

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ EXPERIMENTAL STUDIES

DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-5-479-490

УДК 550.3

EDN: CVGMIC

Научная статья / Research article

Мониторинг технического состояния зданий сейсмическим методом

А.А. Курданова^{ID✉}, М.Н. Воскресенский^{ID}, Е.А. Косорогова^{ID}, Г.И. Парыгин^{ID}

Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

✉ a.truuuuman@gmail.com

Поступила в редакцию: 5 августа 2024 г.

Принята к публикации: 12 октября 2024 г.

Аннотация. Объектом исследования стали резонансные частоты собственных колебаний зданий институтов УрО РАН в г. Екатеринбурге и их распределение в точках наблюдения. Для анализа резонансных характеристик применяется метод спектральных отношений (HVSР, или метод Накамуры), который позволяет выявить скрытые дефекты конструкции. Периодический мониторинг технического состояния строительных объектов позволяет вычислить и оценить изменение динамических характеристик объекта с течением времени. Одинаковые значения амплитуд экстремумов кривой спектральных отношений и равномерное распределение значений в объеме здания свидетельствуют о нормальном работоспособном состоянии конструкции. Присутствие в некоторых точках аномально высоких значений может быть обусловлено наличием скрытых дефектов и подлежит дополнительному изучению. Демонстрируется способ расчета и распределения коэффициента уязвимости K_y в объеме исследуемых зданий. По результатам периодического мониторинга (проводится ежегодно с 2017 г.) демонстрируется устойчивое состояние здания Института геофизики УрО РАН и приводится сравнение резонансных частот, полученных в здании с типовым проектом (Институт геологии и геохимии УрО РАН). В представленной работе описан метод оценки сейсмической устойчивости здания с применением расчета ускорения в горизонтальной плоскости (α_{saj}) в точке наблюдения. Рассчитывается ускорение при максимально возможном сейсмическом событии в регионе исследования (44 см/с²). Вычисляется возможное максимальное ускорение с учетом характеристик грунта, для точки наблюдения с наибольшим K_y , $\alpha_{saj} = 30,6$ см/с², что соответствует интенсивности землетрясения 5,6 балла.

Ключевые слова: сейсмическая устойчивость, резонанс, спектр, мониторинг, здание, уязвимость, ускорение, собственные колебания, метод Накамуры

Курданова Алёна Алексеевна, младший научный сотрудник лаборатории сейсмометрии, Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 7695-6043, ORCID: 0000-0002-1582-8113; e-mail: a.truuuuman@gmail.com

Воскресенский Михаил Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией сейсмометрии, Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 4710-9710, ORCID: 0000-0002-6222-7265; e-mail: voskresenskiy.mn@gmail.com

Косорогова Елена Александровна, младший научный сотрудник лаборатории сейсмометрии, Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 9804-6660, ORCID: 0000-0002-1445-7250; e-mail: kosorotiha30@gmail.com

Парыгин Геннадий Иванович, научный сотрудник лаборатории сейсмометрии, Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 4262-8937, ORCID: 0009-0009-8401-3450; e-mail: usc_gena@mail.com

© Курданова А.А., Воскресенский М.Н., Косорогова Е.А., Парыгин Г.И., 2024

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

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Курданова А.А. — реализация исследовательского процесса, сбор и обработка полевых данных, оформление графических материалов, описание эксперимента; Воскресенский М.Н. — постановка задачи, организация и реализация исследовательского процесса; Косоротова Е.А. — реализация исследовательского процесса, сбор полевых данных; Парыгин Г.И. — сбор полевых данных

Для цитирования: Курданова А.А., Воскресенский М.Н., Косоротова Е.А., Парыгин Г.И. Мониторинг технического состояния зданий сейсмическим методом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 5. С. 479–490. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-5-479-490>

Monitoring of Technical Condition of Buildings by Seismic Method

Alena A. Kurdanova[✉], Mikhail N. Voskresenskiy^{id}, Elena A. Kosorotova^{id}, Gennadiy I. Parygin^{id}

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

✉ a.truuuuman@gmail.com

Received: August 5, 2024

Accepted: October 12, 2024

Abstract. The research object is the natural resonance frequencies of the buildings of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (UB RAS) located in Ekaterinburg and their distribution at observation points. The method of spectral ratios (HVSR or the Nakamura method), which allows hidden construction defects to be identified, is applied to analyze the resonance characteristics. Periodic monitoring of technical condition allows to calculate and evaluate changes in dynamic characteristics over time. Equal values of the amplitude extrema of the spectral ratio curve and uniform distribution of the values throughout the building indicate a normal operational state of the structure. The presence of abnormally high values at some points may be due to hidden defects and requires additional study. A method for calculating vulnerability coefficient K_y is demonstrated. According to the results of annual monitoring (since 2017), the stable state of the Institute of Geophysics building of UB RAS is demonstrated, and a comparison with resonant frequencies obtained from the standard project (Institute of Geology & Geochemistry of UB RAS) is presented. This article presents a method for assessing seismic stability by calculating horizontal acceleration (α_{saj}) at observation points. Acceleration is calculated at the maximum possible seismic event in the studied region (44 cm/s²). The possible maximum acceleration is calculated, taking into account the characteristics of the soil, for the observation point with the highest K_y , $\alpha_{saj} = 30.6$ cm/s², which corresponds to an earthquake intensity of 5.6.

Keywords: seismic stability, resonance, spectrum, monitoring, building, vulnerability, acceleration, natural vibrations, Nakamura's method

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution. Kurdanova A.A. — implementation of the research process, collection and analysis of field data, design of visual materials, and description of the experimental findings; Voskresenskiy M.N. — formulation of the objectives, organization, and conduct of the research; Kosorotova E.A. — execution of the research tasks and collection of field-based data; Parygin G.I. — acquisition of field-based information.

For citation: Kurdanova A.A., Voskresenskiy M.N., Kosorotova E.A., Parygin G.I. Monitoring of technical condition of buildings by seismic method. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024;20(5):479–490. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-5-479-490>

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

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

Elena A. Kosorotova, Junior Researcher, Laboratory of Seismometry, Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 9804-6660, ORCID: 0000-0002-1445-7250; e-mail: kosorotiha30@gmail.com

Gennadiy I. Parygin, Researcher, Laboratory of Seismometry, Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 4262-8937, ORCID: 0009-0009-8401-3450; e-mail: usc_gena@mail.com

1. Введение

Регулярное обследование зданий и сооружений является обязательной процедурой, которая должна проводиться повсеместно, особенно в регионах с повышенной сейсмической активностью. Даже там, где высокая сейсмичность не является обычным явлением, проведение обследования строительных объектов имеет большое значение. Эти мероприятия позволяют значительно снизить риск возникновения аварийных ситуаций и следить за состоянием объектов на необходимом уровне. Один из способов контроля состояния строительного объекта — анализ динамических характеристик с помощью регистрации микросейсмических колебаний [1–4].

Свердловская область считается регионом со слабо выраженной сейсмичностью [5]. Столица Свердловской области г. Екатеринбург является современным мегаполисом, в котором активно ведутся строительные работы жилых многоквартирных домов и промышленных объектов, каждый из которых имеет свои особенности дальнейшей эксплуатации. Кроме того, в городах существует большое количество зданий, срок введения в эксплуатацию которых датируется прошлым столетием. Такие строительные объекты нуждаются в регулярном обследовании, вне зависимости от условий сейсмичности региона. Причиной аварий строительных конструкций часто становятся дефекты, образующиеся в результате действия различных факторов окружающей среды, многие из которых рассмотрены на реальных примерах [6]. Для своевременного выявления и предотвращения причин разрушения мониторинг динамических характеристик объектов — это необходимость.

Подходы к организации процесса наблюдения за состоянием зданий, сооружений и материалов конструкций имеют особую актуальность в работах отечественных и зарубежных авторов [7–9]. Кроме того, универсальность методик позволяет оценивать техническое состояние мостов и путепроводов [10].

В статье описываются результаты мониторинга здания ИГФ УрО РАН за период 2017–2024 г., кроме того приводится опыт обследования строительного объекта подобного проекта — здания ИГГ УрО РАН в 2023 г.

Информация об объектах исследования

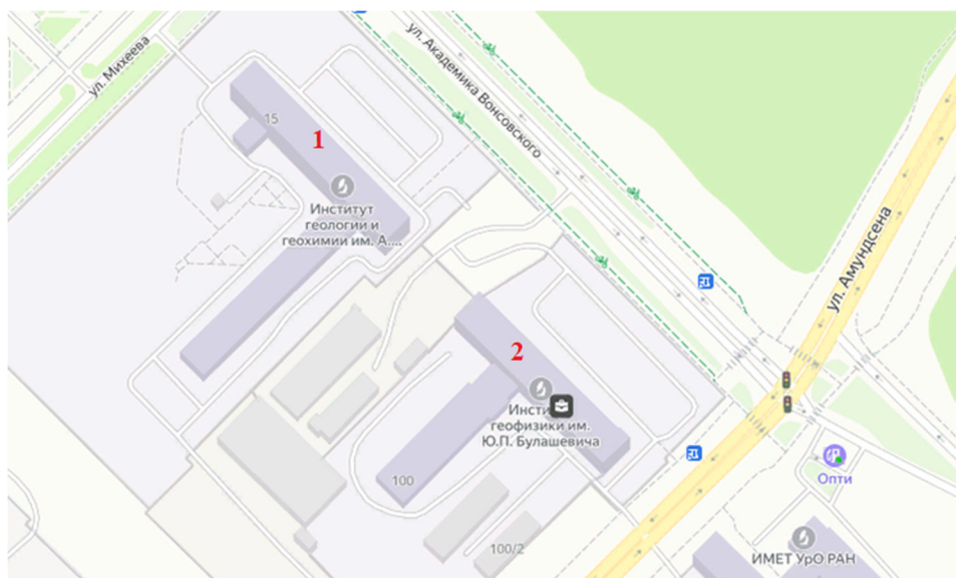


Рис. 1. Объекты исследования. Вид сверху:

1 — здание Института геологии и геохимии; 2 — здание Института геофизики

И с т о ч н и к: <https://yandex.ru/maps/-/CDRrzGyk> (дата обращения: 24.07.2024)

Figure 1. The research objects. A view from above:

1 — the Institute of Geology and Geochemistry building; 2 — the Institute of Geophysics building

S o u r c e: <https://yandex.ru/maps/-/CDRrzGyk> (accessed: 24.07.2024)

Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича представляет собой четырехэтажное кирпичное, введенное в эксплуатацию в 1981 г. Строительство здания Института геологии и геохимии имени А.Н. Заварицкого началось в 1981 г., однако в эксплуатацию оно было введено в декабре 2015 г. Кроме четырех основных этажей в конструкции присутствует еще один — технический. Здания располагаются в квартале, ограниченном улицами Амундсена, А. Вонсовского, Михеева. На рис. 1 представлено изображение объектов исследования, сделанное при помощи сервиса «Яндекс Карты».

2. Метод

Обследование здания путем регистрации микросейсмического шума ИГФ проводится ежегодно с 2017 г. Регистрация осуществляется в дневное время, длительность записи составляет 15–20 мин. В 2017, 2018 гг. в июле 2022 г. использовался аппаратно-программный комплекс «Регистр-SD» [11]. В 2021, в сентябре 2022 измерения проведены с помощью регистратора Reftek DAS 130-1/6 в комплекте с короткопериодным велосиметром LE-3Dlite Mk III (рис. 2). В июле 2024 г. проведены дополнительные точечные измерения, необходимость которых описана далее.

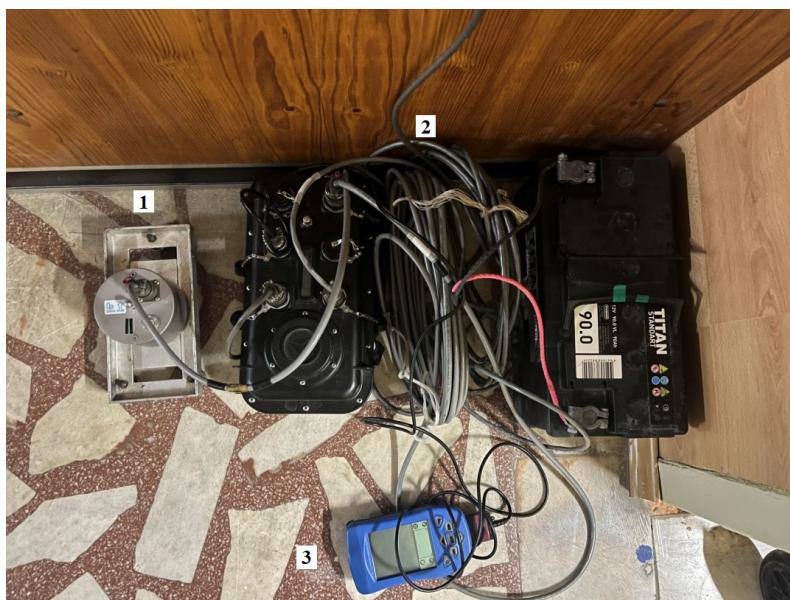


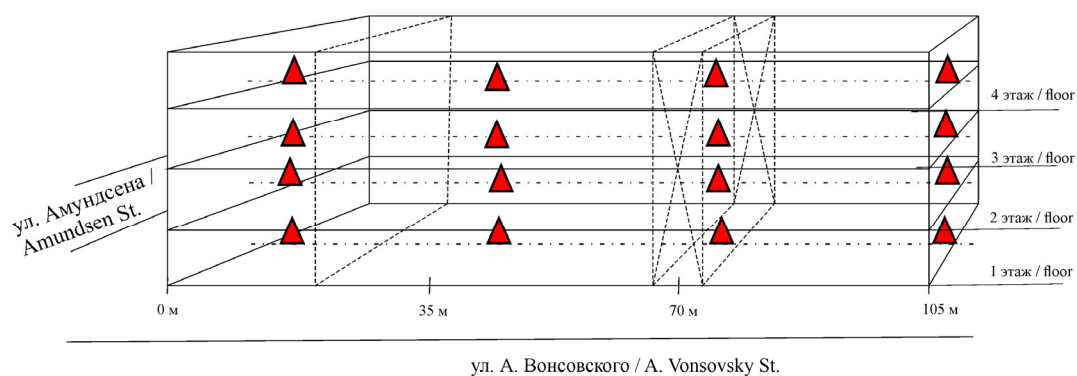
Рис. 2. Комплект оборудования в точке регистрации:

1 — велосиметр LE-3Dlite Mk III; 2 — регистратор сейсмических сигналов REFTEK DAS 130-1/6 и аккумулятор TITAN; 3 — пульт управления регистратором
Источники: 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
Source: photo by M.N. Voskresenskiy, A.A. Kurdanova

Микросейсмы представляют собой относительно слабые колебания грунта, вызванные суммарным воздействием множества источников упругих колебаний, характеристики которых являются случайными величинами [12]. Обследование зданий и сооружений посредством регистрации микросейсмических колебаний предполагает организацию системы точек наблюдения в объеме здания. В здании ИГФ система наблюдений была реализована следующим образом (рис. 3): шестнадцать точек наблюдения равномерно расположены на каждом этаже здания, формируя (условно) четыре вертикальных и четыре горизонтальных профиля. На рис. 3 представлено схематичное изображение здания относительно автомобильных дорог.



Условные обозначения:

-  - точка регистрации микросейсм / microtremor registration point;
-  - шахта лифта / elevator shaft;
-  - лестничный пролет / stairwell.

Рис. 3. Схема расположения точек наблюдения в объеме здания Института геофизики

И с т о ч н и к: выполнено А.А. Курдановой

Figure 3. The layout of observation points within of the Institute of Geophysics Building

S o u r c e: made by A.A. Kurdanova

Обследование здания ИГГ проведено в июле 2023 г. Здание ИГГ для исследования было выбрано исходя из нескольких параметров: схожая геометрия объекта (типовой проект), близкое расположение, одинаковое назначение (офисное здание). Благодаря аналогичной геометрии зданий расположение системы точек наблюдения осталось неизменным, за исключением расстояния между точками в плоскости одного этажа, которое в настоящем исследовании можно считать незначительным. Регистрация микросейсмических колебаний в каждой точке наблюдений проводилась последовательно во времени, длительность регистрации составила 24 ч, однако для текущего исследования были выбраны дневные записи длительностью 15–20 мин [13].

Следует отметить, что при регистрации микросейсм в обоих объектах исследования ориентация регистратора в горизонтальной плоскости осуществлялась не по сторонам света, а в соответствии с ребрами жесткости конструкции. Направление горизонтальной составляющей X (NS) являлось параллельным короткой стороне здания, а направление Y — длинной.

3. Результаты и обсуждение

Обработка сейсмограмм осуществлялась по методике, описанной в межгосударственном стандарте ГОСТ 34081–2017³, и заключалась в расчете спектральной плотности мощности скорости смещений и выделении резонансных частотных пиков. Результаты обработки демонстрируют постоянство резонансных характеристик с течением времени, несмотря на применение различного оборудования и программного обеспечения (ПО).

В таблице представлены значения резонансных частот, присутствующих во всех точках на каждом этаже объектов исследования. Благодаря наблюдаемому постоянству резонансных пиков (частот собственных колебаний) можно утверждать, что состояние здания является стабильным. Соответствие измеренных величин нормативно-технической документации свидетельствует о нормальном, рабочем состоянии объектов.

³ 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: 31.07.2024).

**Значения резонансных частот в горизонтальной плоскости регистрации микросейсмического фона /
Values of resonant frequencies in the horizontal plane of microtremor recording**

Ось регистрации / Registration axis	Институт геофизики, Гц / Institute of Geophysics, Hz	Институт геологии и геохимии, Гц / Institute of Geology and Geochemistry, Hz
<i>X</i>	2,8	2,8
<i>Y</i>	2,5	2,9

Сравнивая значения частот собственных колебаний двух типовых зданий со схожей геометрией, закономерно ожидать одинаковых результатов в обоих объектах. Однако в случае с ИГФ и ИГГ существует различие в значениях по *Y*-составляющей, то есть по длинной стороне зданий. Такое различие может обуславливаться различием в положении строительных конструкций, соединяющихся с основным объектом исследования, а также наличием технического этажа в одном из объектов (см. рис. 1).

Дальнейшая обработка сейсмических материалов проводилась с использованием метода горизонтальных и вертикальных спектральных отношений (HVSР) [14], который нашел широкое применение в области изучения состояния грунтов и конструкций [15–19]. Для объектов исследования в каждой точке наблюдения вычислен коэффициент уязвимости K_y . Этот параметр характеризует наиболее чувствительные участки исследуемых объектов к воздействию упругих колебаний. Вычисляется по формуле (1), где a — максимальное значение коэффициента усиления в соответствии со спектральной кривой HVSР, F — соответствующая этому значению частота [20]:

$$K_y = \frac{a^2}{F}. \quad (1)$$

На рис. 4 представлено изображение распределения коэффициента уязвимости K_y в здании ИГГ. Повышение K_y в крайней правой области объясняется особенностями использования помещений в этой зоне и работой специального оборудования. В остальном объеме здания значение коэффициента уязвимости K_y постоянно.

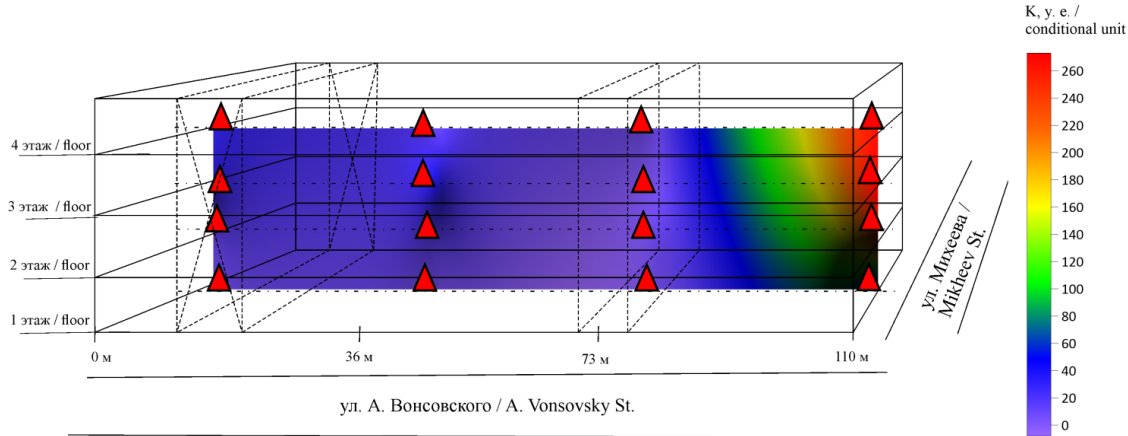


Рис. 4. Распределение коэффициента уязвимости в объеме здания ИГГ УрО РАН. Июль 2023 г.

И с т о ч н и к: выполнено А.А. Курдановой

Figure 4. The distribution of the vulnerability coefficient within of the IGG UB RAS building, July 2023

S o u r c e: made by A.A. Kurdanova

На рис. 5–7 представлены распределения K_y в здании ИГФ в 2017, 2021 и в 2022 гг. Повышение K_y в крайней левой части обуславливается конструктивными особенностями объекта (лестничный пролет), еще одно включение на уровне 70 м описывает положение шахты лифта.

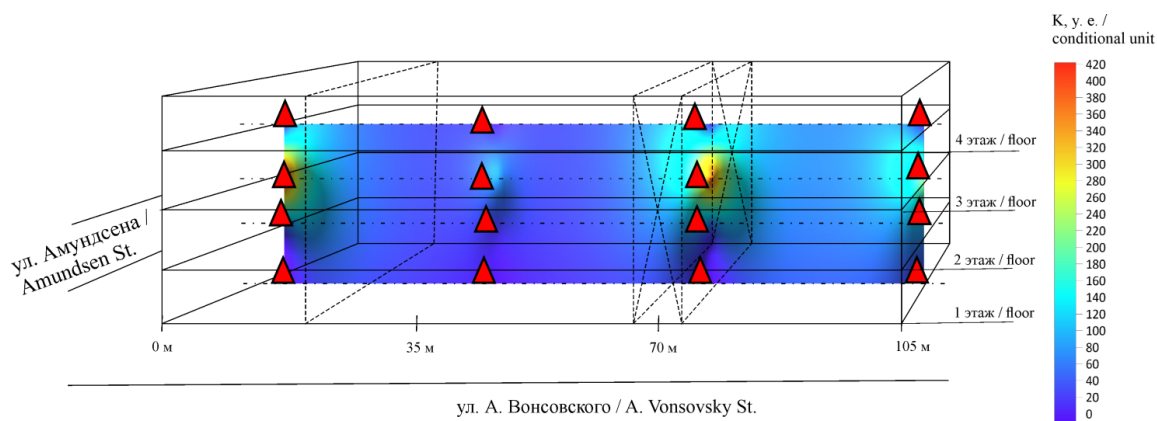


Рис. 5. Распределение коэффициента уязвимости в объеме здания ИГФ. Декабрь 2017

И с т о ч н и к : выполнено А.А. Курдановой

Figure 5. The distribution of the vulnerability coefficient within of the IG UB RAS building. December 2017

S o u r c e : made by A.A. Kurdanova

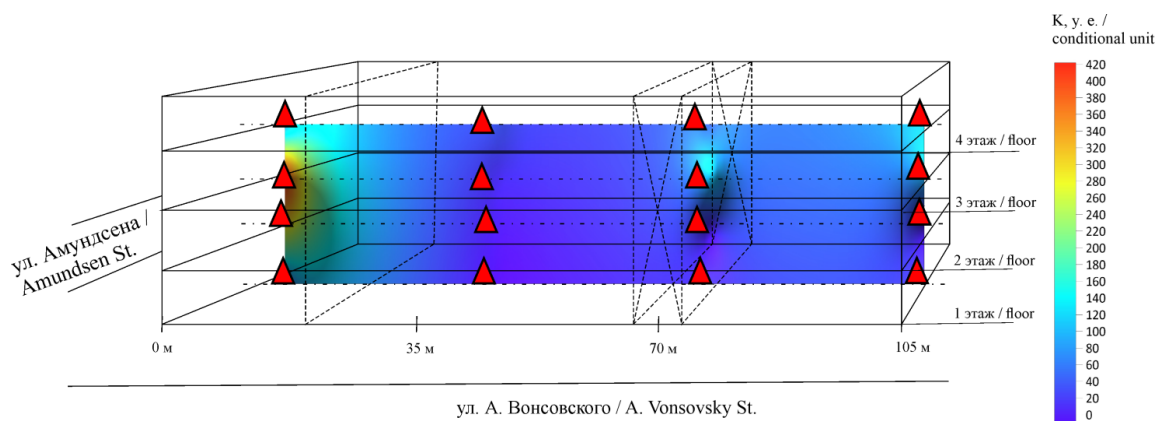


Рис. 6. Распределение коэффициента уязвимости в объеме здания ИГФ. Апрель 2021 г.

И с т о ч н и к : выполнено А.А. Курдановой

Figure 6. The distribution of the vulnerability coefficient within of the IG UB RAS building. April 2021

S o u r c e : made by A.A. Kurdanova

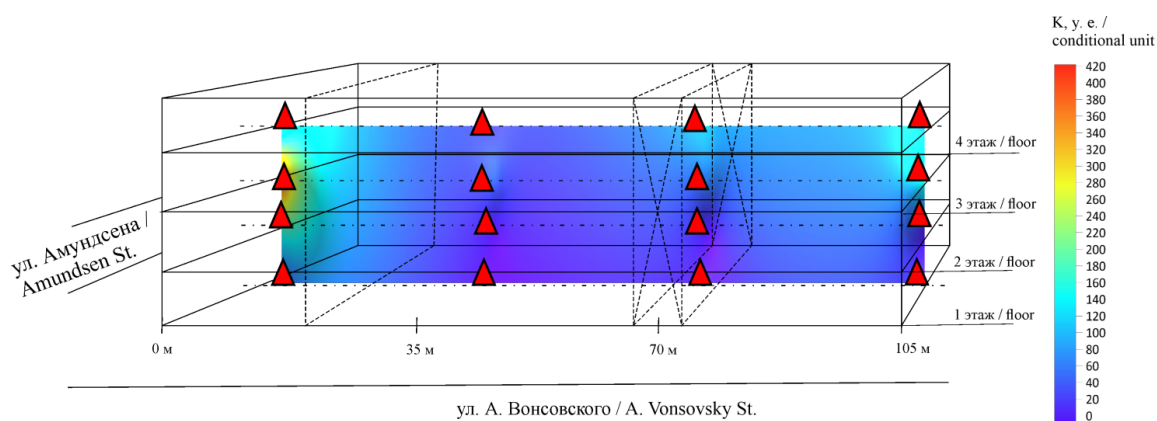


Рис. 7. Распределение коэффициента уязвимости в объеме здания ИГФ.

Вид с ул. А. Вонсовского. Сентябрь 2022 г.

И с т о ч н и к : выполнено А.А. Курдановой

Figure 7. The distribution of the vulnerability coefficient within of the IG UB RAS building.

View from A. Vonsovsky Street. September 2022

S o u r c e : made by A.A. Kurdanova

Еще один ключевой элемент оценки состояния здания — это расчет сейсмической устойчивости строительного объекта. Аналогичный опыт соотечественников описан в работах Г.И. Аносова [20]. Согласно исследованиям Накамуры [15], по формуле (2) рассчитывается максимально допустимое ускорение в $\text{см}/\text{с}^2$ для точки с наибольшим значением коэффициента уязвимости. В последующем данное значение переводится в баллы по шкале MSK-64:

$$\alpha_{saj} = 10^4 \frac{4 \times \pi^2 \times F^2 \times h_j}{A_{sgj} - A_{sgj-1}} \gamma_{aj}, \quad (2)$$

где α_{saj} — ускорение в горизонтальной плоскости; h_j — высота j -го этажа; F — преобладающая частота в точке измерений; A_{sgj} — коэффициент усиления j -го этажа; γ_{aj} — деформационное отклонение j -го этажа.

Коэффициент усиления j -го этажа A_{sgj} — это комбинированный коэффициент усиления [23], который определяется из соотношения горизонтальной составляющей спектра j -го этажа и вертикальной составляющей спектра первого (нижнего) этажа.

Так как в процессе мониторинга здания ИГФ измерения микросейсмического фона производились последовательно во времени в каждой точке наблюдений, то расчет комбинированного коэффициента усиления по данным прошлых лет не представляется возможным. Дополнительные синхронные во времени измерения микросейсмического фона в здании, проведенные в июле 2024 г., позволили рассчитать A_{sgj} (безразмерная величина). Измерения заключались в одновременной регистрации в точке с аномальным значением K_y и на первом этаже здания под этой точкой. Получили значение комбинированного коэффициента A_{sgj} . Затем, аналогичным образом, были проведены необходимые измерения для расчета A_{sgj-1} . То есть из общей схемы точек наблюдений были выбраны только три точки, находящиеся на условном вертикальном профиле, необходимые для вычисления комбинированных коэффициентов усиления. Измерения проводились с помощью регистраторов Reftek DAS 130-1/6 в комплекте с короткопериодным велосиметром LE-3Dlite Mk III. Таким образом, были получены значения $A_{sgj} = 37,7$ и $A_{sgj} = 34,8$.

Деформация конструкций тесно связана с динамическими характеристиками земной поверхности и самой конструкции. Чтобы оценить возможный ущерб от прогнозируемого сейсмического воздействия, необходимо знать текущее состояние прочности грунта. Значение переменной γ_{aj} в текущем исследовании представляет собой деформационное отклонение j -го этажа и является упрощенным значением сдвиговой деформации грунта γ [22]. По данным таблицы зависимости динамических свойств грунта от величины деформации [23], составленной по результатам лабораторных испытаний [24], если пороговая деформация грунта имеет значение $\gamma = 10^{-6}$ (безразмерная величина), то состояние грунта может считаться нормальным, то есть обладающим нормальной пластичностью и способным деформироваться под внешним давлением без разрыва сплошности массы. В случаях, когда $\gamma = 10^{-1}$, происходят оползневые явления или обрушения фундаментов строительных объектов на поверхности Земли.

Таким образом, подставляя теоретическое значение γ , соответствующее «нормальному» состоянию грунта, в формулу (2), получаем, что в здании ИГФ, в точке с максимальным K_y на преобладающей частоте 2,5 Гц, значение ускорения в горизонтальной плоскости составляет $\alpha_{saj} = 2,8 \text{ см}/\text{с}^2$.

Так как γ — величина, характеризующая предельную деформацию грунта [23], ее реальное значение можно определить, зная грунтовые условия и ускорение максимального сейсмического воздействия в точке наблюдений по формуле

$$\gamma = \frac{1,2 \times a \times z}{V_s^2}, \quad (3)$$

где a — пиковое ускорение на поверхности земли, z — мощность рыхлых отложений, V_s — скорость поперечной волны.

В мае 2024 г. на территории ИГФ УрО РАН проведены инженерно-сейсмические работы по методу преломленных волн (МПВ). В результате работ выполнен один профиль и уточнены скоростные характеристики грунтовой толщи исследуемой площадки. На рис. 8 приведен скоростной разрез по поперечным волнам V_s . Расчет выполнен в программе ZondST2D (автор А. Каминский). На скоростном разрезе видно, что рыхлые породы в основном залегают до глубины 10 м ($V_s < 700$ м/с).

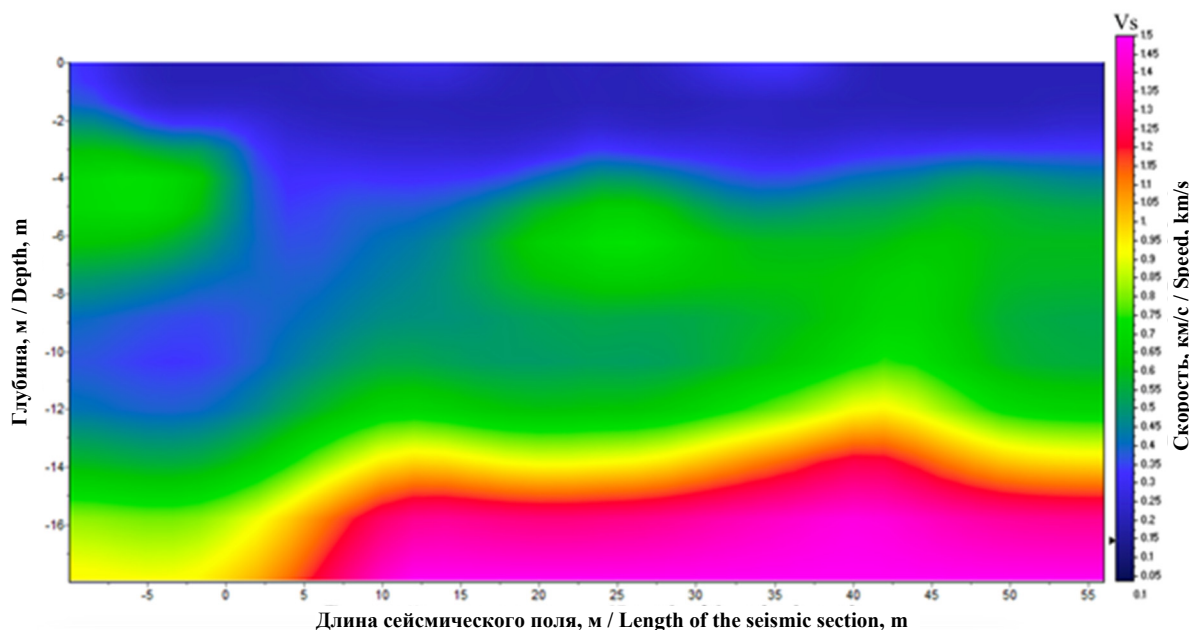


Рис. 8. Скоростной разрез, построенный по поперечным волнам V_s

И с т о ч н и к: выполнено М.Н. Воскресенским

Figure 8. Transverse wave velocity section V_s

S o u r c e: made by M.N. Voskresenskiy

Согласно карте ОСР-2015-В⁴, в точке исследования ожидается сейсмическое событие с максимальной интенсивностью не более 6 баллов по шкале MSK-64 за 1000 лет, что соответствует ускорению 44 см/с^2 . Подставляя в формулу (3) значение максимального воздействия и скорости поперечных волн, получаем значение предельной деформации грунта на территории ИГФ $\gamma = 10,8 \times 10^{-6}$. Подставив измеренные и рассчитанные значения в формулу (2), получаем возможное максимальное ускорение для точки наблюдения с наибольшим K_y , $\alpha_{saj} = 30,6 \text{ см/с}^2$, что соответствует интенсивности землетрясения 5,6 балла.

4. Заключение

1. Сейсмический метод обследования технического состояния зданий и сооружений является простым в исполнении, недорогим и доступным. Его доступность позволяет проводить мероприятия по изучению динамических характеристик объекта как в виде периодического мониторинга техниче-

⁴ СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. URL: <https://internet-law.ru/stroyka/doc/1894/> (дата обращения: 31.07.2024).

ского состояния, так и в виде разовых измерений (обследований) и дальнейшего сравнения результатов с типовыми объектами. Результаты периодического мониторинга технического состояния здания ИГФ и обследования здания ИГГ демонстрируют постоянство резонансных частот на спектральных кривых, что свидетельствует о рабочем состоянии объектов (см. табл.).

2. Использование метода HVSR при обработке сейсмических записей позволяет определять наиболее чувствительные к воздействию упругих колебаний участки конструкции путем расчета коэффициента уязвимости K_y .

3. Расчет сейсмической устойчивости с применением комбинированного коэффициента усиления дает возможность оценить поведение строительного объекта при возможной сейсмической активности. Зная характеристики грунтовой толщ основания здания, расчет сейсмической устойчивости, можно провести с использованием реального значения предельной деформации грунта γ . Для здания ИГФ значение ускорения, рассчитанного для фактических грунтовых условий при максимально возможном сейсмическом событии, соответствует 5,6 балла.

Значения комбинированных коэффициентов уязвимости и результаты оценки сейсмической устойчивости вычислены по экспериментально зарегистрированным данным на этажах Института геофизики. Следующим этапом исследования предполагается сопоставление экспериментальных данных с величинами, полученными с помощью математической модели здания.

Список литературы

1. 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>
2. 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
3. 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. P. 577–592. <https://doi.org/10.1134/S1069351308070082>
4. Калинина А.В., Аммосов С.М., Татевосян Р.Э., Турчков А.М. Об использовании микросейсм в задачах сейсмического микрорайонирования // Вопросы инженерной сейсмологии. 2022. Т. 49. № 1. С. 5–17. <https://doi.org/10.21455/VIS2022.1-1>
5. Кашубин С.Н., Дружинин В.С., Гуляев А.Н., Кусонский О.А., Ломакин В.С., Маловичко А.А., Никитин С.Н., Парыгин Г.И., Рыжый Б.П., Уткин В.И. Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 126 с. ISBN: 5-7691-1212-3
6. Кудерин М.К., Еремин К.И., Фоменко А.А., Несипбаева Ж.К. Постоянный мониторинг и внедрение перспективных методов оценки технического состояния объектов — залог защиты зданий и сооружений от аварий // Наука и техника Казахстана. 2016. № 3–4. С. 113–116. EDN: YMHAOO
7. Еманов А.Ф., Скляр Л.А. Технология диагностики и мониторинга состояния строительных конструкций на основе исследования микросейсмических колебаний // Предотвращение аварий зданий и сооружений. 2009. С. 1–9. URL: <https://pamag.ru/src/prensa/141.pdf> (дата обращения: 04.05.2024).
8. Jiang H., Lu X., Chen L. Seismic Fragility Assessment of RC Moment-Resisting Frames Designed According to the Current Chinese Seismic Design Code // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2012. Vol. 11. Issue 11. P. 53–160. <https://doi.org/10.3130/jaabe.11.153>
9. Ahmad N. Fragility Functions and Loss Curves for Deficient and Haunch-Strengthened RC Frames // Journal of Earthquake Engineering. 2019. Vol. 26. No. 2. P. 1010–1039. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1698478>
10. Карапетян Дк.К., Айрапетян О.Ю., Матевосян Г.М., Карапетян Р.К. Исследование динамических характеристик многопролетного моста в Ереване по микросейсмическим колебаниям // Геология и геофизика Юга России. 2022. Т. 12 (2). С. 67–77. <http://doi.org/10.46698/VNC.2022.25.25.005>
11. Сенин Л. Н., Сенина Т. Е., Воскресенский М.Н. Аппаратно-программный комплекс «РегистрSD» для изучения сейсмодинамических характеристик объектов, находящихся под воздействием упругих колебаний // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 157–158. <https://doi.org/10.7868/S0032816217040115>
12. Шаров Н.В., Маловичко А.А., Щукин Ю.К. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинимики Восточно-Европейской платформы: В 2 кн. Книга 2: Микросейсмичность. Петрозаводск, 2007. 94 с. ISBN: 978-5-9274-0282-3

13. 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>
14. Nakamura Y. What Is the Nakamura Method? // Seismological Research Letters. 2019. Vol. 90. No. 4. P. 1437–1443. <https://doi.org/10.1785/0220180376>
15. Nakamura Y. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly report of Railway Technical Research Institute. 1989. Vol. 30. № 1. P. 25–33. URL: https://www.sdr.co.jp/papers/hv_1989.pdf (accessed: 04.05.2024).
16. 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>
17. 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>
18. Карапетян Д.К., Айрапетян О.Ю., Матевосян Г.М., Карапетян 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>
19. 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>
20. 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
21. Nakamura Y. Real-time information system for seismic hazards mitigation UrEDAS, HERAS and PIC // Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute. 1996. Vol. 37. P. 112–127. URL: https://www.sdr.co.jp/papers/rtis_1996.pdf (accessed: 04.05.2024).
22. Nakamura Y., Gurler E., Dilek, Saita J. Rovelli A., Donati S. Vulnerability investigation of Roman Coliseum using microtremor // Proceeding, 12th WCEE 2000 in Auckland. NZ. 2000. URL: <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/2660.pdf> (accessed: 04.05.2024).
23. Nakamura Y. Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor // World Congress on Railway Research, Florence, Italy 1997. URL: https://www.sdr.co.jp/papers/wcrr_vulnerability_indices.pdf (accessed: 04.05.2024).

References

1. Davydov V.A. Study of seismic response of soils in microseismic soundings of dams. *Bulletin of Kamchatka regional association «Educational-scientific center». Earth sciences*. 2023;2(58):90–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-2-58-90-100>
2. 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
3. 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;44:577–592. <https://doi.org/10.1134/S1069351308070082>
4. 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>
5. Kashubin S.N., Druzhinin V.S., Guljaev A.N., Kusonskij O.A., Lomakin V.S., Malovichko A.A., Nikitin S.N., Parygin G.I., Ryzhij B.P., Utkin V.I. *Seismicity and seismic zoning of the Ural region*. Ekaterinburg: UrO RAN, 2001. (In Russ.) ISBN: 5-7691-1212-3
6. Kuderin M.K., Eremin K.I., Fomenko A.A., Nesipbaeva Zh.K. Continuous monitoring and introduction of the perspective estimation methods of the technical condition of the objects — deposit protection of buildings and facilities of accidents. *Science and technology of Kazakhstan*. 2016;(3–4):113–116. (In Russ.) EDN: YMHAOO
7. Emanov A.F., Skljarov L.A. Technology of diagnostics and monitoring of the condition of building structures based on the study of microseismic vibrations. *Prevention of accidents of buildings and structures*. 2009. (In Russ.) Available from: <https://pamag.ru/src/pressa/141.pdf> (accessed: 04.05.2024).
8. Jiang H., Lu X., Chen L. Seismic Fragility Assessment of RC Moment-Resisting Frames Designed According to the Current Chinese Seismic Design Code. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2012;11(1):153–160. <https://doi.org/10.3130/jaabe.11.153>

9. Ahmad N. Fragility Functions and Loss Curves for Deficient and Haunch-Strengthened RC Frames. *Journal of Earthquake Engineering*. 2019;26(2):1010–1039. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1698478>
10. Karapetjan Dk.K., Ajrapetjan O.Ju., Matevosjan G.M., Karapetjan R.K. Investigation of the dynamic characteristics of the road bridge in Yerevan by recording microseisms. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2022;12(2):67–77. (In Russ.) <http://doi.org/10.46698/VNC.2022.25.25.005>
11. Senin L.N., Senina T.E., Voskresenskiy M.N. Hardware and software complex “Register-SD” for studying the seismodynamic characteristics of objects under the influence of elastic vibrations. *Instruments and experimental techniques*. 2017;(4):157–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0032816217040115>
12. Sharov N.V., Malovichko A.A., Shhukin Ju.K. *Earthquakes and microseismicity in the problems of modern geodynamics of the East European Platform*. In 2 books. Book 2: Microseismicity. Petrozavodsk, 2007. (In Russ.) ISBN: 978-5-9274-0282-3
13. 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. (In Russ.) <https://doi.org/10.17072/psu.geol.18.1.38>
14. Nakamura Y. What Is the Nakamura Method? *Seismological Research Letters*. 2019;90(4):1437–1443. <https://doi.org/10.1785/0220180376>
15. Nakamura Y. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly report of Railway Technical Research Institute*. 1989;30(1):25–33. Available from: https://www.sdr.co.jp/papers/hv_1989.pdf (accessed: 04.05.2024).
16. 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>
17. 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(9):3292 <https://doi.org/10.3390/s21093292>
18. Karapetyan Dk.K., Hayrapetyan O.Ju., Matevosyan G.M., Karapetyan R.K. Comparative analysis of the dynamic characteristics of various types of buildings during microseismic vibrations. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2021;11(3):103–114. (In Russ.) <http://doi.org/10.46698/VNC.2021.70.17.009>
19. 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>
20. Anosov G.I., Drobiz M.V., Konovalova O.A., Sotnikov D.S., Chugaevich V.J. Evaluation of seismic stability of the educational building 3 of Immanuel Kant russian state university using the Nakamura method. *Bulletin of Kamchatka regional association «Educational-scientific center»*. *Earth sciences*. 2010;1(15):223–231. (In Russ.) EDN: MSVNNR
21. Nakamura Y. Real-time information system for seismic hazards mitigation UrEDAS, HERAS and PIC. *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute*. 1996;37:112–127. Available from: https://www.sdr.co.jp/papers/rtis_1996.pdf (accessed: 04.05.2024).
22. Nakamura Y., Gurler E., Dilek, Saita J., Donati S. Vulnerability investigation of Roman Coliseum using microtremor. *Proceeding, 12th WCEE 2000 in Auckland*. NZ. 2000. Available from: <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/2660.pdf> (accessed: 04.05.2024).
23. Nakamura Y. Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor. *World Congress on Railway Research*. Florence, Italy. 1997. Available from: https://www.sdr.co.jp/papers/wcrr_vulnerability_indices.pdf (accessed: 04.05.2024).