

## ДОСТИЖЕНИЯ НАУКИ – ПРОИЗВОДСТВУ



УДК 550.34

**М.Н. ВОСКРЕСЕНСКИЙ, О.Р. ПАХМУРИН, В.С. МИХАЙЛОВ**

### **СЕЙСМОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВЫСОТНОГО ЖИЛОГО ДОМА С ПРИМЕНЕНИЕМ HVSR АНАЛИЗА**

Сейсמודинамический мониторинг высотного жилого дома предполагает периодическую регистрацию упругих колебаний в разных частях здания сейсмическими датчиками. Эксперимент был поставлен в два этапа: лето 2019 г., зима 2020 г. Измерения выполнялись на отечественной аппаратно-программной разработке – регистратор сейсмических сигналов «Регистр», ИГФ УрО РАН. В качестве оценки технического состояния строительного объекта были выбраны следующие динамические характеристики: частота собственных колебаний и скорость смещения. Обработка данных включает в себя HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) анализ. В рамках исследования сделано предположение о влиянии движения лифта на отклик конструкции в различных точках здания по высоте. Результаты измерений не выходят за пределы допусков, описанных в нормативной документации.

**Ключевые слова:** сейсמודинамический мониторинг, метод Накамуры, HVSR анализ, частота собственных колебаний, динамические характеристики строительных объектов.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-738-6-91-98

Под сейсמודинамическим мониторингом авторы подразумевают инженерно-сейсмометрический мониторинг строительных объектов, в рамках которого анализируются динамические характеристики зданий сейсмическими методами. Это один из способов неразрушающего контроля оценки технического состояния сооружения, где в качестве источника сигнала используется микросейсмический фон (или шум). Это результат наложения эндогенных (естественных) и техногенных (антропогенных) упругих колебаний широкого диапазона частот и чрезвычайно малых амплитуд (измеряется в микрометрах,  $10^{-6}$  м). Одно из преимуществ такого метода – отсутствие необходимости применять внешний импульсный источник возбуждения сигнала (удар), который может нежелательным образом сказаться на исследуемом объекте. Для регистрации микросейсм используется сейсмометрическая аппаратура, разработанная в Институте геофизики УрО РАН [1].

© Воскресенский М.Н., Пахмурин О.Р., Михайлов В.С., 2020

Авторы статьи отдают предпочтение экспозиционному мониторингу зданий вместо непрерывного. Первичные измерения проводятся для оценки состояния сооружения, повторные могут быть проведены через полгода для учета сезонных изменений технического состояния. При условии, что измеряемые параметры находятся в пределах нормы, последующие замеры достаточно проводить ежегодно, в противном случае, раз в квартал для оценки динамики ухудшения состояния. Отметим, что непрерывный мониторинг порождает значительное количество данных, которые в рамках решения описанной задачи являются избыточными.

В прошедшее десятилетие наблюдалось возрастание темпов строительства промышленных и гражданских объектов. Увеличение антропогенной нагрузки может оказать негативное влияние на объекты длительной эксплуатации и повышенной этажности. Отмечается рост уровня техногенной сейсмической (вибрационной) нагрузки на объекты жилой застройки. Для оценки влияния такого рода воздействия решено проанализировать сейсמודинамические характеристики здания: частота (период) собственных колебаний и максимальная скорость смещения конструкции под воздействием упругих колебаний естественного или искусственного происхождения.

Научно-исследовательская работа нацелена на обследование сейсмическими методами каркасного здания, построенного с отклонениями от проекта. Информацию об ошибках при проектировании и строительстве подтвердили технические специалисты ТГАСУ г. Томск [2]. На рис. 1, а показан внешний вид объекта исследования – одноподъездный сборно-монолитный дом, шестнадцать жилых и один технический этаж. На рис. 1, б схематично изображено расположение горизонтальных составляющих сейсмического датчика (направления восток – запад и север – юг). Результаты, полученные в ходе данной работы, можно будет использовать при изучении таких же 24 домов в Кемерово, построенных по типовому проекту.

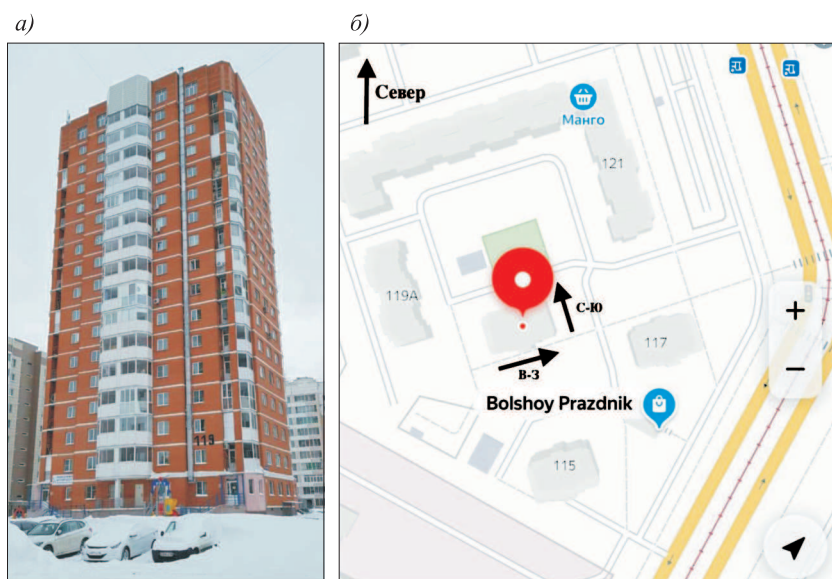


Рис. 1. Вид на фасад здания (а) и расположение дома на карте (б)

Методика состоит в точечных измерениях, равномерно распределенных по высоте дома. В каждой точке наблюдения регистрация микросейсмического фона длится 10–15 мин. Стоит отметить простоту указанного метода, которая достигается применением малогабаритного сейсморегирующего аппаратно-программного комплекса «Регистр». Он является автономным, не требует при использовании управляющего блока в виде ноутбука. Так как энергопотребление прибора минимально, то в полевых работах используется аккумулятор (12 В), весом не более 1 кг. Таким образом, вес всего носимого комплекта не превышает 2–3 кг, что немаловажно при длительных работах.

Измерения проводились дважды: первичные – в июне 2019 г. с использованием сейсмического датчика (СД-Р1) с КЭМС (коэффициент электромеханической связи), равным 0,018, и с частотным диапазоном выше 1,5 Гц; повторные – в январе 2020 г. с применением другого сейсмического датчика – СД-Р2 (КЭМС = 130 и частотный диапазон от 0,3 Гц). Для расчетов в каждой сейсмограмме выбирается несколько коротких участков длительностью 5–20 с (до 30). С помощью спектрального анализа, быстрого преобразования Фурье и усреднения всех полученных отрезков одной сейсмограммы получается среднее арифметическое всех амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) [3]. Выделяются максимальные пики, которые соответствуют частоте собственных колебаний здания в точке измерения.

Анализируя данные, полученные в июне 2019 г., можно отметить, что расчетные и измеренные характеристики здания сильно различаются. Согласно построенной модели, частота собственных колебаний в горизонтальной плоскости должна быть менее 1 Гц; экспериментальные значения оказались выше 3 Гц. Было принято решение провести аналогичные измерения с более чувствительным сейсмометрическим датчиком. Работы были выполнены в январе 2020 г., результаты приведены в табл. 1. На каждом этаже было выполнено два замера: в центре здания и на лестничной клетке (в таблицах обозначена буквой «л», цифрой «ноль» обозначен подвал). Авторы пришли к выводу, что в «летних» измерениях частотного диапазона датчика хватило, чтобы зафиксировать вторую гармонику колебаний. «Зимний» эксперимент подтвердил значение частоты собственных колебаний в горизонтальной плоскости менее 1 Гц и наличие второй гармоники на частотах 2,8–3 Гц.

Следующий существенный сейсмодинамический параметр, который рассмотрен в работе, – максимальная скорость смещения конструкций или объекта в целом под воздействием упругих колебаний естественного или искусственного происхождения. В соответствии с санитарными нормами СН 2.2.4-2.1.8.566–96 «Производственная вибрация. Вибрация в помещениях жилых и общественных зданий» устанавливается классификация предельно допустимых значений вибраций в жилых зданиях. Среднегеометрическое значение частоты в полосе исследований 0,5–4 Гц для нашего случая составляет 0,85 Гц, что соответствует полосе частот  $f = 2$  Гц, указанной в табл. 9 нормативного документа. Таким образом, максимальная виброскорость ограничена значением 320 мкм/с. В табл. 2 приведены расчеты виброскорости для каждой точки наблюдения.

В процессе спектрального анализа в каждой точке наблюдения при расчете АЧХ неоднократно проявлялось действие наведенной помехи, превышаю-

Таблица 1. Частота собственных колебаний в 2020 г., Гц

Этаж	Оси		
	Z	X (С-Ю)	Y (В-З)
17л	4,6	0,8	0,9
17	4,8	0,8	0,9
12л	4,4	0,8	0,9
12	4,9	0,8	0,9
6л	4,6	0,8	0,9
6	4,4	0,8	0,9
0л	4,3	0,8	0,9
0	4,4	0,8	0,9

Таблица 2. Максимальная измеренная виброскорость

Этаж	$V_{max}$ , мкм/с	На частоте 12 Гц $V_{max}$ , мкм/с
17л	61,2	15,3
17	43,2	8,0
12л	12,4	3,1
12	20,1	6,3
6л	35,9	7,8
6	15,0	4,3
0л	6,36	3,1
0	4,48	4,3

щей по амплитуде микросейсмический фон (рис. 2). Влияние на всех трех ортогональных осях было зафиксировано на частоте 12 Гц. Авторы статьи предположили, что данное воздействие может быть связано с движением лифта и работой двигателя, приводящего его в движение. В рамках расчета максимальной скорости смещения интересно оценить влияние помехи на изменение виброскорости. Рассмотрим полосу частот от 10 до 14 Гц со среднегеометрической частотой, равной 12 Гц (расчет приведен в табл. 2). Из санитарных норм следует ограничение по виброскорости в 110 мкм/с.

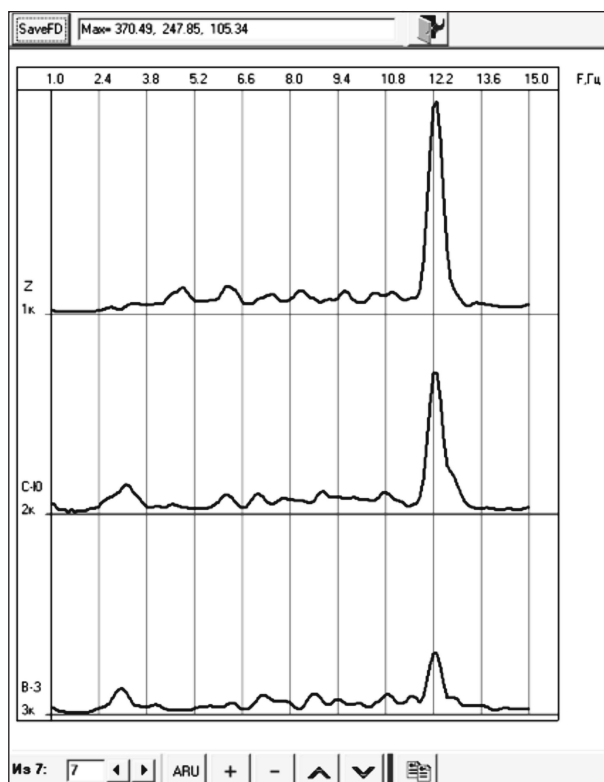


Рис. 2. Спектр помехи

Таблица 3. Коэффициенты уязвимости

Этажи	Частота 1,2 Гц		Частота 2,7 Гц	
	центр	лестница	центр	лестница
17	885,58	501,92	36,20	1,86
12	2 301,95	70,24	60,49	1,05
6	2 411,14	49,72	106,43	124,55
0	26,49	2,70	18,54	7,29

Анализ HVSR (или метод Накамуры) изначально был сформулирован автором (Yutaka Nakamura) для исследования грунта, оценки резонансной частоты и коэффициента усиления приповерхностных слоев, помимо прочего, было введено понятие коэффициента уязвимости (или коэффициента хрупкости) [4]. Применимо к грунту он выявляет «слабые места», показывает подверженность грунта терять твердое консолидированное состояние и переходить в состояние сыпучести, так называемое «разжижение грунта», при приходе интенсивных поперечных колебаний на конкретной частоте [5, 6]. Напомним, что в методе Накамуры утверждается, что поверхностные слои грунта способствуют усилению поперечной волны, не усиливая продольную волну. В процессе освоения и распространения метода некоторые исследователи использовали метод для обследования зданий и сооружений [7]. Позже сам автор метода отметил его применимость при изучении резонансных характеристик строительных конструкций [8].

В ранее опубликованной статье подробно описано применение анализа HVSR при обследовании зданий и сооружений и, собственно, метод расчета [9]. Следует отметить, что для исследуемого объекта в каждой точке наблюдения было просчитано отношение горизонтальной составляющей спектра к вертикальной и построена зависимость от частоты, так называемое распределение коэффициента усиления. Наиболее часто максимумы данных функций встречаются на частотах 1,2 и 2,7 Гц. Именно для этих двух частот рассчитаны коэффициенты уязвимости и представлены в табл. 3.

**Закключение.** 1. Применение более чувствительного и широкополосного сейсмометрического датчика оказалось оправданным. В горизонтальной плоскости были зафиксированы частоты собственных колебаний менее 1 Гц, как и в расчетной модели. Измеренные величины в 0,8 Гц являются пограничными значениями для 16–17-этажного здания согласно приложению Ж, ГОСТ Р 54859–2011 «Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний».

2. Рассчитаны значения скорости смещения в точках измерения, согласно приведенным в тексте санитарным нормам. Максимальные значения, а также величина скорости в момент воздействия помехи на частоте 12 Гц, находятся в пределах допустимого диапазона. О природе возникновения вышеописанной помехи и ее связи с движением лифта можно будет судить после дополнительных детальных исследований.

3. Анализ HVSR показал резкое отличие коэффициента уязвимости в распределении по высоте здания, особенно между 6-м и 12-м этажами. Проводя аналогию с исследованием грунта, можно утверждать, что в некоторых

точках здания выделены области, которые наиболее подвержены поперечным колебаниям на указанных частотах. Увеличение значения коэффициента уязвимости в табл. 3 объясняется тем, что частота 1,2 Гц близка к первой гармонике резонансной частоты здания. Для того чтобы делать более конкретные выводы, целесообразно провести подобные наблюдения на каждом этаже.

4. Максимальные значения распределения коэффициента усиления по частоте зафиксированы на отметках 1,2 и 2,7 Гц. Эти частоты близки по значению к резонансной частоте здания (первая и вторая гармоника). Это предположение является разумным, так как метод Накамуры используется в том числе для оценки резонансных характеристик объектов.

5. Для оценки технического состояния сооружения, в рамках рассмотрения и анализа динамических характеристик, достаточно проанализировать частоты собственных колебаний на различных этажах. Эти значения по каждой из трех ортогональных осей совпадают. Это говорит о целостности конструкции и отсутствии внутренних повреждений.

6. Можно сделать вывод, что сейсмомодинимический мониторинг является простым, наглядным и удобным методом неразрушающего контроля технического состояния здания на примере 16-этажного жилого дома.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сенин Л.Н., Сенина Т.Е., Воскресенский М.Н.* Аппаратно-программный комплекс «Регистр-SD» для изучения сейсмомодинимических характеристик объектов, находящихся под воздействием упругих колебаний // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 157–158.
2. *Пахмурин О.Р., Туровский С.В.* Оценка пространственной работы многоэтажного каркасного здания с безригельным перекрытием // Избранные доклады УНТКСМУ (65 УНТК ТГАСУ). 2019. С. 1119–1121.
3. *Медведев С.В.* (ред.). Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1977.
4. *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, No. 1. P. 25–33.
5. *Abdelnasser Mohamed, Sayed Mohamed Ali, Alaa Mostafa.* Estimation of seismic site effect at the new Tiba City proposed extension, Luxor, Egypt. NRIAG // Journal of astronomy and geophysics. 2020. Vol. 9, No. 1. P. 499–511.
6. *Asskar Choobasti, Mehran Naghizadehrokni, Sadegh Rezaei.* Liquefaction assessment by microtremor measurements in Babol city // Fifth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment Nov Osaka, Japan, 2015, insu-01433798.
7. *Аносов Г.И., Дробиз М.В., Коновалова О.А. и др.* Оценка сейсмической устойчивости учебного корпуса № 3 Российского государственного университета им. И. Канта с применением методики Накамуры // Вестник КрауНЦ. Науки о Земле. 2010. Т. 15, № 1. С. 223–231.
8. *Nakamura Y.* What Is the Nakamura Method? // Seismological Research Letters. 2019. Vol. 90, No. 4. July/August. P. 1437–1443.
9. *Сенин Л.Н., Сенина Т.Е., Воскресенский М.Н., Парыгин Г.И.* Сейсмомодинимический мониторинг инженерных сооружений с использованием аппаратно-программного комплекса «Регистр» (на примере здания станции технических газов Первоуральского новотрубного завода) // Геотехника. 2018. Т. 10, № 5-6. С. 86–93.

**Воскресенский Михаил Николаевич**, канд. техн. наук;

E-mail: Voskresenskiy.mn@gmail.com

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук (ИГФ УрО РАН), г. Екатеринбург

**Пахмурин Олег Равильевич**, доц.; E-mail: orpahmurin@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ)

**Михайлов Виктор Сергеевич**, рук.; E-mail: vsmikhailov@gmail.com

Новосибирский ЦНТИ SCAD SOFT

Получено после доработки 18.05.2020

**Voskresenskiy Mikhail Nikolaevich**, PhD; E-mail: Voskresenskiy.mn@gmail.com

Institute of Geophysics Yu.P. Bulashevich of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

**Pakhmurin Oleg Ravilievich**, Ass. Professor; E-mail: orpahmurin@mail.ru

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering (TGASU), Russia

**Mikhailov Victor Sergeevich**, Leader; E-mail: vsmikhailov@gmail.com

Novosibirsk CSTP SCAD SOFT, Russia

## **SEISMODYNAMIC MONITORING OF A HIGH-RISE APARTMENT BUILDING USING HVSR ANALYSIS**

Seismodynamic monitoring of a high-rise apartment building involves periodic recording of elastic vibrations in different parts of the building by seismic sensors. The measurements were carried out on the domestic hardware and software development – the seismic recorder "Register", IGF UB RAS (Russia). The following dynamic characteristics were chosen as an assessment of the operational reliability of the construction object – the frequency of natural vibrations and the displacement rate. Data processing includes HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) analysis. The experiment was set in two stages: summer 2019, winter 2020. As part of the study, the influence of the movement of the elevator on the response of the structure at different points of the building in height was estimated. The measurement results do not go beyond the tolerances described in the regulatory documentation.

**Key words:** seismodynamic monitoring, Nakamura method, HVSR analysis, natural frequency, dynamic characteristics of construction objects.

### REFERENCES

1. *Senin L.N., Senina T.E., Voskresenskiy M.N.* Apparato-programmnyy kompleks "Registr-SD" dlya izucheniya seysmodinamicheskikh kharakteristik ob"yektov, nakhodyashchikhsya pod vozdeystviyem uprugikh kolebaniy [Hardware-software complex "Register-SD" for studying the seismodynamic characteristics of objects under the influence of elastic vibrations]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental equipment]. 2017. No. 4. Pp. 157–158. (in Russian)
2. *Pakhmurin O.R., Turovskiy S.V.* Otsenka prostranstvennoy raboty mnogoetazhnogo karkasnogo zdaniya s bezrigel'nym perekrytiyem [Evaluation of the spatial work of a multi-storey frame building with bezel-less overlapping]. *Izbrannyye doklady UNTKSMU* [Selected reports UNTKSMU (65 UNTK TGASU)]. 2019. Pp. 1119–1121. (in Russian)
3. *Medvedev S.V.* (ed.). *Seysmicheskoye mikrorayonirovaniye* [Seismic microzoning]. Moscow, 1977. (in Russian)

4. 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, No. 1. Pp. 25–33.
5. Abdelnasser Mohamed, Sayed Mohamed Ali, Alaa Mostafa. Estimation of seismic site effect at the new Tiba City proposed extension, Luxor, Egypt. NRIAG. Journal of astronomy and geophysics. 2020. Vol. 9, No. 1. Pp. 499–511.
6. Asskar Choobbasti, Mehran Naghizadehrokni, Sadegh Rezaei. Liquefaction assessment by microtremor measurements in Babol city. Fifth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment Nov Osaka, Japan, 2015, insu-01433798.
7. Anosov G.I., Drobiz M.V., Konvalova O.A. et al. Otsenka seysmicheskoy ustoychivosti uchebnogo korpusa No. 3 Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta im. I. Kanta s primeneniym metodiki Nakamury [Assessment of the seismic stability of educational building No. 3 of the Russian State University. I. Kant using the Nakamura technique]. Vestnik KrauNTS. Nauki o Zemle [Bulletin of the KraunC. Earth Sciences]. 2010. Vol. 15, No. 1. Pp. 223–231. (in Russian)
8. Nakamura Y. What Is the Nakamura Method? Seismological Research Letters. 2019. Vol. 90, No. 4. July/August. Pp. 1437–1443.
9. Senin L.N., Senina T.E., Voskresenskiy M.N., Parygin G.I. Seysmodinamicheskiy monitoring inzhenernykh sooruzheniy s ispol'zovaniyem apparatno-programmnogo kompleksa «Registr» (na primere zdaniya stantsii tekhnicheskikh gazov Pervoural'skogo novotrubnogo zavoda) [Seismodynamic monitoring of engineering structures using a hardware-software complex “Register” (on the example of the building of the technical gas station of the Pervouralsk Novotrubny Factory)]. Geotekhnika [Geotechnika]. 2018. Vol.10, No. 5-6. Pp. 86–93. (in Russian)