

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-167-173

Оригинальная статья /Original Paper

О моделях колебаний грунтов при сильных землетрясениях

Х.Р. Зайнулабидова, У.Д. Тотурбиева, А.М. Джамалудинов

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение на основе разработанных моделей описывающих сейсмические воздействия, наиболее приемлемых для принятия с точки зрения точности описания сейсмического колебания как по форме огибающей, так и по продолжительности, и по частотным характеристикам. **Метод.** Использование эмпирических моделей при описании колебаний грунтов как случайного процесса рассматривалось в ряде работ. В данной работе исследуется обоснованность эмпирических моделей и некоторые трудности, возникающие при моделировании процесса колебаний. **Результат.** Предложена методика оценки надёжности предлагаемых моделей воздействий, которая учитывает грунтово - геологические характеристики, а также спектральные данные инструментальных записей известных землетрясений. **Вывод.** Модель сейсмического воздействия, а также аппроксимирующая моделирующая функция должна определяться степенью ответственности здания; модель для расчета зданий массовой застройки должна обеспечить сейсмостойкость при строительстве на любой территории, даже без учёта региональных составляющих, а модель для расчета уникальных объектов должна учитывать сейсмологические данные конкретной строительной площадки.

Ключевые слова: землетрясения, модель воздействия, аппроксимация, огибающая, частота, длительность землетрясений, сейсмические свойства

Для цитирования: Х.Р. Зайнулабидова, У.Д. Тотурбиева, А.М. Джамалудинов. О моделях колебаний грунтов при сильных землетрясениях. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):167-173. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-167-173

On models of ground vibrations in strong earthquakes
H.R. Zainulabidova, U.D. Toturbieva, A.M. Jamaludinov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala, 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of these studies is to determine, on the basis of the developed models describing seismic impacts, the most acceptable for acceptance from the point of view of the accuracy of the description of the seismic oscillation both in the shape of the envelope and in duration and frequency characteristics. **Method.** The use of empirical models in describing soil fluctuations as a random process has been considered in a number of papers. This paper presents the main simplifying assumptions used in this approach. The validity of empirical models and some difficulties encountered in modeling the oscillation process are investigated. **Result.** A methodology for assessing the reliability of the proposed impact models is proposed. The proposed method takes into account the soil - geological characteristics, as well as spectral data of instrumental recordings of known earthquakes. **Conclusion.** The seismic impact model, as well as the approximating modeling function, should be determined by the degree of responsibility of the building.

Keywords: earthquakes, impact model, approximation, envelope, frequency, duration of earthquakes, seismic properties

For citation: H.R. Zainulabidova, U.D. Toturbieva, A.M. Jamaludinov. On models of ground vibrations in strong earthquakes. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1):167-173. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-167-173

Введение. Одна из задач теории сейсмостойкости состоит в определении реакции зданий и сооружений на сейсмическое воздействие, заданное в виде акселерограмм, сейсмограмм или велосиграмм. Расчётная модель системы определяется видом здания или сооружения, модель должна быть такая, что позволит определить отклик системы на сейсмическое воздействие. Колебания грунта при сейсмических воздействиях являются случайными процессами, зависящие от параметров источника, механизма действия, строения среды, местных грунтово-геологических условий. Многие из этих параметров трудно определить.

Исследователь, приступающий к расчёту конструкций зданий или сооружений оказывается в трудном положении, так как воздействие на систему должно быть задано в форме случайного процесса, близкого к реальному сейсмическому воздействию, но современное состояние науки не позволяет дать точный прогноз сейсмических воздействий, как в области низкочастотных (менее 1 Гц), так и в области высокочастотных (1-20 Гц) колебаний. Поэтому реалии состояния современной науки позволяют нам задать только сейсмическую нагрузку в вероятностной форме.

Постановка задачи. Модель воздействия - это гипотеза о характере случайного процесса, которая в дальнейшем может быть подтверждена или опровергнута на базе анализа экспериментальных данных.

Основные упрощающие предположения, используемые при построении эмпирических моделей [1-7], заключаются в следующем:

1. Колебания грунта $\ddot{Y}(t)$ описываются гауссовским процессом, при котором каждая реализация процесса формируется произведением изменяющейся во времени по сравнению с основным периодом колебаний детерминистической функцией $A(t)$ на реализацию гауссовского стационарного процесса $\eta_k(t)$ с единичной дисперсией,
2. Предполагается, что существуют универсальные параметрические выражения, аппроксимирующие моделирующую функцию и энергетический спектр $S(\omega)$ гауссовского процесса, независимые от сейсмологических условий.
3. Исследователи [1, 8-12, 20] предлагают свои видения этого процесса.

В частности, зависимости, предложенные в работе [10] имеют следующий вид:

$$A(t) = b \cdot t \cdot \exp(-c \cdot t) \quad (2)$$

$$s(\omega) = \frac{4 \cdot d(\omega + \omega_{df}^2)}{(\omega^2 + \omega_{df}^2)^2 - 4 \cdot f^2 \cdot \omega^2} \quad (3)$$

$$\omega_{df}^2 = d^2 + f^2 \quad (4)$$

В зависимости от сейсмологических условий, параметры модели могут принимать разные значения. Согласно работе [10], перечисленные упрощающие предположения корректны для описания колебаний скальных грунтов на средних гипоцентральных расстояниях. В случае, когда все три компонента движения были заданы, вводится дополнительное предположение о независимости различных компонент движения.

Каждая компонента представляет собой случайный процесс, описываемый выражением (1). Более сложные модели случайного процесса приведены в работах [2- 4, 15-20]. Приняв решение и выбрав модель случайного процесса, необходимо исследовать зависимость значений параметров b - f от параметров очага и среды. Как правило, это магнитуда землетрясения, гипоцентральное расстояние, тип грунта у поверхности.

Методы исследования. Рассмотрим одну из методик проведения исследований: рассмотрим множество акселерограмм сильных землетрясений и допустим, что каждая из акселерограмм является реализацией случайного процесса $\ddot{Y}(t)$, описываемого выражением

ями (1) – (4), тогда произведём оценку параметров процесса по одной реализации. Изучая соответствие параметров процесса b-f и параметров очага среды, получим искомую зависимость. Установление указанной зависимости позволит определить область вероятных значений параметров процесса b-f, имеющих место при конкретных сейсмологических условиях. Большой интерес представляет также вопрос о взаимной зависимости параметров b-f.

Ясно, что оценка параметров модели по одной реализации процесса не может быть произведена, даже если модель идеально правильная. Качество оценки должно быть контролируемо в каждом конкретном случае.

В данной работе приводится критерий оценки качества простейшего метода определения параметров модели, описываемой формулами 1-4

Оценка параметров модели по одной реализации процесса

Функцию $A_0(t)$, определяем по формуле (5)

$$A_0(t) = \sqrt{\frac{1}{T}} \cdot \int_{t-T/2}^{t+T/2} [\ddot{Y}_0(t)]^2 dt \quad (5)$$

где, $\ddot{Y}_0(t)$ – анализируемая акселерограмма, которая служит оценкой моделирующей функции $A(t)$ в том случае, когда время усреднения T велико по сравнению с основным периодом колебаний процесса и мало по сравнению с общей длительностью записи T_m , тогда в соответствии (1) получаем следующее выражение:

$$\ddot{Y}_0(t) = A(t) \cdot \eta_0(t) \quad (6)$$

Используя выражение (5) и учитывая медленный характер изменения $A(t)$, получим:

$$A(t) - A_0(t) = A(t) \cdot \left[\frac{1}{T} \cdot \int_{t-T/2}^{t+T/2} (\eta(t))^2 dt \right] \quad (7)$$

Исходя из выражения (7), можно предположить, что функция

$$\Delta A_0(t) = A(t) - A_0(t) \quad (8)$$

Должна испытывать некоторое отклонение относительно среднего значения, которое равно нулю. Если вычислить $A_0(t_i)$ в ряде точек t_i по формуле (5) и аппроксимировать полученные данные выражением (2), то указанные отклонения скажутся на точности оценки параметров b и c. Но низкие требования к точности оценок моделирующей функции позволяет пренебречь этим эффектом [4]. Аппроксимация производится при помощи метода наименьших квадратов.

Далее поделив $\ddot{Y}_0(t)$ на $A(t)$, можно приступить к оценке параметров стационарной функции $R(t, \tau) = M[\eta(t) \cdot \eta(t+\tau)]$ стационарного случайного процесса не зависит от t и связана с энергетическим спектром $S(\omega)$ процесса соотношением (9)

$$S(\omega) = 4 \cdot \int_0^\infty R(\tau) \cdot \cos(\omega \cdot \tau) d\tau \quad (9)$$

$$R(\tau) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\infty S(\omega) \cdot \cos(\omega \cdot \tau) d\omega \quad (10)$$

Корреляционная функция процесса η , энергетический спектр которого задан в форме (3), имеет вид (11)

$$R(\tau) = \exp(-d|\tau|) \cos(f\tau) \quad (11)$$

Так как выражение (11) достаточно простое анализ корреляционной функции может быть использован [4] для вычислений значений d, f , определяющих случайный процесс η . Если длительность реализации велика, т.е. $(T_m \rightarrow \infty)$, то функция $R(\tau)$ приблизительно совпадает с временной корреляционной функцией $R_{Tm}(\tau)$, которая вычисляется с использованием одной реализации $\eta(t)$:

$$R_{Tm}(\tau) = \frac{1}{T_m - \tau} \cdot \int_0^{T_m - \tau} \eta_0(t) \cdot \eta_0(t + \tau) dt \quad (12)$$

Как показано в (11) математическое ожидание $M[\Delta R(\tau)]$ разности корреляционной функции $R(\tau)$ и временной корреляционной функции $R_{Tm}(\tau)$ равны нулю

$$\Delta R(\tau) = R(\tau) - R_{Tm}(\tau) \quad (13)$$

Дисперсию можно определить по следующей формуле:

$$\sigma_i^2 = M_i\{(\Delta R(\tau))^2\} \leq \frac{4}{T_m} \cdot \int_0^{T_m} R^2(\vartheta) d\vartheta \quad (14)$$

В случае длительной реализации ($T_m \rightarrow \infty$) дисперсия σ_i стремится к нулю. В таком случае вычисление $R_{Tm}(\tau)$ в ограниченном числе точек и последующая аппроксимация e_t по вычисленным значениям выражением (11) позволяет оценить параметры d и f процесса. По вычисленным значениям $R_{Tm}(\tau)$ определяется средний период τ_0 прохождения через нули функции $R_{Tm}(\tau)$. Значения f в выражении (11) определяется по формуле (15)

$$f = \frac{1}{T_0} \quad (15)$$

Авторы работы [4] предлагают выражение τ_0 через τ_1 первого обращения в ноль функции $R_{Tm}(\tau)$

Приближённая оценка d производится по формуле (16)

$$d^* = \frac{2 \ln \left[R\left(\frac{\tau_0}{2}\right) \right]}{\tau_0} \quad (16)$$

Уточним эту оценку таким образом, чтобы добиться (при фиксированном f) наилучшего согласия аппроксимирующего выражения с вычисленными значениями в пределах одного периода колебаний функции $R_{Tm}(\tau)$:

$$\vartheta(d) = \sum_{i=1}^n (R_i - \exp(-d\tau_i) \cdot \cos f\tau_i)^2 = \min \quad (17)$$

$$R_i = R_{Tm}(\tau_i) \quad (18)$$

Задача сводится к нахождению корня уравнения (19)

$$F(d) = 0 \quad (19)$$

$$\text{где, } F(d) = \sum_{i=1}^n (R_i - \exp(-d\tau_i) \cdot \cos f \cdot \tau_i) \cdot \tau_i \cdot \exp(-d\tau_i) \cdot \cos f \cdot \tau_i \quad (20)$$

С одним неизвестным, которое можно осуществить методом Ньютона

$$d_{n+1} = d_n - \frac{F(d_n)}{\vartheta \cdot (d_n)} \quad (21)$$

Обсуждение результатов. Прежде чем использовать описанный метод следует оценить его качество, исходя из следующих соображений.

Будем считать, что корреляционная функция находится в интервале $\Delta = 2 \cdot \sigma_1$ от своей временной оценки $R(\tau) = R_{Tm}(\tau) + \Delta$

Оценку абсолютной ошибки, можно получить, подставляя в правую часть неравенства (14) временную корреляционную функцию $R_{Tm}(\tau)$ вместо $R(\tau)$

$$\text{Тогда } \Delta = 4 \cdot \sqrt{\frac{1}{T_m}} \cdot \int_0^{T_m} R^2(\theta) d\theta$$

Следует надеяться на удовлетворительную оценку параметров, описанным выше методом в том случае, когда высота второго максимума (первый максимум имеет место при $\tau=0$) функции превышает уровень ошибки Δ .

В качестве примера противоположной ситуации приведём результаты анализа интенсивной фазы акселерограммы землетрясения. В Дагестане 15 мая 1970 года, компонента С-Ю. Восстанавливающая коррелирующая функция $A(\tau)$ и временная корреляционная функция $R_{Tm}(\tau)$ приведены на рис. 1 и 2, соответственно. Как видно на рис.2, временная корреляционная функция $R_{Tm}(\tau)$ не сможет быть описана выражением (11).

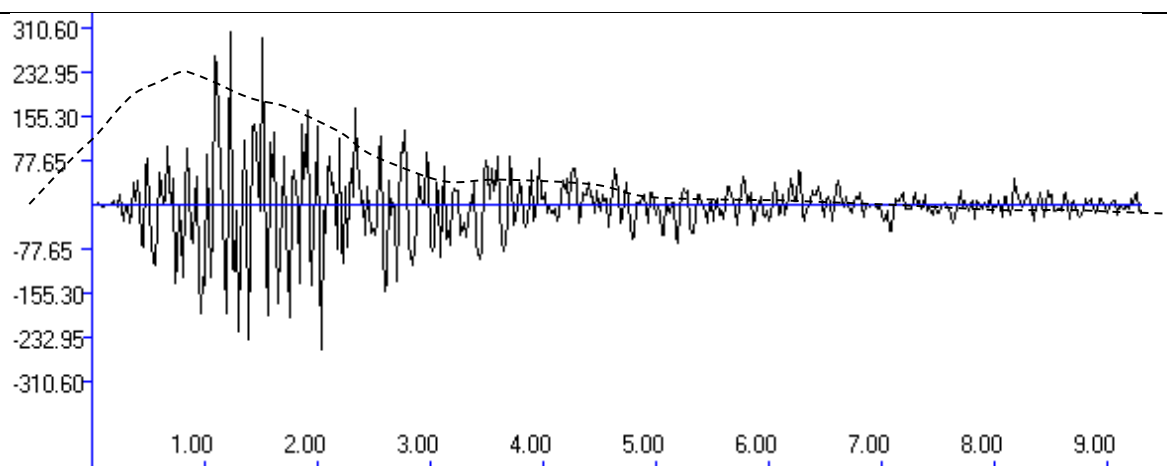


Рис.1. Синтезированная акселерограмма землетрясения в Махачкале 14 мая 1970 года, штриховой линией проведена огибающая процесса колебаний $A(t)$
Fig.1. Synthesized accelerogram of the earthquake in Makhachkala on May 14, 1970, the dashed line shows the envelope of the oscillation process $A(t)$

Такое не соответствие, может быть объяснено высоким уровнем ожидаемой ошибки Δ . Для описания сейсмического воздействия принимается модель случайного процесса, предложенная в работе [4]

Рассмотрим вопрос о возможности оценки параметров модели по существующим экспериментальным данным. Показано, что в ряде случаев простейший метод оценки параметров [4, 11] не может быть реализован. На это обстоятельство необходимо обратить внимание при использовании методов генерации, синтезированных акселерограмм, описанных в работах [2-10, 14-16, 21].

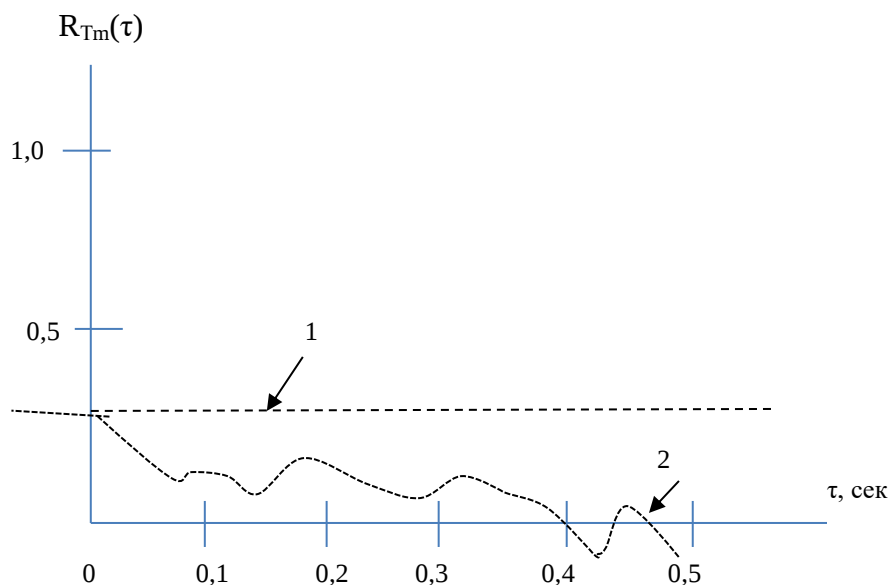


Рис.2. Временная корреляционная функция $R_{Tm}(\tau)$ и уровень ошибки Δ 1 - $R_{Tm}(\tau)$; 2 - Δ
Fig.2. Time correlation function $R_{Tm}(\tau)$ and error level Δ 1 - $R_{Tm}(\tau)$; 2 - Δ

Вывод. Рассмотренные в данной работе методы реализации случайного процесса не являются универсальными и применимы только в конкретных случаях.

Выбор модели сейсмического воздействия, а также аппроксимирующей моделирующей функции должен определяться требуемой степенью надёжности, соответствующей степени ответственности здания. Модель для расчета зданий массовой застройки должна обеспечить сейсмостойкость при строительстве в любом районе с заданной сейсмичностью, а модель для расчета уникальных объектов должна учитывать сейсмологические

данные строительной площадки, при этом задача обеспечения запаса надежности должна быть на первом месте.

Для каждого региона необходимо разработать модель воздействия, учитывающую сейсмологические характеристики территории.

Библиографический список:

1. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. – М.: Наука. -1979. – 336 с.
2. Санкин Ю.Н. Построение динамических моделей колебательных упругих систем на основе обработки амплитудно-частотных характеристик (АФЧХ) при наличии интегрирующих звеньев в цепи измерения / Вестник УлГТУ. -2008. -№1. – С. 25-31.
3. Диментберг М. Ф. Нелинейные стохастические задачи механических колебаний. М.: Наука, 1980. 368 с.
4. Алфутов Н. А. Основы расчёта на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1991. 336 с.
5. Кулаков А.В., Румянцев А.А. Введение в физику нелинейных процессов. М.: Наука, 1988. 160 с.
6. Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны. М.: Наука, 1997. 416 с.
7. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Политехника. 1990. 272 с.
8. Wong H. L., Trifunak M. D. Generation of artificial accelerograms of strong motion /Earthquake in English. – 1979, p. 509-527.
9. Jurkevich A., Ulrych T.J. Autoregressive parameters of a suite of strong motion accelerograms/ Earthquake engineering and structural dynamics. - 1979, vol. 7, p. 407-425.
10. Hsu T.I. Bernard M.S. A random process for earthquake simulation /Earthquake engineering and structural dynamics. - 1978, vol. 6, p. 347-362.
11. Shinazuka M., Sato Y. Simulation of nonstationary random process / J. Engng. Mech. Div. ASCE. - 1967, vol. 93, Emi, p. 11-40.
12. Amin M., Ang A.H.S. Nonstationary stochastic model earthquake motions /J. Engng. Mech. Div. ASCE. - 1968, vol. 94, p. 559-584.
13. Jennings P.S., Housner G.W., Tsai N.C. Simulated earthquake motions for design purposes. – Proc – Fourth World Conf. Earthq. Engng. Chile. – 1969. P. 145-160.
14. Iyengar R.N. Iyengar K.T. A nonstationary random process model for earthquake accelerograms - Bul. Seism. Soc. Am., 1969, vol. 59, 1163-1188.
15. Айзенберг, Я. М. Статистическая расчетная модель сейсмического воздействия на сооружения /Кн. Сейсмическое воздействие на гидротехнические и энергетические сооружения. М.: наука, 1980. С. 5-10.
16. Ньюмарк Н., Розенблют Э. Основы сейсмоактивного строительства. М.: Стройиздат. 1980. С. 61 – 99.
17. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. М.: Сов. Радио, 1963. С.32.
18. Абакаров, А. Д., Зайнулабидова Х.Р., Курбанов И.Б. Модель сейсмического воздействия для Г. Махачкалы // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2011. – № 3(22). – С. 109-117.
19. Уздин А. М., Л. Н. Смирнова Л.Н., Сорокина Г.В. и др. Статистическое моделирование сейсмических воздействий/ Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2019. – № 5. – С. 19-27.
20. Богданова М.А., Нестерова О.П., Никонова Н.В., Ткаченко А.С., Уздин А.М., Рахманова М., Азаев Т.М., Зайнулабидова Х.Р. / Числовые характеристики сейсмических воздействий. Наука и мир. 2017. Т. 1. № 3 (43). С. 49.
21. Уздин А. М., Смирнова Л. Н., Сорокина Г. В. [и др.]. Статистическое моделирование сейсмических воздействий/ Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2019. – № 5. – С. 19-27.

References:

1. Bolotin V.V. Random oscillations of elastic systems. M.: Science. 1979; 336. [In Russ]
2. Sankin Yu.N. Construction of dynamic models of oscillatory elastic systems based on the processing of amplitude-frequency characteristics (APFC) in the presence of integrating links in the measurement circuit *Bulletin of UIGTU*. 2008;1: 25-31. [In Russ]
3. M. F. Dimentberg, Nonlinear Stochastic Problems of Mechanical Oscillations. M.: Nauka, 1980; 368. [In Russ]
4. N. A. Alfutov, Fundamentals of calculating the stability of elastic systems. M.: Mashinostroenie, 1991; 336. [In Russ]
5. Kulakov A.V., Rumyantsev A.A. Introduction to the physics of nonlinear processes. M.: Nauka, 1988;160. [In Russ]
6. Landa P.S. Nonlinear oscillations and waves. M.: Nauka, 1997; 416. [In Russ]

7. Panovko Ya.G. Fundamentals of Applied Theory of Oscillations and Impact. L.:Polytechnic. 1990; 272 [In Russ]
8. Wong H. L., Trifunak M. D. Generation of artificial accelerograms of strong motion. *Earthquake in English*. 1979; 509-527.
9. Jurkevich A., Ulrych T.J. Autoregressive parameters of a suite of strong motion accelerograms. *Earthquake engineering and structural dynamics*. 1979; 7: 407-425.
10. Hsu T.I. Bernard M.S. A random process for earthquake simulation. *Earthquake engineering and structural dynamics*. 1978; 6:347-362.
11. Shinazuka M., Sato Y. Simulation of nonstationary random process. *J. Engng. Mech. Div. ASCE*. 1967; 93: 11-40.
12. Amin M., Ang A.H.S. Nonstationary stochastic model earthquake motions. *J. engng. Mech. Div. ASCE*. 1968; 94: 559-584.
13. Jennings P.S., Housner G.W., Tsai N.C. Simulated earthquake motions for design purposes. *Proc – Fourth Word Conf. Earthq. engng. Chile*. 1969;145-160.
14. Iyengar R.N. Iyengar K.T. A nonstationary random process model for earthquake accelerograms. *Bul. seism. soc. Am.*, 1969; 59:1163-1188.
15. Aizenberg, Ya. M. Statistical calculation model of seismic impact on structures. Kn. Seismic impact on hydraulic engineering and power structures. M.: Nauka, 1980; 5-10. [In Russ]
16. Newmark N., Rosenbluth E. Fundamentals of seismically active construction. Moscow: Stroyizdat. 1980; 61 - 99. [In Russ]
17. Romanenko A.F., Sergeev G.A. Issues of Applied Analysis of Stochastic Processes. M.: Sov. Radio, 1963; 32. [In Russ]
18. D. Abakarov, Kh. R. Zainulabidova, and I. B. Kurbanov, Russ. Model of seismic impact for G. Makhachkala. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2011; 3(22): 109-117. [In Russ]
19. Uzdin A. M., L. N. Smirnova L. N., Sorokina G. V. etc. Statistical modeling of seismic impacts. *Seismic-resistant construction. Building safety*. 2019; 5:19-27. [In Russ]
20. M. A. Bogdanova, O. P. Nesterova, N. V. Nikonova, A. S. Tkachenko, A. M. Uzdin, M. Rakhmanova, T. M. Azaev, and Kh. Numerical characteristics of seismic impacts. *Science and Peace*. 2017; 1: 3 (43): 49. [In Russ]
21. Uzdin A. M., Smirnova L. N., Sorokina G. V. [et al.]. Statistical modeling of seismic effects. *Seismic construction. Building safety*. 2019; 5:19-27. [In Russ]

Сведения об авторах:

Зайнулабидова Ханзада Рауповна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой архитектуры; hanzada1@mail.ru

Тотурбиева Умуй Джакаевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра архитектуры; hanzada1@mail.ru

Джамалудинов Абдулнасыр Магомедович, старший преподаватель, кафедры архитектуры, a-nasir@mail.ru

Information about the authors:

Hanzada R. Zainulabidova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Architecture; hanzada1@mail.ru

Umuy Dz. Toturbieva, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Architecture; hanzada1@mail.ru

Abdulnasyr M. Jamaludinov, Senior Lecturer of the Department of Architecture a-nasir@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 27.12.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 19.01.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 19.01.2023.