

## СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ СООРУЖЕНИЙ SEISMIC RESISTENCE

DOI: 10.22363/1815-5235-2025-22-1-67-80

EDN: IQZRJE

Научная статья / Research article

### Сопоставление экспериментальных и расчетных динамических характеристик здания

М.Н. Воскресенский<sup>1</sup>, А.А. Курданова<sup>1</sup>, Е.А. Косорогова<sup>1</sup>, В.С. Михайлов<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт геофизики имени Ю.П. Булашевца Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Российская Федерация<sup>2</sup> Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (НГАСУ), Новосибирск, Российская Федерация

✉ a.truuuman@gmail.com

Поступила в редакцию: 25 декабря 2025 г.

Доработана: 2 февраля 2026 г.

Принята к публикации: 15 февраля 2026 г.

**Аннотация.** Рассмотрена проблема определения динамических характеристик зданий на основе микросейсмических наблюдений. Актуальность исследования обусловлена требованиями нормативных документов, предусматривающих необходимость определения фактических динамических параметров зданий при их обследовании и мониторинге. Существующие методики, основанные на анализе микросейсмического фона, позволяют определить собственные частоты колебаний, однако не всегда обеспечивают однозначную идентификацию мод колебаний и их характера (изгибного или крутильного). Цель исследования — уточнение методики обследования зданий в части определения характера колебаний и идентификации мод собственных колебаний на основе сопоставления экспериментальных и расчетных данных. Объектом исследования является здание Института геофизики УрО РАН. Выполнена регистрация микросейсмического фона, проведен спектральный анализ записей и определены частоты собственных колебаний здания. Полученные экспериментальные данные сопоставлены с результатами численного моделирования, выполненного в программном комплексе SCAD с учетом конструктивных особенностей здания и геологических характеристик основания. Сравнение показало согласованность экспериментально определенных частот с расчетными значениями. Установлено, что в различных частях здания могут доминировать разные формы колебаний, включая изгибные и крутильные моды. Полученные результаты подтверждают эффективность комплексного подхода, основанного на совместном использовании инструментальных наблюдений и численного моделирования, для уточнения динамических характеристик зданий. Полученные результаты могут быть использованы при формировании критериев интерпретации микросейсмических данных и уточнении методики оценки динамических характеристик зданий.

**Ключевые слова:** конечно-элементная модель, формы колебаний, частота, здание, мониторинг, микросейсмический фон

**Воскресенский Михаил Николаевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией сейсмометрии, Институт геофизики имени Ю.П. Булашевца Уральского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100; eLIBRARY SPIN-код: 4710-9710, ORCID: 0000-0002-6222-7265; e-mail: voskresenskiy.mn@gmail.com

**Курданова Алена Алексеевна**, младший научный сотрудник лаборатории сейсмометрии, Институт геофизики имени Ю.П. Булашевца Уральского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100; eLIBRARY SPIN-код: 7695-6043, ORCID: 0000-0002-1582-8113; e-mail: a.truuuman@gmail.com

**Косорогова Елена Александровна**, младший научный сотрудник лаборатории сейсмометрии, Институт геофизики имени Ю.П. Булашевца Уральского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100; eLIBRARY SPIN-код: 9804-6660, ORCID: 0000-0002-1445-7250; e-mail: kosorotiha30@gmail.com

**Михайлов Виктор Сергеевич**, директор проектного и научно-исследовательского офиса, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (НГАСУ), Российская Федерация, 630008, г. Новосибирск, ул. Белинского, д. 151; eLIBRARY SPIN-код: 2330-3643, ORCID: 0000-0002-0178-3516; e-mail: vsmikhailov@mail.ru

© Воскресенский М.Н., Курданова А.А., Косорогова Е.А., Михайлов В.С., 2026

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

**Вклад авторов:** *Вокресенский М.Н.* — постановка задачи, организация и реализация исследовательского процесса, описание эксперимента; *Курданова А.А.* — организация и реализация исследовательского процесса, сбор и обработка полевых данных, оформление графических материалов, описание эксперимента; *Косоротова Е.А.* — реализация исследовательского процесса, сбор полевых данных; *Михайлов В.С.* — выполнение численного моделирования, описание эксперимента. Авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

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

**Для цитирования:** *Вокресенский М.Н., Курданова А.А., Косоротова Е.А., Михайлов В.С.* Сопоставление экспериментальных и расчетных динамических характеристик здания // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2026. Т. 22. № 1. С. 67–80. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-1-67-80> EDN: IQZRJE

## Comparison of Experimental and Numerical Dynamic Characteristics of a Building

Mikhail N. Voskresenskiy<sup>1</sup>, Alena A. Kurdanova<sup>1</sup>, Elena A. Kosorotova<sup>1</sup>, Viktor S. Mikhailov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (NSUACE), Novosibirsk, Russian Federation

✉ a.truuuman@gmail.com

Received: Desember 25, 2025

Revised: February 2, 2026

Accepted: February 15, 2026

**Abstract.** The problem of determining the dynamic characteristics of buildings based on microseismic observations is considered. The relevance of the research is associated with regulatory requirements that necessitate the determination of actual dynamic parameters of buildings during structural inspection and monitoring. Existing approaches based on microseismic background analysis allow the identification of natural frequencies; however, they do not always provide unambiguous identification of vibration modes and their type (bending or torsional). The aim of this study is to refine the methodology for building surveys by improving the identification of vibration types and mode shapes through the comparison of experimental observations with numerical modeling results. The object of the study is the building of the Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IG UB RAS). Ambient vibration (microtremor) recordings were performed, followed by spectral analysis of the signals to determine the natural frequencies of the building. The obtained experimental data were compared with the results of numerical modeling carried out in the SCAD software environment, taking into account the structural characteristics of the building and the geological properties of the foundation. The comparison showed good agreement between experimentally determined and calculated frequencies. It was also found that different vibration modes, including bending and torsional modes, may dominate in different parts of the building. The results demonstrate the effectiveness of a combined approach based on instrumental observations and numerical modeling for refining the dynamic characteristics of buildings and may contribute to the development of criteria for the interpretation of microseismic data and the improvement of methodologies for evaluating building dynamics.

**Keywords:** finite element model, mode shapes, frequency, building, monitoring, microseismic noise

**Authors' contribution:** *Vokresenskiy M.N.* — conceptualization, supervision, investigation, experiment description; *Kurdanova A.A.* — supervision, investigation, field data acquisition and processing, preparation of figures, experiment description; *Kosorotova E.A.* — investigation, field data acquisition; *Mikhailov V.S.* — numerical modeling, experiment description. The authors read and approved the final version of the article.

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

**For citation:** Voskresenskiy M.N., Kurdanova A.A., Kosorotova E.A., Mikhailov V.S. Comparison of experimental and numerical dynamic characteristics of a building. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2026;22(1):67–80. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-1-67-80> EDN: IQZRJE

*Mikhail N. Voskresenskiy*, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Head of the Seismometry Laboratory, Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 100 Amundsen St, Yekaterinburg, 620016, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4710-9710, ORCID: 0000-0002-6222-7265; e-mail: vokresenskiy.mn@gmail.com

*Alena A. Kurdanova*, Junior Researcher, Seismometry Laboratory, Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 100 Amundsen St, Yekaterinburg, 620016, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7695-6043, ORCID: 0000-0002-1582-8113; e-mail: a.truuuman@gmail.com

*Elena A. Kosorotova*, Junior Researcher, Laboratory of Seismometry, Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 100 Amundsen St, Yekaterinburg, 620016, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9804-6660, ORCID: 0000-0002-1445-7250; e-mail: kosorotiha30@gmail.com

*Viktor S. Mikhailov*, Director of the Project and Research Office, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (NSUACE), 151 Belinsky St, Novosibirsk, 630008, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2330-3643, ORCID: 0000-0002-0178-3516; e-mail: vsmikhailov@mail.ru

## 1. Введение

Оценка динамических характеристик зданий и сооружений является одной из ключевых задач прикладной геофизики, особенно в условиях плотной городской застройки и сейсмоопасных регионов. Современные требования к надежности объектов диктуют необходимость применения оперативных, достоверных и неразрушающих методов контроля технического состояния конструкций.

Традиционные методы, основанные на ударных или вибрационных воздействиях, часто оказываются неприменимыми при обследовании эксплуатируемых, исторических или промышленных зданий. В пассивной геофизике в качестве зондирующего сигнала широко используется естественный сейсмический фон Земли (микросейсмы), что позволяет быстро и экономично получать информацию о структуре земной толщи и особенностях взаимодействия здания с основанием [1; 2].

Одним из распространенных и эффективных методов является *HVSR* — спектральное отношение горизонтальной и вертикальной компонент микросейсмического сигнала, предложенный Накамурой [3]. Этот метод активно применяется в российских научных центрах (ИГФ УрО РАН, Сибстрин, ТГАСУ и др.) и доказал свою эффективность в [4; 5]. Для идентификации сложных форм колебаний и верификации численных моделей применяется метод стоячих волн, который особенно актуален при обследовании зданий сложной геометрии и сейсмоизолированных конструкций, как показано в [6; 7].

Практика сейсмического мониторинга ответственных объектов (например, гидроэлектростанций и зданий в Арктике) обобщена в исследованиях [8], с учетом особенностей промышленного шума. Международный опыт, в частности сеть *KiK-net* в Японии [9–11], подтверждает важность *HVSR*-анализа для оценки взаимодействия «основание–здание», что особенно значимо для зданий малой и средней этажности [12].

Современные методики объединяют расчетные модели и инструментальные измерения, обеспечивая верификацию проектных решений [13]. Согласно межгосударственному стандарту ГОСТ 31937-2024<sup>1</sup>, при вводе зданий в эксплуатацию необходимо указывать фактические динамические характеристики, что особенно важно для объектов повышенной ответственности. В гражданском строительстве расхождение между проектными и фактическими характеристиками конструкций способно вызывать вибрации и ухудшать эксплуатационные показатели. В рамках настоящего исследования рассматривается частота собственных колебаний как основная динамическая характеристика здания. Объект исследования — здание, предмет — собственные частоты его колебаний.

Согласно действующим нормативным документам, определение динамических характеристик зданий может выполняться на основе регистрации микросейсмического фона и анализа спектральной плотности мощности для выявления собственных частот (периодов) колебаний. Однако предложенный подход не предусматривает критериев, позволяющих однозначно идентифицировать порядковый номер моды и установить характер колебаний конструкции (изгибной или крутильный).

Цель исследования — уточнение методики обследования зданий и сооружений в части определения характера колебаний (изгибных или крутильных) и однозначной идентификации порядкового номера моды собственных колебаний. Для достижения этой цели в работе решались следующие задачи:

- 1) анализ результатов многолетнего микросейсмического мониторинга здания Института геофизики для выявления закономерностей динамического поведения конструкции;
- 2) расчет, адаптация и уточнение математической модели здания с учетом экспериментальных данных и геологических характеристик основания;
- 3) сопоставление результатов экспериментального мониторинга с расчетными данными численного моделирования для выявления критических зон и оценки согласованности динамических характеристик здания.

<sup>1</sup> ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. URL: <https://fkr-spb.ru/upload/iblock/63e/ecmzt5zuoze4p3sclatcp9gobynte9h.pdf> (дата обращения: 01.08.2025).

В исследовании применяется экспозиционный (периодический) мониторинг. Периодический мониторинг исключает накопление избыточных данных при сохранении достоверности оценки. Моделирование в *SCAD* демонстрирует необходимость учета высоких форм собственных колебаний — вплоть до 243-й, однако в рамках настоящей работы рассматриваются первые три формы, вносящие основной вклад в динамическую массу, что соответствует подходу [14].

Комплексный подход позволяет создавать базы данных по динамическому поведению зданий разной этажности, способствуя уточнению проектных моделей и повышению надежности в процессе строительства и эксплуатации.

Исследования показывают, что расчетные модели в программных комплексах (*SCAD*, ЛИРА) часто базируются на упрощенных параметрах и не учитывают фактическое состояние конструкций. Это приводит к расхождениям в частотах и формах колебаний. О.Р. Пахмурин с соав. [15] указывают, что фактические характеристики зданий нередко превышают расчетные из-за обжатия элементов и взаимодействия с самонесущими стенами.

Необходимость верификации моделей микросейсмическим мониторингом и методом стоячих волн отражена в СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения»<sup>2</sup>, однако нормативно не регламентирована на ранних этапах проектирования, что ограничивает использование мониторинга для уточнения моделей. Отсутствуют также формализованные процедуры перехода от спектральных характеристик к коэффициентам уязвимости и единые критерии оценки достоверности спектров.

В настоящем исследовании численное моделирование динамики объекта выполнено в *SCAD Office* на примере четырехэтажного офисного здания Института геофизики УрО РАН (ИГФ) с железобетонным каркасом. Модель создана на основе проектной документации, визуального обследования и замеров, учитывает несущие элементы и распределение масс с учетом нагрузок и грунтовых условий (суглинки).

Расчитанные формы колебаний и частоты сопоставлены с экспериментальными данными микросейсмического мониторинга. Высокая степень совпадения расчетных и экспериментальных результатов обосновывает предложенную методику как эффективный инструмент для повышения точности диагностики технического состояния зданий.

## 2. Аппаратура и методика

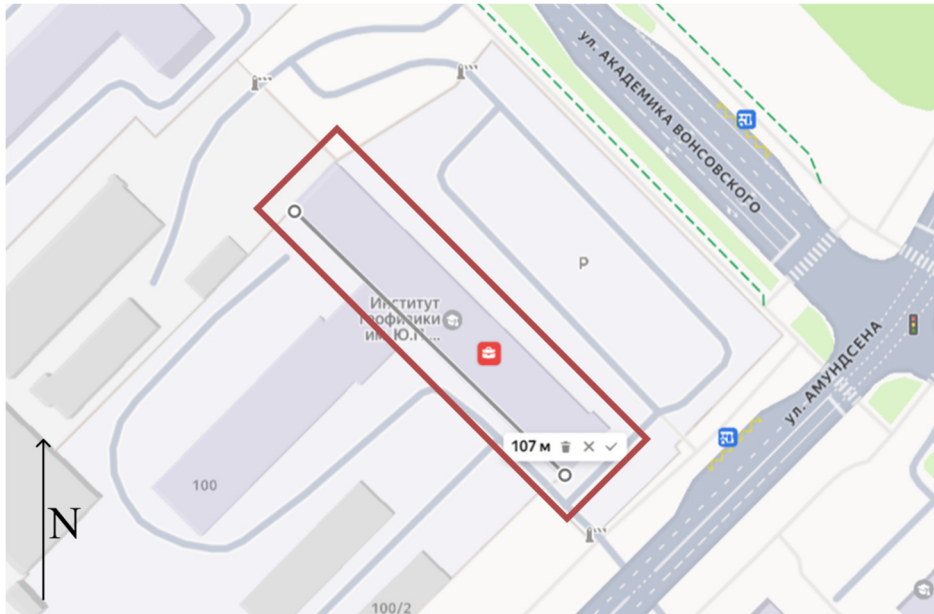
В сентябре 2022 г. было проведено сейсмическое обследование здания Института геофизики УрО РАН. В ходе эксперимента осуществлялась регистрация микросейсмического фона. Для анализа записей рассчитывались спектры мощности скорости смещения по трем компонентам зарегистрированного сейсмического сигнала.

Здание Института геофизики имени Ю.П. Булашевича — кирпичное здание, введенное в эксплуатацию в 1981 г., с размерами 107 на 20 м. На рис. 1 приведено изображение здания, полученное с помощью сервиса «Яндекс Карты»<sup>3</sup>. Изучаемое здание имеет Т-образную форму, однако основной, и, соответственно, исследуемый, объем здания выделен красным прямоугольником. Остальная часть здания представляет собой одноэтажный пристрой, поэтому в этой работе не рассматривается.

Обследование зданий и сооружений с использованием регистрации микросейсмических колебаний требует организации сети наблюдательных точек в объеме здания. В случае здания Института геофизики УрО РАН (ИГФ) система наблюдений представляла собой 16 точек наблюдения, равномерно распределенных по четыре на каждом этаже и формирующих условно четыре вертикальных и четыре горизонтальных профиля.

<sup>2</sup> СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. 2018. 22 с. URL: <https://sro-a.ru/upload/medialibrary/b58/hqu55t90lv26otre29t25xmc0p9r85ca/SP-385.1325800.2018.-Svod-pravil.-Zashchita-zdaniy-i-sooruzheniy.pdf> (дата обращения: 20.11.2025).

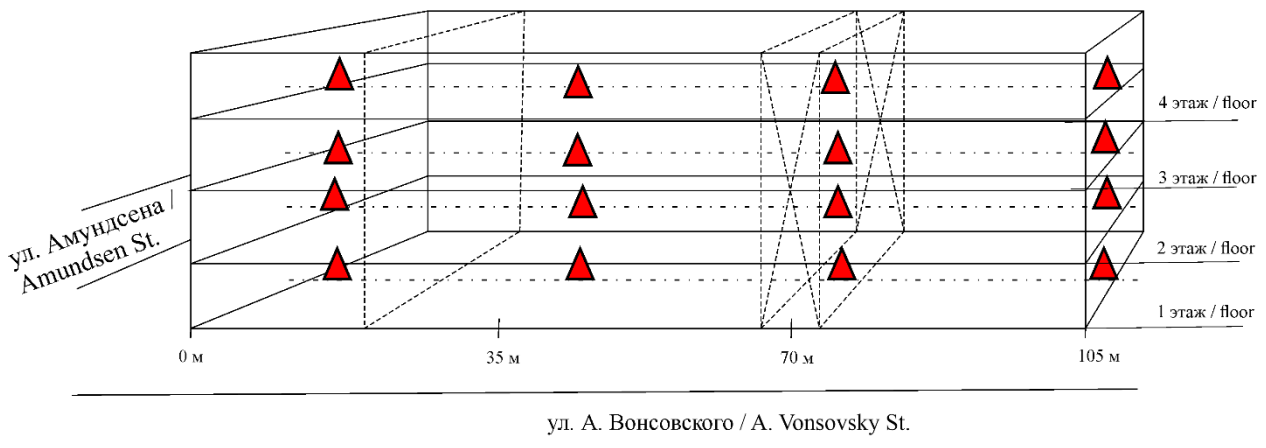
<sup>3</sup> Яндекс Карты. URL: <https://yandex.ru/maps/-/CHfw5Xn3> (дата обращения: 24.11.2026).



**Рис. 1.** Расположение здания ИГФ УрО РАН на карте  
Источник: выполнено А.А. Курдановой.

**Figure 1.** Location of the IG UB RAS building on the map  
Source: made by A.A. Kurdanova.

На рис. 2 представлено схематичное изображение здания относительно автомобильных дорог. Пунктирными линиями обозначены лестничные пролеты и шахта лифта, а красными треугольниками — расположение точек наблюдения.



**Рис. 2.** Схема здания относительно близлежащих улиц с расположением точек наблюдений  
Источник: выполнено А.А. Курдановой.

**Figure 2.** Model of the building relative to nearby streets with the location of the monitoring points  
Source: made by A.A. Kurdanova.

Обследование здания Института геофизики УрО РАН методом регистрации микросейсмического шума проводится ежегодно с 2017 г. Ранее для измерений применялся аппаратно-программный комплекс «Регистр-SD» [16]. С 2021 г. используется мобильный регистратор сейсмических сигналов REFTEK DAS 130-1/6 в комплекте с короткопериодным велосиметром LE-3Dlite Mk III (рис. 3).



**Рис. 3.** 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: выполнено А.А. Курдановой.

**Figure 3.** 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: made by A.A. Kurdanova.

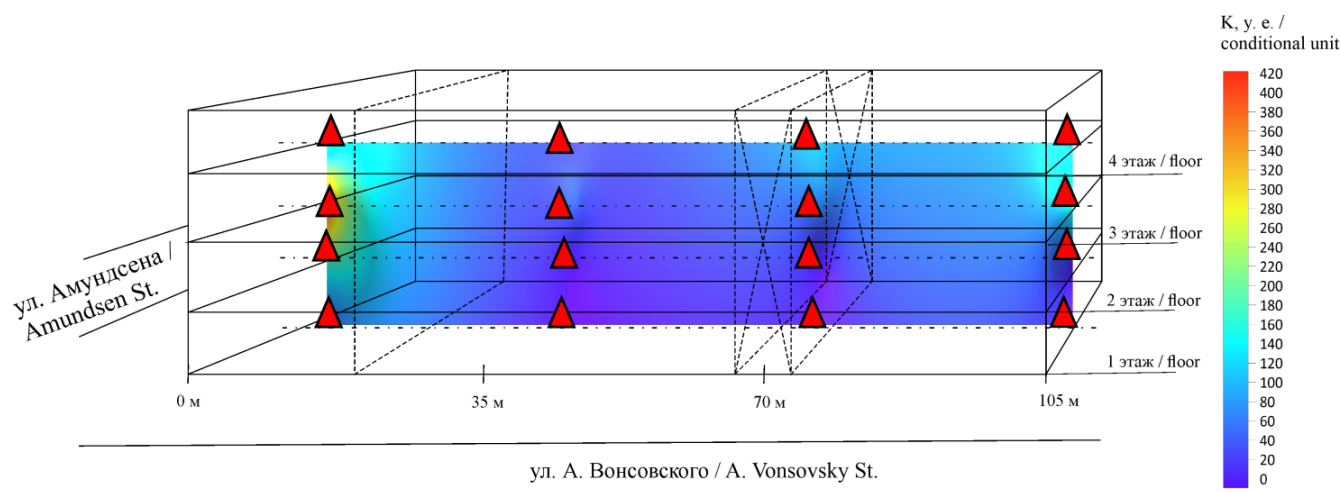
Измерения в точках наблюдения осуществляются последовательно во времени с использованием двух комплектов оборудования. Каналы регистратора ориентированы по трем взаимно перпендикулярным направлениям: горизонтальным составляющим  $X$  и  $Y$ , а также вертикальной составляющей  $Z$ . Длительность записи составляет 15–20 мин [17], частота дискретизации — 125 Гц, что обеспечивает максимальную частоту сигнала до 62,5 Гц. Обработка сейсмограмм и вычисления выполнялись отдельно по каждой измерительной оси с использованием программного обеспечения *MicroSeisTool* [18]. Для определения резонансных частот рассчитывается спектральная плотность мощности с применением полосовой фильтрации от 1 до 7 Гц.

Следует отметить, что при регистрации микросейсмических сигналов ориентация регистратора в горизонтальной плоскости не совпадала с направлениями сторон света, а была ориентирована согласно ребрам жесткости конструкции. В государственных стандартах, регламентирующих порядок мониторинга зданий и сооружений, описываются нормативы для горизонтальных составляющих, поэтому в настоящей работе значения вертикальной составляющей не рассматриваются. Направление горизонтальной составляющей  $X$  было параллельно короткой стороне здания, а направление  $Y$  — длинной стороне.

### 3. Результаты и обсуждение

Результаты мониторинга демонстрируют ежегодную стабильность резонансных характеристик, несмотря на использование различного оборудования и программного обеспечения (основной экстремум по оси  $X$  соответствует 2,8 Гц, по оси  $Y$  — 2,5 Гц) [19]. Помимо подробного описания результатов мониторинга в [19] рассматривается распределение коэффициента уязвимости ( $K_y$ ) в плоскости наблюдений. Коэффициент уязвимости — это параметр, который позволяет описывать участки исследуемых объектов, наиболее чувствительные к воздействию упругих колебаний. Применение  $K_y$  основывается на методе *HVSR*, предложенном Накамуром [3].

На рис. 4 приведена карта распределения  $K_y$ . Значительное повышение значений наблюдается в левой части карты (торец здания со стороны ул. Амундсена). Ранее было выдвинуто предположение, что данные различия связаны с особенностями конструкции [20]: описываемая часть здания построена отлично от основного объема, вследствие чего здание не колеблется как единая система.



**Рис. 4.** Распределение коэффициента уязвимости в объеме здания ИГФ

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

**Figure 4.** The distribution of the vulnerability coefficient throughout the IG UB RAS building

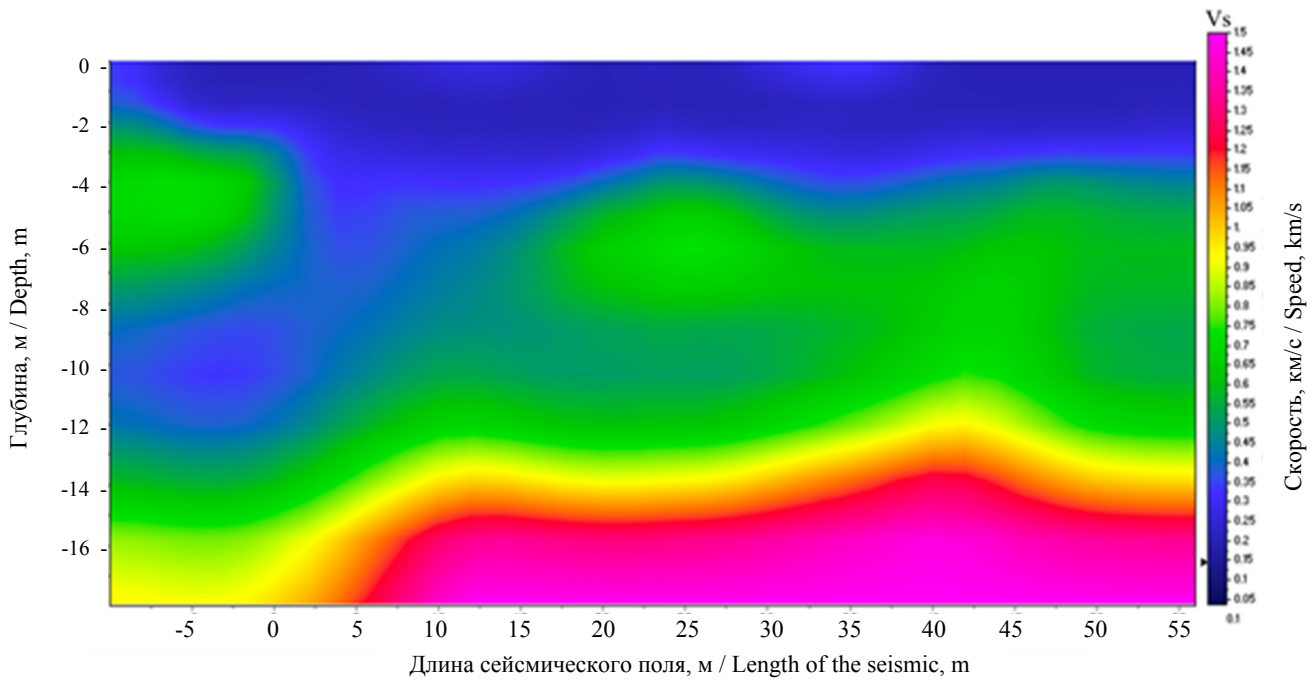
S o u r c e: made by A.A. Kurdanova.

Основной задачей настоящего исследования является сопоставление результатов, полученных с помощью экспериментальных и расчетных методов. В качестве расчетного метода используется численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе *SCAD*. Численное моделирование позволяет воспроизвести динамическое поведение здания с учетом реальных геометрических и конструктивных особенностей, а также уточненных характеристик грунтового основания, полученных на основе метода преломленных волн (МПВ). Это дает возможность не только проверить соответствие экспериментальных мод колебаний и собственных частот, но и визуализировать распределение напряжений, деформаций и коэффициента уязвимости в объеме здания. На модели это показано амплитудой суммарных перемещений.

Для повышения точности модели выполнено уточнение инженерно-геологических условий с использованием данных сейсморазведки методом преломленных волн. Измерения проводились на территории объекта с регистрацией продольных и поперечных волн. Полученные скоростные параметры позволили построить скоростной разрез грунтов (ПО *Zond ST*) и скорректировать характеристики грунтового основания. На рис. 5 приведен скоростной разрез, построенный по поперечным волнам.

Таким образом, получена конечно-элементная модель, учитывающая не только материалы конструкции, но и реальные грунтовые условия. Модель описывает 12 форм колебаний (рис. 6), которые характеризуют динамическое состояние здания в пространстве.

В представленном эксперименте и модели *SCAD* были определены первые пять форм собственных частот колебаний, вовлекающие наибольшее количество динамических масс в колебательный процесс. Первыми тремя формами являются преимущественно изгибные колебания, отражающие асимметрию конструкции и распределение масс. Четвертая и пятая формы характеризуют крутильные колебания по продольной и поперечной осям соответственно. Расчетные частоты, полученные по результатам вычисления математической модели в *SCAD office* (рис. 6), совпадают с экспериментальными результатами спектрального анализа микросейсмического фона (рис. 7).



**Рис. 5.** Скоростной разрез по поперечным волнам  
Источник: выполнено М.Н. Воскресенским.

**Figure 5.** Transverse wave velocity section  $V_s$   
Source: made by M.N. Voskresenskiy.

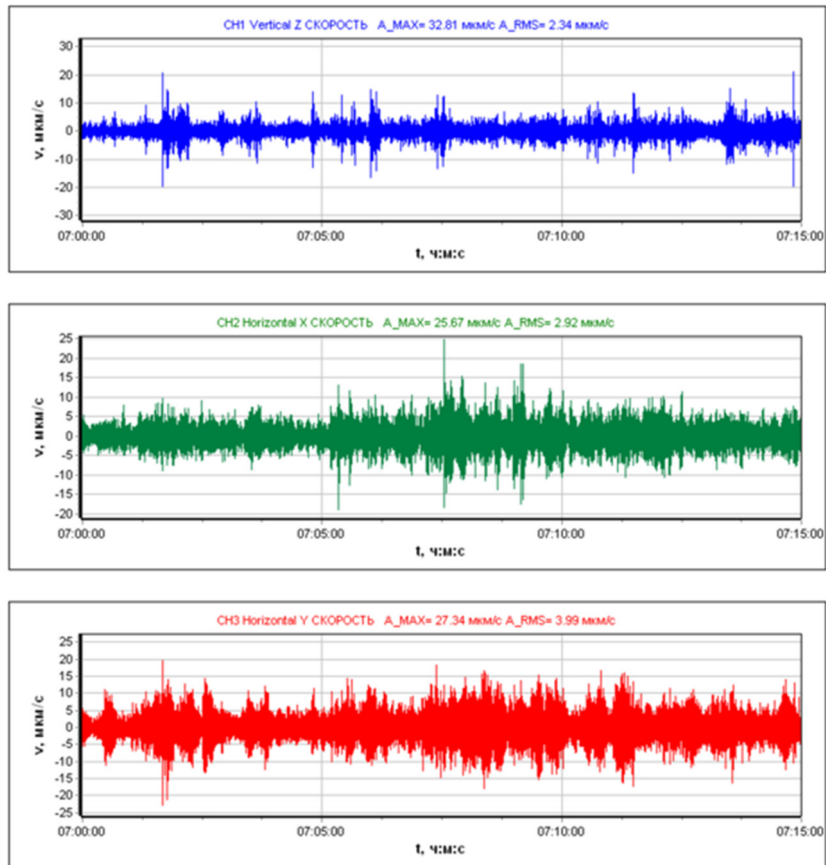
Загружение Load Case		Номер формы Mode Number	Собственное значение Eigenvalue	Частота Frequency		Период Period сек s
				рад/сек rad/s	Гц Hz	
5	Модан.СВ / Modal Analysis	1	0,069	14,571	2,319	0,431
		2	0,065	15,474	2,463	0,406
		3	0,06	16,614	2,644	0,378
		4	0,045	22,126	3,521	0,284
		5	0,04	24,961	3,973	0,252
		6	0,037	27,371	4,356	0,23
		7	0,029	34,685	5,52	0,181
		8	0,025	40,193	6,397	0,156
		9	0,023	43,808	6,972	0,143
		10	0,022	45,291	7,208	0,139
		11	0,021	46,861	7,458	0,134
		12	0,021	47,419	7,547	0,133

**Рис. 6.** Периоды и частоты колебаний в ПО SCAD  
Источник: выполнено В.С. Михайловым, А.А. Курдановой.

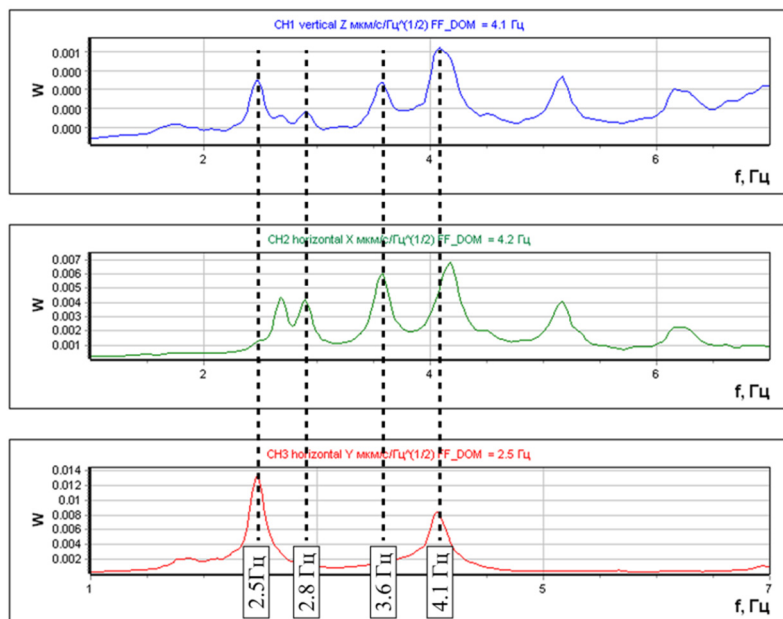
**Figure 6.** Periods and frequencies of vibrations in the SCAD software  
Source: made by V.S. Mikhailov, A.A. Kurdanova.

Первая, вторая и третья формы колебаний — изгибные на частотах 2,3, 2,5, 2,6 Гц соответственно, четвертая и пятая — крутильные на 3,5 и 4,0 Гц.

На рис. 7, б, представлены значения резонансных частот, полученные в ходе эксперимента. Значения приведены для точки наблюдений, находящейся на 4-м этаже здания. В экспериментальных расчетах первая изгибная форма не наблюдается из-за малого энергетического вклада (рис. 7). Однако основные резонансные пики эксперимента совпадают с формами колебаний, полученными с помощью модели. Экспериментальная оценка подтверждает расчетную модель.



a



b

**Рис. 7.** Результат обработки экспериментальных данных в ПО *MicroSeisTool*:

a — запись микросейсмического фона по трем каналам регистратора;

b — плотность мощности для каждого канала регистратора

Источники: выполнено А.А. Курдановой.

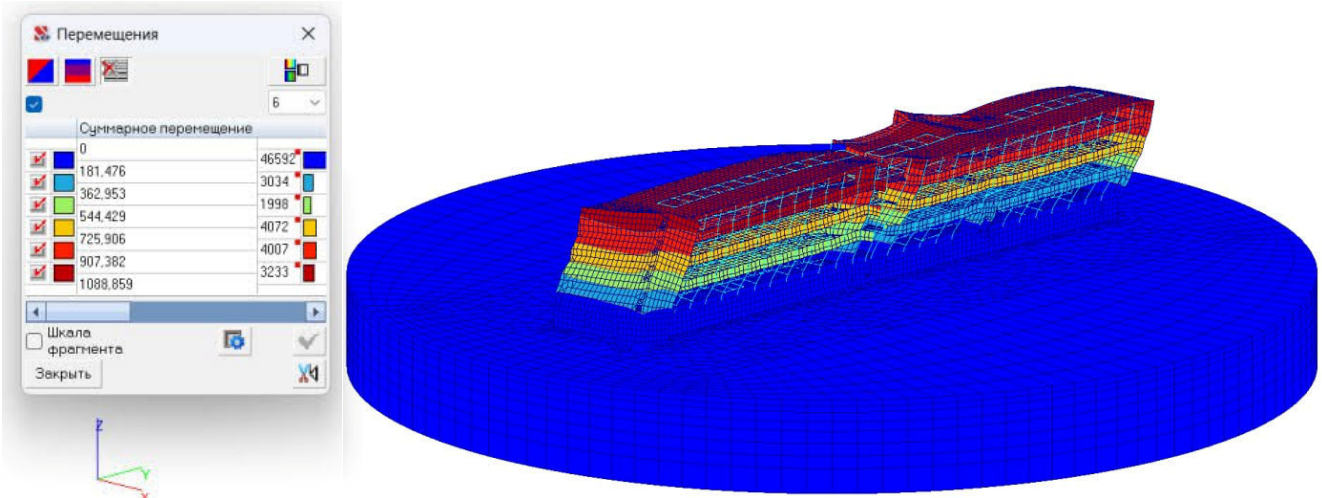
**Figure 7.** The result of processing experimental data in *MicroSeisTool* software:

a — recording of the microtremor on three channels of the recorder;

b — the spectral power density for each channel of the recorder.

Source: made by A.A. Kurdanova.

Ранее упоминалось, что при проведении ежегодного мониторинга постоянство резонансных пиков наблюдалось во всех точках наблюдения, кроме торца здания со стороны ул. Амундсена. Если в основном объеме здания резонансная частота по длинной стороне здания составляла 2,8 Гц, то в отличающейся части — 4,2 Гц. Ранее предположение о том, что эта часть построена отлично от всего здания, было опровергнуто математической моделью. Модель демонстрирует, что эта разница возникает из-за того, что в разных частях здания доминируют различные формы колебаний. Это показано на рис. 8–11, которые визуализируют колебания и дифференцируют их по типу деформации. Наиболее жестким и устойчивым является центр здания, а максимальные колебания приходятся на крайние части зданий. Доминирование крутильных частот на краях зданий — закономерное явление для протяженных строительных объектов. У крутильных форм амплитуды ближе к ядру жесткости (области смещения центра кручения) будут существенно ниже, чем в краевых точках. У изгибных форм колебаний амплитуды будут сопоставимы с краевыми точками.

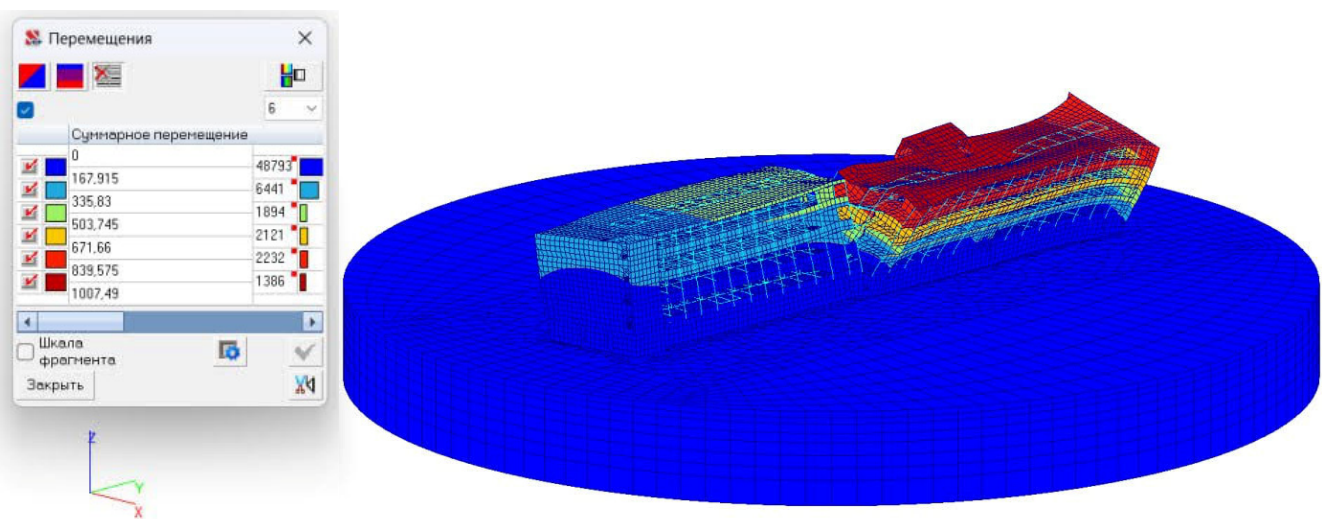


**Рис. 8.** Вторая форма колебаний – изгибная по оси  $Y$

И с т о ч н и к: выполнено В.С. Михайловым.

**Figure 8.** The second bending mode shape,  $Y$  axis

S o u r c e: made by V.S. Mikhailov.

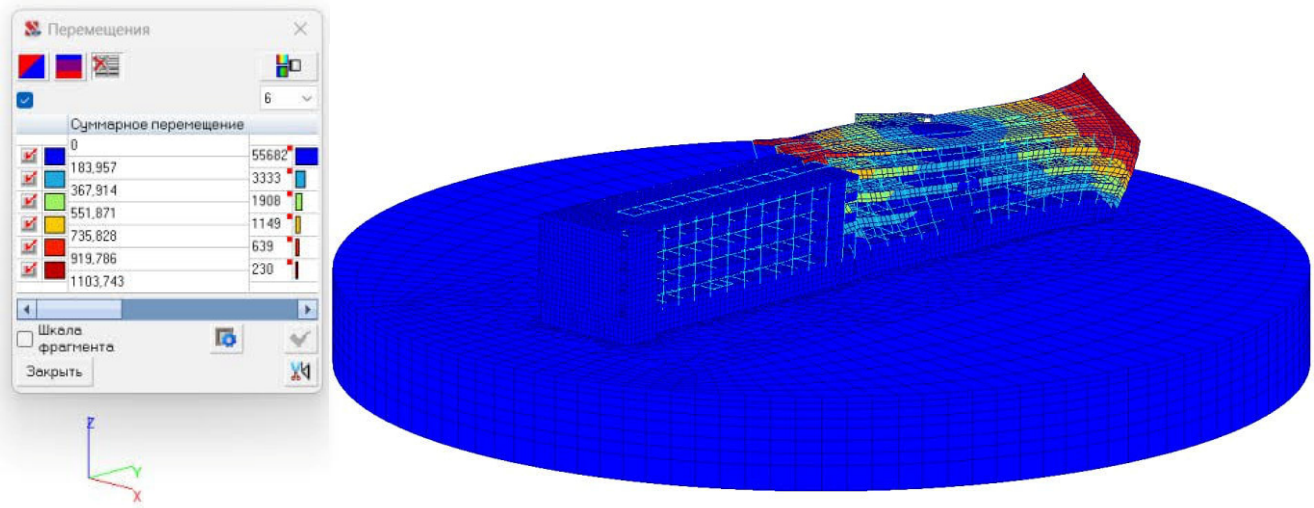


**Рис. 9.** Третья форма колебаний – изгибная по оси  $X$

И с т о ч н и к: выполнено В.С. Михайловым.

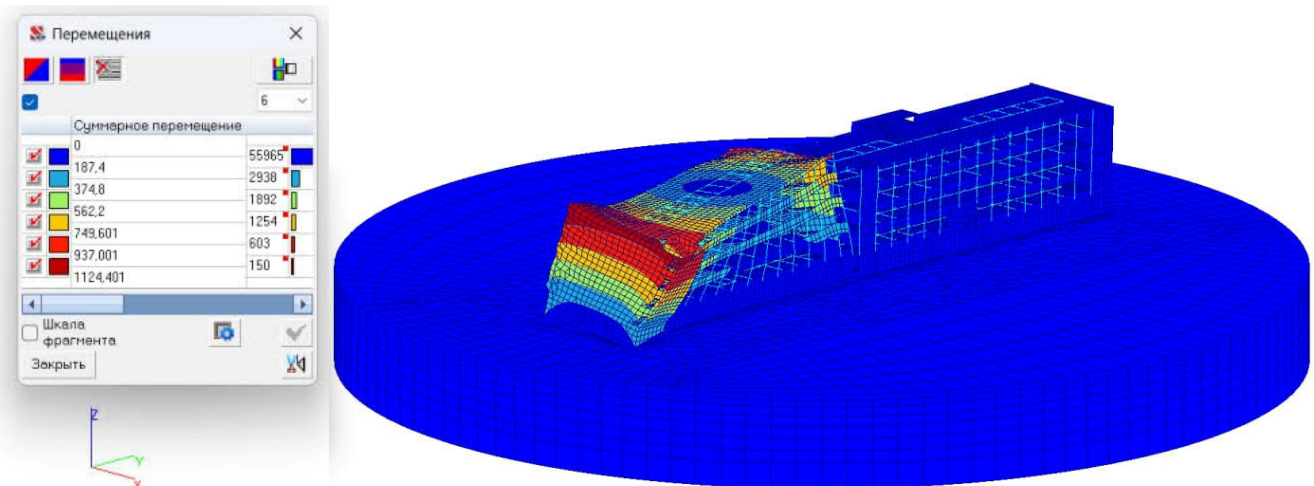
**Figure 9.** The third bending mode shape,  $X$  axis

S o u r c e: made by V.S. Mikhailov.



**Рис. 10.** Четвертая форма колебаний — крутильная  
Источник: выполнено В.С. Михайловым.

**Figure 10.** The fourth torsional mode shape  
Source: made by V.S. Mikhailov.



**Рис. 11.** Пятая форма колебаний – крутильная  
Источник: выполнено В.С. Михайловым.

**Figure 11.** The fifth torsional mode shape  
Source: made by V.S. Mikhailov.

Для сопоставления экспериментального и аналитического метода были выбраны первые пять экстремумов колебаний. Первая, вторая и третья формы колебаний — изгибные на частотах 2,3, 2,5 и 2,6 Гц соответственно, четвертая и пятая — крутильные на 3,5 и 4,0 Гц. Результаты, полученные с помощью моделирования, подтверждают результаты натурного эксперимента.

Сопоставление расчетных значений с экспериментальными показало совпадение собственных частот и форм мод, что подтверждает корректность экспериментальной методики и адекватность используемых моделей. При этом численное моделирование позволило дополнительно выявить зоны с максимальными значениями напряжений и потенциально повышенной уязвимостью, что согласуется с распределением коэффициента уязвимости, рассчитанного по данным микросейсмического мониторинга.

Возможность визуализации форм колебаний в *SCAD* дает возможность наглядно представить динамическое поведение здания в резонансных режимах. Это создает предпосылки:

- для определения потенциально перегруженных зон конструкции;
- оценки эффективности демпфирующих элементов;
- проведения перспективного анализа декремента затухания на основе комбинации моделирования и натурных наблюдений.

#### 4. Заключение

1. Частоты собственных колебаний здания ИГФ стабильны во времени, но неоднородны по объему здания. В юго-восточном торце наблюдается смещение резонансной частоты, связанное с преобладанием различных форм колебаний; крутильные моды доминируют на краевых участках, что характерно для протяженных зданий.

2. Для анализа выбраны первые пять мод: три изгибные (2,3; 2,5; 2,6 Гц) и две крутильные (3,5; 4,0 Гц). Результаты численного моделирования согласуются с натурными измерениями.

3. Регистрация микросейсмиков показала ее эффективность как экспресс-метода для оценки соответствия здания нормативным требованиям.

4. Численное моделирование позволяет прогнозировать динамическое поведение здания, а микросейсмический метод предоставляет фактические данные; сопоставление этих подходов подтверждает их взаимодополняемость.

5. Формы собственных колебаний (изгиб и кручение) определены путем сопоставления экспериментальных данных с расчетными моделями с учетом уточненных характеристик основания.

Перспективные направления развития методики включают расширение выборки зданий с различной конструкцией и географией, изучение временных характеристик микросейсмических сигналов, интеграцию с цифровыми платформами моделирования и анализ влияния параметров дискретизации и оборудования на точность результатов. Реализация этих направлений повысит точность диагностики, надежность мониторинга и своевременность принятия решений по техническому состоянию зданий.

#### Список литературы

1. Ведерников Г.В. Методы пассивной сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2013. Т. 44. № 2. С. 30–36. EDN: QOUGXP
2. Колосова Е.А., Лукк А.А., Серова О.А., Сидорин А.Я. Природные и техногенные источники триггерной активности сейсмичности и сейсмического шума // Наука и технологические разработки. 2015. Т. 94. № 4. С. 30–43. EDN: WAOWMJ
3. Nakamura Y. What Is the Nakamura Method? // Seismological Research Letters. 2019. Vol. 90. No. 4. P. 1437–1443. <https://doi.org/10.1785/0220180376>
4. Пахмурин О.Р., Михайлов В.С., Воскресенский М.Н. Использование трехкомпонентной сейсмостанции «регистр» для определения динамических характеристик и HVSR анализа каркасных зданий методом Накамуры // Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения // Материалы XI Международной научно-практической конференции : в 2 частях. 02–04 марта, Томск, 2021. С. 417–420. EDN: FNHXUW
5. Адищев В.В., Калачева В.В., Михайлов В.С. Методы оценки амплитудно-частотных характеристик зданий с монолитным железобетонным каркасом // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (СИБСТРИН). 2024. Т. 27. № 4. С. 9–26. <https://doi.org/10.32683/1815-5987-2024-27-94-4-9-26> EDN: XLXLWR
6. Еманов А.Ф., Бах А.А. Стоячие волны в инженерных объектах сложных конструкций // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. № 2 (2). С. 67–73. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-2-67-73> EDN: TNIQQO
7. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Коковкин И.В., Соловьев В.М. Изменение значений частот собственных колебаний зданий и сооружений в зависимости от внешних факторов // Геология и геофизика. 2024. Т. 65. № 7. С. 1036–1044. <https://doi.org/10.15372/GiG2024102> EDN: ZVFRU
8. Антоновская Г. Н. Сейсмический мониторинг состояния антропогенных объектов и территорий их размещения, включая Крайний Север : дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2018. 317 с. EDN: URZDHW
9. Kong X., Rong M., Li X., Wang J., Zhang B. The relationship between site resonance frequency and bedrock interface at one-dimensional sites based on the Kik-Net database. 2023. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4579250>

10. Gosar A. Site effects and soil-structure resonance study in the Kobarid basin (NW Slovenia) using microtremors // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2010. Vol. 10. P. 761–772. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-761-2010>
11. Moisiđi M., Vallianatos F., Gallipoli M.R. Assessing the main frequencies of modern and historical buildings using ambient noise recordings: Case studies in the historical cities of crete (Greece) // *Heritage*. 2018. Vol. 1. No. 12. P. 171–188. <https://doi.org/10.3390/heritage1010012> EDN: HKXLXX
12. Khodabakhshi Soureshjani R., Ghasemzadeh H. Development of seismic fragility curves for buckling-restrained braced structures under far-field motions considering soil-structure interaction // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 25. Article no. 104188. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104188>
13. Базаров А.Д., Лундэнбазар Б., Комаров А.К., Иванов И.А. Оценка динамической реакции каркасного здания под воздействием микросейсмического шума в г. Улан-Баторе // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2020. Т. 10. № 2. С. 198–205. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-2-198-205> EDN: DYLOFJ
14. Lalin V.V., Le Ty K.C. Calculation of building structures under multiple dynamic loads with static consideration of higher vibration modes // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020. Vol. 16. No. 3. P. 171–178. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-3-171-178> EDN: VSEGWP
15. Туровский С.В., Пахмурип О.Р. Оценка пространственной работы многоэтажного каркасного здания с безригельным перекрытием // *Избранные доклады Юбилейной университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых*. 25 апреля, Томск, 2019. С. 100–103. EDN: JSHSEO
16. Сенип Л.Н., Сенипа Т.Е., Воскресенский М.Н. Аппаратно-программный комплекс «Регистр-SD» для изучения сейсродинамических характеристик объектов, находящихся под воздействием упругих колебаний // *Приборы и техника эксперимента*. 2017. № 4. С. 157–158. <https://doi.org/10.7868/S0032816217040115> EDN: ZCQCQD
17. Воскресенский М.Н., Курдапова А.А. Оптимальная длительность наблюдений при обследовании зданий сейсмическим методом // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2024. Т. 20. № 2. С. 182–194. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-2-182-194> EDN: JPZCMI
18. Романов В.В., Мальский К.С. MicroSeisTool — программа обработки записей микросейсмических колебаний. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016615697.27.05.2016. Заявка № 2016611234 от 16.02.2016. EDN: SACRCP
19. Курдапова 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> EDN: CVGMIC
20. Воскресенский М.Н., Парыгин Г.И., Сенипа Т.Е., Сенип Л.Н. Обследование здания ИГФ УрО РАН с применением метода HVSR // *Материалы всероссийской конференции с международным участием. Глубинное строение, геодинатика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей*. 23–27 сентября 2019 г. Екатеринбург, 2019. С. 85–90. EDN: CASQLI

## References

1. Vedernikov G.V. Methods of passive seismic survey. *Instruments and Systems of Exploration Geophysics*. 2013; 44(2):30–36. (In Russ.) EDN: QOUGXP
2. Kolosova E.A., Lukk A.A., Serova O.A., Sidorin A.Ya. Natural and technogenic origins of trigger effects in seismicity and seismic noise. *Science and Technological Developments*. 2015;94(4):30–43. (In Russ.) EDN: WAOWMJ
3. Nakamura Y. What Is the Nakamura method? *Seismological Research Letters*. 2019;90(4):1437–1443. <https://doi.org/10.1785/0220180376>
4. Pakhmurin O.R., Mikhailov V.S., Voskresenskiy M.N. Using the Three-Component Seismostation “Registr” for Determining Dynamic Characteristics and HVSR Analysis of Frame Buildings by the Nakamura Method. *Investments, Urban Planning, and Real Estate as Drivers of Socio-Economic Development and Quality of Life. Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference*. March 02–04, Tomsk, 2021. p. 417–420. (In Russ.) EDN: FNHXUW
5. Adishchev V.V., Kalacheva V.V., Mikhailov V.S. Methods for Evaluating the Amplitude-Frequency Characteristics of Buildings with Monolithic Reinforced Concrete Frames. *Proceedings of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SIBSTRIN)*. 2024;27(4):9–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.32683/1815-5987-2024-27-94-4-9-26> EDN: XLXLWR
6. Emanov A.F., Bakh A.A. Standing waves in engineering structures of complex design. *Interexpo Geo-Siberia*. 2019;2(2):67–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-2-67-73>
7. Seleznev V.S., Liseykin A.V., Kokovkin, I.V., Solovyev V.M. Variations of Natural Frequencies of Buildings and Structures under External Influences. *Geology and Geophysics*. 2024;65(7):1036–1044. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG2024102> EDN: ZVFRTU
8. Antonovskaya G.N. *Seismic monitoring of anthropogenic structures and their sites, including the far north*. Doctoral Dissertation. 2018. (In Russ.)
9. Kong X., Rong M., Li X., Wang J., Zhang B. *The relationship between site resonance frequency and bedrock interface at one-dimensional sites based on the KIK-Net database*. 2023. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4579250>

10. Gosar A. Site Effects and soil-structure resonance study in the Kobarid Basin (NW Slovenia) Using Microtremors. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2010;10:761–772. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-761-2010>
11. Moisiidi M., Vallianatos F., Gallipoli M.R. Assessing the main frequencies of modern and historical buildings using ambient noise recordings: Case studies in the historical cities of crete (Greece). *Heritage*. 2018;1(12):171–188. <https://doi.org/10.3390/heritage1010012> EDN: HKXLXX
12. Khodabakhshi Soureshjani R., Ghasemzadeh H. Development of seismic fragility curves for buckling-restrained braced structures under far-field motions considering soil-structure interaction. *Results in Engineering*. 2025;25:104188. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104188>
13. Bazarov A.D., Lundenbazar B., Komarov A.K., Ivanov I.A. Dynamic response assessment of a frame building affected by microseismic noise in the city of Ulan Bator. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*. 2020;10(2):198–205. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-2-198-205>
14. Lalin V.V., Le Ty K.C. Calculation of building structures under multiple dynamic loads with static consideration of higher vibration modes. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(3):171–178. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-3-171-178> EDN: VSEGWP
15. Pakhmurin O.R., Turovskiy S.V. Evaluation of the Spatial Behavior of a Multi-Storey Frame Building with Beamless Slabs. *Selected reports of the Anniversary University Science and Technology Conference of Students and Young Scientists*. April 25, Tomsk, 2019. p. 100–103. (In Russ.) EDN: JSHSEO
16. Senin L.N., Senina T.E., Voskresenskiy M.N. Hardware-software complex “Registr-SD” for studying seismic-dynamic characteristics of structures subject to elastic vibrations. *Instruments and Experimental Techniques*. 2017;4:157–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0032816217040115> EDN: ZCQCQD
17. 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. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-2-182-194>
18. Romanov V.V., Malskiy K.S. *MicroSeisTool — Software for processing microseismic records*. Certificate of Registration of Computer Program No. 2016615697, 27.05.2016. Application No. 2016611234, 16.02.2016. (In Russ.) EDN: CACRCP
19. 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.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-5-479-490> EDN: CVGMIC
20. Voskresenskiy M.N., Parygin G.I., Senina T.E., Senin L.N. Survey of the IGF UB RAS building using the HVSr method. *Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation. Deep Structure, Geodynamics, Thermal Field of the Earth, Interpretation of Geophysical Fields. September 23–27, Yekaterinburg, 2019*. p. 85–90. (In Russ.) EDN: CASQLI