

УДК 624.042.7; 624.01; 550.34

DOI [10.37153/2618-9283-2022-5-47-66](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-5-47-66)

### **Теоретические и экспериментальные исследования**

#### **Опыт динамического мониторинга сейсмоизолированного здания морского вокзала, расположенного в г. Петропавловске-Камчатском**

Гизятуллин И.Р.<sup>1</sup>, Бубис А.А.<sup>2</sup>, Смирнова Л.Н.<sup>3</sup>, Ставницер Л.Р.<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3,4</sup> АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

**Аннотация:** *Введение.* Рассматривается проблема и подчеркивается актуальность исследования поведения зданий и сооружений с системами сейсмоизоляции в виде резинометаллических опор в условиях реальных сейсмических воздействий, а также оценки их технического состояния после сейсмических событий. Приводится опыт исследования поведения сейсмоизолированных зданий при реальных сейсмических воздействиях за рубежом и в России.

*Материалы и методы.* Исследуются динамические параметры железобетонного здания с системой сейсмоизоляции в виде резинометаллических опор со свинцовыми сердечниками. Регистрация сейсмических колебаний здания выполнена стационарной станцией динамического мониторинга. Результаты обработки записей получены на основе интерпретации данных мониторинга, включая гармонический анализ, определение спектральной плотности мощности и передаточных функций сигналов, а также применение методов вейвлет-преобразования.

*Результаты.* Приведены данные динамического мониторинга сейсмоизолированного здания морского вокзала, расположенного в г. Петропавловск-Камчатский, за отчетный 2021 год мониторинга. Выполнен анализ реакции и динамических параметров здания во время наиболее интенсивных сейсмических событий за отчетный период.

*Выводы.* Анализ результатов показал, что система сейсмоизоляции здания при землетрясениях слабой интенсивности работает в области начальной жесткости сейсмоизолирующих опор, а динамические параметры сейсмоизолированного здания зависят от интенсивности сейсмического воздействия. Сделан вывод о том, что частотно-временной анализ с применением методов вейвлет-преобразования имеет преимущества при анализе данных динамического мониторинга зданий и сооружений с системами сейсмоизоляции перед преобразованием Фурье. Методы анализа данных динамического мониторинга, описанные в настоящей статье, могут эффективно использоваться для оценки динамических параметров и последующего анализа их изменения в процессе эксплуатации зданий и сооружений с системами сейсмоизоляции. Исследование, представленное в настоящей статье, показывает, что с помощью динамического мониторинга зданий и сооружений можно получить более полное и детальное представление об их динамическом поведении, выявить повреждения в конструктивной системе здания или сооружения, обнаружить их нежелательные или специфические реакции, которые могли быть не учтены при проектировании.

**Ключевые слова:** динамический мониторинг, резинометаллические опоры, сейсмическая изоляция, система сейсмоизоляции

@ Гизятуллин И.Р., Бубис А.А., Смирнова Л.Н., Ставницер Л.Р., 2022

**Для цитирования:** Гизятуллин И.Р., Бубис А.А., Смирнова Л.Н., Ставницер Л.Р. Опыт динамического мониторинга сейсмоизолированного здания морского вокзала, расположенного в г. Петропавловске-Камчатском // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 5. С. 47–66. DOI: [10.37153/2618-9283-2022-5-47-66](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-5-47-66)

### ***Theoretical and experimental studies***

#### **Experience of dynamic monitoring of a base isolated building of a marine station located in Petropavlovsk-Kamchatsky city**

**Giziatullin I.R.<sup>1</sup>, Bubis A.A.<sup>2</sup>, Smirnova L.N.<sup>3</sup>, Stavnitser L.R.<sup>4</sup>**  
<sup>1,2,3,4</sup> JSC RCC

**Abstract: Introduction.** The problem is considered and the relevance of studying the behavior of buildings and structures with seismic isolation systems using lead rubber bearing under real seismic impact, as well as assessing their technical condition after the earthquake, is emphasized. The experience of studying the behavior of base isolated buildings under real seismic impact abroad and in Russia is given.

**Materials and methods.** The dynamic parameters seismic isolation of a reinforced concrete building using lead rubber bearing are investigated. Registration of seismic vibrations of the building was performed by a stationary station for dynamic monitoring. The results of processing the records were obtained based on the interpretation of monitoring data, including harmonic analysis, determination of the power spectral density and signal transfer functions, as well as the application of wavelet transform methods.

**Results.** The data of dynamic monitoring of the seismically isolated building of the sea station located in the city of Petropavlovsk-Kamchatsky for the reporting year 2021 of monitoring are presented. The analysis of the reaction and dynamic parameters of the building during the most intense seismic events for the reporting period was performed.

**Conclusions.** The analysis of the results showed that the system of seismic isolation of the building during earthquakes of low intensity operates in the area of the initial rigidity of the seismic isolation supports, and the dynamic parameters of the seismically isolated building depend on the intensity of the seismic impact. It is concluded that the time-frequency analysis using wavelet transform methods has advantages in the analysis of dynamic monitoring data of buildings and structures with seismic isolation systems over the Fourier transform. The methods for analyzing dynamic monitoring data described in this article can be effectively used to assess dynamic parameters and then analyze their changes during the operation of base isolated buildings and structures. The study presented in this article shows that with the help of dynamic monitoring of buildings and structures, one can get a more complete and detailed understanding of their dynamic behavior, identify damage in the structural system of a building, and detect their undesirable or specific reactions that could not be taken into account when designing.

**Keywords:** dynamic monitoring, lead rubber bearing, seismic isolation, seismic isolation system

**For citation:** Giziatullin I.R., Bubis A.A., Smirnova L.N., Stavnitser L.R. Experience of dynamic monitoring of a base isolated building of a marine station located in Petropavlovsk-

Kamchatsky city. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 5, pp. 47–66. (In Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2022-5-47-66](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-5-47-66)

## ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая изоляция – это один из наиболее эффективных способов сейсмозащиты как конструктивной системы здания или сооружения в целом, так и несущих конструкций, а также материальных ценностей внутри здания или сооружения. Наиболее распространенными среди них являются системы сейсмоизоляции в виде резинометаллических опор. Резинометаллические опоры широко применяются в новом строительстве, при реконструкции и повышении сейсмостойкости существующих зданий и сооружений. Для обеспечения эффективности, надежности и механической безопасности конструктивных решений, в соответствии с нормативными требованиями СП 14.13330.2018 [1], проектирование зданий и сооружений с системами сейсмоизоляции выполняется при научно-техническом сопровождении.

Совершенствование теории сейсмостойкости, а также использование систем сейсмозащиты нуждается в апробации их на практике, в связи с чем остаются актуальными вопросы исследования поведения зданий и сооружений с такими системами в условиях реальных сейсмических воздействий, а также оценки их технического состояния после сейсмических событий. Ввиду существенной нелинейной работы резинометаллических опор, динамические параметры здания в зависимости от уровня внешнего воздействия всегда будут различными, что является основной проблемой контроля их технического состояния традиционными методами. При этом внешний вид резинометаллических опор не является достаточным показателем их эксплуатационной надежности и механической безопасности. Поэтому здания и сооружения с системами сейсмоизоляции в виде резинометаллических опор следует оснащать стационарными станциями динамического мониторинга. Мониторинг динамического поведения зданий и сооружений с системами сейсмоизоляции имеет основополагающее значение для оценки их действительной работы в условиях реальных землетрясений, анализа эффективности принятых конструктивных решений, а также оценки их технического состояния после сейсмических событий. На сегодняшний день имеются некоторые единичные результаты исследования поведения сейсмоизолированных зданий при реальных сейсмических воздействиях за рубежом [1-21] и в России [22–25].

Центром исследований сейсмостойкости сооружений ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» в Камчатском крае и Сахалинской области смонтированы стационарные станции и выполняется мониторинг четырех сейсмоизолированных зданий. Три из них являются зданиями береговой охраны пограничного управления Федеральной службы безопасности Российской Федерации и относятся к объектам повышенной секретности, в связи с чем динамический мониторинг указанных зданий выполняется в режиме регистрации реакции здания во время сейсмических событий и сохранения этих данных на физический носитель, расположенный в здании. При необходимости, в процессе периодического обследования зданий или после землетрясений умеренной и сильной интенсивности, эта информация может быть получена и проанализирована. Динамический мониторинг четвертого объекта – здания морского вокзала, расположенного в г. Петропавловск-Камчатский, выполняется в

режиме регистрации реакции здания во время сейсмических событий и непрерывной передачи данных по установленным каналам связи.

В настоящей статье рассматривается опыт ЦИСС ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко и приведены результаты динамического мониторинга здания морского вокзала за отчетный 2021 год мониторинга.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом мониторинга является здание морского вокзала, состоящее из двух отдельных динамически независимых блоков, разделенных антисейсмических швом. Блоки предусмотрены разными как по этажности, так и по размерам в плане. Первый блок – четырехэтажный, высотой не более 18 м, прямоугольной формы в плане, с габаритными размерами 57,6 x 16,0 м. Второй блок – пятиэтажный, высотой не более 20,1 м, прямоугольной формы в плане, с габаритными размерами 32,0x19,2 м. Внешний вид здания показан на рисунке 1а. Конструктивная система обоих блоков здания – монолитный железобетонный рамно-связевый каркас с монолитными железобетонными диафрагмами жесткости. Для обеспечения сейсмозащиты в конструктивной системе здания была предусмотрена система сейсмоизоляции в виде резинометаллических опор со свинцовыми сердечниками. Общий вид здания в уровне сейсмоизолирующего слоя представлен на рисунке 1б.

В 2016 году здание морского вокзала было оснащено стационарной станцией динамического мониторинга, включающей в себя два створа датчиков ускорений (акселерометров), расположенных в двух независимых динамических блоках здания, и обеспечивающей регистрацию колебаний объекта во время землетрясений. Опорные точки регистрации ускорений колебаний здания располагаются в 3-х характерных уровнях (рис. 1с) и записывают ускорения колебаний объекта в трех взаимно перпендикулярных направлениях N (вдоль здания), E (поперек здания) и Z (вертикально).

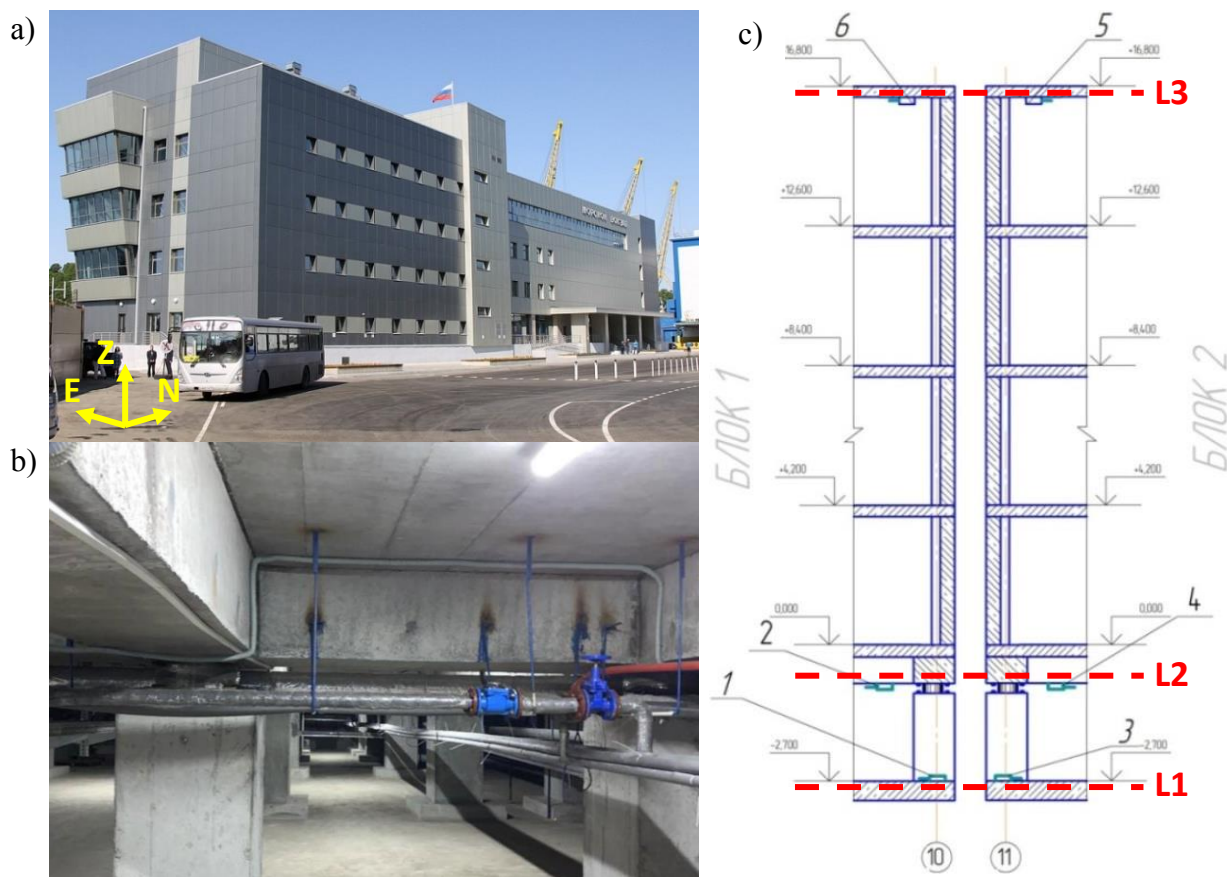


Рисунок 1 – Общий вид здания (а) и сейсмоизолирующего слоя (б). Схема расстановки датчиков в здании (с)

Figure 1 – General view of the building (a) and seismic isolation layer (b). Layout of sensors in the building (c)

Уровень «L1» – отметка верха (обреза) фундамента: для регистрации сейсмических колебаний, подходящих к системе сейсмоизоляции.

Уровень «L2» – отметка верха резинометаллической опоры: для регистрации сейсмических колебаний на выходе из системы сейсмоизоляции.

Уровень «L3» – отметка низа плиты покрытия: для регистрации сейсмических колебаний в уровне верха здания.

Два акселерометра в уровне обреза фундамента работают как триггер, и, когда ускорение в точках установки указанных датчиков превышает предустановленный порог в  $0,1\text{m/s}^2$ , станция мониторинга переходит в режим регистрации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее интенсивные землетрясения за отчетный 2021 год динамического мониторинга с их наименьшими эпицентрными расстояниями до здания произошли 17.01.2021, 16.03.2021, 17.04.2021, 13.07.2021, 18.10.2021. Указанные сейсмические события условно обозначены EQ1-EQ5 соответственно. Эпицентры рассматриваемых сейсмических событий показаны на рисунке 2, а в таблице 1 приведены их основные параметры. Оценки параметров сейсмических событий были выполнены с

использованием данных, полученных на научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» [26, 27], и приняты согласно данным информационного ресурса Камчатского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук».

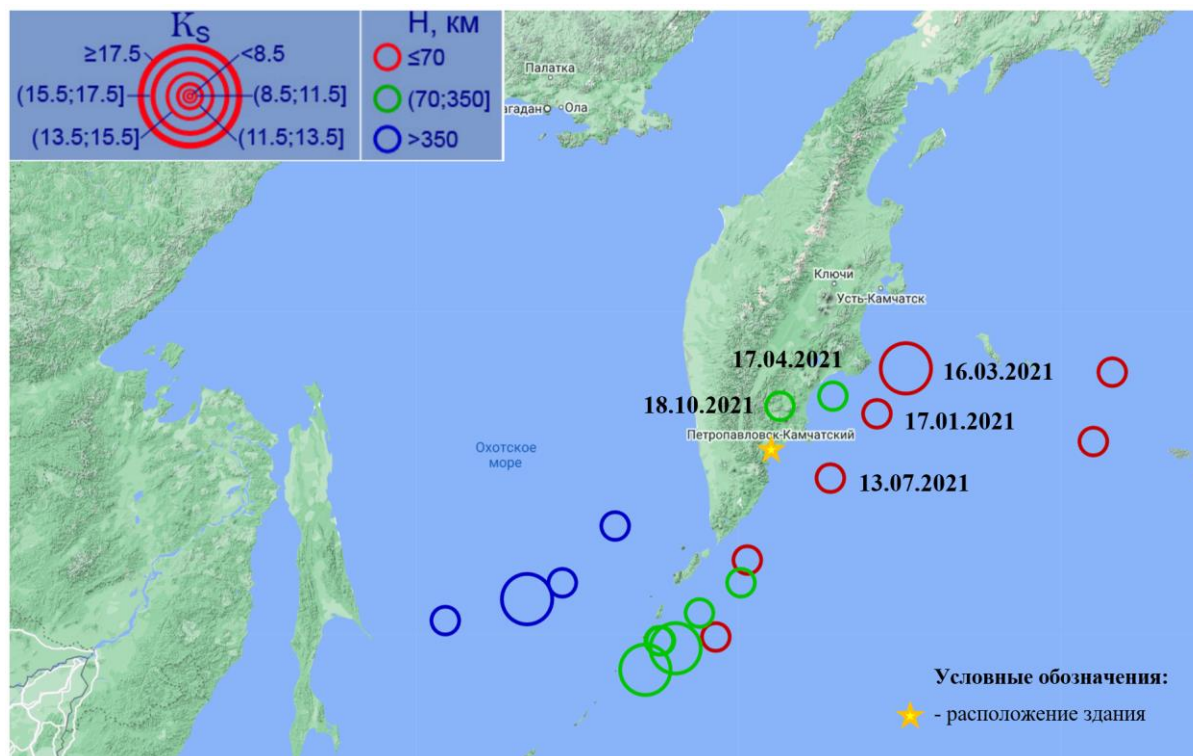


Рисунок 2 – Расположение эпицентров рассматриваемых землетрясений

Figure 2 – Location of epicenters of considered earthquakes

Максимальное значение ускорения горизонтальных колебаний основания фундамента обоих блоков здания не превышает  $0,88 \text{ см/с}^2$  для землетрясения 17.01.2021,  $3,31 \text{ см/с}^2$  для землетрясения 16.03.2021,  $3,66 \text{ см/с}^2$  для землетрясения 17.04.2021,  $1,51 \text{ см/с}^2$  для землетрясения 13.07.2021,  $1,81 \text{ см/с}^2$  для землетрясения 18.10.2021, что соответствует значениям сейсмических воздействий интенсивностью до 3 баллов по шкале MSK-64.

Таблица 1 – Параметры рассматриваемых сейсмических событий

Table 1 – Parameters of considered seismic events

Обозначение землетрясения	Дата и время	Координаты эпицентра	Глубина очага, км	Магнитуда	Расстояние от эпицентра до здания, км
EQ1	17.01.2021, 08:31	53.72 с.ш. 162.32 в.д.	48	5,7	258
EQ2	16.03.2021, 18:38	54.64 с.ш. 163.35 в.д.	64	6,6	357
EQ3	17.04.2021, 15:45	54.08 с.ш. 160.79 в.д.	71	5,9	185
EQ4	13.07.2021, 02:28	52.37 с.ш. 160.73 в.д.	51	5,7	165
EQ5	18.10.2021, 08:24	53.89 с.ш. 158.97 в.д.	186	5,9	100

Наибольшая реакция здания была получена при анализе сейсмических событий EQ2 и EQ3, произошедших 16.03.2021 и 17.04.2021 соответственно. В настоящей статье представлены результаты обработки записей, полученных для указанных сейсмических событий.

В процессе анализа данных динамического мониторинга была выполнена процедура цифровой фильтрации с применением полосового фильтра Чебышева 6-го порядка с целью получения записей, исключаящих как инфранизкие, так и высокочастотные помехи, всегда присутствующие в аналого-цифровой аппаратуре и оказывающие негативное влияние на информативность полезного сигнала. Результаты анализа получены на основе интерпретации данных мониторинга, включая гармонический анализ, определение спектральной плотности мощности (СПМ) и передаточных функций сигналов, а также применение методов вейвлет-преобразования.

На рисунке 3, в качестве примера, приведены фрагменты записей наибольших горизонтальных (в направлении «Е») ускорений колебаний здания в точках 3, 4 и 5, находящихся соответственно в уровнях L1, L2 и L3 блока № 2 здания для сейсмических событий EQ2 и EQ3 соответственно. Максимальные горизонтальные ускорения в уровне обреза фундамента для сейсмических событий EQ2 и EQ3 составили не более  $3,31 \text{ см/с}^2$  и  $3,66 \text{ см/с}^2$ , соответственно, в то время как в уровне верха сейсмоизолирующих опор они не превышали  $0,56 \text{ см/с}^2$  и  $0,84 \text{ см/с}^2$ , соответственно.

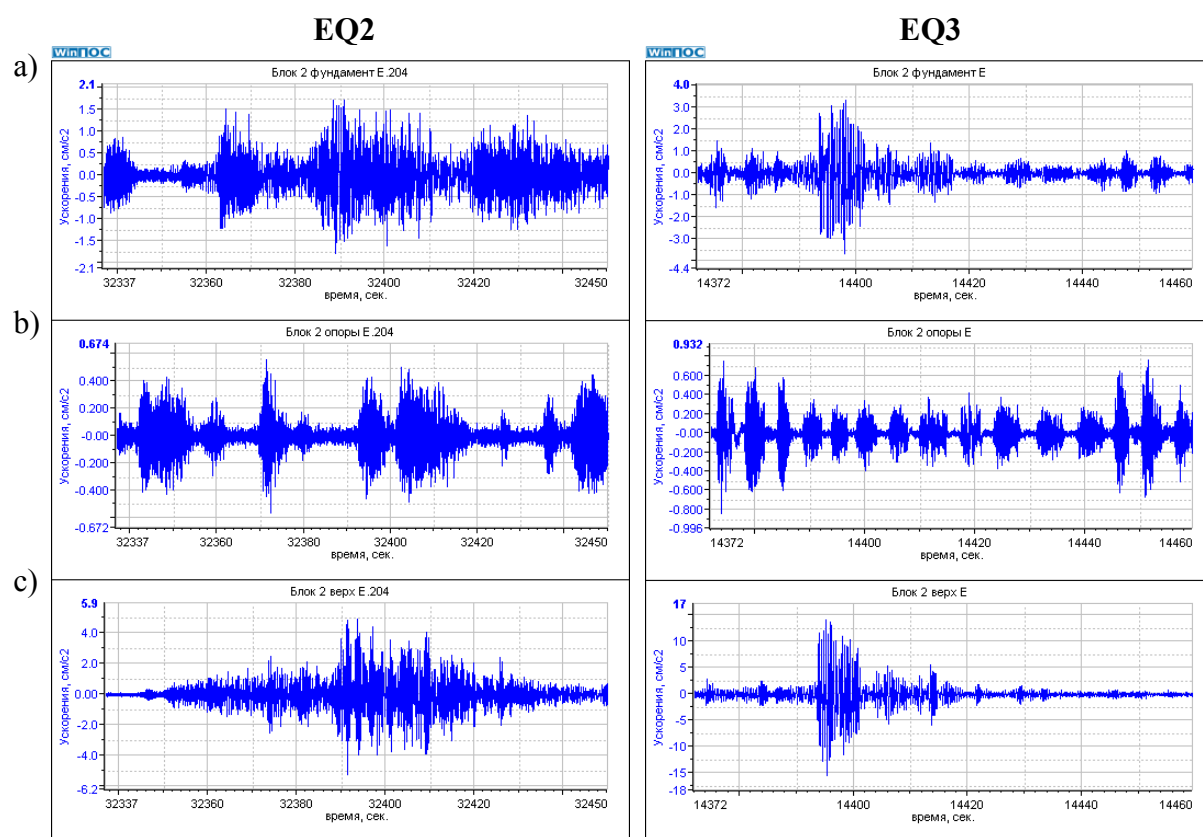


Рисунок 3 – Фрагменты записи ускорений горизонтальных колебаний в направлении «Е» в точках 3, 4 и 5 находящихся соответственно в уровнях L1 (а), L2 (б) и L3 (с) блока № 2 здания для сейсмических событий EQ2 и EQ3 соответственно

Figure 3 – Fragments of the recording of accelerations of horizontal vibrations in the direction "E" at points 3, 4 and 5 located respectively at the levels L1 (a), L2 (b) and L3 (c) of block №2 of the building for seismic events EQ2 and EQ3, respectively

По результатам анализа записей горизонтальных ускорений колебаний здания можно отметить, что с увеличением амплитуды ускорений в уровне обреза фундамента (L1) ускорения в уровне верха сейсмоизолирующих опор (L2) снижаются. Несмотря на незначительную амплитуду ускорений колебаний здания при переходе через сейсмоизолирующий слой происходит снижение уровня горизонтальных ускорений, однако, по высоте здания ускорения возрастают и достигают  $5,2 \text{ см/с}^2$  и  $15,42 \text{ см/с}^2$  в уровне L3 для сейсмических событий EQ2 и EQ3 соответственно. Причина возрастания горизонтальных ускорений по высоте сейсмоизолированной части здания (суперструктуры) во время землетрясений небольшой интенсивности заключается в том, что система сейсмоизоляции при слабых колебаниях работает в области начальной жесткости сейсмоизолирующих опор, в результате здание ведет себя больше как традиционное, защемленное в основании, здание, вызывая возрастание ускорений по высоте суперструктуры.

На рисунке 4 приведены СПМ вышеуказанных фрагментов записей наибольших горизонтальных (в направлении «Е») ускорений колебаний здания в точках 3, 4 и 5, находящихся соответственно в уровнях L1, L2 и L3 блока № 2 здания для сейсмических событий EQ2 и EQ3 соответственно.



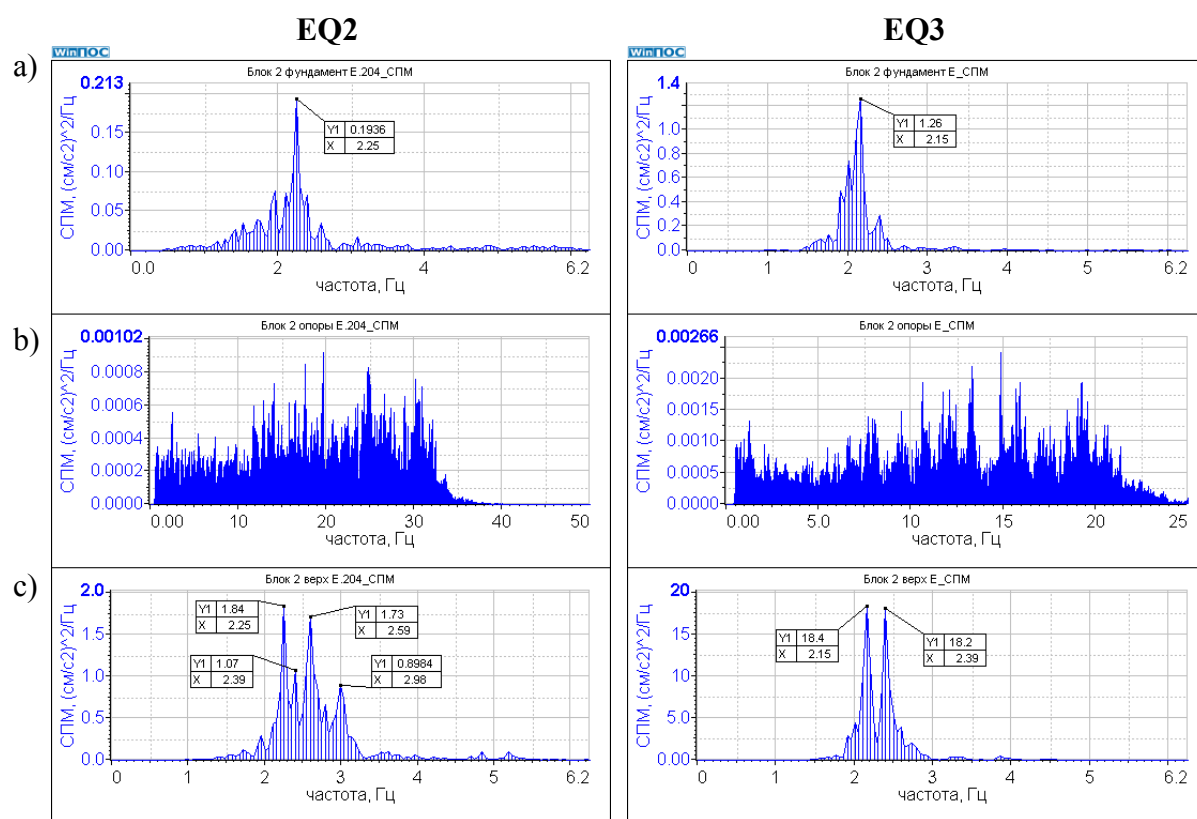


Рисунок 4 – СПМ записей ускорений горизонтальных колебаний в направлении «Е» в точках 3, 4 и 5 находящихся соответственно в уровнях L1(a), L2 (b) и L3 (c) блока № 2 здания для сейсмических событий EQ2 и EQ3 соответственно

Figure 4 – PSD records of accelerations of horizontal vibrations in the direction "E" at points 3, 4 and 5 located respectively at the levels L1(a), L2 (b) and L3 (c) of block № 2 of the building for seismic events EQ2 and EQ3, respectively

На графиках можно отметить несколько ярко выраженных пиков, которые соответствуют преобладающим гармоникам в обработанных сигналах. В СПМ записей горизонтальных ускорений колебаний в уровне обреза фундамента (L1) блока № 2 здания обозначились выраженные локальные максимумы на частоте 2,25 Гц и 2,15 Гц для сейсмических событий EQ2 и EQ3 соответственно. В СПМ записей горизонтальных ускорений колебаний в уровне верха сейсмоизолирующих опор (L2) блока № 2 здания отсутствуют выраженные локальные максимумы для соответствующих записей обоих сейсмических событий. В СПМ записей горизонтальных ускорений колебаний в уровне перекрытия 4-го этажа (L3) блока № 2 здания обозначились выраженные локальные максимумы на частотах 2,25 Гц, 2,39, 2,59 Гц и 2,98 Гц для сейсмического события EQ2 и 2,15 Гц и 2,39 Гц для сейсмического события EQ3.

Передаточные функции систем «фундамент – верх сейсмоизолирующих опор», «верх сейсмоизолирующих опор – перекрытие 4-го этажа», «фундамент – перекрытие 4-го этажа» по направлениям «Е» и «N» здания для сейсмических событий EQ2 и EQ3 приведены на рисунках 5 и 6 соответственно.

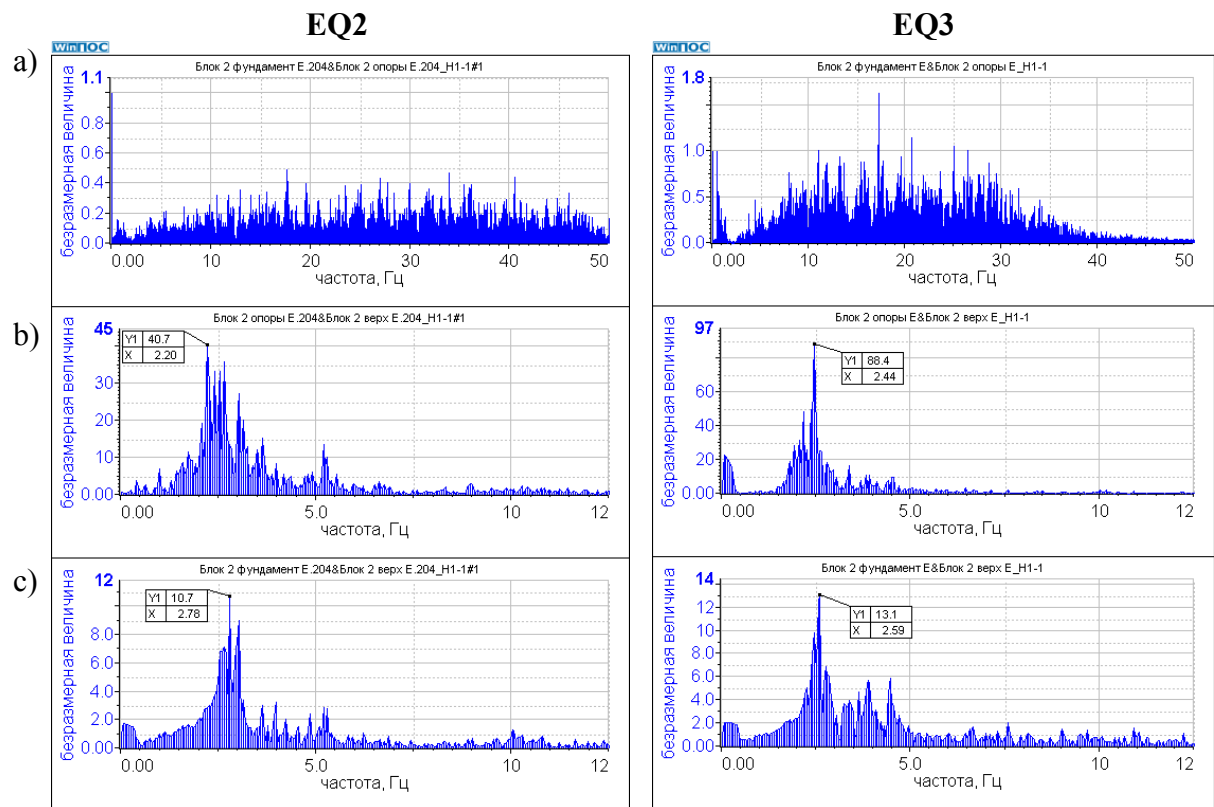


Рисунок 5 – Передаточные функции систем: «фундамент – верх сейсмоизолирующих опор» (а), «верх сейсмоизолирующих опор – перекрытие 4-го этажа» (б), «фундамент – перекрытие 4-го этажа» (с) в направлении «N» блока №2 здания

Figure 5 – Transfer functions of the system: «foundation – top of seismic isolation bearing» (a), «top of base isolation bearing – 4th floor ceiling» (b), «foundation – 4th floor ceiling» (c) in the direction «N» block № 2 of the building

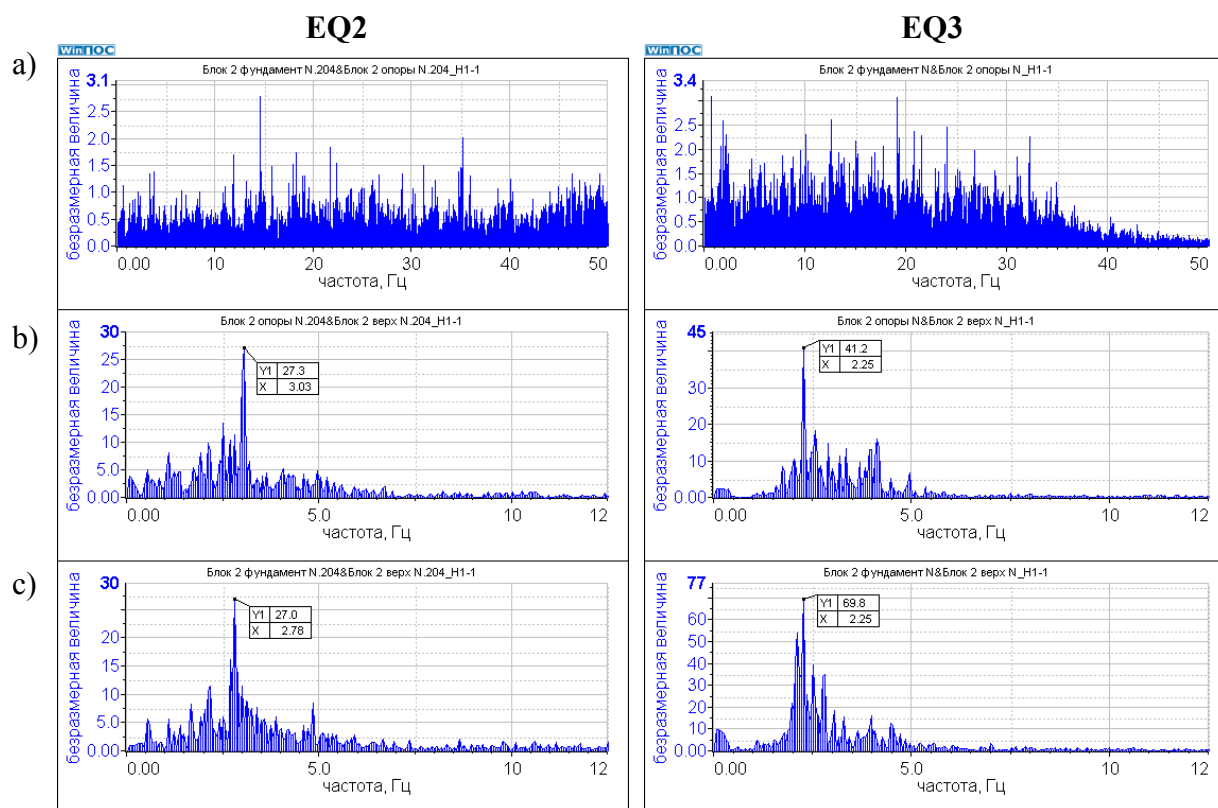


Рисунок 6 – Передаточные функции систем «фундамент – верх сейсмоизолирующих опор» (а), «верх сейсмоизолирующих опор – перекрытие 4-го этажа» (б), «фундамент – перекрытие 4-го этажа» (с) в направлении «Е» блока №2 здания

Figure 6 – Transfer functions of the system: «foundation – top of base isolation bearing» (a), «top of seismic isolation bearing – 4th floor ceiling» (b), «foundation – 4th floor ceiling» (c) in the direction «E» block № 2 of the building

Передаточные функции системы «верх сейсмоизолирующих опор – перекрытие 4-го этажа» блока №2 здания отражают динамические характеристики суперструктуры. На передаточных функциях системы «верх сейсмоизолирующих опор – перекрытие 4-го этажа» в направлении «Е» блока №2 здания обозначились выраженные локальные максимумы на частотах 2,2 Гц и 2,44 Гц для сейсмических событий EQ2 и EQ3 соответственно. На передаточных функциях системы «верх сейсмоизолирующих опор – перекрытие 4-го этажа» в направлении «N» блока №2 здания обозначились выраженные локальные максимумы на частотах 3,03 Гц и 2,25 Гц для сейсмических событий EQ2 и EQ3 соответственно.

Передаточные функции системы «фундамент – перекрытие 4-го этажа» блока №2 здания отражают динамические характеристики здания в целом. На передаточных функциях системы «фундамент – перекрытие 4-го этажа» в направлении «Е» блока №2 здания обозначились выраженные локальные максимумы на частотах 2,78 Гц и 2,59 Гц для сейсмических событий EQ2 и EQ3 соответственно. На передаточных функциях системы «фундамент – перекрытие 4-го этажа» в направлении «N» блока №2 здания обозначились выраженные локальные максимумы на частотах 3,78 Гц и 2,25 Гц для сейсмических событий EQ2 и EQ3 соответственно.

Поскольку динамическое поведение нелинейных систем при сейсмическом воздействии представляет собой сложный нестационарный процесс, для оценки изменения динамических параметров здания с системой сейсмоизоляции во времени в настоящем исследовании применяется алгоритм вейвлет-анализа с использованием вейвлета типа Морле. Особенностью вейвлет-преобразования является возможность анализа сигнала с локализацией одновременно по времени и по частоте. Теория вейвлет-преобразования стала одним из быстро развивающихся математических инструментов обработки сигналов благодаря своим многочисленным отличительным достоинствам с тех пор, как она была впервые выдвинута А. Гроссманом и Ж. Морле в 1980-х годах [28]. Дальнейшее развитие современной теории вейвлет-преобразования связано с именами С. Малла [29], И. Мейера [30, 31], И. Добеши [32] и многих других. В настоящее время вейвлет-анализ превратился в мощнейший инструмент изучения частотно-временной структуры сигналов, широко используемый почти во всех естественных науках и многих областях техники [33].

Примеры вейвлет-преобразования записей наибольших горизонтальных (в направлении «Е») ускорений колебаний в уровне L3 блока № 2 здания показаны на рисунках 7–8 для сейсмических событий EQ2 и EQ3 соответственно. На вейвлет-спектрограммах сигналов, приведенных на рисунке 7, видно, что основной пик частоты во время менее интенсивной части сейсмического воздействия (временной интервал до 32385 с) сосредоточен в области 2,8 Гц и падает до 2,3 Гц во время наиболее интенсивной части сейсмического воздействия (временной интервал 32385 – 32395 с). Ближе к окончанию сейсмического воздействия, когда амплитуда колебаний становится меньше, собственная частота колебаний здания увеличивается до 2,7 Гц.

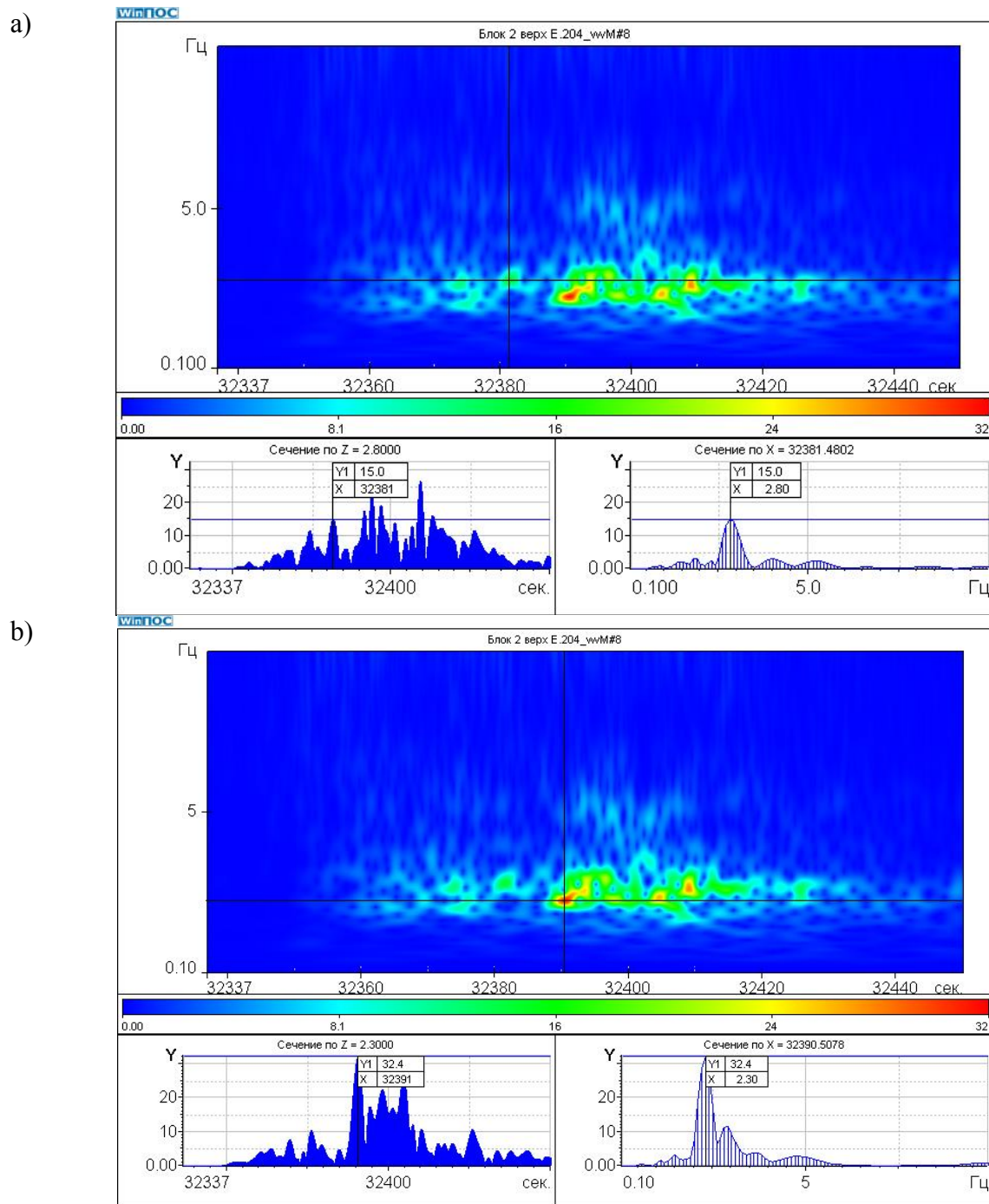


Рисунок 7 – Вейвлет-спектрограммы записей горизонтальных (в направлении «Е») ускорений колебаний в уровне перекрытия 4-го этажа блока № 2 здания для сейсмического события EQ2. «Локальный» спектр, посчитанный для отдельного максимума амплитуды сигнала в момент времени 32381 с (а) и в момент времени 32391 с (б)

Figure 7 – Wavelet spectrograms of records of horizontal (in the «E» direction) accelerations of vibrations at the level of the 4th floor ceiling of block №2 of the building for the seismic event EQ2. «Local» spectrum calculated for a separate maximum of the signal amplitude at time 32381 s (a) and at time 32391 s (b)

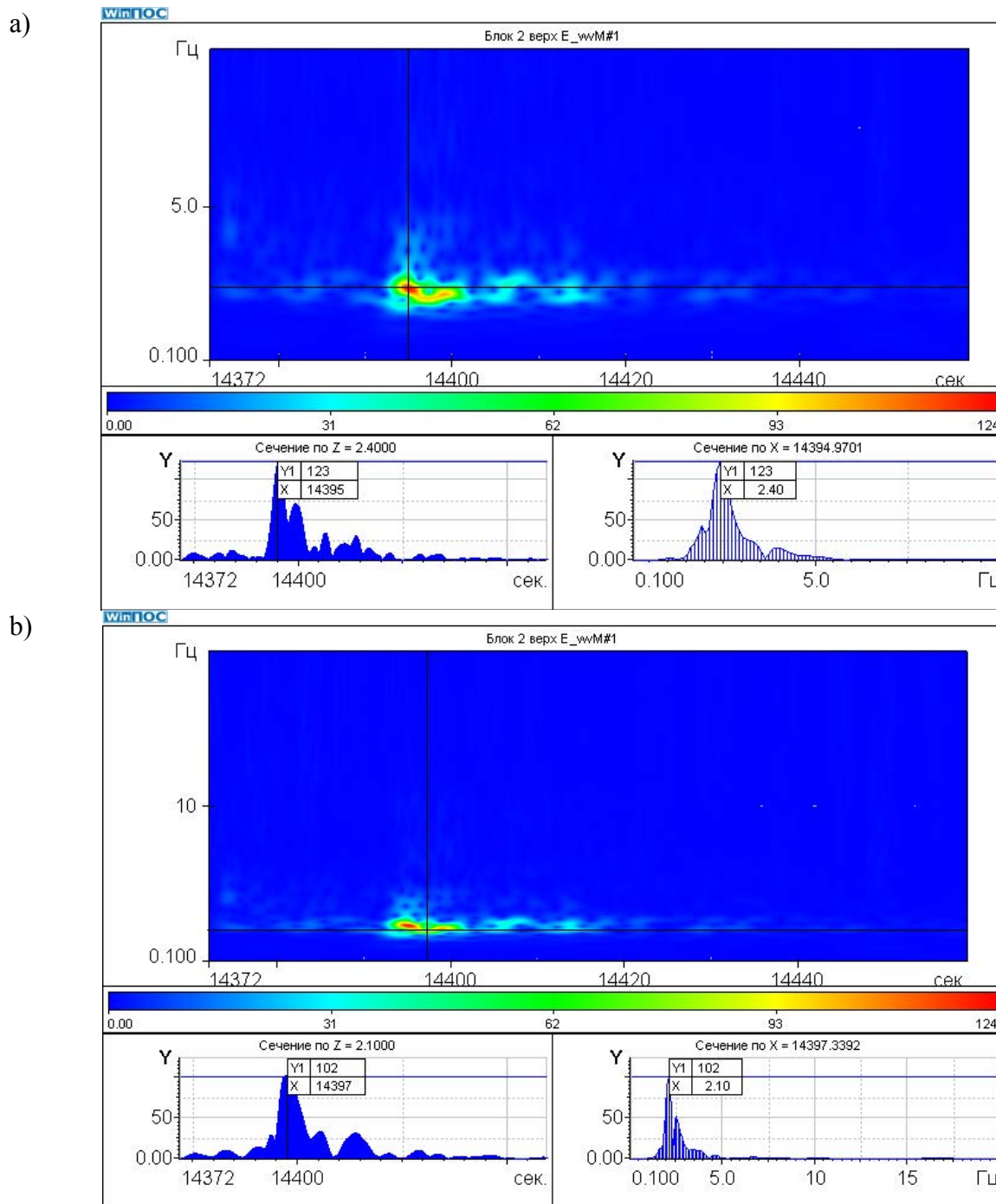


Рисунок 8 – Вейвлет-спектрограммы записей горизонтальных (в направлении «Е») ускорений колебаний в уровне перекрытия 4-го этажа блока № 2 здания для сейсмического события EQ3. «Локальный» спектр, посчитанный для отдельного максимума амплитуды сигнала в момент времени 14395 с (а) и в момент времени 14397 с (б)

Figure 8 – Wavelet spectrograms of records of horizontal (in the «E» direction) accelerations of vibrations at the level of the 4th floor ceiling of block №2 of the building for the seismic event EQ3. «Local» spectrum calculated for a separate maximum of the signal amplitude at time 14395 s (a) and at time 14397 s (b)

На вейвлет-спектрограммах сигналов, приведенных на рисунке 8, видно, что основной пик частоты в точке начала интенсивной части сейсмического воздействия (временной интервал до 14395 с) сосредоточен в области 2,4 Гц и падает до 2,1 Гц во время наиболее интенсивной части сейсмического воздействия (временной интервал 14395–14400 с). Ближе к окончанию интенсивной части сейсмического воздействия, когда амплитуда колебаний становится меньше, собственная частота колебаний здания увеличивается до 2,21 Гц.

Примеры вейвлет-преобразования записей наибольших горизонтальных (в направлении «Е») ускорений колебаний в уровне L3 блока № 2 здания, приведенные на рисунках 7–8, показывают, что собственные частоты колебаний сейсмоизолированного здания изменяются во время сейсмических событий и существенно зависят от их интенсивности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей статье были рассмотрены и проанализированы данные динамического мониторинга сейсмоизолированного здания морского вокзала, расположенного в г. Петропавловск-Камчатский во время наиболее интенсивных сейсмических событий, зарегистрированных в 2021 году. Во время всех зарегистрированных сейсмических событий за указанный год максимальные горизонтальные ускорения в уровне фундамента не превышали  $4 \text{ см/с}^2$ . Колебания такого уровня не могут вызвать появление существенных повреждений в несущих конструкциях здания, но позволяют получить представление о его текущих динамических параметрах.

Основные результаты можно резюмировать следующим образом.

1. Система сейсмоизоляции здания при землетрясениях слабой интенсивности работала в области начальной жесткости резинометаллических опор, наблюдался рост горизонтальных ускорений по высоте суперструктуры. Текущие значения зарегистрированных ускорений не являются проблемой с точки зрения механической безопасности или комфортности пребывания людей в здании. При землетрясениях умеренной и сильной интенсивности предполагается, что податливость системы сейсмоизоляции будет в значительной степени доминировать в общей реакции здания. В результате ожидается, что пиковые горизонтальные ускорения по высоте суперструктуры значительно снизятся по сравнению с ускорениями в уровне низа системы сейсмоизоляции.

2. Динамические параметры сейсмоизолированного здания зависят от интенсивности сейсмического воздействия. Так, по мере увеличения амплитуды колебаний субструктуры и достижения наиболее интенсивной части сейсмического воздействия, наблюдается снижение собственной частоты колебаний сейсмоизолированного здания, что указывает на увеличение податливости здания, как прямое следствие функционирования системы сейсмоизоляции.

3. Частотно-временной анализ с применением методов вейвлет-преобразования имеет преимущества при анализе данных динамического мониторинга зданий и сооружений с системами сейсмоизоляции перед преобразованием Фурье. Вейвлет-анализ позволяет проследить за изменением спектральных свойств сигнала со временем и указать, какие частоты доминируют в сигнале.

4. Оценку эффективности, надежности и механической безопасности зданий и сооружений с системами сейсмоизоляции следует выполнять в том числе с учетом реализации сейсмических событий меньшей интенсивности, чем расчетные.

5. Методы анализа данных динамического мониторинга, описанные в настоящей статье, могут эффективно использоваться для оценки динамических параметров и последующего анализа их изменения в процессе эксплуатации зданий и сооружений с системами сейсмоизоляции.

Ожидается, что анализ результатов динамического мониторинга улучшит наше понимание о динамическом поведении зданий и сооружений во время землетрясений, будет способствовать развитию наших знаний в области сейсмостойкого строительства.

### Список литературы

1. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\* (с Изменениями № 2, 3).

2. Boroschek R., Retamales R., Aguilar A. Seismic response of isolated structures subjected to Mw 8.8 Chile Earthquake of February 28, 2010. The International Symposium for CISNID 25th Anniversary, Paper No. M-2.

3. Clemente P. Effectiveness of HDRB isolation systems under low energy earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 118, 2019, pp. 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.12.018>

4. Clemente P., Bongiovanni G., Buffarini G., Saitta F., Castellano M.G., Scafati F. Effectiveness of HDRB isolation systems under low energy earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 118 (2019), pp. 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.12.018>

5. Iiba M., Kashima T., Morita K. Behaviour of Seismically Isolated Buildings Based on Observed Motion Records during the 2011 Great East Japan Earthquake. Proc. 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures – commemorating JSSI 20th Anniversary. 2013. Paper №875925.

6. Kashima T. Dynamic Behaviour of a Seven-Storey Seismically Isolated Building during the 2011 Tohoku Earthquake. EACS 2016 – 6th European Conference on Structural Control, №127, 2016.

7. Kashima T., Kitagawa T. Dynamic Behaviour of A 9-storey Base Isolated Building Estimated from Strong Motion Records, Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. No. 871, 2006.

8. Kashima T., Kitagawa Y. Dynamic characteristics of buildings estimated from strong motion records. Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering. 2006, pp. 18–22.

9. Kashima T., Koyama T., Okawa I., Iiba M. Strong Motion Records in Buildings from the 2011 Great East Japan Earthquake. Proceeding of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE). No.1762, 2012.

10. Morita K., Takayama M. Lessons learned from the 2016 Kumamoto earthquake: Building damages and behavior of seismically isolated buildings. AIP Conference Proceedings. 1892 (1): 020007, 2017. doi: 10.1063/1.5005638

11. Moroni M.O., Sarrazin M., Soto P. (2012). Behavior of Instrumented Base-Isolated Structures during the 27 February 2010 Chile Earthquake. *Earthquake Spectra*. 28, S1, S407–S424 doi: 10.1016/j.soildyn.2012.06.019

12. Nagarajaiah S., Xiaohong S. Response of base-isolated USC hospital building in Northridge earthquake. *Journal of structural engineering*. 2000, pp.1177–1186.

13. Performance of Seismic Protection Technologies during the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. K. Kasai, A. Mita, H. Kitamura, K. Matsuda, T.A. Morgan, A.W. Taylor. *Earthquake Spectra*. Volume 29, No. 1, pp. 265–293.



14. Saito T. Performance of Seismically Isolated Buildings at March 11, 2011, Tohoku Earthquake. Proceedings of the 19th CIB World Building Congress. Brisbane, Australia, May 9–13, 2013.
15. Saito. Behavior of response controlled and seismically isolated buildings during severe earthquakes in Japan. doi 10.12910/EAI2015-078
16. Seismic monitoring of buildings with base isolation. Salvatori A., Di Cicco A., Clemente P. 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, pp. 5254–5275. doi: 10.7712/120119.7301.19221
17. Seismic response of building base isolated with filled rubber bearings under earthquakes of different characteristics. S. Jain, S. Thakkar. 12WCEE 2000.
18. Shirazi A. (2010). Thermal degradation of the performance of elastomeric bearings for seismic isolation. UC San Diego. ProQuest ID: Shirazi\_ucsd\_0033D\_10837. Merritt ID: ark:/20775/bb0103625m. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/6j3486gj>.
19. Stewart J. P., Conte J. P., Aiken I.D. Observed behavior of seismically isolated buildings. Journal of structural engineering. 1999, pp. 955–964.
20. Ventura C.E., Liam Finn W.D., Lord J.-F., Fujita N. Dynamic characteristics of a base isolated building from ambient vibration measurements and low level earthquake shaking. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. No. 23, 2003, pp. 313–322.
21. Zhou C., Chase J. G., Rodgers G. W., Kuang A., Gutschmidt S., Xu C. Performance evaluation of CWH base isolated building during two major earthquakes in Christchurch. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering. Vol. 48, No. 4, 2015. doi: 10.5459/bnzsee.48.4.264–273
22. Giziattullin I.R., Bubis A.A., Vakhrina G.N., Chupanov M.R. Monitoring of dynamic behavior of the base isolated buildings and adjacent soils in the Kamchatka region. Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions. Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. 2019: 7th, Rome, January 17–20, 2019, pp. 2667–2673.
23. Гизятуллин И.Р., Бубис А. А., Вахрина Г.Н., Чупанов М.Р. Анализ динамической реакции здания с системой сейсмоизоляции при реальном сейсмическом воздействии. Материалы XIII Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием). Санкт-Петербург, 01– 06 июля 2019. С. 113.
24. Вахрина Г.Н., Чупанов М.Р., Гизятуллин И.Р. Анализ динамической реакции здания при реальном сейсмическом воздействии // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2018. № 2. С. 39–45.
25. Гизятуллин И.Р. Анализ динамических характеристик сейсмоизолированного здания с применением результатов численных расчетов и натуральных наблюдений: выпускная квалификационная работа магистра: 08.04.01. Моск. гос. строит. университет. Москва, 2018. 93 с.
26. Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // *Вулканология и сейсмология*. 2013. № 1. С. 18–40. doi: 10.7868/S0203030613010021
27. Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // *Геофизические исследования*. 2020. Том 21. № 3. С. 66 – 91. DOI: <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>.

28. Grossmann A., Morlet J. (1984) Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*. 15, 723–736. doi:10.1137/0515056.
29. Mallat S.G. *A wavelet tour of signal processing*. New York: Academic Press, 1998.
30. Meyer Y. *Wavelets: Algorithms and applications*. Philadelphia: S.I.A.M., 1993.
31. Meyer Y. *Wavelets and operators*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
32. Daubechies I. *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia: S.I.A.M., 1992.
33. Павлов А.Н., Филатова А.Е., Храмов А.Е. Частотно-временной анализ нестационарных процессов: концепции вейвлетов и эмпирических мод // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. (2011). 19 (2), 141–157.

## References

1. SP 14.13330.2018 Construction in seismic areas. Updated version of SNiP II-7-81\* (with Amendments No. 2, 3). (In Russian)
2. Boroschek R., Retamales R., Aguilar A. Seismic response of isolated structures subjected to Mw 8.8 Chile Earthquake of February 28, 2010. *The International Symposium for CISNID 25th Aniversary*, Paper No. M-2.
3. Clemente P. Effectiveness of HDRB isolation systems under low energy earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 118, 2019, pp. 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.12.018>
4. Clemente P., Bongiovanni G., Buffarini G., Saitta F., Castellano M.G., Scafati F. Effectiveness of HDRB isolation systems under low energy earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 118 (2019), pp. 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.12.018>
5. Iiba M., Kashima T., Morita K. Behavior of Seismically Isolated Buildings Based on Observed Motion Records during the 2011 Great East Japan Earthquake. *Proc. 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures – commemorating JSSI 20th Anniversary*. 2013. Paper No. 875925.
6. Kashima T. Dynamic Behaviour of a Seven-Storey Seismically Isolated Building during the 2011 Tohoku Earthquake. *EACS 2016 – 6th European Conference on Structural Control*, №127, 2016.
7. Kashima T., Kitagawa T. Dynamic Behaviour of A 9-storey Base Isolated Building Estimated from Strong Motion Records, *Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. No. 871, 2006.
8. Kashima T., Kitagawa Y. Dynamic characteristics of buildings estimated from strong motion records. *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. 2006, pp. 18–22.
9. Kashima T., Koyama T., Okawa I., Iiba M. Strong Motion Records in Buildings from the 2011 Great East Japan Earthquake. *Proceeding of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)*. No.1762, 2012.
10. Morita K., Takayama M. Lessons learned from the 2016 Kumamoto earthquake: Building damages and behavior of seismically isolated buildings. *AIP Conference Proceedings*. 1892 (1): 020007, 2017. doi: 10.1063/1.5005638
11. Moroni M.O., Sarrazin M., Soto P. (2012). Behavior of Instrumented Base-Isolated Structures during the 27 February 2010 Chile Earthquake. *Earthquake Spectra*. 28, S1, S407–S424 doi: 10.1016/j.soildyn.2012.06.019
12. Nagarajaiah S., Xiaohong S. Response of base-isolated USC hospital building in Northridge earthquake. *Journal of structural engineering*. 2000, pp.1177–1186.

13. Performance of Seismic Protection Technologies during the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. K. Kasai, A. Mita, H. Kitamura, K. Matsuda, T.A. Morgan, A.W. Taylor. *Earthquake Spectra*. Volume 29, No. 1, pp. 265–293.
14. Saito T. Performance of Seismically Isolated Buildings at March 11, 2011, Tohoku Earthquake. Proceedings of the 19th CIB World Building Congress. Brisbane, Australia, May 9–13, 2013.
15. Saito. Behavior of response controlled and seismically isolated buildings during severe earthquakes in Japan. doi 10.12910/EAI2015-078.
16. Seismic monitoring of buildings with base isolation. Salvatori A., Di Cicco A., Clemente P. 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, pp. 5254–5275. doi: 10.7712/120119.7301.19221
17. Seismic response of building base isolated with filled rubber bearings under earthquakes of different characteristics. S. Jain, S. Thakkar. 12WCEE 2000.
18. Shirazi A. (2010). Thermal degradation of the performance of elastomeric bearings for seismic isolation. UC San Diego. ProQuest ID: Shirazi\_ucsd\_0033D\_10837. Merritt ID: ark:/20775/bb0103625m. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/6j3486gj>.
19. Stewart J. P., Conte J. P., Aiken I.D. Observed behavior of seismically isolated buildings. *Journal of structural engineering*. 1999, pp. 955–964.
20. Ventura C.E., Liam Finn W.D., Lord J.-F., Fujita N. Dynamic characteristics of a base isolated building from ambient vibration measurements and low level earthquake shaking. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. No. 23, 2003, pp. 313–322.
21. Zhou C., Chase J. G., Rodgers G. W., Kuang A., Gutschmidt S., Xu C. Performance evaluation of CWH base isolated building during two major earthquakes in Christchurch. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. Vol. 48, No. 4, 2015. doi: 10.5459/bnzsee.48.4.264–273
22. Giziatullin I.R., Bubis A.A., Vakhrina G.N., Chupanov M.R. Monitoring of dynamic behavior of the base isolated buildings and adjacent soils in the Kamchatka region. *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions*. Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. 2019: 7th, Rome, January 17–20, 2019, pp. 2667–2673.
23. Gizyatullin I.R., Bubis A.A., Vakhrina G.N., Chupanov M.R. Analysis of the dynamic response of a building with a seismic isolation system under real seismic impact. Proceedings of the XIII Russian National Conference on Seismic Construction and Seismic Zoning (with international participation). St. Petersburg, July 01–06, 2019, p. 113. (In Russian)
24. Vakhrina G.N., Chupanov M.R., Gizyatullin I.R. Analysis of the dynamic response of the building under real seismic impact. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2018, no. 2, pp. 39–45. (In Russian)
25. Gizyatullin I.R. Analysis of the dynamic characteristics of a seismically isolated building using the results of numerical calculations and field observations: master's final qualification work: 08.04.01. Moscow state builds. university. Moscow, 2018. 93 p. (In Russian)
26. Chebrov V.N., Droznin D.V., Kugaenko Yu.A., Levina V.I., Senyukov S.L., Sergeev V.A., Shevchenko Yu.V., Yashchuk V.V. System of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011. *Vulkanology and seismology*. 2013, no. 1, pp. 18–40. doi:10.7868/S0203030613010021 (In Russian)
27. Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A., Chebrov D.V. Unified information system of seismological data in the Kamchatka branch of the FRC EGS RAS: principles of organization, basic elements, key functions. *Geophysical Research*. 2020, Volume 21, no. 3, pp. 66 – 91. DOI: <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>. (In Russian)

28. Grossmann A., Morlet J. (1984) Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*. 15, 723–736. doi:10.1137/0515056.
29. Mallat S.G. A wavelet tour of signal processing. New York: Academic Press, 1998.
30. Meyer Y. Wavelets: Algorithms and applications. Philadelphia: S.I.A.M., 1993.
31. Meyer Y. Wavelets and operators. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
32. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. Philadelphia: S.I.A.M., 1992.
33. Pavlov A.N., Filatova A.E., Khramov A.E. Time-Frequency Analysis of Nonstationary Processes: Concepts of Wavelets and Empirical Modes. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Applied nonlinear dynamics*. (2011). 19(2), 141–157. (In Russian)

#### Данные об авторах/Information about authors

**Гизятуллин Ильнур Раэлевич**, зав. сектором расчета сооружений ЛССИМС ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация  
[gizatullin1994@yandex.ru](mailto:gizatullin1994@yandex.ru)

**Giziatullin Inur R.**, head of the Structures calculation sector of LSSIMS, TSNIISK named after V.A. Kucherenko of JSC RCC. Moscow, Russian Federation  
[gizatullin1994@yandex.ru](mailto:gizatullin1994@yandex.ru)

**Бубис Александр Александрович**, зам. руководителя ЦИСС ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация  
[albubis@gmail.com](mailto:albubis@gmail.com)

**Bubis Alexander A.**, deputy chief of Structures Earthquake Resistance Research Center of TSNIISK named after V.A. Kucherenko of JSC RCC. Moscow, Russian Federation  
[albubis@gmail.com](mailto:albubis@gmail.com)

**Смирнова Любовь Николаевна**, кандидат технических наук, Ученый секретарь АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация  
[lyubovsmirnova80@gmail.com](mailto:lyubovsmirnova80@gmail.com)

**Smirnova Lyubov N.**, Cand. Sci. (Engineering), Scientific Secretary of JSC RCC. Moscow, Russian Federation  
[lyubovsmirnova80@gmail.com](mailto:lyubovsmirnova80@gmail.com)

**Ставницер Леонид Рувимович**, доктор технических наук, профессор, главный специалист НИИОСП им Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация  
**Stavnitser Leonid R.**, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Chief Specialist of the NIIOSP named after N.M. Gersevanov of JSC RCC. Moscow, Russian Federation