

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.3

[DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.67.36.006)

Оригинальная статья

Об оценках спектров колебаний и спектральных характеристик грунтов для вероятностного анализа сейсмической опасности территорий

Ю.К. Чернов 

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: chenta-26@mail.ru

Статья поступила: 26.04.2023, доработана: 22.05.2023, одобрена к публикации: 31.05.2023

Резюме: Актуальность работы. В связи с появлением новых данных о существенной вариабельности, полученных для территории РСО-Алания интегральных (кумулятивных) оценок макросейсмической интенсивности сотрясений разных по сейсмическим свойствам грунтов, для этого же района рассмотрены аналогичные количественные оценки других важных с научной и практической точек зрения характеристик сейсмических воздействий – спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов и соотношений между ними. **Цель исследования.** Изучение абсолютных и относительных оценок интегральных спектров колебаний грунтов с разными сейсмическими свойствами для вероятностного прогнозирования сейсмической опасности территории РСО-Алания. **Методы исследования.** Основной элемент работы – вероятностный анализ сейсмической опасности (PSHA) нескольких «представительных» участков территории РСО-Алания, выполненный в терминах интегральных вероятных спектров Фурье и спектров реакции колебаний «мягких» и «твердых» грунтов, а также соотношений между ними – спектральных характеристик. Итоговые функции распределения рассчитывались отдельно для каждой из 18 спектральных составляющих в диапазоне частот 0,28–22 Гц. Расчеты проведены на основе формулы полной вероятности, где условная вероятность отражает случайную природу колебаний грунта при возникновении землетрясений, а безусловная – неопределенность в возникновении этих землетрясений. Используются разработанные ранее модели локальной сейсмичности (модели зон ВОЗ, повторяемости землетрясений во времени и др.) и модели сильных движений (вероятностные функции затухания спектров Фурье «мягких» и «твердых» грунтов). Интегральные спектры реакции рассчитывались по интегральным спектрам Фурье с использованием связи спектральных ускорений с энергетической спектральной плотностью Фурье. **Результаты исследования.** Для каждого «представительного» участка разработаны интегральные спектры Фурье и спектры реакции колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях со средними периодами повторяемости 500, 1000, 2500 и 5000 лет. По соотношениям этих спектров определены интегральные спектральные характеристики колебаний «мягких» грунтов по отношению к «твердым». Произведен сравнительный анализ полученных спектров и спектральных характеристик. Показано, что полученные спектральные характеристики подвержены значительным (до 45%) флуктуациям как в части расположения расчетного участка, так и в зависимости от среднего периода повторяемости расчетных землетрясений, что говорит о необходимости учета этого обстоятельства в исследовательской и практической работе. Установленные флуктуации спектров и спектральных характеристик в целом сходны с выявленной ранее для данной территории вариабельностью интегральных макросейсмических интенсивностей сотрясений и приращений балльности. Но есть и отличия. Это делает прямые переходы, например, от оценок приращений балльности к спектральным характеристикам чреватыми существенными погрешностями. Это также следует иметь в виду при проведении оценок типа PSHA. Полученные результаты пока трактуются как относящиеся только к территории РСО-Алания. Насколько они применимы и к другим районам предстоит выяснить в дальнейшем.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, вероятностные оценки сейсмических воздействий, спектральные характеристики грунтов, спектры колебаний грунта, сейсмическое микрорайонирование.

Для цитирования: Чернов Ю.К. Об оценках спектров колебаний и спектральных характеристик грунтов для вероятностного анализа сейсмической опасности территорий. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 67–81. DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006.

G E O P H Y S I C S

[DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.67.36.006)

Original paper

On estimates of vibration spectra and spectral characteristics of soils for probabilistic seismic hazard analysis of territories

Y.K. Chernov 

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: chenta-26@mail.ru

Received: 26.04.2023, revised: 22.05.2023, accepted: 31.05.2023

Abstract: Relevance. In connection with the emergence of new data on the significant variability of integral (cumulative) estimates of the macroseismic intensity of shaking of soils of different seismic properties obtained for the territory of RNO–Alania, similar quantitative estimates of other seismic impact characteristics that are important from scientific and practical points of view are considered for the same area – vibration spectra of “soft” and “hard” soils and the relationships between them. **The aim.** The study of absolute and relative estimates of the integral spectra of soil vibrations with different seismic properties for probabilistic forecasting of the seismic hazard of the RNO–Alania territory. **Methods.** The main element of the work is a probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) of several “representative” sites of the RNO–Alania territory, performed in terms of the integral probable Fourier spectra and the response spectra of vibrations for “soft” and “hard” soils, as well as the ratios between them – spectral characteristics. The final distribution function was calculated separately for each of the 18 spectral components in the frequency range of 0.28–22 Hz. The calculations were carried out on the basis of the total probability formula, where the conditional probability reflects the random nature of ground vibrations during the occurrence of earthquakes, and the unconditional one reflects the uncertainty in the occurrence of these earthquakes. Previously developed models of local seismicity (models of PSS zones, recurrence of earthquakes in time, etc.) and models of strong motions (probability functions of the Fourier spectrum attenuation of “soft” and “hard” soils) were used. The integral reaction spectra were calculated from the integral Fourier spectra using the relationship between spectral accelerations and the Fourier energy spectral density. **Results.** For each “representative” site, integral Fourier spectra and response spectra of vibrations for “soft” and “hard” soils during earthquakes with average return periods of 500, 1000, 2500 and 5000 years have been developed. According to the ratios of these spectra, the integral spectral characteristics of vibrations of “soft” soils in relation to “hard” soils are determined. A comparative analysis of the obtained spectra and spectral characteristics is carried out. It is shown that the obtained spectral characteristics are subject to significant (up to 45%) fluctuations both in terms of the location of the calculated site and depending on the average recurrence period of the calculated earthquakes, which indicates the need to take this circumstance into account in research and practical work. The established fluctuations of the spectra and spectral characteristics are generally similar to the variability of the integral macroseismic intense shaking and intensity increments identified earlier for this territory. But there are also differences. This makes direct transitions, for example, from estimations of intensity increments to spectral characteristics, fraught with significant errors. This should also be kept in mind when conducting PSHA–type assessments. The results obtained so far are interpreted as relating only to the territory of RNO–Alania. How applicable they are to other areas remains to be seen in the future.

Keywords: seismic hazard, probabilistic estimates of seismic impacts, spectral characteristics of soils, spectra of soil vibrations, seismic microzonation.

For citation: Chernov Y.K. On estimates of vibration spectra and spectral characteristics of soils for probabilistic seismic hazard analysis of territories. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 67–81. DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006.

Введение

Грунтовые условия существенным образом влияют на характер и величину последствий возникающих в данном месте землетрясений. В связи с этим количественной оценке и учету такого влияния в инженерно-сейсмологических исследованиях во всем мире всегда уделялось большое внимание. В результате к настоящему времени уже накоплен обширный опыт экспериментальных и теоретических разработок, произведены глубокие обобщения, подготовлены соответствующие методические и практические рекомендации, создана соответствующая нормативная база. В то же время, несмотря на значительный прогресс в данной области знаний, в процессе развития данного направления продолжают выявляться новые аспекты, требующие дополнительного рассмотрения. Так, например, выполненные в Геофизическом институте ВНИИ РАН исследования, показали, что функции затухания спектров Фурье ускорений колебаний двух разных типов грунтов, в обобщенном виде названных «мягкими» и «твердыми», могут существенно отличаться от моделей, традиционно используемых в отечественной и ряде зарубежных практик оценок сейсмических воздействий, сейсмической опасности и сейсмического риска. Основная особенность этих функций затухания состоит в том, что количественные соотношения между уровнями спектральной плотности ускорений колебаний рассмотренных двух типов («мягких» и «твердых») грунтов на фиксированных частотах не являются постоянными (в средне-статистическом смысле, разумеется) величинами, как это вытекает из действующих отечественных нормативно-методических документов, а закономерно меняются в зависимости от частоты спектральной составляющей, магнитуды землетрясения и расстояния до очага [Чернов, 2022]. В свою очередь, использование этих новых функций затухания в расчетах сейсмических воздействий, может приводить к корректировке оценок, получаемых на основе традиционных моделей сильных движений грунта. В наиболее простой и явной форме этот эффект будет проявляться в случае так называемых «ситуационных» оценок, когда расчет воздействия осуществляется для землетрясения с известным (заданным) расположением, магнитудой и другими характеристиками очага ожидаемого землетрясения. Для интегральных же вероятностных оценок, когда прогнозируемое воздействие рассчитывается как суперпозиция воздействий от всех потенциально опасных для данного места очагов землетрясений, с учетом вероятности их возникновения в окружающем расчетную точку сейсмогенерирующем пространстве, вопрос о том, каковы характер и величина ожидаемой коррекции уже не является тривиальным и требует отдельного рассмотрения.

В связи с этим в Геофизическом институте ВНИИ РАН в рамках следующего этапа исследований для территории РСО-Алания выполнены вероятностные оценки макросейсмической интенсивности сотрясений для «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях со средними периодами повторяемости 500, 1000, 2500 и 5000 лет. Эти данные затем были использованы для оценок распределения по рассматриваемой территории приращений балльности, т.е. поточечных разностей вероятных балльностей сотрясений, рассчитанных для «мягких» и «твердых» грунтов. Полученные результаты показали значительную (до 0,8 балла *MSK*) вариабельность рассчитанных значений приращений балльности как по площади, так и по повторяемости расчетных землетрясений, что, помимо чисто познавательного значения, делает учет этих флуктуаций актуальным для практических целей (подробнее см. в [Чернов Ю. и др., 2022]).

В вышеуказанном случае вероятные сейсмические воздействия в первоочередном порядке рассмотрены в виде макросейсмических интенсивностей сотрясений.

Это сделано потому, что в отечественных строительных нормативах именно этот параметр является одним из основных показателей, используемых для расчетов сейсмических нагрузок на строительные объекты. В то же время практикой антисейсмического проектирования предусмотрено использование еще одного важного расчетного параметра – спектров реакции колебаний грунта, которые российскими нормативами в формализованном виде задаются в виде произведения нормативного или эффективного ускорения (ранее коэффициента сейсмичности) и соответствующих разным частотам коэффициентов динамичности. Поэтому, принимая во внимание вышеприведенные оценки variability приращений балльности, можно сказать, что в рассматриваемом контексте вопрос анализа variability вероятных интегральных спектров «мягких» и «твердых» грунтов и их соотношений (спектральных характеристик) при оценках долговременной сейсмической опасности также становится **актуальным**.

Рассмотрению данной **задачи** и посвящено настоящее исследование.

Методика исследований

Основным элементом данной работы является вероятностный анализ сейсмической опасности (probabilistic seismic hazard analysis или PSHA) нескольких «представительных» участков территории РСО-Алания, выполненный в терминах интегральных вероятных спектров Фурье и производных от них спектров реакции ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов. Рассмотрено четыре таких участка размером 5×5 км² – по одному в каждой из выделенных ранее на территории РСО-Алания зон с разными значениями приращений балльности для землетрясений с средним периодом повторяемости $t=500$ лет. Расположение участков выбрано таким образом, чтобы они характеризовались средними для данной зоны значениями приращений балльности (рис. 1). Для каждого из участков (№1–4) сделаны оценки спектров Фурье и спектров реакции для землетрясений со средними периодами повторяемости $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет.

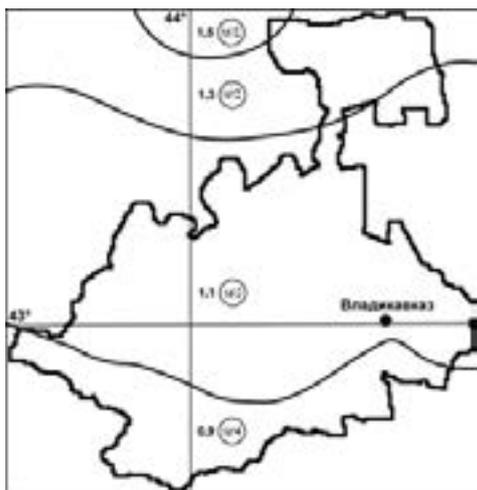


Рис. 1. Участки, для которых произведены оценки вероятных спектров и спектральных характеристик «мягких» и «твердых» грунтов (кружки с номерами этих участков). Толстая линия – граница РСО-Алания; тонкие линии – границы зон с разными приращениями балльности для землетрясений с $t=500$ лет из [Чернов Ю. и др., 2022], цифры около кружков – средние значения приращений балльности для данной зоны /

Fig. 1. Sites for which estimates of probable spectra and spectral characteristics of “soft” and “hard” soils were made (circles with numbers of these sites). The thick line is the RNO–Alania border; thin lines are the boundaries of zones with different intensity increments for earthquakes with $t=500$ years from [Chernov Yu. et al., 2022], the numbers near the circles are the average intensity increments for this zone

Расчеты PSHA производились по той же общей схеме, что и ранее выполненные оценки макросейсмических интенсивностей сотрясений. Согласно этой схеме, итоговая функция распределения вероятностей рассчитывается на основе формулы полной вероятности, где условная вероятность отражает случайную природу ко-

лебаний грунта при возникновении землетрясений с теми или иными характеристиками, а безусловная описывает случайный характер возникновения самих этих землетрясений (см. [Чернов Ю. и др., 2022]).

В процессе указанных построений использованы исходные данные двух типов. Первый тип – это разработанные на предыдущих этапах исследования модели сильных движений грунта (СДГ) – спектров Фурье ускорений колебаний двух типов грунтов, обозначаемых как «мягкие» и «твердые» грунты. Подробно эти модели описаны в [Чернов, 2022]. Здесь же приводятся только их основные характеристики.

Данные модели описывают частотно-зависимые значения параметров функций распределения вероятностей уровней спектральной плотности Фурье ($|S|(f)$) колебаний указанных двух типов грунтов при землетрясениях с различными магнитудами (M) и расстояниями до очага (D). Эти модели построены на основе статистического анализа большого объема эмпирического материала – 2362 спектра колебаний «мягких» и 1021 спектр «твердых» грунтов при землетрясениях с $M=2,5-7,3$ и $D=1-672$ км инструментально зарегистрированных на Кавказе, в Средней Азии, на Дальнем Востоке, в Калифорнии, Индии, Новой Зеландии, Юге Европы, Тайване, Японии и других сейсмоактивных районах мира. Исходным материалом при этом являются записи землетрясений, в разные годы полученные эпицентрными экспедициями и стационарными сейсмическими станциями Института сейсмологии АН УзССР, Института физики Земли АН СССР (РАН), Института морской геологии и геофизики ДВО АН СССР (РАН) и материалы, приводимые в публикациях, (см. [Ташкентское..., 1971; San-Fernando..., 1973; Analysis..., 1969-1976; Toker, Brune, 1973; Рустанович, 1974; Bull. of international..., 1978a–e; Strong-motion..., 1975-1979; Preliminary..., 1979; Назарбекское..., 1981; , Дагестанское..., 1981; Исфара-Баткентское..., 1981; Porcella et al., 1982; Bull. of strong-motion..., 1984a–c; Газлийские..., 1986; Папское..., 1986; Адылов и др., 1988; The Northridge..., 1994; Шикотанское..., 1995; Геодинамика..., 1997; Соколов, 1998], а также в специализированных базах сильных движений (Strong-Motion Virtual Data Center (VDC); European Strong-Motion Database (ESD)).

Модели построены в виде оценок наиболее вероятных значений и дисперсий (стандартных отклонений), распределенных по нормальному закону (при заданных M , D и f) случайных величин $\lg|S|(f)$ в ближней зоне землетрясений разных магнитуд и частотно-зависимых коэффициентов затухания этих величин по мере удаления от очагов землетрясений – $n(f, M, D) = \Delta \lg|S|(f, M, D) / \Delta \lg D$. На рисунке 2 в графическом виде даны примеры этих характеристик.

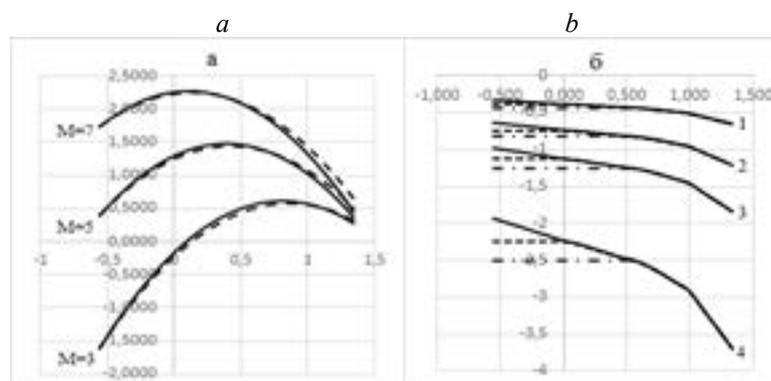


Рис. 2. Примеры принятых моделей СДГ: а – наиболее вероятные уровни спектров Фурье колебаний «мягких» (сплошная линия) и «твердых» (пунктир) грунтов в ближней зоне землетрясений разных магнитуд (M), ось ординат – $\lg|S|$ в см/с, ось абсцисс – $\lg f$ в Гц;

б – коэффициенты затухания n (ось ординат) уровней спектров колебаний «мягких» грунтов в зависимости от $\lg f$ (ось абсцисс); индексы 1, 2, 3, 4 – в переходной, в первой подзоне дальней зоны, в дальней зоне и во второй подзоне дальней зоны, соответственно; сплошная линия, пунктир и пунктир с точкой – для землетрясений с $M=7, 5, \text{ и } 3$, соответственно /

Fig. 2. Examples of adopted SDG models: a – the most probable levels of the Fourier spectra for “soft” (solid line) and “hard” (dotted line) soil vibrations in the near zones of earthquakes of different magnitudes (M), ordinate axis – $\lg|S|$ in cm/s, abscissa-axis is $\lg f$ in Hz; *b* – attenuation coefficients n (ordinate axis) of the levels of vibration spectra for “soft” soils depending on $\lg f$ (abscissa axis), indices 1, 2, 3, 4 – in the transition, in the first subzone of the far zone, in the far zone and in the second subzone of far zone, respectively, solid line, dashed line and dashed line with a dot – for earthquakes with $M=7, 5, \text{ and } 3$, respectively

Второй тип исходных данных – это разработанные на предыдущих этапах исследований модели локальной сейсмичности – модели зон ВОЗ (зон возникновения очагов землетрясений), модели повторяемости очагов землетрясений в рассматриваемом пятимерном сейсмогенерирующем объеме (энергия-пространство-время), модели, описывающие параметры потенциально опасных очагов землетрясений (рис. 3).

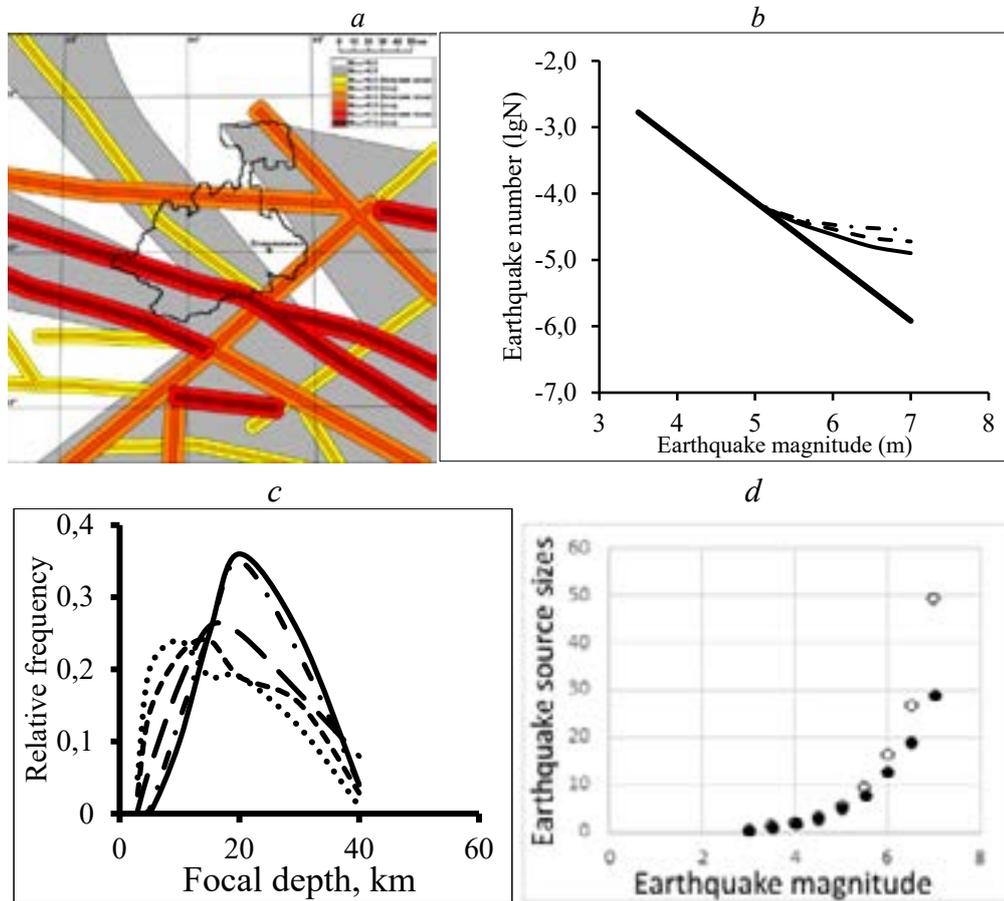


Рис. 3. Примеры использованных моделей локальной сейсмичности. а – зоны ВОЗ, черная ломаная линия – граница РСО-Алания; *б* – средние количества землетрясений (\bar{N}) разных магнитуд (M) для площади $5 \times 5 \text{ км}^2$ и времени 1 год (толстая и тонкая сплошные линии – средние по району и по зонам ВОЗ с разными M_{\max} , без разделения на осевые и боковые подзоны; пунктир и пунктир с точкой – для зон ВОЗ с разными M_{\max} с разделением на боковые и осевые подзоны, соответственно); *с* – распределения очагов по глубине для землетрясений с $M=3$ (точечная линия), с $M=4$ (короткий пунктир) с $M=5$ (длинный пунктир), с $M=6$ (пунктир с точкой, с $M=7$ (сплошная линия); *д* – длина и ширина (пустые и залитые кружки) очагов землетрясений /

Fig.3. Examples of used models of local seismicity. a – PSS zones, black broken line – the border of RNO–Alania; b – average number of earthquakes (\bar{N}) of different magnitudes (\bar{M}) for an area of 5*5 sq. km. and time of 1 year (thick and thin solid lines are averages for the area and for the PSS zones with different M_{max} , without division into axial and lateral subzones; dashed line and dashed line with a dot are for PSS zones with different M_{max} , divided into lateral and axial subzones, respectively); c – depth distributions of sources for earthquakes with $M=3$ (dotted line), with $M=4$ (short dashed line) with $M=5$ (long dashed line), with $M=6$ (dashed line with a dot), with $M=7$ (solid line); d – length and width (empty and filled circles) of earthquake sources

Под «зонами ВОЗ» здесь понимаются сейсмогенерирующие области земной коры и верхней мантии, где очаги землетрясений могут возникнуть или зародиться. Сами же очаги в процессе своего развития могут и выходить за границы непосредственно зон ВОЗ. В данном случае физический смысл зон ВОЗ отличается от представления о зонах ВОЗ как об областях, целиком вмещающих возникающие в их пределах очаги землетрясений. Указанные различия в определении зон ВОЗ не имеют большого значения при оценках сейсмической опасности на больших удалениях от этих зон или при небольших, разрешенных в этих зонах магнитудах землетрясений. При приближении же к зонам ВОЗ, особенно если в них могут возникать очаги большой протяженности, влияние размеров очага может оказаться решающим при оценках вызываемых ими сейсмических воздействий.

Итоговые функции распределения вероятностей случайных величин $lg|S|(f)$ рассчитывались отдельно для 18 спектральных составляющих, равномерно распределенных по частоте в инженерном диапазоне 0,28–22 Гц. По этим функциям затем по методике из [Ванмарке, 1981] оценивались параметры функций распределения соответствующих спектров реакции ($SA(f)$), т.е. амплитуд колебаний 18-ти осцилляторов с 5-типроцентным затуханием.

По полученным интегральным (кумулятивным) спектрам Фурье и спектрам реакции рассчитывались спектральные характеристики «мягких» грунтов по отношению к «твердым» – значения $\varphi(f)=|S|(f)_M/|S|(f)_T$ и $\psi(f)=SA(f)_M/SA(f)_T$, соответственно.

Результаты работы и их обсуждение

На рисунке 4 в качестве примера приведены вероятные значения $|S|(f)$ и $SA(f)$ «мягких и «твердых» грунтов, рассчитанные для рассматриваемых четырех участков территории РСО–Алания при землетрясениях с $t=500$ лет.

Из этого рисунка видно, что уровни спектров (и Фурье, и реакции) при землетрясениях с $t=500$ возрастают в южном направлении – от участка №1 к участку №4. Максимальные значения $|S|(f)_M$ и $|S|(f)_T$ наблюдаются на частотах 1–1,3 Гц, а максимумы $SA(f)_M$ и $SA(f)_T$ – на частотах 3–3,5 Гц. Спектры колебаний «твердых» грунтов в пределах одного участка ниже спектров колебаний «мягких» грунтов. Примерно так же ведут себя спектры Фурье и спектры реакции при увеличении t . Разница состоит в постепенном возрастании общего уровня спектров (и Фурье, и реакции, и для «мягких» и для «твердых» грунтов) в 2,3–2,9 раза при изменении t от 500 до 5000 лет. Стандартные отклонения случайных величин $lg|S|(f)$ и $lgSA(f)$ (в предположении их лог. нормального распределения) составляют ~0,3 для рассматриваемых f и t и для всех исследуемых участков на территории РСО–Алания.

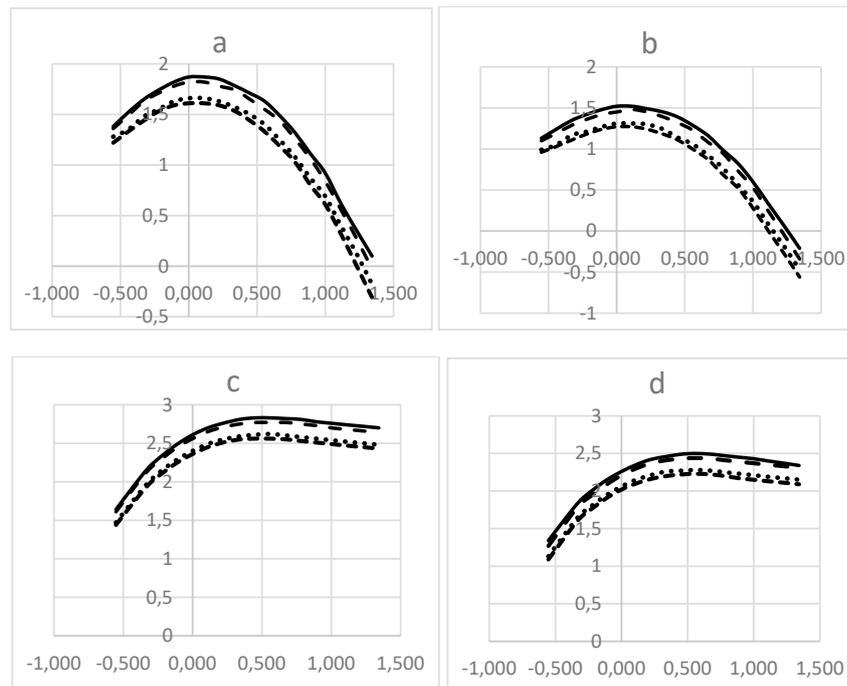


Рис. 4. Наиболее вероятные спектры колебаний грунта при землетрясениях с $t=500$ лет: *a* и *b* – спектры Фурье «мягких» и «твердых» грунтов, соответственно; *c* и *d* – спектры реакции «мягких» и «твердых» грунтов, соответственно; короткий пунктир, точечная линия, длинный пунктир и сплошная линия – оценки для участков №1, 2, 3 и 4, соответственно; оси абсцисс – $-\lg f$ в Гц, оси ординат – $-\lg|S|$ в см/с и $\lg SA$ и см/с/с, соответственно /

Fig. 4. The most probable spectra of soil vibrations during earthquakes with $t=500$ years: *a* and *b* – Fourier spectra for “soft” and “hard” soils, respectively; *c* and *d* – reaction spectra for “soft” and “hard” soils, respectively; short dashed line, dotted line, long dashed line and solid line are the estimates for sites 1, 2, 3 and 4, respectively; abscissa axes – $-\lg f$ in Hz, ordinate axes – $-\lg|S|$ in cm/s and $\lg SA$ and cm/s/s, respectively

О реалистичности представленных выше оценок (например, спектров реакции), в частности, говорит их хорошая согласованность с приведенными в таблице 1 независимыми оценками вероятных пиковых ускорений (PGA) и интенсивности сотрясений (I) грунта, полученных для тех же участков в процессе предыдущих исследований (см. [Чернов Ю. и др., 2022]).

Таблица 1 / Table 1

Интегральные вероятностные оценки параметров сейсмических воздействий в условиях «мягких» грунтов, независимым образом полученные для рассматриваемых участков территории РСО-Алания при землетрясениях с разными средними периодами повторяемости t . / Integral probabilistic estimates of the parameters of seismic impacts in the conditions of “soft” soils, independently obtained for the considered sites of the territory of RNO–Alania for earthquakes with different average return periods t

Участок, № / Site, N	t , лет /	Параметры сейсмических воздействий / Parameters of seismic impacts		
		$SA(f)_{\max}$, см/с/с / $SA(f)_{\max}$, cm/s/s	PGA , см/с/с / PGA , cm/s/s	I , балл MSK / I , MSK intensity
1	500	372	158	7,09
	1000	490	200	7,39
	2500	646	269	7,80
	5000	759	331	8,12

2	500	417	178	7,25
	1000	540	223	7,46
	2500	708	316	8,03
	5000	891	407	8,35
3	500	589	219	7,62
	1000	813	309	8,00
	2500	1122	437	8,48
	5000	1380	589	8,75
4	500	676	245	7,81
	1000	912	347	8,20
	2500	1245	501	8,75
	5000	1549	661	9,10

Действительно, отношения $(SA(f)_{\max})/PGA$ для разных участков и значений t варьируют в диапазоне 2,19-2,76 (среднегеометрическое значение 2,45), что не противоречит многочисленным данным, полученным разными исследователями по инструментальным записям сильных землетрясений (см. например, [Sadigh et al., 1986; Boore et al., 1994; Boore, Atkinson, 2008]). Соотношения между $SA(f)_{\max}$ (и другими значениями $SA(f)$), полученными в настоящем исследовании и I , коррелируют, например, с данными, приводимыми в [Atkinson, Sonley, 2000]. Кроме того, хорошие соответствия можно видеть между спектрами реакции настоящих исследований и оценками спектров, вытекающими из рекомендаций отечественных строительных нормативов, применительно к приведенным в таблице 1 значениям PGA и I в сочетании со стандартной кривой динамичности $\beta(T)$.

Далее по полученным интегральным спектрам для рассматриваемых участков территории РСО-Алания выполнен расчет соотношений $\varphi(f)=|S|(f)_M/|S|(f)_T$ и $\psi(f)=SA(f)_M/SA(f)_T$ для землетрясений с $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет. На рисунке 5 приведены типичные примеры полученных оценок.

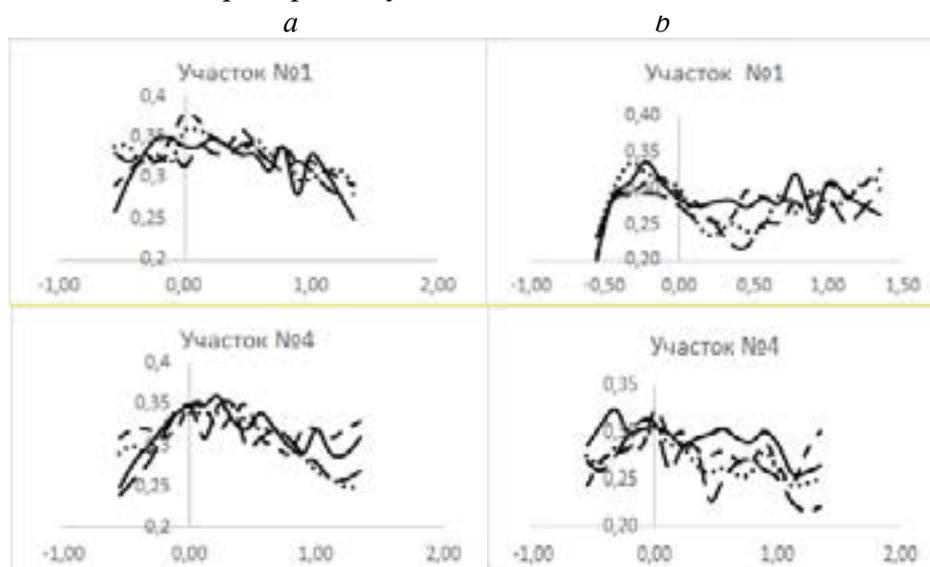


Рис. 5. Примеры вероятных значений $lg\varphi(f)$ (a) и $lg\psi(f)$ (b), рассчитанных для различных участков и землетрясений с $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет (сплошные линии, короткий пунктир, точечные линии и длинный пунктир, соответственно); оси абсцисс – lgf в Гц /

Fig. 5. Examples of probable values of $lg\varphi(f)$ (a) and $lg\psi(f)$ (b) calculated for different areas and earthquakes with $t=500, 1000, 2500$ and 5000 years (solid lines, short dashed line, dotted lines and long dashed line, respectively); abscissa axis – lgf in Hz

Как видно из этих примеров, функции $\varphi(f)$ и $\psi(f)$, рассчитанные для разных участков и для разных значений t заметно различаются между собой. В принципе их вариабельность ожидаема, принимая во внимание результаты предыдущих исследований (см. [Чернов, 2022; Чернов Ю. и др., 2022] и рис. 1). В удобном для анализа виде эта вариабельность видна на рисунке 6, где приведены значения $\varphi(f)$ и $\psi(f)$, полученные на всех рассматриваемых участках и для землетрясений со всеми рассматриваемыми t . Из этого рисунка, например, можно видеть некоторые общие черты в характере полученных данных. Так значения и $\varphi(f)$ и $\psi(f)$ имеют значительный разброс во всем рассматриваемом диапазоне частот. Максимумы этих разбросов наблюдаются на крайних высоких и низких частотах, где $\varphi(f)$ изменяются от 1,73 до 2,40 (разница 39%), а $\psi(f)$ – от 1,58 до 2,29 (разница 45%). Минимальные разбросы наблюдаются в области частот 0,6–0,8 Гц – для $\varphi(f)$ от 2,0 до 2,24 (разница 12%) и для $\psi(f)$ от 1,93 до 2,15 (разница 11%). Стандартные отклонения значений $\lg\varphi(f)$ и $\lg\psi(f)$ по всем оценкам также близки – 0,027 и 0,026, соответственно. Уменьшение (по сравнению с общим фоном) значений как $\varphi(f)$, так и $\psi(f)$, наблюдается на частотах, на которых наблюдаются максимальные уровни спектров Фурье и спектров реакции.

Есть и некоторые отличия. Так, среднегеометрические по массиву значения $\varphi(f)$ составляют $\sim 2,1$, против 1,94 для аналогичных определений $\psi(f)$. Кроме того, в области средних частот ($f=2-6$ Гц) разброс значений $\varphi(f)$ в среднем уменьшается, в то время как разброс значений $\psi(f)$, наоборот, увеличивается.

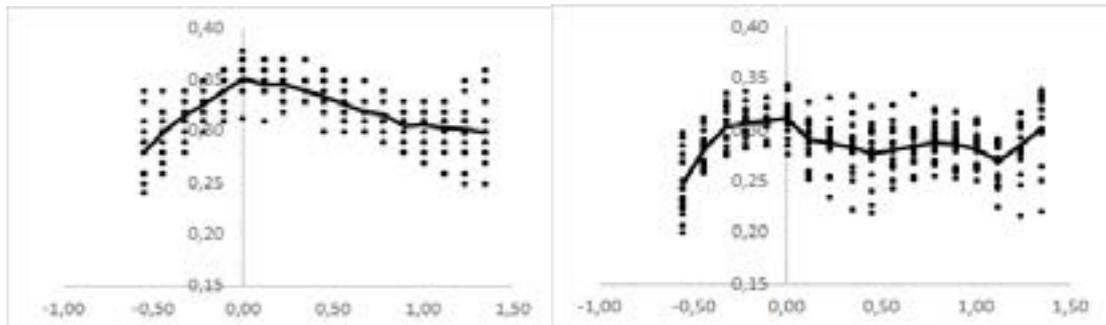


Рис. 6. Совокупные массивы спектральных отношений, рассчитанные по спектрам Фурье (а) и спектрам реакции (б) на разных участках территории РСО-Алания и для землетрясений с разными t : точки и линии – индивидуальные и осредняющие оценки, соответственно; оси абсцисс – значения $\lg f$ в Гц, оси ординат – значения $\lg\varphi(f)$ и $\lg\psi(f)$, соответственно /

Fig. 6. Cumulative arrays of spectral ratios calculated from the Fourier spectra (a) and response spectra (b) in different parts of RNO–Alania and for earthquakes with different t : points and lines are individual and averaging estimates, respectively; the abscissa axes are the values of $\lg f$ in Hz, the ordinate axes are the values of $\lg\varphi(f)$ and $\lg\psi(f)$, respectively

Полученные данные по интегральным спектрам и спектральным характеристикам Фурье и реакции в целом корреспондируют с полученными ранее (см. [Чернов Ю. и др., 2022]) интегральными оценками макросейсмических интенсивностей (I) и приращений балльности (ΔI) в условиях «мягких» и «твердых» грунтов территории РСО-Алания. Так для средних по массивам значений $\varphi(f)$ и $\psi(f)$, составляющие здесь также (как и в случае I и ΔI) наблюдается существенная изменчивость полученных оценок в зависимости от расположения точки наблюдения и значений t для расчетных землетрясений. В то же время имеются и некоторые отличия. Так вариабельность значений $\varphi(f)$ и $\psi(f)$ в целом немного ниже и распределена по площади

и по повторяемости землетрясений несколько иначе, чем вариабельность значений ΔI . Так, например, вариабельность средних значений ΔI при $t=500$ лет существенно выше, чем при $t=1000-5000$ лет ($\sim 0,6$ балла *MSK* против $\sim 0,2$ балла, соответственно). В то же время значения $\varphi(f)$ и $\psi(f)$ при $t=500$ лет ниже, чем при $t=1000-5000$ лет на 5–10%, тогда, как значения ΔI , наоборот выше. Принимая во внимание известные соотношения между уровнями спектров и макросейсмической интенсивностью сотрясений (см., например, [Atkinson, Sonley, 2000; Чернов Ю. и др., 2022]) можно видеть, что изменения значений $\varphi(f)$ и $\psi(f)$ при изменении расположения расчетной точки, также несколько меньше, чем аналогичные изменения в величинах ΔI .

Обобщая вышеизложенное, можно констатировать, что осуществляемые в рамках PSHA вероятностные оценки спектров Фурье и спектров реакции также, как и рассмотренные на предыдущем этапе исследований оценки макросейсмических интенсивностей сотрясений, обладают существенной изменчивостью как таковой и вариабельностью по отношению друг к другу. При этом важно подчеркнуть, что определяющие эту изменчивость разные соотношения между спектрами колебаний «мягких» и «твердых» грунтов объективно вытекают из уникальности сочетаний в каждой расчетной точке не только физико-механических, геометрических и других свойств самих грунтовых комплексов, о чем подробно можно найти, например, в [Заалишвили, 2009; Штейнберг и др., 1993; Мельков и др., 2022; Cotton et al., 2006], но и соотношения различных характеристик зон ВОЗ, сейсмического режима и других параметров очаговой сейсмичности. Многочисленность этих сочетаний и невозможность полной их предсказуемости (что необходимо для детерминистских оценок), создают механизм случайности в данном сегменте интегральных оценок PSHA, что, кстати, принципиально отличает их от полудетерминистских (или полув вероятностных) «ситуационных» определений. В этих условиях статистические подходы (к которым относится и вероятностная технология настоящего исследования), представляются предпочтительными, а получаемые на их основе результаты обоснованными и адекватными.

Подводя итог данному этапу исследований, можно сказать, что, как и рассмотренные на предыдущих этапах соотношения интегральных (т.е. полученных посредством PSHA) макросейсмических интенсивностей сотрясений «мягких» и «твердых» грунтов, аналогичные соотношения между спектрами их колебаний так же подвержены значительной вариабельности, хотя и в несколько сглаженном виде и с рядом других отличий. При этом данная вариабельность обусловлена не только известным влиянием свойств самих грунтов, но и связана с особенностями окружающего сейсмогенерирующего пространства, которые при вероятностных оценках сейсмической опасности типа PSHA обычно учитываются в рамках общего сейсмического районирования (ОСР), детального сейсмического районирования (ДСР) и уточнения исходной сейсмичности (УИС) при сейсмическом микрорайонировании (СМР), то есть в отрыве от особенностей местных грунтовых условий. Местные же грунтовые условия учитываются путем последующего внесения в результаты ОСР, ДСР и УИС поправок (приращений балльности, спектральных отношений и др.), которые в свою очередь, не зависят от вероятностных оценок ОСР, ДСР и УИС. Эту расчетную схему мы называем «двухступенчатой». Но, как показывает опыт настоящего исследования, такой «двухступенчатый» подход может приводить к искажениям получаемых оценок. Так, например, рекомендуемые российскими нормативами стандартные спектральные ускорения для грунтов первой категории СНиП

по сейсмическим свойствам (группа «твердых» грунтов по нашей и [Чернов, 2022; Чернов Ю. и др., 2022] терминологии) в два раза ниже чем значения $SA(f)$, рекомендуемые для грунтов второй категории (т. е. для «мягких» грунтов). И это соотношение постоянно и не зависит от частоты спектральной составляющей, от места расположения расчетной точки (т.е. от окружающей сеймотектонической обстановки) и от того, для землетрясений, с какими периодами повторяемости производится данная оценка. Т.е., следуя данным рекомендациям, и взяв за основу полученную для данного места в результате ОСР, ДСР или УИС интегральную оценку спектра, например, «мягкого» грунта, при последующем переходе к «твердому» грунту, как видно из вышеизложенных материалов, мы рискуем получить существенную погрешность. Очевидно, также, что применение в такой «двухступенчатой» схеме более сложных и точных оценок реакции самой грунтовой толщи, с более подробным учетом ее особенностей (что обычно реализуется при проведении СМР) в принципе не меняет дела, так как и в этом случае за рамками остаются учет конкретного расположения расчетной точки на местности и величины t .

Поэтому, вслед за рекомендациями работ [Чернов, 2022; Чернов Ю. и др., 2022], высказанными относительно вероятностных оценок приращений балльности, здесь укажем на целесообразность применения «одноступенчатых» расчетных схем и при оценках спектров и спектральных характеристик разных типов грунтов. Под «одноступенчатыми» схемами понимаются оценки PSHA с одновременным и взаимозависанным учетом как влияния свойств грунтов, так и очаговых факторов.

Выводы

1. Полученные посредством PSHA оценки показывают, что интегральные (кумулятивные) спектры и спектральные характеристики колебаний «мягких» и «твердых» грунтов обладают существенной изменчивостью, что необходимо учитывать в исследовательских проектах и на практике.

2. Изменчивости кумулятивных спектров и спектральных характеристик Фурье и реакции в целом коррелируют с аналогичными изменчивостями макросейсмических интенсивностей и приращений балльности, но в деталях могут иметь отличия, что следует иметь в виду при, например, оценках спектров и спектральных характеристик по значениям балльности и наоборот.

3. Полученные в данном исследовании результаты и сделанные на их основе выводы пока относятся только к сеймотектоническим условиям территории РСО-Алания. В какой части и в какой степени они применимы и к другим районам предстоит выяснить в процессе дальнейших исследований.

Литература

1. Адылов С.К., Соколов В.Ю., Фремд В.М. и др. Сильные землетрясения Узбекистана в 1984-1985 гг. – М.: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1988. – 121 с.
2. Ванмарке Э.Х. Реакция сооружений на землетрясения. // В кн.: Сейсмический риск и инженерные решения. – М.: Недра, 1981. – С. 256–299.
3. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. – Ташкент: «Фан», 1986. – 368 с.
4. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Том VI. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. – Южно-Сахалинск, 1997. – 340 с.
5. Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. (Разрушительные последствия. // Инженерная сейсмология. Вопросы сейсмостойкого строительства.). – М: Наука, 1981. – 265 с.

6. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука, 2009. – 349 с.
7. Исфара-Баткентское и Таваксайское землетрясения 1977 г. – Ташкент: «Фан», 1981. – 152 с.
8. Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Фидарова М.И., Мерзликин Т.И., Песраева З.В. Влияние нелинейных свойств среды на сейсмический эффект сильных землетрясений. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №4. – С. 72–84. DOI: 10.46698/VNC.2022.75.68.006
9. Назарбекское землетрясение 11 декабря 1980 г. – Ташкент: «Фан», 1984. – 145 с.
10. Папское землетрясение 1984 г. – Ташкент: «Фан», 1986. – 136 с.
11. Рустанович Д.Н. Колебания поверхности земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений. – М.: Наука, 1974. – 97 с.
12. Соколов В.Ю. Спектры ускорений колебаний грунта при землетрясениях на Кавказе. // Физика Земли. – 1998. – №8. – С. 56–69.
13. Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 г. – Ташкент: «Фан», 1971. – 672 с.
14. Чернов Ю.К. Некоторые предварительные данные о спектрах колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №3. – С. 61–78. DOI: 10.46698/VNC.2022.45.59.004
15. Чернов Ю.К., Заалишвили В.Б., Чернов А.Ю. Некоторые новые данные о влиянии различных грунтовых условий на вероятностные оценки сейсмической опасности территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №4. – С. 85–100. DOI: 10.46698/VNC.2022.32.20.007
16. Шикотанское землетрясение 1994 г. Эпицентральные наблюдения и очаг землетрясения. Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. // Информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. – М., 1995. – 136 с.
17. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. – М.: Наука, 1993. – С. 5–94.
18. Analysis of strong-motion accelerograms. Vol. I, part A-V. Vol. II, part A-V. Vol. III, part A-V. Vol. IV, part A-V, Index (EERS' Rep 76-P2). Earthquake Engineering Research Labor., California Inst. Technol. Pasadena, California, USA, 1969-1976.
19. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity, and Response Spectra. // BSSA. – 2000. – Vol. 90(2). – pp. 533-544.
20. Bull. of international. Seismol. Cent. – 1978a. – Vol. 13. No.5.
21. Bull. of international. Seismol. Cent. – 1978b. – Vol. 13. No.6.
22. Bull. of international. Seismol. Cent. – 1978c. – Vol. 13. No.7.
23. Bull. of international. Seismol. Cent. – 1978d. – Vol. 13. No.8.
24. Bull. of international. Seismol. Cent. – 1978e. – Vol. 13. No.9.
25. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms. // University “Kirill and Mefodij”. – Skopje, 1984a. – No.1.
26. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms. // University “Kirill and Mefodij”. – Skopje, 1984b. – No.2.
27. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms. // University “Kirill and Mefodij”. – Skopje, 1984c. – No.3.
28. Boore D.M, Atkinson G.M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. // Earthquake Spectra. – 2008. – Vol. 24(1). – pp. 99–138.
29. Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E.. Estimation of Response Spectra and Peak Accelerations From Western North American Earthquake: An Interim Report. Part 2. // U.S. Geological Survey Open – File Report. – 1994. – pp. 94-127.
30. Cotton F., Scherbaum F., Bommer J.J., Bungum H. Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites. // Journal of Seismology. – 2006. – Vol. 10. – pp. 137–156.

31. Porcella R.L., Matthiesen R.B., Maley R.P. Strong motion data records in the United States. Imperial Valley, California Earthquake of October 15, 1979. // Geological Survey Professional Paper 1254. Washington, 1982. – pp. 289-318.
32. Preliminary analysis of strong motion records from April 15, 1979. Montenegro, Yugoslavia earthquake. – Skopje, 1979. – No. №4. – 78 p.; No.67. – 184 p.
33. Sadigh K., Egan J., Youngs R. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. // Earthquake Notes. – 1986. – pp. 57-13
34. San-Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C. – 1973. – 482p.
35. Strong-motion earthquake accelerograms, digitized and plotted data. Uncorrected accelerograms. – Vol. 1, Part 1-5, Commissions CHEM-ENEI, Italy, 1975–1979.
36. The Northridge, California Earthquake of January 17. Central Reconnaissance Report. National Center for Earthquake Engineering Research. Edited by J.D. Goltz. Technical Report NCEER-94-0005, March 11, 1994.
37. Toker B.E., Brune J.N. Seismograms, S-Wave Spectra, and source Parameters for Aftershocks of San Fernando, California, Earthquake. // San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C. – 1973. – pp. 69-121.

References

1. Adylov S.K., Sokolov V.Yu., Fremd V.M. et al. Strong earthquakes in Uzbekistan in 1984–1985. Moscow. IPE AS USSR. 1988. 121 p. (In Russ.)
2. Vanmarke E.Kh. Building response to earthquakes. In: Seismic Risk and Engineering Solutions. Moscow. Nedra. 1981. pp. 256–299. (In Russ.)
3. Ghazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent, Fan. 1986. 368 p. (In Russ.)
4. Geodynamics of the tectonosphere in the junction zone of the Pacific Ocean with Eurasia. Volume VI. Problems of seismic hazard in the Far East region. Yuzhno-Sakhalinsk, 1997. 340 p. (In Russ.)
5. Dagestan earthquake on May 14 1970. Destructive consequences. Engineering seismology. Problems of earthquake engineering. Moscow. Nauka. 1981. 265 p. (In Russ.)
6. Zaalishvili V.B. Seismic microzonation of urban territories, settlements and large building sites. Moscow. Nauka, 2009. 349 p. (In Russ.)
7. Isfara-Batkent and Tavaksay earthquakes of 1977. Tashkent, Fan. 1981. 152 p. (In Russ.)
8. Melkov D.A., Gabaraev A.F., Fidarova M.I., Merzlikin T.I., Persaeva Z.V. Influence of nonlinear properties of the medium on the seismic effect of strong earthquakes. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 72–84. (In Russ.). DOI: 10.46698/VNC.2022.75.68.006.
9. Nazarbek earthquake on December 11, 1980. Tashkent, Fan. 1984. 145 p. (In Russ.)
10. Pap earthquake of 1984. Tashkent, Fan. 1986. 136 p. (In Russ.)
11. Rustanovich D.N. Vibrations of the Earth's surface in the epicentral zones of strong earthquakes. Moscow. Nauka, 1974. 97 p. (In Russ.)
12. Sokolov V.Yu. Spectra of accelerations of ground vibrations during earthquakes in the Caucasus. *Physics of the Solid Earth*. 1998. No. 8. pp. 56–69. (In Russ.)
13. Tashkent earthquake of April 26, 1966. Tashkent, Fan. 1971. 672 p. (In Russ.)
14. Chernov Yu.K. Some preliminary data on the vibration spectra of “soft” and “hard” soils during earthquakes of different magnitudes and distances. *Geology and Geophysics of Russian South*. (In Russ.). 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 61–78. DOI: 10.46698/VNC. 2022.45.59.004.
15. Chernov Y.K., Zaalishvili V.B., Chernov A.Y. Some new data on the influence of various soil conditions on probabilistic seismic hazard assessment of territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 85–100. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.32.20.007.
16. Shikotan earthquake of 1994. Epicentral observations and earthquake source. Federal

System of Seismological Observations and Earthquake Prediction. Information and analytical bulletin. Special issue. Moscow. 1995. 136 p. (In Russ.)

17. Shteinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. et al. Methods for assessing seismic effects (handbook). Problems of engineering seismology. Issue 34. Moscow. Nauka. 1993. pp. 5–94. (In Russ.)

18. Analysis of strong-motion accelerograms. v. I, part A-V, v. II, part A-V, v. III, part A-V, v. IV, part A-V, Index (EERS' Rep 76-P2), Earthquake Engineering Research Labor., California Inst. Technol. Pasadena, California, USA, pp. 1969–1976.

19. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity, and Response Spectra. BSSA. 2000. Vol. 90. No. 2. pp. 533–544.

20. Bull. of international. Seismol. Cent. 1978a. Vol. 13. No.5.

21. Bull. of international. Seismol. Cent. 1978b. Vol. 13. No.6.

22. Bull. of international. Seismol. Cent. 1978c. Vol. 13. No.7.

23. Bull. of international. Seismol. Cent. 1978d. Vol. 13. No.8.

24. Bull. of international. Seismol. Cent. 1978e. Vol. 13. No.9.

25. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms. University “Kirill and Mefodij”. Skopje, 1984a. No.1.

26. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms. University “Kirill and Mefodij”. Skopje, 1984b.No.2.

27. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms. University “Kirill and Mefodij”. Skopje, 1984c. No.3.

28. Boore D.M, Atkinson G.M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. Earthquake Spectra. 2008. Vol. 24. No. 1. pp. 99–138.

29. Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E. Estimation of response spectra and peak accelerations from Western North American Earthquake: An Interim Report. Part 2. U.S. Geological Survey Open-File Report. 1994. pp. 94–127.

30. Cotton F., Scherbaum F., Bommer J.J., Bungum H. Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites. Journal of Seismology. 2006. Vol. 10. pp. 137–156.

31. Porcella R.L., Matthiesen R.B., Maley R.P. Strong motion data records in the United States. Imperial Valley, California Earthquake of October 15, 1979. Geological Survey Professional Paper 1254. Washington. 1982. pp. 289–318.

32. Preliminary analysis of strong motion records from April 15, 1979. Montenegro, Yugoslavia earthquake. Skopje. 1979. No. 4. 78 p. No.67. 184 p.

33. Sadigh K., Egan J., Youngs R. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. Earthquake Notes. 1986. pp. 57–13

34. San-Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C. 1973. 482 p.

35. Strong-motion earthquake accelerograms, digitized and plotted data. Uncorrected accelerograms. Vol. 1, Part 1-5, Commissions CHEM-ENEI, Itaiy, pp. 1975–1979.

36. The Northridge, California Earthquake of January 17. Central Reconnaissance Report. National Center for Earthquake Engineering Research. Edited by J.D. Goltz. Technical Report NCEER-94-0005, March 11, 1994.

37. Toker B.E., Brune J.N. Seismograms, S-Wave Spectra, and source Parameters for After-shocks of San Fernando, California, Earthquake. San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Vol. III. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C. 1973. pp. 69–121.