. Assessment of the degree of reflection of the quality of the object in the as-built documentation. *Construction production*. 2019;1:78–81. (In Russ.) https://doi.org/10.54950/26585340_2019_1_78
21. Voskresenskiy M.N., Parygin G.I., Senina T.E., Senin L.N. Expositional dynamic engineering-seismometric monitoring of the building of the institute of geophysics ub ras with use of the hardware-software complex “Register-SD”. *Bulletin of Perm University. Geology*. 2019;18(1):38–42. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.18.1.38>
22. Voskresenskiy M.N., Parygin G.I., Kosorotova E.A., Kurdanova A.A. Research of the process of registration, processing and interpretation of seismic events. *Ural geophysical bulletin*. 2021;3:11–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.25698/UGV.2021.3.2.11>
23. Romanov V.V., Mal'skiy K.S. *Certificate of registration of the computer program No. 2016615697.27.05.2016*. MicroSeisTool is a program for processing records of microseismic vibrations. Application No. 2016611234 dated 02/16/2016
24. Romanov V.V., Mal'skiy K.S., Dronov A.N. Selection of optimum parameters of microseismic vibration recording in underground excavations. *Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)*. 2016;7:101–107. (In Russ.) EDN: WGBLZJ
25. Davydov V.A. Shallow seismic sounding based on ellipticity analysis of microtremor. *Georesources*. 2019;21(1): 78–85. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.78-85>