=ГЕОФИЗИКА=

## VДК 550.34.09 DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006

Оригинальная статья

## Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности

# В.Б. Заалишвили<sup>1</sup>, Д.А. Мельков<sup>1</sup>, Н.В. Никонова<sup>2</sup>, Л.Н. Смирнова<sup>3</sup>, А.М. Уздин<sup>2</sup>

 <sup>1</sup>Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru;
 <sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения, Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, e-mail: uzdin@mail.ru;
 <sup>3</sup>АО «НИЦ «Строительство»», Россия, 109428, 2 г. Москва, Институтская ул., д. 6,

Статья поступила: 05.02.2022, доработана: 21.02.2022, одобрена в печать: 07.03.2022

e-mail: lyubovsmirnova80@gmail.com

Резюме: Актуальность работы. Вследствие рассеяния волн, возникающего из-за сложности строения земли, а также эффектов распространения разрывов по протяженным разломам, при сейсмических воздействиях наблюдаются эффекты некогерентности. Эти эффекты особенно значительны для протяженных конструкций, таких как мосты. Цель работы состоит в разработке характеристик, позволяющих учитывать эффекты распространения волн и пространственную корреляцию движений грунта при оценке реакции строительных конструкций на колебания грунта при землетрясениях. Метод исследований. В статье предлагается детализация оценки пространственного распределения сейсмических ускорений на площадке строительства. Для этого вводятся четыре характеристики неравномерности поля ускорений на дневной поверхности: показатель несинхронности, показатель некогерентности, показатель разномасштабности (разницы амплитуд колебаний) и показатель непохожести. Для указанных показателей приводятся аналитические формулы для их определения, причем введенные показатели являются независимыми. Результаты работы. Выполнены простые тестовые расчеты и приведен пример использования реальных записей землетрясений. Записи землетрясений получены при выполнении работ по сейсмическому микрорайонированию площадки проектируемой Чири-Юртской ГЭС. В статье приводится сопоставление трех записей ускорений в разных точках площадки. Карты значений показателей на площадке строительства можно получить простыми замерами колебаний дневной поверхности при взрывах и микросейсмах. Такие карты вскрывают природу неоднородности поля сейсмических ускорений и дают серьезный вспомогательный материал проектировщику. Большие показатели некогерентности и разномасштабности указывают на сложную геологию площадки строительства и необходимость серьезных геологических изысканий. Показатель разномасштабности позволяет скорректировать расчетное ускорение при проектировании сооружений с большим пятном застройки. Показатель несинхронности указывает на необходимую величину деформационных швов для протяженных сооружений. Представляется целесообразным построение предлагаемых карт на стадии обоснования проектных решений. Если введенные показатели сильно различаются по площади предполагаемой застройки, то для проектирования следует разрабатывать специальные технические условия и представлять детальную геологию площадки строительства.

**Ключевые слова:** сейсмическое возмущение, характеристики воздействия, пространственная неоднородность, корреляция, расчеты, станции, регистрация, показатели, несинхронность, некогерентность.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант ГФЕН\_а № 21-58-53012 «Теоретические основы и методы проектирования сценариев накопления повреждений при сейсмических воздействиях на примере портовых и шельфовых сооружений».

12 (1) 2022

**Для цитирования**: Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Никонова Н. В., Смирнова Л. Н., Уздин А. М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности. *Геология и геофизика Юга России.* 2022. 12 (1): 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.

=GEOPHYSICS=

DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006

Original paper

# Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface

### V. B. Zaalishvili<sup>1</sup>, D. A. Melkov<sup>1</sup>, N. V. Nikonova<sup>2</sup>, L. N. Smirnova<sup>3</sup>, A. M. Uzdin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: vzaal@mail.ru;

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Peterberg state transport university, 9 Moskovsky pr., Saint-Petersburg 190031, Russian Federation, e-mail: uzdin@mail.ru;

<sup>3</sup>Research Center of Construction, 62<sup>nd</sup> Institutskaya Str., Moscow 109428, Russian Federation, e-mail: lyubovsmirnova80@gmail.com

Reseived:05.02.2022, revised: 21.02.2022, accepted: 07.03.2022

Abstract: Relevance. Due to the scattering of waves arising from the complexity of the earth's structure, as well as the effects of the propagation of ruptures along extended faults, spectacular incoherence is observed during seismic impacts. These effects are especially significant for extended structures such as bridges. Aim consists in the development of characteristics that allow taking into account the effects of wave propagation and spatial correlation of ground movements when assessing the reaction of building structures to ground vibrations during earthquakes. Methods. The article offers a detailed assessment of the spatial distribution of seismic accelerations at the construction site. To do this, four characteristics of the non-uniformity of the acceleration field on the daytime surface are introduced: the indicator of non-synchronicity, the indicator of incoherence, the indicator of different scales (differences in oscillation amplitudes) and the indicator of dissimilarity. Analytical formulas for their determination are given for these indicators, and the entered indicators are independent. **Results.** Simple test calculations and an example of using real earthquake records were performed. Earthquake records were obtained during the performance of seismic micro-zoning of the site of the projected Chiri-Yurt HPP. The article provides a comparison of three records of accelerations at different points of the site. Maps of the values of indicators at the construction site can be obtained by simple measurements of the fluctuations of the daytime surface during explosions and microseisms. Such maps reveal the nature of the heterogeneity of the seismic acceleration field and provide serious auxiliary material to the designer. Large incoherence and multiscale indicators indicate the complex geology of the construction site and the need for serious geological surveys. The multi-scale indicator allows you to adjust the calculated acceleration when designing structures with a large building spot. The non-synchronicity indicator indicates the required amount of deformation seams for extended structures. It seems appropriate to build the proposed maps at the stage of substantiation of design decisions. If the entered indicators vary greatly in the area of the proposed development, then special technical conditions should be developed for the design and a detailed geology of the construction site should be presented.

**Keywords:** seismic excitation, excitation characteristics, spatial heterogeneity, correlation, calculations, stations, registration, asynchronous ground motion, incoherence.

**Acknowledgments:** The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant GFEN\_a No. 21-58-53012 "Theoretical foundations and methods for designing damage accumulation scenarios under seismic effects on the example of port and offshore structures".

**For citation**: Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Nikonova N.V., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.

#### Введение

При расчете многоопорных конструкций встает вопрос различия возмущений под опорами. Вопросам расчета многоопорных конструкций посвящено много отечественных [Гиман, Уздин, 2002, 2006; Назаров, Николаенко, 1988; Петров, Базилевский, 1978] и зарубежных [Bogdanoff et al., 1965; Igusa, Kiureghian, 1985; Dong, Wieland, 1988; Gatti et al., 2017; Lavorato et al., 2017; Falamarz-Sheikhabadi, Zerva, 2018; Jia et al., 2020] исследований. Особенно остро этот вопрос стоит для мостов, когда основания береговых опор могут характеризоваться 7-мибалльной сейсмичностью, а основания русловых – 9-тибалльной. Расчет мостов с учетом несинхронности возмущения опор рассмотрен в работах [Уздин, Кузнецова, 2014; Dong, Wieland, 1988; Ardila et al., 2018; Lavorato et al., 2018; Papadopoulos, Sextos, 2018, 2020; Jia et al., 2020; Petronijević et al., 2002; Savvas et al., 2020; Smirnova et al., 2020; Meibodi, Alexander, 2021; Soyluk, Karaca, 2021]. Основополагающими для расчета сооружений с точечным опиранием на основание в условиях пространственной неоднородности поля ускорений являются исследования А. Тер-Кюрегяна [Kiureghian, 1981, 1996; Kiureghian, Neuenhofer, 1992]. В России этому вопросу уделено много внимания в работах А.А. Петрова [Петров, Базилевский, 1978], Ю.П. Назарова и Е.В. Позняк [Назаров, Николаенко, 1988; Nazarov, Poznyak, 2018]. В настоящее время инженерная задача о колебаниях протяженного сооружения в предположении известного распределения ускорений на свободной поверхности достаточно подробно описана, например, в работах [Назаров, Николаенко, 1988; Igusa, 1985; Shen et al., 2019]. Вопросами корреляции колебаний точек дневной поверхности при землетрясениях занимались известные специалисты [Петров, Базилевский, 1978; Kiureghian, 1981, 1996; Kiureghian, Neuenhofer, 1992]. Однако данных для задания неоднородности поля ускорений на площадке строительства явно недостаточно. Поэтому предпринимались попытки смоделировать такое поле численными методами, например, [Katsuhisa, 2000; Nazarov, Poznyak, 2018; Petronijević et al., 2002]. Возникающие сложности связаны, по нашему мнению, с тем, что нет четких критериев неоднородности поля ускорений на площадке строительства.

#### Методы работы

Показатель некогерентности характеризует относительный сдвиг по времени для возмущений разных точек площадки по отношению к некоторой базовой точке. Показатель некогерентности характеризует изменение спектрального состава воздействия в пределах рассматриваемой площадки. Показатель разномасштабности характеризует изменение амплитуд воздействия по отношению к базовому значению. Показатель непохожести представляет собой относительную величину нормы разности воздействий в рассматриваемой и базовой точках. Он может быть выражен через показатели несинхронности, некогерентности и разномасштабности.

В сейсмологии различие в колебаниях удаленных друг от друга точек дневной поверхности характеризуют корреляционной функцией К (t) и коэффициентом корреляции  $\rho$ :

$$K(\tau) = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} f(t)\varphi(t-\tau)dt, \qquad (1)$$

где f(t) и  $\phi$ (t) – колебания рассматриваемых точек дневной поверхности, T – продолжительность землетрясения

$$\rho = \frac{K(0)}{\|f\| \cdot \|\varphi\|},\tag{2}$$

где

$$\|f\| = \sqrt{\int_{0}^{T} f(t)^{2} dt} .$$
(3)

Этот показатель не характеризует в полной мере различие возмущений в разных точках поверхности на площадке строительства. Рассмотрим в качестве примера 4 возмущения, приведенные в таблице 1. Каждый тип зависимости определяет особенности несовпадения базовой и рассматриваемых функций. Очевидно, что

#### Таблица 1 / Table 1

#### Данные, иллюстрирующие различия возмущений на площадке строительства / Data illustrating the differences of disturbances at the construction site

Функция / Function	Пара- метры / Param- eters	График функции / Function graph	Тип отличий от базовой функции / Туре of differences from the basic function	ρ
sin <i>wt</i>	ω=1		-	1
$\sin(\omega t + \delta)$	ω=1; δ=0,3		Hесинхронность / Outofsync	0,955
A sin wt	A=1,1		Разномасштаб- ность / Multi- scale	1
$\sin \omega_{l} t$	ω <sub>1</sub> =1,1		Некоге- рентность / Incoherence	0,937
$A_{\sin}(\omega_{1}t+\delta)$	$\omega_1 = 1,1;$ $\delta = 0,3;$ A = 1,1; $\omega_1 = 1,1$	$\begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ -1 \\ -2 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -2 \\ -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -2 \\ -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -2 \\ -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -2 \\ -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ -2 \\ -2 \\ -2 \\ -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ -2 \\ -2 \\ -2 \\ -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ -2 \\ -2 \\ -2 \\ -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\$	Несинхрон- ность, разно- масштабность и некогерентность / Out-of-sync, multi-scale, andincoheren	0,733

коэффициент корреляции не видит разномасштабности функций и не позволяет выделить, чем вызвана малая корреляция – несинхронностью или некогерентностью возмущений.

Попытаемся уточнить показатели различия возмущений.

Если разложить функцию  $\varphi(t - \tau)$  в выражении (1) в ряд по степеням *t* и удержать первые два члена, то получим

$$K(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_{0}^{T} f(t) \left[ \varphi(t) - \dot{\varphi}(t)\tau + \frac{1}{2} \ddot{\varphi}\tau^{2} \right] dt$$
(4)

Отсюда получим

$$K(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_{0}^{T} f(t)\varphi(t)dt - \frac{\tau}{T} \int_{0}^{T} f(t)\varphi(t)dt + \frac{\tau^{2}}{2T} \int_{0}^{T} f(t)\varphi(t)dt$$
(5)

Экстремальное значение К(т) достигается при условии

$$\frac{dK}{d\tau} = 0 \tag{6}$$

Из (5, 6) получаем показатель несинхронности воздействий  $\tau_1$ 

$$\tau_1 = \frac{\int\limits_0^0 f(t)\phi(t)dt}{\int\limits_0^0 f(t)\phi(t)dt}$$
(7)

При этом в качестве показателя когерентности сигналов можно принять

$$\rho_1 = \frac{K(\tau_1)}{\|f\| \cdot \|\varphi\|} \tag{8}$$

Заметим, что показатель когерентности реагирует только на различие в частотах процессов f и  $\varphi$  и сдвиг фаз  $\tau$ . Амплитуды процессов могут различаться. Они линейно входят в числитель и знаменатель и не влияют на величину  $\rho$ .

Для учета различий в амплитудах авторы предлагают использовать функцию и коэффициент идентичности процессов:

$$I(\tau) = \int_{0}^{T} \left( f(t) - \varphi(t - \tau) \right)^{2} dt$$
<sup>(9)</sup>

$$\chi(\tau) = \frac{I(\tau)}{2\|f\| \cdot \|\varphi\|}.$$
(10)

Если раскрыть скобки в представлении (9), то получим

$$\chi(\tau) = \frac{1}{2} \left( \frac{\|f\|}{\|\varphi\|} - 2\rho(\tau) + \frac{\|\varphi\|}{\|f\|} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{\|f\|}{\|\varphi\|} + \frac{\|\varphi\|}{\|f\|} \right) + \rho(\tau)$$
(11)

Раскладывая  $\varphi(t - \tau)$  в ряд, аналогично тому, как это было сделано ранее, получим

$$I(\tau) = \int_{0}^{T} \left( f(t) - \varphi(t) - \dot{\varphi}(t)\tau - \dot{\varphi}(t)\frac{\tau^{2}}{2} \right)^{2} dt$$
 (12)

ИЛИ

$$I(\tau) = \int_{0}^{T} (f(t) - \varphi(t))^{2} dt - 2\tau \int_{0}^{T} (f(t) - \varphi(t))\varphi(t) dt + \tau^{2} \int_{0}^{T} [(f(t) - \varphi(t))\varphi(t) + \varphi(t)^{2}] dt - \tau^{3} \int_{0}^{T} \varphi(t)\varphi(t) dt + \frac{\tau^{4}}{4} \int_{0}^{T} \varphi(t)^{2} dt$$
(13)

Условие  $\frac{dI}{d\tau} = 0$  приводит к следующему кубическому уравнению для нахождения показателя несинхронности t<sub>2</sub>

$$-2\int_{0}^{T} (f(t) - \varphi(t))\varphi(t)dt + 2\tau \int_{0}^{T} [(f(t) - \varphi(t))\varphi(t) + \varphi(t)^{2}]dt - 3\tau^{2}\int_{0}^{T} \varphi(t)\varphi(t)dt + \tau^{3}\int_{0}^{T} \varphi(t)^{2}dt = 0$$
(14)

Первый корень этого уравнения  $t_2$  определяет показатель несинхронности сигналов и должен совпадать с аналогичным показателем, полученным по формуле (7). Для показателя идентичности сигналов получаем формулу

$$\chi = \frac{I(\tau_2)}{\|f\| \cdot \|\varphi\|} \tag{15}$$

Таким образом, мы получили три характеристики для оценки различия процессов колебаний точек на дневной поверхности.

Первая характеристика,  $\tau_1$  – несинхронность колебаний, которая оценивается по формуле (7) или на основе решения уравнения (14).

Вторая характеристика, r – некогерентность колебаний, определяемая различием их частот. Показатель когерентности оценивается по формуле (8).

Третья характеристика показывает расхождение амплитуд сопоставляемых сигналов и представляет собой первое слагаемое в выражении (11). Обозначим эту величину через z. Тогда

$$\zeta = \frac{1}{2} \left( \frac{\|f\|}{\|\varphi\|} + \frac{\|\varphi\|}{\|f\|} \right) \tag{16}$$

На основе второго и третьего показателей строится показатель идентичности сигналов по формуле (11).

Набор показателей для рассмотренных выше сигналов приведен в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Функция / Function	Показатель несинхронности / Indicator of out- of-sync		Показатель когерентности / Coherence indicator			Показатель масштабности / Scale indicator	Показатель непохожести / Indicator of
	$\tau_1$	$\tau_2$	ρ	$\rho_1$	$\rho_2$		dissimilarity
sin <i>wt</i>	0	0	1	1	1	1	0
$\sin(\omega t + \delta)$	0,309	0,273	0,955	1	0,84	1	0,16
A sin <i>wt</i>	0	0	1	1	1	1,017	0,017
$\sin \omega_{\rm l} t$	0,463	0,358	0,837	0,939	0,609	1	0,421
$A\sin(\omega_1 t + \delta)$	0,884	0,201	0,733	-0,906	0,19	1,052	0,703

Примеры значений вводимых показателей для некоторых функций / Examples of values of the entered indicators for some functions

Предложенные параметры в полной мере характеризуют задание неоднородности поля ускорений на площадке строительства. При этом они по-разному влияют на отклик системы. Небольшие отклонения показателя амплитуд возмущений z под опорами слабо уменьшают реакцию сооружения. Что касается некогерентности возмущений, то этот эффект может приближать или удалять систему от резонанса. В этом случае влияние некогерентности может быть существенным и резко меняться при приближении к резонансу, особенно у слабо демпфированных систем. Более сложная картина возникает при несинхронности возмущения. Малые значения изменения показателя  $t_0$  не приводят к большому искажению колебаний, однако в случае, когда  $t_0$  соизмеримо с периодом возмущения, искажения могут быть весьма существенными.

#### Результаты работы и их обсуждение

Предлагаемые параметры для оценки неоднородности поля ускорений на площадке строительства могут иметь значение для проектирования сооружений с большим пятном застройки и протяженных сооружений. Учет неоднородности поля ускорений для оценки сейсмостойкости такого рода сооружений рассматривается в литературе, прежде всего, в работах профессора Ю.П. Назарова и Е.В. Позняк [Назаров, Николаенко, 1988; Nazarov, Poznyak, 2018]. В них выделяется интегральная (для сооружений с большими по площади опирания фундаментами) и дифференциальная (для сооружений с точечным опиранием на грунт) неоднородность для учета поля ускорений в расчетах на сейсмостойкость. Оценка неоднородности поля ускорений производится на основе решения задачи распространения упругой волны по дневной поверхности. На практике все может быть намного сложнее. Инженерные сейсмометрические сети и локальные группы станций являются инструментальной основой оценки пространственной неоднородности сейсмического поля [Карапетян и др., 2019, 2021; Мамаев и др., 2019; Harichandran, 1991; Sextos et al., 2015; Zaalishvili et al., 2020; Huang et al., 2020]. Для ответственных сооружений в задачу микросейсморайонирования следует включать оценку неоднородности поля ускорений на площадке строительства. В качестве примера авторы провели оценку предлагаемых параметров для трех точек площадки вблизи с. Чири-Юрт в Чеченской республике.

В 2012 г. Геофизическим институтом велись сейсмологические наблюдения в связи с выполнением работ по сейсмическому микрорайонированию площадки проектируемой Чири-Юртской ГЭС. Галечниковые грунты поймы и надпойменной террасы реки Аргун, распространенные в пределах площадки проектируемой Чири-Юртской ГЭС, характеризуются наличием песчано-глинистого заполнителя содержанием менее 30%, которые согласно СНиП-7-II-81\* по сейсмическим свойствам относятся к грунтам I категории. Были организованы стационарные пункты наблюдений за сейсмическими событиями, представляющие собой хорошо обустроенные подвальные помещения на правой террасе реки в селениях Дуба-Юрт (код станции DBU) и Чири-Юрт (код станции CHU) и на левой террасе в селении Старые Атаги (код станции SAT). В состав каждого пункта сейсмологических наблюдений входил регистратор сейсмических сигналов (РСС) «Дельта-Геон-2М», 3-х компонентный сейсмоприемник СПВ-3К. Запись велась в режиме непрерывной регистрации с частотой дискретизации 125 Гц. Продолжительность непрерывных наблюдений составила более 4-х месяцев. За этот период было зарегистрировано



Puc. 1. Записи ускорений для двух близко расположенных точек поверхности / Fig. 1. Acceleration records for two closely spaceds urface points

около сотни сейсмических событий различной природы. Для группирования отобранных событий по признаку магнитуд и эпицентральных расстояний на основе использования данных имеющихся каталогов и бюллетеней сейсмических событий для данной территории были определены параметры соответствующих землетрясений. Для отсутствующих событий в бюллетенях эпицентры были оценены по параметрам поляризации первых вступлений р-волн.

Пункты наблюдений «Старые Атаги» и «Чири-Юрт» были расположены на расстоянии 2 км на разных, противоположных берегах р. Аргун. Записи, зарегистрированные указанными станциями, позволяют проанализировать неоднородность поля ускорений на площадке строительства в зависимости от направления прихода сейсмических волн и других параметров событий.

Обратимся, прежде всего, к анализу близко расположенных точек. В литературе [Петров, Базилевский, 1978; Сейсмический риск ..., 1981; Kiureghian, 1996] отмечается, что при удалении точек друг от друга более чем на 60 м, корреляцией колебаний можно пренебречь. Авторы рассмотрели два воздействия для пунктов наблюдений, расположенных примерно в 200 м друг от друга. Акселерограммы колебаний дневной поверхности представлены на рис. 1, а результаты расчетов в таблице 3.

Внешне записи довольно похожи. Пиковые значения амплитуд близки. Преобладающие периоды колебаний составляют 0,15 с. Однако корреляция записей незначительна.

Представленные данные дают значительно больше информации о воздействии, чем просто коэффициент корреляции. Мы видим, что они довольно близки по показателю z и показателю когерентности. Вместе с тем показатель несинхронности весьма мал, что указывает на то, что фронт волны был почти параллелен линии, соединяющей точки.

Таблица 3 / Table 3

Характеристики «похожести» возд	ействий, представленных на рисунке 1 /
Characteristics of the "similarity	y" of the impacts presented in Figure 1

			_ F · · · · F · · · · · ·	8
Коэффициент корреляции / Correlation coefficient	Показатель несин- хронности / Indicator of out-of-sync	Коэффициент когерентности / Coherence indicator	Показатель раз- номасштабности / Indicator of multi -scale	Показатель непо- хожести / Indicator of dissimilarity
0,143	0,003	0,315	1,011	0,303



*Puc. 2. Записи ускорений в поселках Дуба-Юрт, Чири-Юрт и Старые Атаги / Fig. 2. Records of accelerations in the settlements of Duba-Yurt, Chiri-Yurt and Starye Atagi* 

Обратимся теперь к точкам, расположенным в селениях Дуба-Юрт, Чири-Юрт и Старые Атаги. Пример записей при одном воздействии приведен на рисунке 2. Чисто внешне видно, что записи отличаются. Запись в селе Старые Атаги более высокочастотная. За базу (в качестве функции f) нами принята запись в Дуба-Юрте. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Как видно из таблицы, точки удалены значительно и коэффициент корреляции практически равен 0. Зато появился показатель несинхронности возмущения, сопоставимый с периодом колебаний грунта. Когерентность практически отсутствует, а вот показатель разномасштабности близок к 1, т.е. амплитуда и энергия воздействия во всех точках соизмеримы. В целом, воздействие в Чири-Юрт более похоже на воздействие в Дуба-Юрт, чем на воздействие в Старых Атагах.

Таблица 4 / Table 4

Характеристики «похожести» воздействий, в поселках Дуба-Юрт, Чири-Юрт и Старые Атаги / Characteristics of the "similarity" of impacts, in the villages of Duba-Yurt, Chiri-Yurt and Starye Atagi

Коэффициент корреляции / Correlation coefficient	Показатель несин- хронности / Indicator of out-of-sync	Коэффициент когерентности / Coherence indicator	Показатель раз- номасштабности / Indicator of multi -scale	Показатель непо- хожести / Indicator of dissimilarity
0,062	0,015	0,055	1,23	0,284
0,044	0,027	0,038	1,13	0,165

Предлагаемый подход позволяет на предварительных этапах проектирования, не имея полной геологии площадки, получить показатели неоднородности поля ускорений, измеряя только микросейсмы на дневной поверхности. При этом можно зафиксировать несинхронность, некогерентность и разномасштабность поля ускорений. Каждый из этих факторов обуславливается характерными особенностями грунтовой толщи на площадке и указывает на то, какие и в каких местах геологические данные следует дополнительно получить для проектирования.

#### Выводы

1. В статье предложена детализация оценки пространственного распределения сейсмических ускорений на площадке строительства. Для этого введено четыре характеристики неравномерности поля ускорений на дневной поверхности: показатель несинхронности, показатель некогерентности, показатель разномасштабности (разницы амплитуд колебаний) и показатель непохожести.

2. Выполнены простые тестовые расчеты и приведен пример использования реальных записей землетрясений, полученных при выполнении работ по сейсмическому микрорайонированию площадки проектируемой Чири-Юртской ГЭС.

3. Показатель разномасштабности позволяет скорректировать расчетное ускорение при проектировании сооружений с большим пятном застройки. Показатель несинхронности указывает на необходимую величину деформационных швов для протяженных сооружений. Представляется целесообразным построение предлагаемых карт на стадии обоснования проектных решений. Если введенные показатели сильно различаются по площади предполагаемой застройки, то для проектирования следует разрабатывать специальные технические условия и представлять детальную геологию площадки строительства.

#### Литература

1. Гиман Л. Н., Уздин А. М. К вопросу расчета на сейсмические воздействия протяженных сооружений с дискретными опорами. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2002. – № 2. – С. 18-23.

2. Гиман Л.Н., Уздин А.М. Об одной форме представления сейсмического воздействия для оценки корреляции колебаний точек дневной поверхности при расчете многоопорных конструкций. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2006. – № 2. – С. 22-25.

3. Карапетян Дж.К., Айрапетян О.Ю., Мхитарян Д.А. Анализ динамических характеристик здания комплексной конструкции. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 1. – С. 110-121. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26792.

4. 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.

5. Мамаев С. А., Дорофеев В. М., Мамаев А. С. Определение динамических параметров моделей зданий и сооружений на основе инженерно-сейсмометрической информации. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. №4. – С. 111-125. DOI: 10.23671/ VNC.2019.4.44493.

6. Назаров Ю.П., Николаенко Н.А. Динамика и сейсмостойкость сооружений. – М.: Стройиздат, 1988. – 312 с.

7. Петров А.А., Базилевский С.В. Учет взаимной корреляции между обобщенными координатами при определении сейсмических нагрузок. // Реф. инф. «Сейсмостойкое стро-

ительство (отечественный и зарубежный опыт)», серия XIV, ЦИНИС – 1978. – Вып. 5. – С. 23-28.

8. Сейсмический риск и инженерные решения. // Пер. с англ. / Под ред. Ц. Ломнитца и Э. Розенблюта. – М.: Недра, 1981. – 375 с.

9. Уздин А.М., Кузнецова И.О. Сейсмостойкость мостов. – Саарбрюкен: Palmarium, 2014. – 450 с.

10. Ardila J., Chio G., Benjumea J. Asynchronous seismic excitation in bridges: asynchronous patterns, analysis methods and structural types studied. // Revista Ingenieria De Construccion. – 2018. – Vol. 33 (1). – pp. 93-110.

11. Bogdanoff J. L., Goldberg J. E., Schiff A. J. The effect of ground transmission time on the response of long structures. // Bull. Seism. Soc. Am. – 1965. – Vol. 55. – pp. 627-640.

12. Dong K. K., Wieland M. Application of response spectrum method to a bridge subjected to multiple support excitation. // The proceedings of the 9-th World conference on earthquake engineering (9-th WCEE), Tokyo, Japan/ – 1988. – Vol. VI. – pp. 531-536.

13. Falamarz-Sheikhabadi M. R., Zerva A. Two uncertainties in simulating spatially varying seismic ground motions: incoherency coefficient and apparent propagation velocity. // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2018. – Vol. 16 (10). – pp. 4427-4441. DOI: 10.1007/s10518-018-0385-x

14. Gatti F., De Carvalho Paludo L., Clouteau D. Investigation of the earthquake ground motion coherence in heterogeneous non-linear soil deposits. // Procedia Engineering, 12 September 2017. – 2017. – Vol. 199. – pp. 2354-2359.

15. Harichandran R. S. Estimating the spatial variation of earthquake ground motion from dense array recordings. // Structural Safety. – 1991. – Vol. 10. – pp. 219-233. DOI: 10.1016/0167-4730 (91) 90016-3

16. Huang Jyun-Yan, Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Chun-Hsiang Kuo, Kuo-Liang Wen, Chun-Te Chen. Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan. // Geology and Geophysics of Russian South. – 2020. – Vol. 10. No. 2. – pp. 95-112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007.

17. Jia Hongyu, Yue Weiqin, Zheng Shixiong, Gou Hongye. Time-dependent pounding probability analysis between adjacent decks of bridges under non-stationary stochastic seismic excitations. // December 2020, Structures. – Vol. 28 (2020). – pp. 2355-2366. DOI:10.1016/j. istruc. 2020.10.028

18. Igusa T., Der Kiureghian A. Dynamic response of multiply supported secondary systems. // Journal of Engineering Mechanics. (ASCE). – 1985. – Vol. 111 (1). – pp. 20-41

19. Shen Jiyang, Li Rui, Shi Jun, Zhou Guangchun. Modified Multi-Support Response Spectrum Analysis of Structures with Multiple Supports under Incoherent Ground Excitation. // Applied Sciences, April. – 2019. – Vol. 9 (9). – p. 1744 DOI:10.3390/app9091744

20. Katsuhisa Kanda Seismic responses of structures subjected to incident incoherent waves considering a layered media with irregular interfaces. // The proceedings of the 12-th World conference on earthquake engineering (12-th WCEE), 30 January – 4 February 2000, Auckland, New Zealand; Paper reference 0649.

21. Kiureghian A. A response spectrum method for random vibration analysis of MDF systems. // Earthquake engineering and structural dynamics. – 1981. – Vol. 9. – pp. 419-435.

22. Kiureghian A. A coherency model for spatially varying ground motions. // Earthquake engineering and structural dynamics. – 1996. – Vol. 25. – pp. 99-111.

23. Kiureghian A., Neuenhofer A. Response spectrum method for multi-support seismic excitations. // Earthquake engineering and structural dynamics. – 1992. – Vol. 21. – pp. 713-740.

24. Lavorato D., Vanzi I., Nuti C., Monti G. Generation of Non-synchronous Earthquake Signals. // Risk and Reliability Analysis: Theory and Applications: in Honor of Prof. Armen Der Kiureghian. – 2017. – pp. 169-198. DOI: 10.1007/978-3-319-52425-2 8

25. Lavorato D., Fiorentino G., Bergami A.V., Briseghella B., Nuti C., Santini S., Vanzi I. Asynchronous earthquake strong motion and RC bridges response. // Journal of Traffic and

Transportation Engineering-English Edition. – 2018. – Vol. 5 (6). – pp. 454-466. DOI:10.1016/j. jtte. 2018.06.001

26. Meibodi A.A., Alexander N.A. Spatiotemporal seismic excitation of bridges with an anti-symmetrical first mode. // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2021. – Vol. 19 (4). – pp. 1957-1977. DOI: 10.1007/s10518-020-01025-5

27. Nazarov Y.P. Poznyak E.V. Response Spectrum Method for integrated and differential spatial seismic ground motions. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2018. – Vol. 108. – pp. 69-78. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2018.02.014

28. Papadopoulos S.P., Sextos A.G. Anti-symmetric mode excitation and seismic response of base-isolated bridges under asynchronous input motion. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2018. – Vol. 113. – pp. 148-161. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2018.06.004

29. Papadopoulos S. P., Sextos A. G. Simplified design of bridges for multiple-support earthquake excitation. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2020. – Vol. 131. – Article 106013. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2019.106013

30. Petronijević M., Nefovska M., Brčić S. Multiple-support seismic analysis of bridges including soil-structure interaction. // Proc. of 12-th European Conference on Earthquake Engineering 9-13th September 2002. Paper Reference 180.

31. Savvas P., Papadopoulos S. P., Anastasios G. Sextos A. G. Simplified design of bridges for multiple-support earthquake excitation. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27 January 2020. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2019.106013

32. Sextos A., Karakostas C., Lekidis V., Papadopoulos S. Multiple support seismic excitation of the Evripos bridge based on free-field and on-structure recordings. // Structure and Infrastructure Engineering. – 2015. – Vol. 11 (11). – pp. 1510-1523. DOI: 10.1080/15732479.2014.977302.

33. Smirnova L., Uzdin A., Polorotova N., Freze M. Important feature of calculating bridges under seismic action. // E3S Web of Conferences 157, 06020. - 2020. DOI: 10.1051/  $e^{3}$ sconf/202015706020

34. Soyluk K., Karaca H. Asynchronous dynamic analyses of cable-supported bridges under near-fault ground motions. // Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. – 2021. – Vol. 36 (2). – pp. 727-742. https://doi. org/10.17341/gazimmfd. 594282

35. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G, Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. // Geology and Geophysics of Russian South. – 2020. – Vol. 10 (3). – pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

#### References

1. Giman L.N., Uzdin A.M. On the issue of calculating the seismic loadings of extended structures with discrete supports. Earthquake Engineering Constructions Safety. 2002. No. 2. pp. 18-23. (In Russ.)

2. Giman L. N., Uzdin A. M. On one form of seismic impact representation for assessing the correlation of fluctuations of day surface points in the calculation of multi-support structures. Earthquake Engineering Constructions Safety. 2006. No. 2. pp. 22-25. (In Russ.)

3. Karapetyan J.K., Hayrapetyan H.Yu., Mkhitaryan D.A. Analysis of the dynamic characteristics of the mixed structure building. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2019. Vol. 9. No. 1. pp. 110-121. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26792 (In Russ.)

4. 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.)

5. Mamaev S.A., Dorofeev V.M., Mamaev A.S. Determination of dynamic parameters of models of buildings and structures based on engineering seismometric information. Geology of the South of Russia. 2019. Vol. 9. No. 4. pp. 111-125. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.44493 (In Russ.)

6. Nazarov Yu. P., Nikolaenko N.A. Dynamics and seismic resistance of structures. Moscow. Stroyizdat, 1988. 312 p. (In Russ.)

7. Petrov A.A., Bazilevsky S.V. Accounting for cross-correlation between generalized coordinates when determining seismic loads. Ref. inf. "Earthquake Engineering (national and foreign experience), series XIV, CINIS. 1978. Issue. 5. pp. 23-28. (In Russ.)

8. LomnitzC., Rosenbluth E. (ed.) Seismic risk and engineering solutions. Moscow. Nedra, 1981. 375 p. (In Russ.)

9. Uzdin A.M., Kuznetsova I.O. Seismic resistance of bridges. Saarbrucken. Palmarium, 2014. 450 p. (In Russ.)

10. Ardila J., Chio G., Benjumea J. Asynchronous seismic excitation in bridges: asynchronous patterns, analysis methods and structural types studied. Revista Ingenieria De Construccion. 2018. Vol. 33. No. 1. pp. 93-110.

11. Bogdanoff J. L., Goldberg J. E., Schiff A. J. The effect of ground transmission time on the response of long structures. Bull. Seism. Soc. Am. 1965. Vol. 55. pp. 627-640.

12. Dong K.K., Wieland M. Application of response spectrum method to a bridge subjected to multiple support excitation. In: The proceedings of the 9-th World conference on earthquake engineering (9-th WCEE), Tokyo, Japan. 1988. Vol. VI. pp. 531-536.

13. Falamarz-Sheikhabadi M. R., Zerva A. Two uncertainties in simulating spatially varying seismic ground motions: incoherency coefficient and apparent propagation velocity. Bulletin of Earthquake Engineering. 2018. Vol. 16. Issue 10. pp. 4427-4441. DOI: 10.1007/s10518-018-0385-x.

14. Gatti F., De Carvalho PaludoL., ClouteauD. Investigation of the earthquake ground motion coherence in heterogeneous non-linear soil deposits. Procedia Engineering, 12 September 2017. 2017. Vol. 199. pp. 2354-2359.

15. Harichandran R. S. Estimating the spatial variation of earthquake ground motion from dense array recordings. Structural Safety. 1991. Vol. 10. pp. 219-233. DOI: 10.1016/0167-4730 (91) 90016-3

16. Huang Jyun-Yan, Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Chun-Hsiang Kuo, Kuo-Liang Wen, Chun-Te Chen. Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 95-112. DOI: 10.46698/ VNC.2020.28.93.007

17. Jia Hongyu, Yue Weiqin, Zheng Shixiong, Gou Hongye. Time-dependent pounding probability analysis between adjacent decks of bridges under non-stationary stochastic seismic excitations. December 2020, Structures. Vol. 28. 2020. pp. 2355-2366. DOI:10.1016/j. istruc. 2020.10.028

18. Igusa T., Der Kiureghian A. Dynamic response of multiply supported secondary systems. Journal of Engineering Mechanics. (ASCE). 1985. Vol. 111. No. 1. pp. 20-41

19. Shen Jiyang, Li Rui, Shi Jun, Zhou Guangchun. Modified Multi-Support Response Spectrum Analysis of Structures with Multiple Supports under Incoherent Ground Excitation. Applied Sciences, April. 2019. Vol. 9. Issue 9. p. 1744. DOI: 10.3390/app9091744.

20. Katsuhisa Kanda Seismic responses of structures subjected to incident incoherent waves considering a layered media with irregular interfaces. In: The proceedings of the 12-th World conference on earthquake engineering (12-th WCEE), 30 January – 4 February 2000, Auckland, New Zealand; Paper reference 0649.

21. Kiureghian A. A response spectrum method for random vibration analysis of MDF systems. Earthquake engineering and structural dynamics. 1981. Vol. 9. pp. 419-435.

22. Kiureghian A. A coherency model for spatially varying ground motions. Earthquake engineering and structural dynamics. 1996. Vol. 25. pp. 99-111.

23. Kiureghian A., Neuenhofer A. Response spectrum method for multi-support seismic excitations. Earthquake engineering and structural dynamics. 1992. Vol. 21. pp. 713-740.

24. Lavorato D., Vanzi I., Nuti C., Monti G. Generation of Non-synchronous Earthquake Signals. Risk and Reliability Analysis: Theory and Applications: in Honor of Prof. Armen Der Kiureghian. 2017. pp. 169-198. DOI: 10.1007/978-3-319-52425-2 8

25. Lavorato D., Fiorentino G., Bergami A.V., Briseghella B., Nuti C., Santini S., Vanzi I. Asynchronous earthquake strong motion and RC bridges response. Journal of Traffic and Transportation Engineering-English Edition. 2018. Vol. 5 No. 6. pp. 454-466. DOI:10.1016/j. jtte. 2018.06.001.

26. Meibodi A.A., Alexander N.A. Spatiotemporal seismic excitation of bridges with an anti-symmetrical first mode. Bulletin of Earthquake Engineering. 2021. Vol. 19. Issue 4. pp. 1957-1977. DOI: 10.1007/s10518-020-01025-5.

27. Nazarov Y.P. Poznyak E.V. Response Spectrum Method for integrated and differential spatial seismic ground motions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2018. Vol. 108. pp. 69-78. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2018.02.014.

28. Papadopoulos S. P., Sextos A. G. Anti-symmetric mode excitation and seismic response of base-isolated bridges under asynchronous input motion. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2018. Vol. 113. pp. 148-161. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2018.06.004

29. Papadopoulos S.P., Sextos A.G. Simplified design of bridges for multiple-support earthquake excitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2020. Vol. 131. Article 106013. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2019.106013.

30. Petronijević M., Nefovska M., Brčić S. Multiple-support seismic analysis of bridges including soil-structure interaction. In: Proc. of 12-th European Conference on Earthquake Engineering 9-13th September 2002. Paper Reference 180.

31. Savvas P., Papadopoulos S. P., Anastasios G. Sextos A. G. Simplified design of bridges for multiple-support earthquake excitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27 January 2020. DOI: 10.1016/j. soildyn. 2019.106013.

32. Sextos A., Karakostas C., Lekidis V., Papadopoulos S. Multiple support seismic excitation of the Evripos bridge based on free-field and on-structure recordings. Structure and Infrastructure Engineering. 2015. Vol. 11. Issue 11. pp. 1510-1523. DOI: 10.1080/15732479.2014.977302.

33. Smirnova L., Uzdin A., Polorotova N., Freze M. Important feature of calculating bridges under seismic action. E3S Web of Conferences 157, 06020. 2020. DOI: 10.1051/ e<sup>3</sup>sconf/202015706020.

34. Soyluk K., Karaca H. Asynchronous dynamic analyses of cable-supported bridges under near-fault ground motions. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. 2021. Vol. 36 No. 2. pp. 727-742. DOI: 10.17341/gazimmfd. 594282.

35. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G, Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.