

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2026.28.96.001

Оригинальная статья

Оценка динамических характеристик и сейсмической уязвимости шестиэтажного железобетонного здания в Армении с использованием метода Накамуры

Дж.К. Карапетян[✉], О.Ю. Айрапетян[✉], А.В. Элоян[✉],
Р.К. Карапетян[✉], С.Р. Шахпаронян[✉]

Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. акад. А. Назарова НАН РА,
Республика Армения, 3115, г. Гюмри, ул. В. Саргсяна, 5а,
e-mail: jon_iges@mail.ru; hhmy39@gmail.com

Статья поступила: 11.11.2025, доработана: 15.05.2026, принята к публикации: 25.05.2026

Резюме: Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки сейсмической уязвимости железобетонного здания середины XX века, расположенного на территории Республики Армения – региона с высоким уровнем сейсмической опасности. Сооружение возведено до вступления в силу современных норм сейсмостойкого проектирования и в процессе эксплуатации подверглось ряду конструктивных модификаций, что привело к трансформации его динамических характеристик и снижению несущей способности. Определение фактических динамических параметров эксплуатируемых зданий представляет ключевую задачу при разработке мероприятий по снижению сейсмического риска и обосновании инженерных решений по усилению конструкций. **Цель исследования** – количественная оценка динамических характеристик и степени сейсмической уязвимости шестиэтажного железобетонного здания 1960-х годов постройки посредством определения интегральных показателей жёсткости несущей системы, собственных периодов колебаний и расчётных индексов уязвимости. **Методы:** выполнена многоточечная регистрация микросейсмических колебаний в характерных точках здания. Обработка временных рядов осуществлялась методом спектральных отношений горизонтальных и вертикальных компонент (HVSR) по методике Накамуры, что позволило идентифицировать основные собственные периоды и формы колебаний несущей системы. На основании установленных параметров рассчитаны коэффициенты сейсмической уязвимости для отдельных конструктивных зон. Подход обеспечивает неразрушающую диагностику изменений жёсткостных характеристик, обусловленных эксплуатационными воздействиями и реконструктивными вмешательствами. **Результаты** выявили выраженную неоднородность распределения жесткости, как по высоте здания, так и в плане, с локализацией зон пониженной жёсткости в отдельных конструктивных секциях. Рассчитанные индексы уязвимости свидетельствуют о повышенной восприимчивости указанных зон к сейсмическим воздействиям, включая вероятность резонансного усиления колебаний при совпадении собственных частот сооружения с преобладающими частотами возбуждения. Полученные данные подтверждают эффективность метода HVSR для оперативной диагностики динамических характеристик железобетонных зданий и оценки их сейсмостойкости. Сформулированы рекомендации по локальному усилению критических зон несущей системы и внедрению систем непрерывного инструментального мониторинга для минимизации сейсмического риска и обеспечения безопасной эксплуатации здания.

Ключевые слова: регистрация микросейсмических колебаний, динамические характеристики, HVSR-анализ, метод Накамуры, резонансная частота.

Для цитирования: Карапетян Дж.К., Айрапетян О.Ю., Элоян А.В., Карапетян Р.К., Шахпаронян С.Р. Оценка динамических характеристик и сейсмической уязвимости шестиэтажного железобетонного здания в Армении с использованием метода Накамуры. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 57–70. DOI: 10.46698/VNC.2026.28.96.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.28.96.001

Original paper

Assessment of dynamic characteristics and seismic vulnerability of a six-storey reinforced concrete building in Armenia using the Nakamura method

J.K. Karapetyan^{ORCID}, H.Yu. Hayrapetyan^{ORCID}, A.V. Eloyan^{ORCID},
R.K. Karapetyan^{ORCID}, S.R. Shahparonyan^{ORCID}

Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov of NAS RA,
5a V. Sargsyan Str., Gyumri 3115, Republic of Armenia,
e-mail: jon_iges@mail.ru; hhmy39@gmail.com

Received: 11.11.2025, revised: 15.05.2026, accepted: 25.05.2026

Abstract: This study addresses the seismic vulnerability of a mid-twentieth-century reinforced concrete building in the Republic of Armenia, a region of high seismic hazard. The structure was erected prior to modern seismic design codes and has undergone structural modifications during service, leading to changes in its dynamic characteristics and a reduction in load-bearing capacity. Determining the actual dynamic parameters of existing buildings is a key task in seismic risk mitigation and the rationale for retrofitting. **The aim** is to quantitatively assess the dynamic characteristics and seismic vulnerability of a six-storey reinforced concrete building constructed in the 1960s through integral stiffness indicators, natural periods of vibration, and vulnerability indices. **Methods:** multi-point recording of microseismic vibrations was performed at representative points within the building. Time series were processed using the horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSr) method following the Nakamura technique, identifying the principal natural periods and mode shapes of the load-bearing system. Vulnerability coefficients were then computed for individual structural zones. The approach provides non-destructive diagnostics of stiffness changes induced by operational loads and reconstruction interventions. **Results** revealed pronounced heterogeneity in stiffness distribution along the height and in plan, with reduced-stiffness zones localised in specific sections. The vulnerability indices indicate increased susceptibility of these zones to seismic actions, including resonant amplification when the natural frequencies of the structure coincide with dominant excitation frequencies. The data confirm the effectiveness of HVSr for rapid diagnosis of dynamic characteristics of reinforced concrete buildings and assessment of seismic resistance. Recommendations are formulated for local strengthening of critical zones and continuous monitoring to minimise seismic risk and ensure safe operation.

Keywords: microseismic vibration recording, dynamic characteristics, HVSr analysis, Nakamura method, resonant frequency.

For citation: Karapetyan J.K., Hayrapetyan H.Yu., Eloyan A.V., Karapetyan R.K., Shahparonyan S.R. Assessment of dynamic characteristics and seismic vulnerability of a six-storey reinforced concrete building in Armenia using the Nakamura method. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 57–70. DOI: 10.46698/VNC.2026.28.96.001

Введение

Оценка структурной уязвимости и динамических характеристик эксплуатируемых сооружений представляет собой фундаментальную задачу обеспечения сейсмической безопасности застройки, приобретающую особую значимость в регионах с высоким уровнем сейсмической опасности. Республика Армения, расположенная в пределах Кавказско-Анатолийского сегмента Альпийско-Гималайского сейсмиче-

ского пояса, характеризуется сложным тектоническим строением и историей разрушительных сейсмических событий, что определяет приоритетность исследований динамического поведения существующих конструкций при потенциальных сейсмических воздействиях [Геодакян и др., 2023; Свалова, Заалишвили, 2024]. Железобетонный фонд застройки, преимущественно сформированный в середине XX века, характеризуется существенной вариативностью сейсмостойкости, обусловленной несовершенством проектных решений того периода, деградацией физико-механических свойств материалов в процессе длительной эксплуатации и кумулятивным влиянием конструктивных модификаций [Карапетян и др., 2021; Хачиян, 2015; Cosenza et al., 2002; Berto et al., 2009]. Особую значимость указанная проблематика приобрела после катастрофического Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. ($M_s = 6,9$), приведшего к массовым обрушениям несущих конструкций железобетонных зданий и продемонстрировавшего критическую недооценку сейсмических воздействий в проектных нормах советского периода.

Объектом настоящего исследования является каркасное железобетонное здание 1960-х годов постройки прямоугольной формы в плане размерами $15,0 \times 54,0$ м, включающее полуподвальный уровень и шесть надземных этажей. Отсутствие исходной проектно-исполнительной документации существенно затрудняет верификацию структурной целостности объекта, а многолетние ремонтные и реконструктивные вмешательства, включая локальные пристройки, привели к трансформации динамических характеристик здания и изменению его восприимчивости к сейсмическим воздействиям. Выполненные ранее обследования (2008 и 2023 гг.) установили вторую категорию технического состояния по локальной классификации, что обусловило необходимость углубленного диагностического анализа. Ограниченная информативность визуального осмотра, связанная со скрытым характером ряда конструктивных модификаций и повреждений, определила обоснованность применения инструментальных методов для комплексной оценки динамических параметров и индексов сейсмической уязвимости. Согласно действующей классификации Республики Армения, объекты второй категории технического состояния подлежат обязательному инструментальному обследованию с последующим обоснованием программы сейсмоусиления.

Основные задачи исследования включают: идентификацию фактических динамических характеристик здания и грунтов основания, включая преобладающие периоды колебаний и пространственное распределение жесткостных параметров; расчёт и интерпретацию коэффициентов сейсмической уязвимости методом Накамуры с количественной оценкой уровней риска для отдельных зон; идентификацию резонансных эффектов посредством сопоставления собственных периодов здания и грунтов основания; разработку рекомендаций по локальному сейсмоусилению критических зон и формирование программы инструментального мониторинга в процессе эксплуатации.

Регистрация микросейсмических колебаний выполнялась в характерных точках здания и на прилегающей территории в ночное время для минимизации антропогенных помех. Обработка временных рядов осуществлялась специализированным программным обеспечением и обеспечивала построение кривых HVSR, отражающих преобладающие частоты несущей системы и подстилающих грунтов. Метод спектрального отношения горизонтальных и вертикальной компонент (HVSR), известный как метод Накамуры, представляет собой устоявшийся подход к идентификации динамических характеристик сооружений и грунтов [Агаева и др., 2025; Заалишвили и др., 2024; Капустян и др., 2025; Аносов и др., 2010; Nakamura, 1997; Nakamura et al., 2000; Nakamura, 2019; Irie, Nakamura, 2000; Dal Moro, Panza, 2021; Fazriati et al.,

2023; Gallipoli et al., 2010; Giacomo et al., 2005; Kapustian et al., 2013; Kawase et al., 2014; Mucciarelli et al., 2003; Sungkono et al., 2011]. Он основан на регистрации фонового сейсмического шума и позволяет диагностировать резонансные явления при взаимодействии в системе «сооружение–основание».

Метод Накамуры реализован посредством разработанного авторским коллективом программного инструментария, обеспечивающего повышенную точность обработки данных и расширенный функционал спектрального анализа, идентификации экстремумов и визуализации HVSR-функций.

Многоточечная регистрация на различных уровнях несущей системы обеспечила разрешение, достаточное для фиксации вариативности динамических характеристик. Анализ спектральных отношений позволил установить закономерности взаимодействия в системе «здание–основание» и выявить зоны с трансформированными параметрами вследствие модификаций и пристроек. Сопоставление с нормативными значениями обеспечило выявление рисков резонансного усиления.

Работа развивает методологию оценки сейсмического риска применительно к стареющему железобетонному фонду Республики Армения и регионов сопоставимых геодинамических условий. Результаты представляют собой научно-методическую основу для разработки стратегий сейсмоусиления, повышения надёжности существующих зданий и совершенствования национальной нормативной базы в части стареющей инфраструктуры и эволюции региональных сейсмических рисков [Ditommaso et al., 2012].

Методология исследования

В основу исследований положен метод спектрального отношения горизонтальных и вертикальной компонент микросейсмических колебаний (HVSR), предложенный Ю. Накамурой [Nakamura, 1997; Nakamura et al., 2000; Nakamura, 2019] и широко применяемый в инженерной сейсмологии для определения динамических характеристик сооружений и грунтов основания. Теоретическая основа базируется на преобладании поперечных волн SH в фоновом шуме и инвариантности вертикальной компоненты относительно резонансных эффектов в приповерхностной толще, что позволяет интерпретировать горизонтальную составляющую как меру локального усиления и определять собственные частоты по экстремумам спектрального отношения. К преимуществам метода относятся неразрушающий характер регистрации, оперативность полевых измерений и независимость от активного источника возбуждения, что определяет его применимость для диагностики эксплуатируемых сооружений при ограничениях на динамические испытания. Применение требует соблюдения методологических ограничений: достаточной длительности регистрации для статистической устойчивости оценок, отсутствия импульсных антропогенных помех и стабильности температурно-влажностных условий, влияющих на жесткостные характеристики конструкции.

Инструментальные наблюдения выполнялись в характерных точках здания и на грунтах основания; продолжительность регистрации в каждой точке составляла десять минут при минимизации шумовых помех. Регистрация выполнялась трёхкомпонентным сейсмометром SeismoLog (рис. 1) лабораторной разработки с аналого-цифровым преобразованием 10 бит, коэффициентом усиления 200 в дифференциальном режиме и диапазоном измерения $\pm 10^{-5}$ В. Прибор построен на базе трёхосного геофона ST-4.5N (чувствительность $28,8 \pm 5$ % В·с/см, собственная частота $4,5 \pm 10$ % Гц) и обеспечивает регистрацию двух ортогональных горизонтальных (В–З, С–Ю) и вертикальной компонент. Данные сохраняются в формате JSON, содержащем метаданные и временные ряды трёхкомпонентного сигнала.

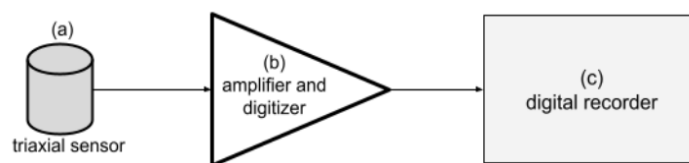


Рис. 1. Схема прибора SeismoLog /

Fig. 1. Schematic diagram of the SeismoLog instrument

Предварительная обработка временных рядов направлена на устранение импульсных и подавление стационарных шумовых составляющих. Фрагменты с амплитудными выбросами исключались из анализа; спектральный диапазон ограничивался полосовым фильтром Баттерворта с частотами среза 2 и 10 Гц. Для минимизации утечки спектра применялось весовое окно Хэмминга [Fazriati et al., 2023]. Переход в частотную область выполнялся посредством быстрого преобразования Фурье. Сглаживание спектральных оценок осуществлялось фильтром Баттерворта второго порядка для подавления высокочастотных осцилляций и устойчивого выделения преобладающих частот, отражающих резонансные свойства системы.

Идентификация преобладающей частоты колебаний осуществляется через расчёт спектрального отношения горизонтальных и вертикальной компонент H по формуле (1):

$$H(f) = \frac{\sqrt{X^2(f) + Y^2(f)}}{Z(f)} \quad (1)$$

где X , Y и Z – спектральные компоненты продольной, поперечной и вертикальной составляющих сигнала. Локальные максимумы кривой HVSR соответствуют преобладающим частотам колебательной системы, глобальный максимум интерпретируется как резонансная частота и используется для оценки эффективной мощности осадочной толщи основания [Fazriati et al., 2023].

Объект исследования

Объектом исследования является каркасное железобетонное здание 1960-х годов постройки, прямоугольное в плане, габаритами $15,0 \times 54,0$ м, с полуподвальным уровнем и шестью надземными этажами (рис. 2). Аналитическая обработка данных и количественная оценка сейсмической уязвимости проводились в соответствии с действующей нормативной базой Республики Армения и современными международными подходами к оценке уязвимости железобетонных сооружений. Объект эксплуатируется как учебно-административное здание с массовым пребыванием людей, что определяет его повышенный класс ответственности и необходимость детализированной оценки сейсмической надёжности.



Рис. 2. Здание с главного и заднего фасадов /

Fig. 2. Front and rear elevations of the building

Несущая система здания представляет собой сборный железобетонный рамно-связевой каркас, образованный поперечными многопролётными рамами с диафрагмами жёсткости и сборными междуэтажными перекрытиями. По результатам инженерных обследований 2008 и 2023 гг. техническое состояние отнесено ко второй категории согласно нормативной классификации Республики Армения; сформулированы рекомендации по устранению дефектов и усилению несущих элементов.

Существенным обстоятельством является отсутствие проектной и исполнительной документации. В процессе многолетней эксплуатации здание подвергалось ремонтам, модификациям и конструктивным вмешательствам, что затрудняет визуальную идентификацию фактических повреждений несущих элементов. В этих условиях объективная оценка технического состояния методами визуального осмотра не представляется возможной, что обусловило необходимость инструментального обследования как основного источника диагностической информации.

Результаты и обсуждение

Одним из ключевых факторов при оценке эксплуатационной надёжности здания является идентификация взаимосвязи между первой формой собственных колебаний его надземной части и резонансными характеристиками грунтов основания, определяющей вероятность возникновения резонансных явлений в системе «грунт–здание». До настоящего исследования комплексный инструментальный анализ динамического состояния здания не выполнялся. Для объективной диагностики динамических параметров несущей системы проведены натурные испытания здания и грунтов основания; собственные периоды колебаний определены методом регистрации микросейсмических колебаний.

Регистрация выполнялась в ночное время для минимизации антропогенного шумового фона. Сейсмоприёмники устанавливались в характерных точках несущей системы на разных этажах (рис. 3, табл. 1), что обеспечило идентификацию пространственного распределения жесткостных характеристик по высоте и в плане.



Рис. 3. Точки инструментальных наблюдений внутри здания /

Fig. 3. Instrumental measurement points inside the building

Спектральный анализ временных рядов выполнен для двух горизонтальных (X, Y) и вертикальной (Z) компонент (рис. 4–8); обобщённые результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Рассчитанные динамические характеристики грунтов основания и регистрации микросейсмических колебаний здания /
Calculated dynamic characteristics of the foundation soils and microseismic vibration recordings of the building

Фактически измеренные значения преобладающих периодов колебаний грунта, T_{0I} / Actual measured values of soil dominant periods, T_{0I}	На основе записей микросейсм, расчетное значение периода составляет $1.15T_{0I}$ согласно BSRA-20.04-2020 [BSRA-20.04-2020 ..., 2020] / Based on microtremor records, the calculated value of period is $1.15T_{0I}$, according to the BSRA-20.04-2020 [BSRA-20.04-2020 ..., 2020]	Этажи / Floors	Фактические значения преобладающих периодов (Т, с) / Значения отношений спектральных компонент H/V колебаний здания / Actual values of dominant periods (T, sec.) / Values of H/V ratios of spectral component of building vibrations		
			Секция I / Section I	Секция II / Section II	Секция III / Section III
0.21	0.242/4.3	0	0.175/3.316	-	0.12(0.4)/4.343
		1	0.159/2.648	0.22/3.056	0.344/4.133
		3	0.233(0.44)/10.0	0.23(0.44)/5.5	0.315/1.913
		6	0.313(0.44)/18.1	0.313(0.46)/10.8	0.315(0.45)/3.704

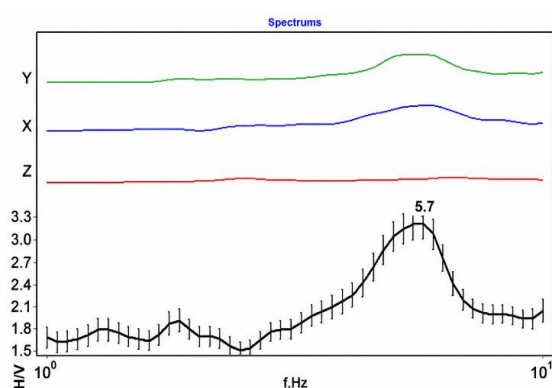


Рис. 4. HVSr (для компонент – X, Y, Z) в подвале /

Fig. 4. Instrumental records (for components – X, Y, Z) and HVSr on basement

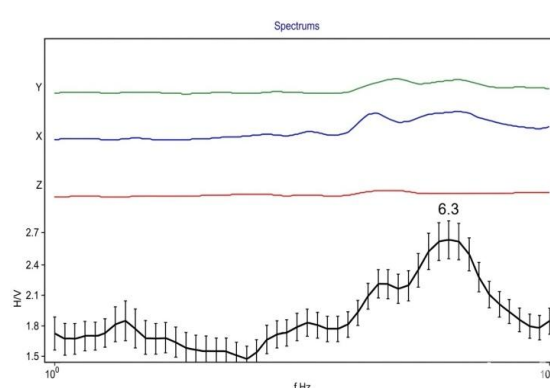


Рис. 5. HVSr (для компонент – X, Y, Z) на 1-м этаже /

Fig. 5. Instrumental records (for components – X, Y, Z) and HVSr on the 1st floor

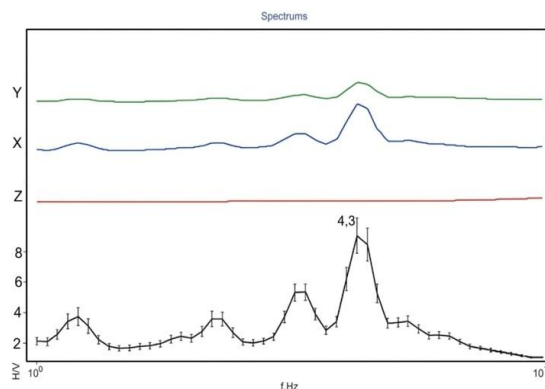


Рис. 6. HVSr (для компонент – X, Y, Z)
на 3-м этаже /

Fig. 6. HVSr curves (for X, Y, Z components)
on the 3rd floor

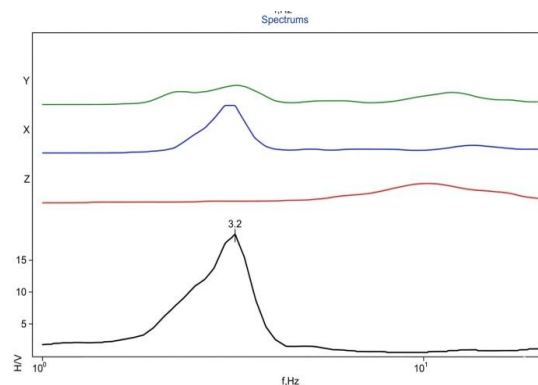


Рис. 7. HVSr (для компонент – X, Y, Z)
на 6-м этаже /

Fig. 7. HVSr curves for the X, Y, and Z
components on the 6th floor

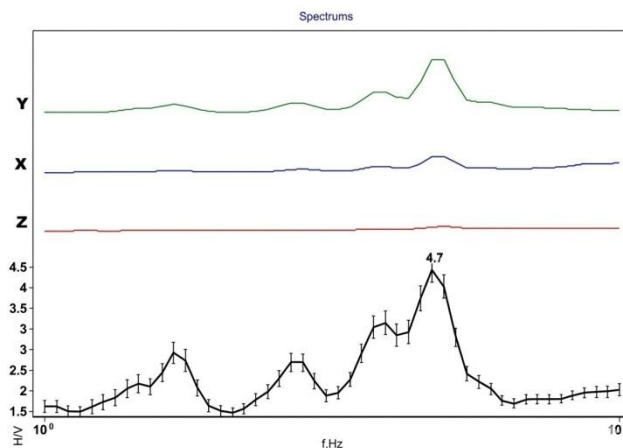


Рис. 8. HVSr (для компонент – X, Y, Z) на грунте /

Fig. 8. HVSr curves for the X, Y, and Z components on the ground

Измеренные амплитуды HVSr обнаруживают выраженную пространственную вариативность в пределах сооружения. Максимальные значения зафиксированы в зоне дополнительной лестничной клетки, минимальные – в части здания, примыкающей к соседнему сооружению. Неоднородность колебательного отклика свидетельствует о неравномерном динамическом поведении отдельных конструктивных зон, обусловленном влиянием пристроек и локальных конструктивных включений, трансформировавших исходные динамические характеристики несущей системы. По данным инструментальных измерений, преобладающие периоды колебаний шестого этажа варьируют в диапазоне 0,315–0,45 с, а период колебаний грунтов основания составляет 0,242 с (см. табл. 1), что соответствует I категории грунтов согласно строительным Нормам Республики Армения [BSRA-20.04-2020 ..., 2020] ($T_0 < 0,4$ с). Согласно статье 70 указанного норматива, для исключения резонансного взаимодействия в системе «грунт–сооружение» разность собственных периодов здания и грунтов основания должна удовлетворять одному из условий формулы (2).

Для рассматриваемого объекта при $T_0 = 0,242$ с и $T_1 = 0,175...0,315$ с пороговое значение составляет $1,3 \cdot T_0 = 1,3 \times 0,242 = 0,3146$ с. Значения преобладающих периодов в различных конструктивных зонах не превышают указанного порога, то есть формально условие резонансной отстройки не выполняется. Вместе с тем, согласно той же статье 70 [BSRA-20.04-2020 ..., 2020] при $T_1 < 0,4$ с указанные условия не

являются обязательными, что обусловлено особенностями сейсмической реакции жёстких сооружений на грунтах I категории.

Анализ коэффициентов сейсмической уязвимости

На основе графиков спектральных отношений H/V (HVSР) для отдельных секций здания (рис. 4–8) рассчитаны коэффициенты уязвимости несущей системы (K_b) и грунтов основания (K_s), а также интегральные индексы уязвимости для всех точек обследования. Результаты приведены в таблице 2. Коэффициенты рассчитывались по формуле $K = A^2/f$, где A – амплитуда HVSР на преобладающей частоте, f – соответствующая частота (Гц); показатель характеризует энергетический отклик системы и отражает концентрацию деформаций в её конструктивных зонах [Nakamura, 1997; Mucciarelli et al., 2003]. Анализ выявил выраженную пространственную дифференциацию коэффициентов уязвимости, отражающую кумулятивное влияние конструктивных вмешательств различных периодов эксплуатации на распределение жесткостных характеристик. Значения в полуподвальном уровне и на первом этаже в первом приближении воспроизводят фоновые характеристики 30-метровой толщи грунтов основания (V_{s30} -эквивалент), что свидетельствует о согласованности колебательного отклика нижних уровней с динамическими свойствами основания. Расхождение между полуподвалом и первым этажом существенно меньше, чем между нижними и верхними уровнями. Максимальные значения коэффициента уязвимости зафиксированы на шестом этаже в секции I (табл. 2). В переходных зонах между секциями I и II на третьем и шестом этажах соотношение составляет 2,8–3,4 раза, тогда как между секциями II и III – 6,1 для третьего и 8,5 для шестого этажа. Это свидетельствует о том, что наиболее динамически уязвимой зоной является конструктивный переход между секциями I и II, формирующий локальный концентратор сейсмического риска. Пониженные значения в III секции объясняются стабилизирующим влиянием пристройки в боковой части сооружения (рис. 1), функционирующей как дополнительный демпфирующий элемент.

Таблица 2 / Table 2

Значения коэффициентов уязвимости K_s и K_b , соотношение K_b/K_s и индексы уязвимости для различных частей здания /
Values of the vulnerability coefficients K_s and K_b , the K_b/K_s ratio, and the vulnerability indices for various parts of the building

K_s для грунтов / K_s for soils	Этажи / Floors	K_b для здания (K_b/K_s – отношение коэффициентов уязвимости) / K_b for building (K_b/K_s – the ratio of vulnerability coefficients)		
		Секция I / Section I	Секция II / Section II	Секция III / Section III
2.9÷5.1/4.4	0	1.9/(0.43-A)	-	2.27/(0.52-A)
	1	1.11/(0.25-A)	2.03/(0.46-A)	5.9/(1.34-B)
	3	23.3/(5.3-D)	6.9/(1.57-B)	1.14/(0.26-A)
	6	102.4/(23.3-D)	36.45/(8.28-D)	4.29/(0.98-A)

По данным таблицы 2, максимальные значения коэффициента уязвимости несущей системы зафиксированы на третьем и шестом этажах в секциях I и II: $K_b = 102,4$ (6-й этаж, секция I), 36,45 (6-й этаж, секция II) и 23,3 (3-й этаж, секция I). На основании указанных значений рассчитаны критические уровни пикового ускорения грунта (PGA) в диапазоне 12,8–320,8 см/с², соответствующие потенциальной локальной потере несущей способности отдельных конструктивных зон сооружения. Соглас-

но сейсмической шкале МСК-64, установленный диапазон ускорений соответствует интенсивности сейсмических воздействий 5–9 баллов, что свидетельствует о возможности проявления сейсмической уязвимости отдельных конструктивных зон уже при землетрясениях интенсивностью 5 баллов – статистически достижимом уровне сейсмической активности для рассматриваемого региона в течение проектного срока службы сооружения.

Для интегральной оценки сейсмического риска дополнительно рассчитан индекс обрушения η , определяемый как отношение коэффициента уязвимости несущей системы K_b к коэффициенту уязвимости грунтов основания K_s . В соответствии с общепринятой международной классификацией, диапазоны значений индекса η соответствуют четырём категориям сейсмического риска: низкому (категория А, $\eta \leq 1$), умеренному (категория В, $1 < \eta < 2$), высокому (категория С, $2 < \eta < 3$) и критическому с риском обрушения (категория D, $\eta > 3$). Результаты расчёта (табл. 2) выявили наличие конструктивных зон, относящихся к категории D – в секциях I и II на уровне шестого этажа, а также в секции I на уровне третьего этажа, что определяет указанные зоны как приоритетные объекты для целенаправленных мероприятий сейсмоусиления.

Выводы

На основании проведённых инструментальных и расчётно-аналитических исследований сформулированы следующие выводы:

- Метод регистрации микросейсмических колебаний с HVSR-анализом по методике Накамуры обеспечивает корректную идентификацию динамических параметров эксплуатируемых железобетонных зданий при отсутствии проектной документации и скрытых конструктивных вмешательствах, что подтверждает его применение как инструмента неразрушающей диагностики.
- Пространственная неоднородность собственных периодов ($T_1 = 0,175\text{--}0,315$ с по секциям и этажам) подтверждает дифференцированное влияние реконструкций и пристроек на распределение жесткостных характеристик и формирование локальных аномалий динамического отклика.
- Расчёт уязвимости выявил критическое возрастание K_b/K_s до 23,3 в секции I и 8,28 в секции II на шестом этаже, что соответствует категории риска D (катастрофический, с риском обрушения) и определяет уровни PGA 12,8–320,8 см/с², при которых вероятно локальная потеря несущей способности уже при воздействиях интенсивностью 5 баллов по шкале МСК-64.
- Сопоставление с требованиями статьи 70 RABC 20.04–2020 показывает, что при $T_1 < 0,4$ с условием резонансной отстройки формально не обязательно; тем не менее, неравномерность колебательного поведения по секциям обуславливает необходимость мероприятий по выравниванию жесткостных характеристик.
- HVSR-метод особенно значим для строительных объектов, находящихся в сложных инженерно-геологических условиях – межгорных котловинах, аллювиальных отложениях, водонасыщенных и слабokonсолидированных грунтах, склоновых зонах, – где эффекты усиления колебаний осадочной толщей и изменчивость резонансных характеристик основания требуют инструментальной оценки системы «грунт–сооружение»; традиционные подходы на основе нормативных спектральных характеристик в этих условиях не обеспечивают достоверной оценки уязвимости.
- Разработанный программный комплекс для HVSR-анализа обеспечивает оперативность и воспроизводимость обработки данных и может быть рекомендован для массового обследования фонда железобетонных зданий в сейсмоактивных регионах с целью приоритизации сейсмоусиления.

Заключение

HVSR-диагностика шестиэтажного железобетонного здания 1960-х годов постройки позволила количественно охарактеризовать его динамическое состояние и выявить пространственную дифференциацию жесткостных параметров, сформировавшуюся вследствие многолетних модификаций, пристроек и эксплуатационных воздействий. Вариативность собственных периодов и амплитуд спектральных отношений в различных секциях и уровнях отражает неоднородность жесткости несущей системы и формирование локальных аномалий динамического отклика.

Идентифицированы зоны предельной сейсмической уязвимости преимущественно в верхних этажах, определяющие интегральный риск объекта при сейсмических воздействиях умеренной интенсивности, статистически вероятных для региона в течение проектного срока службы. При формальном соответствии нормативным требованиям резонансной отстройки выявленная неоднородность свидетельствует о потенциальной нестабильности отдельных зон, что обосновывает необходимость адресного усиления, выравнивания жесткостных характеристик и инструментального мониторинга.

Результаты подтверждают обоснованность применения HVSR-подхода для диагностики стареющего фонда железобетонных зданий в условиях информационной неопределённости. Особую актуальность методология приобретает для Республики Армения с её высокой сейсмической опасностью, значительным фондом зданий советской постройки и сложными инженерно-геологическими условиями межгорных котловин с эффектами усиления колебаний осадочной толщей.

Существенным прикладным направлением является сейсмическая паспортизация зданий – документирование фактических динамических характеристик, индексов уязвимости и категорий риска. Формирование паспортов на основе HVSR-измерений обеспечивает объективную базу для классификации объектов по уязвимости, обоснования очередности сейсмоусиления и периодической переоценки состояния, что востребовано для типовой застройки с утраченной проектной документацией.

Разработанный инструментарий открывает перспективы построения региональных систем мониторинга, формирования приоритетов сейсмоусиления на муниципальном и национальном уровнях, а также совершенствования нормативной базы в части учёта фактических динамических характеристик при оценке остаточного ресурса. Дальнейшие исследования целесообразно провести в направлении интеграции HVSR-данных с вероятностным анализом сейсмической опасности (PSHA) и методами нелинейного динамического анализа (IDA, IM-based assessment), что обеспечит комплексную оценку сейсмического риска с учётом региональной сейсмологической обстановки и фактического состояния объектов.

Литература

1. Агаева Л.А., Мурадов Ё.Д., Гаражаев А.Б., Эбердыев Х.Г. Инженерно-геологические условия и оценка сейсмичности площадки строительства мечети в городе Аркадаге (Туркменистан) // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 3. – С. 37–52. DOI: 10.46698/VNC.2025.95.83.001.
2. 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. – Вып. 15(1). – С. 223–231.
3. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Мкртчян М.А., Мкртчян Г.А. Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023 г. и геодинамическая модель очага сильнейшего

землетрясения ($M_w=7,8$) // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004.

4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Шманатов Г.В. Геоэкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе инструментальных данных // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 45–60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004.

5. Капустян Н.К., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Акбиев Р.Т., Мерзликин Т.И., Морозова Т.В. Инженерно-сейсмометрические сети, как геофизический метод контроля воздействий опасных природно-техногенных процессов на урбанизированные территории // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 4. – С. 60–77. DOI: 10.46698/a1779-6138-3406-a.

6. Карапетян Дж.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. DOI: 10.46698/VNC.2021.70.17.009.

7. Свалова В.Б., Заалишвили В.Б. Глубинная геодинамика и сейсмичность Кавказско-Анатолийского региона // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006.

8. Хачиян Э.Е. Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. – Ереван: Изд. «Гитутюн» НАН РА, 2015. – 555 с.

9. Berto L., Vitaliani R., Saetta A., Simioni P. Seismic assessment of existing RC structures affected by degradation phenomena // Structural Safety. – 2009. – Vol. 31. No. 4. – pp. 284–297. DOI: 10.1016/j.strusafe.2008.09.006.

10. BSRA-20.04-2020. Earthquake Engineering. Design Standards, Republic of Armenia. Yerevan, 2020. – 93 p.

11. Cosenza E., Manfredi G., Verderame G.M. Seismic assessment of gravity load designed R.C. frames: critical issues in structural performance // Journal of Earthquake Engineering. – 2002. – Vol. 6. No. S1. – pp. 101–122. DOI: 10.1080/13632460209350434.

12. Dal Moro G., Panza G. Multiple-peak HVSR curves: Management and statistical assessment // Engineering Geology. – 2021. – Vol. 297. – Art. No. 106500. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106500.

13. Ditommaso R., Mucciarelli M., Parolai S., Picozzi M. Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and time-frequency analyses // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2012. – Vol. 10. – pp. 1221–1235. DOI: 10.1007/s10518-012-9347-x.

14. Fazriati E., Azhari M.R., Hakam A., Utama W., Rosandi Y. Horizontal to vertical spectral ratio (HVSR) analysis of the passive seismic data on alluvial lithology: an example from Bandung Basin Rim // Jurnal Penelitian Pendidikan IPA. – 2023. – Vol. 9. No. 1. – pp. 402–411. DOI: 10.29303/jppipa.v9i1.2962.

15. Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Sket-Motnikar B., Zupancic P., Gosar A., Prevolnik S., Herak M., Stipcevic J., Herak D., Milutinovic Z., Olumceva T. Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2010. – Vol. 8. No. 3. – pp. 593–607. DOI: 10.1007/s10518-009-9133-6.

16. Giacomo D., Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Parolai S., Richwalski S.M. Analysis and modeling of HVSR in the presence of a velocity inversion: the case of Venosa, Italy // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2005. – Vol. 95. No. 6. – pp. 2364–2372.

17. Irie Y., Nakamura Y. Dynamic characteristics of a RC building of five stories based on microtremor measurements and earthquake observations // In: 12th World Conference on Earthquake Engineering. – Auckland, New Zealand, 2000. – Art. No. 1747.

18. Kapustian N., Antonovskaya G., Agafonov V., Neumoin K., Safonov M. Seismic monitoring of linear and rotational oscillations of the multistory buildings in Moscow // Seismic Behavior of Irregular and Complex Structures. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. – 2013. – Vol. 24. – pp. 353–363.

19. Kawase H., Nagashima F., Matsushima S., Sanchez-Sesma F.J. Application of horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratios for both microtremors and earthquake motions based on the diffuse field theory // In: 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering (10NCEE). – Anchorage, Alaska, USA, 2014. – 10 p.

20. Mucciarelli M., Gallipoli M.R., Arcieri M. The stability of the horizontal-to-vertical spectral ratio of triggered noise and earthquake recordings // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2003. – Vol. 93. – pp. 1407–1412.
21. Nakamura Y. Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor // In: *World Congress on Railway Research*. – Florence, Italy, 1997. – pp. 1–7.
22. Nakamura Y. What is the Nakamura method? // *Seismological Research Letters*. – 2019. – Vol. 90. No. 4. – pp. 1437–1443. DOI: 10.1785/0220180376.
23. Nakamura Y., Gurler E.D., Saita J., Rovelli A., Donati S. Vulnerability investigation of Roman Colosseum using microtremor // In: *12th World Conference on Earthquake Engineering*. – Auckland, New Zealand, 2000. – Art. No. 2660.
24. Sungkono, Warnana D., Triwulan, Utama W. Evaluation of buildings strength from microtremor analyses // *International Journal of Civil and Environmental Engineering IJCEE-IJENS*. – 2011. – Vol. 11. – pp. 108–114.

References

1. Agayeva L.A., Myradov Yo.D., Garajayev A.B., Eyeberdiyev H.G. Engineering-geological conditions and seismicity assessment of the construction site of a mosque in the city of Arkadag (Turkmenistan). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 3. pp. 37–52. DOI: 10.46698/VNC.2025.95.83.001. (In Russ.)
2. Anosov G.I., Drobiz M.V., Konovalova O.A., Sotnikov D.S., Chugaevich V.Ya. Evaluation of seismic stability of the educational building 3 of Immanuel Kant Russian State University using the Nakamura method. *Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*. 2010. Issue 15(1). pp. 223–231. (In Russ.)
3. Geodakyan E.G., Karapetyan Jh.K., Zaalishvili V.B., Sahakyan B.V., Hovhannisyan S.M., Mkrtchyan M.A., Mkrtchyan G.A. Regional seismotectonics of focal zones of the east Turkey earthquakes on 06 February 2023 and geodynamic model of the source of the strongest earthquake ($M_w = 7.8$). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Shmanatov G.V. Geoecological aspects of earthquake intensity formation based on instrumental data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 45–60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004. (In Russ.)
5. Kapustyan N.K., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Akbiev R.T., Merzlikin T.I., Morozova T.V. Engineering seismometric networks as a geophysical method for monitoring the impact of hazardous natural and technogenic processes on urbanized areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 4. pp. 60–77. DOI: 10.46698/a1779-6138-3406-a. (In Russ.)
6. Karapetyan J.K., Hayrapetyan H.Yu., Matevosyan G.M., Karapetyan R.K. Comparative analysis of the dynamic characteristics of various types of buildings during microseismic vibrations. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 No. 3. pp. 103–114. DOI: 10.46698/VNC.2021.70.17.009. (In Russ.)
7. Svalova V.B., Zaalishvili V.B. Deep geodynamics and seismicity of the Caucasus-Anatolian region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006. (In Russ.)
8. Khachiyan E.E. Seismic effects and prediction of structural behavior. Yerevan. Gitutyan Publishing House of NAS RA. 2015. 55 p. (In Russ.)
9. Berto L., Vitaliani R., Saetta A., Simioni P. Seismic assessment of existing RC structures affected by degradation phenomena. *Structural Safety*. 2009. Vol. 31. No. 4. pp. 284–297. DOI: 10.1016/j.strusafe.2008.09.006.
10. BSRA-20.04-2020. Earthquake Engineering. Design Standards, Republic of Armenia. Yerevan. 2020. 93 p.
11. Cosenza E., Manfredi G., Verderame G.M. Seismic assessment of gravity load designed R.C. frames: critical issues in structural performance. *Journal of Earthquake Engineering*. 2002. Vol. 6. No. S1. pp. 101–122. DOI: 10.1080/13632460209350434.
12. Dal Moro G., Panza G. Multiple-peak HVSR curves: Management and statistical assessment. *Engineering Geology*. 2021. Vol. 297. Art. No. 106500. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106500.

13. Ditommaso R., Mucciarelli M., Parolai S., Picozzi M. Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and time-frequency analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 10. pp. 1221–1235. DOI: 10.1007/s10518-012-9347-x.
14. Fazriati E., Azhari M.R., Hakam A., Utama W., Rosandi Y. Horizontal to vertical spectral ratio (HVSr) analysis of the passive seismic data on alluvial lithology: an example from Bandung Basin Rim. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. 2023. Vol. 9. No. 1. pp. 402–411. DOI: 10.29303/jppipa.v9i1.2962.
15. Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Sket-Motnikar B., Zupancic P., Gosar A., Prevolnik S., Herak M., Stipcevic J., Herak D., Milutinovic Z., Olumceva T. Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2010. Vol. 8. No. 3. pp. 593–607. DOI: 10.1007/s10518-009-9133-6.
16. Giacomo D., Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Parolai S., Richwalski S.M. Analysis and modeling of HVSr in the presence of a velocity inversion: the case of Venosa, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2005. Vol. 95. No. 6. pp. 2364–2372.
17. Irie Y., Nakamura Y. Dynamic characteristics of a RC building of five stories based on microtremor measurements and earthquake observations. In: *12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland. New Zealand. 2000. Art. No. 1747.
18. Kapustian N., Antonovskaya G., Agafonov V., Neumoin K., Safonov M. Seismic monitoring of linear and rotational oscillations of the multistory buildings in Moscow. *Seismic Behavior of Irregular and Complex Structures. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. 2013. Vol. 24. pp. 353–363.
19. Kawase H., Nagashima F., Matsushima S., Sanchez-Sesma F.J. Application of horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratios for both microtremors and earthquake motions based on the diffuse field theory. In: *10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering (10NCEE)*. Anchorage, Alaska, USA. 2014. 10 p.
20. Mucciarelli M., Gallipoli M.R., Arcieri M. The stability of the horizontal-to-vertical spectral ratio of triggered noise and earthquake recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2003. Vol. 93. pp. 1407–1412.
21. Nakamura Y. Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor. In: *World Congress on Railway Research*. Florence, Italy. 1997. pp. 1–7.
22. Nakamura Y. What is the Nakamura method? *Seismological Research Letters*. 2019. Vol. 90. No. 4. pp. 1437–1443. DOI: 10.1785/0220180376.
23. Nakamura Y., Gurler E.D., Saita J., Rovelli A., Donati S. Vulnerability investigation of Roman Colosseum using microtremor. In: *12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland. New Zealand. 2000. Art. No. 2660.
24. Sungkono, Warnana D., Triwulan, Utama W. Evaluation of buildings strength from microtremor analyses. *International Journal of Civil and Environmental Engineering IJCEE-IJENS*. 2011. Vol. 11. pp. 108–114.