

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010

Оригинальная статья

Опыт экспресс-оценок спектров реакции по спектрам Фурье ускорений колебаний грунта при землетрясениях

Ю.К. Чернов 

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002,
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: chenta-26@mail.ru

Статья поступила: 02.07.2024, доработана: 28.11.2024, принята к публикации: 29.11.2024

Резюме: Актуальность работы. В Российской Федерации и за рубежом накоплен значительный объем данных о спектрах Фурье колебаний грунтов при сильных землетрясениях. В отечественной практике эти данные используются, в том числе, для оценок спектров реакции колебаний грунта, необходимых для антисейсмического проектирования. Однако процедуры такого рода пересчетов относительно сложны и трудоемки. Поэтому на данный момент полезно дополнительно иметь и более простые, но обладающие приемлемой точностью способы таких расчетов. Разработке варианта решения этой задачи и посвящено настоящее исследование. **Цель исследований.** Разработка новых моделей для вероятностного описания спектров реакции ускорений колебаний грунта при землетрясениях разной величины и удаленности. **Объект исследований.** Эмпирические функции затухания с расстоянием спектров колебаний разных типов грунтов при землетрясениях. **Методы исследования.** Комплексный статистический анализ большого объема одновременно зарегистрированных спектров Фурье и спектров реакции колебаний разных типов грунтов при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей. Сопоставление интегральных (кумулятивных) спектров Фурье и спектров реакции, попарно рассчитанных для различных сейсмоактивных районов. Разработанные модели спектров реакции тестировались путем их сопоставления со спектрами и пиковыми ускорениями колебаний грунта при реальных землетрясениях. **Результаты исследования.** Разработаны статистические модели связи между спектрами реакции и спектрами Фурье ускорений колебаний грунта, позволяющие с приемлемой точностью оценивать спектральные ускорения по имеющимся данным об уровнях спектральной плотности Фурье колебаний грунта. Разработанные модели в определенной степени универсальны и позволяют оценивать спектры реакции землетрясений для разных магнитуд, расстояний и частот, для разных типов грунтов, а также для простых («ситуационных») и интегральных (кумулятивных) оценок. Использование разработанных моделей позволило получить новые альтернативные оценки имеющих существенное практическое значение соотношений между пиковыми ускорениями колебаний грунта и максимальными величинами спектральных ускорений.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмические воздействия, вероятные спектры реакции колебаний грунта, спектры Фурье колебаний грунта.

Для цитирования: Чернов Ю.К. Опыт экспресс-оценок спектров реакции по спектрам Фурье ускорений колебаний грунта при землетрясениях. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(4): 113-127. DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010

DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010

Original paper

Rapid estimates experience of reaction spectra based on Fourier spectra of accelerations of ground motions during earthquakes

Yu.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: 02.07.2024, revised: 28.11.2024, accepted: 29.11.2024

Abstract: Relevance. In the Russian Federation and abroad, a significant amount of data has been accumulated on the Fourier spectra of ground motions during strong earthquakes. In Russian practice, these data are used, among other things, to estimate the spectra of the ground motions response necessary for seismic-resistant design. However, the procedures for this kind of recalculation are relatively complex and time-consuming. Therefore, at the moment it is useful to additionally have simpler, but with acceptable accuracy, methods of such calculations. The present research is devoted to the designing of a solution to this problem. **Aim.** Designing of new models for the probabilistic description of the reaction spectra of accelerations of ground motions in earthquakes of different magnitude and distance. **The object of research.** Empirical attenuation functions with the distance of the motion spectra of different types of soils during earthquakes. **Methods.** Comprehensive statistical analysis of a large volume of simultaneously recorded Fourier spectra and vibration response spectra of different types of soils during earthquakes of different magnitudes and distances. Comparison of integral (cumulative) Fourier spectra and reaction spectra calculated in pairs for various seismically active regions. The designing models of the reaction spectra were tested by comparing them with the spectra and peak accelerations of ground motions in real earthquakes. **Results.** Statistical models of the relationship between the reaction spectra and the Fourier spectra of ground motion accelerations have been designed, which make it possible to estimate spectral accelerations with acceptable accuracy based on available data on the levels of the Fourier spectral density of ground motions. The designed models are to a certain extent universal and allow us to estimate the spectra of earthquake reactions for different magnitudes, distances and frequencies, for different types of soils, as well as for simple ("situational") and integral (cumulative) estimates. The use of the designed models made it possible to obtain new alternative estimates of the relations between peak accelerations of ground motions and maximum values of spectral accelerations of significant practical importance.

Keywords: earthquakes, seismic impacts, probable spectra of the reaction of ground motions, Fourier spectra of ground motions.

For citation: Chernov Yu.K. Rapid estimates experience of reaction spectra based on Fourier spectra of accelerations of ground motions during earthquakes. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(4): 113-127. DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010

Введение

Спектры реакции ускорений колебаний грунта при возможных землетрясениях используются в расчетах на сейсмостойкость зданий и сооружений. Поэтому прогнозирование таких спектров традиционно является одной из основных задач инженерной сейсмологии. Важным первоисточником данных для таких прогнозов сейчас являются спектры реакции, рассчитанные по инструментальным записям

колебаний грунта во время землетрясений (см., например, базы данных по сильным движениям Strong-Motion Virtual Data Center (VDC); European Strong-Motion Database (ESD)).

Но на более ранних этапах по получаемым таким образом записям сильных движений в массовом порядке рассчитывались не спектры реакции, а спектры Фурье. В результате в ряде зарубежных сейсмологических центров созданы достаточно обширные базы спектров Фурье колебаний грунта при землетрясениях. Несколько позднее в Советском Союзе также начала создаваться система инструментальной регистрации сильных землетрясений движений, которая позволила в ряде районов Средней Азии, Северного Кавказа и Дальнего Востока получить несколько сотен инструментальных записей смещений, скоростей и ускорений колебаний грунта при ощутимых и сильных землетрясениях, по которым затем рассчитаны спектры Фурье (примеры см. в [Рустанович, 1974; Дагестанское ..., 1981; Назарбекское ..., 1984; Папское ..., 1986; Газлийские ..., 1986; Шикотанское ..., 1995; Геодинамика ..., 1997]).

Интерес к представлению сейсмических колебаний именно в виде спектров Фурье связан, в том числе, и с возможностями использования этой информации для решения фундаментальных задач сейсмологии, таких, например, как изучение физики очага землетрясения, закономерностей формирования поля сейсмических колебаний в разных геологических средах и др. [Костров, 1975; Брун, 1981; Аки, Ричардс, 1983]. Установленные экспериментальным путем зависимости спектров Фурье колебаний грунта при землетрясениях применялись также и для решения прикладных задач – оценок сейсмической опасности территорий, прогнозирования возможных сейсмических воздействий и сейсмического риска (см., например, [Штейнберг и др., 1993; Чернов, 2023]). При этом переход к необходимым для инженерных расчетов спектрам реакции осуществлялся при помощи специальных процедур. Так, в отечественной практике для построения спектров реакции ускорений грунта широко используется методика, основанная на их связи с энергетической спектральной плотностью Фурье [Ванмарке, 1981]. Опыт более чем сорокалетнего использования этого подхода на территории СССР, а затем и России в целом показывает эффективность данного метода. В то же время, его корректное применение имеет свои сложности. Так, например, получаемые данным способом оценки спектральных ускорений зависят от задаваемой в качестве исходных данных длительности колебаний и вероятностей, для которых производятся оценки. Определение и того и другого во многих случаях требует своего исследования.

Изложенное показывает, что для отечественной инженерно-сейсмологической практики было бы полезным помимо вышеуказанной и хорошо зарекомендовавшей себя, но относительно сложной методики, в качестве первого приближения иметь еще и более простой и быстрый способ расчетов, который можно называть экспресс-оценками. Одно из возможных решений данной задачи приводится в данной работе, что и определяет ее актуальность, цель, новизну, научную и практическую значимость.

Информационная база и методика исследований

В основу работы положено статистическое сопоставление спектров Фурье и спектров реакции. Затухание спектров реакции здесь и далее во всех случаях 5%. Всего в анализ включены 1198 пар спектров, рассчитанных по одним и тем же инструментальным записям ускорений колебаний грунтов разных типов при коровых

землетрясениях разных магнитуд (М) и удаленностей от очага (D), полученных в различных районах мира. Подробное описание этих данных можно найти по ссылкам и в работах разных авторов, указанных выше, а также в [Чернов, 2024]. Обобщенные же характеристики этого материала сведены в таблицу 1.

Таблица 1 / Table 1

Обобщенные характеристики используемых в исследовании данных по инструментальной регистрации землетрясений с одновременными оценками спектров Фурье и спектров реакции ускорений колебаний грунта /
Generalized characteristics of the data used in the research on instrumental registration of earthquakes with simultaneous estimates of Fourier spectra and reaction spectra of accelerations of ground motions

«Мягкие»* грунты / “Soft”* soils			«Твердые»* грунты / “Hard”* soils		
М	D (км, km)	Кол-во пар спектров / Number of pairs of spectra	М	D (км, km)	Кол-во пар спектров / Number of pairs of spectra
7 (6,5-7,3)	1,0-496	205	7 (6,5-7,3)	1,0-517	168
6 (5,5-6,4)	1,0-377	201	6 (5,5-6,4)	1,-386	200
5 (4,5-5,4)	1,0-201	192	5 (4,5-5,4)	1-208	180
4 (3,5-4,4)	1,0-45	44	-	-	-
3 (2,5-3,4)	2-18	8	-	-	-

* – терминология [Чернов, 2023]; terminology [Chernov, 2023]

К этой же группе данных относятся и включенные в общий анализ 138 (102 для «мягких» и 36 для «твердых» грунтов) пар интегральных (кумулятивных) спектров Фурье и спектров реакции, рассчитанных для землетрясений со средними периодами повторяемости $t=100, 200, 500, 1000, 2500$ и 5000 лет. Эти оценки получены в процессе вероятностного анализа сейсмической опасности (PSHA) различных участков территорий Узбекистана, Хабаровского края, Приморья, Сахалина, РСО-Алания, Центрального Предкавказья, Северного Алжира на суше и на дне моря, а также на глубинах (по грунту) до 3000 м.

Описание этих данных содержится в [Геодинамика ..., 1997; Глаговский и др., 2004; Чернов, 2023], а также в соответствующих Отчетах Геофизического института ВНИЦ РАН, Института сейсмологии АН Узбекистана, Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, Северо-Кавказского инженерно-геологического центра, ОАО «Ставрополь ТИСИЗ», ООО «Изыскатель», EQE International Inc.

Часть второй группы исходных данных – это 1052 пар значений максимумов спектров реакции (максимальных спектральных ускорений SA_{max}) и соответствующих этим же акселерограммам пиковых ускорений грунта (PGA), равных среднегеометрическим значениям максимальных амплитуд ускорений на двух горизонтальных компонентах записи. Характеристики этого массива данных такие же как в таблице 1. Вторая часть этой группы данных – 478 пар значений интегральных значений SA_{max} и соответствующих им интегральных оценок PGA для землетрясений с $t=50, 100, 200, 500, 1000, 2500, 5000$ и 10000 лет. Эти оценки получены в процессе PSHA вышеуказанных участков территорий для различных типов грунтов в условиях поверхности суши и дна моря, а также вглубь (от морского дна) до 3000 м.

Во всех вышеуказанных случаях (кроме данных EQE International Inc) интегральные спектры реакции получены пересчетом спектров Фурье по методу Ван-

марке (см. выше). Данные EQE являются прямыми интегральными оценками спектров реакции.

Для дальнейшего анализа все исходные спектры ускорений колебаний грунта (и Фурье и реакции) параметризованы в виде набора уровней спектральной плотности Фурье ($|S|$) и спектральных ускорений (SA) для 18-ти спектральных составляющих, логарифмически равномерно распределенных в инженерном диапазоне частот $f=0,28-22$ Гц. По преобразованным таким образом массивам данных первой группы, с учетом принятия гипотезы о логарифмически нормальном распределения случайных величин $|S|(f)$ и $SA(f)$, для каждой спектральной составляющей произведены вероятностные оценки зависимости наиболее вероятных значений $\lg SA$ от $\lg |S|$. Эти зависимости затем объединены в еще один блок зависимостей, теперь уже от частоты спектральной составляющей. Все вышеуказанные зависимости строились методом подбора в виде многочленов различной степени, оптимальным образом аппроксимирующих все исходные данные $|S|(f)$ и $SA(f)$. Для достижения некоторой «универсальности» исследуемых соотношений $\lg SA(\lg |S|)$ при построении аппроксимирующих выражений учитывались только частоты спектральных составляющих. Все остальные характеристики – магнитуды и удаленности зарегистрированных землетрясений, грунтовые и иные условия в пунктах регистрации, а также вид оценок (простые или интегральные) не учитывались.

Для выяснения степени обоснованности и надежности разработанных моделей зависимостей $SA(f)$ от $|S|(f)$ произведено их тестирование путем сопоставления с независимыми оценками. Для этих целей использованы исходные данные второй группы (см. выше), а также независимые оценки ряда других авторов.

Результаты и обсуждения

На рисунке 1 в графическом виде приведены типичные примеры описанных выше массивов пар значений $\lg SA$ и $\lg |S|$, сформированных для двух спектральных составляющих.

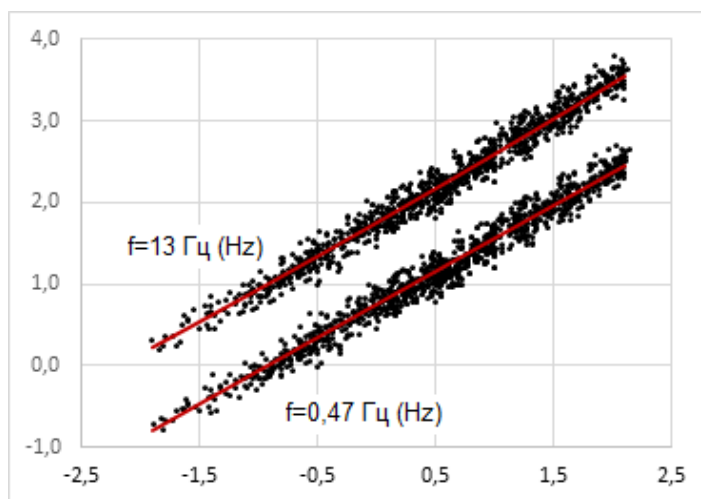


Рис. 1. Примеры сформированных для различных частот (f) массивов экспериментально зарегистрированных пар значений SA и $|S|$ (точки) и соответствующих выражениям (1) и (2) модельных оценок (сплошные линии). Оси абсцисс и ординат – значения $\lg |S|$ и $\lg SA$, соответственно. SA в см/с/с, $|S|$ в см/с /

Fig. 1. Examples of arrays of experimentally recorded pairs of SA and $|S|$ values (dots) formed for different frequencies (f) and corresponding to expressions (1) and (2) model estimates (solid lines). The abscissa and ordinate axes are the values of $\lg |S|$ and $\lg SA$, respectively. SA in cm/s/s, $|S|$ in cm/s

Рассчитанные по совокупности таких массивов аппроксимирующие выражения, описывающие зависимости наиболее вероятных уровней $\lg SA$ от $\lg |S|$ на разных частотах, можно представить в виде:

$$\lg SA = a (\lg |S|)^2 + b \lg |S| + c \quad (1)$$

где:

$$\begin{aligned} a &= 0,0720(\lg f)^5 - 0,1020(\lg f)^4 - 0,0718(\lg f)^3 + 0,0614(\lg f)^2 + 0,0469\lg f + 0,0060 \\ b &= 0,4910(\lg f)^5 - 0,6323(\lg f)^4 - 0,0120(\lg f)^3 + 0,1827(\lg f)^2 + 0,0008\lg f + 0,7992 \\ c &= 0,2599(\lg f)^3 - 0,1285(\lg f)^2 + 0,6366\lg f + 0,9868. \end{aligned} \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) $|S|(f)$ и $SA(f)$ в см/с и см/с/с, соответственно, f в Гц. Выражения (1) и (2) справедливы для $f \approx 0,28-22$ Гц и $|S| \approx 0,1-500$ см/с. При этом стандартные отклонения случайной величины $\lg SA$ принимаются одинаковыми и равными $\sigma = 0,111$ для всех фиксированных значений $\lg |S|$ и $\lg f$.

В графическом виде примеры моделей, соответствующих выражениям (1) и (2) также показаны на рисунке 1. На рисунке видно хорошее соответствие модельных оценок и экспериментальных данных. Примерно такое же хорошее соответствие модельных и экспериментальных оценок наблюдается и на других частотах спектров.

Еще одно подтверждение качества разработанной модели, описывающей связь между спектрами реакции и спектрами Фурье ускорений колебаний грунта (выражения (1) и (2)), можно видеть на рисунках 2 и 3.

О реалистичности вышеописанных модельных оценок спектров реакции можно также судить по тесту, результаты которого приведены на рисунке 4. На этом рисунке показаны разности между логарифмами уровней реальных спектральных ускорений грунта, определенных непосредственно по 70-ти произвольно выбранным акселерограммам землетрясений и их модельными аналогами, рассчитанными при помощи выражений (1) и (2) по спектрам Фурье тех же акселерограмм – $\Delta \lg SA(f) = \lg SA(f)_{\text{реал}} - \lg SA(f)_{\text{мод}}$.

На рисунке видно, что для каждой из частот осредненные разности $\Delta \lg SA(f)$ незначительно колеблются около нулевых значений во всем рассматриваемом диапазоне f . Среднее значение $\Delta \lg SA$ по всему диапазону f составляет $-0,0024$, т.е. среднестатистическая ошибка порядка 0,55%, что является хорошим показателем. Стандартные отклонения значений $\Delta \lg SA$ на разных частотах варьируют в пределах $0,123-0,198$ (среднее 0,149). Существование этого разброса связано с дисперсией самих экспресс-оценок случайной величины $\lg SA$ (см. выше). Свой вклад здесь вносят и погрешности определений реальных уровней $SA(f)$ и $|S|(f)$.

Приведенные выше сопоставления и тесты показывают, что предлагаемый способ экспресс-оценок в принципе обеспечивает приемлемую точность расчетов и поэтому может применяться для определения уровней $SA(f)$ по известным уровням $|S|(f)$. На рисунке 5 приведены примеры такого применения, когда экспресс-оценки $SA(M,D,f)$ выполнены путем пересчета вероятностных моделей $|S|(M,D,f)$ из [Чернов, 2024]. Полученные таким образом моделирующие спектры реакции колебаний разных типов грунтов при землетрясениях разных M и D представляются достаточно реалистичными и не противоречащими многим другим известным зависимостям такого типа (см. [Штейнберг и др., 1993; Boore, Atkinson, 2008; Campbell, Bozorgnia, 2008; Akkar et al., 2014; Danciu et al., 2018]).

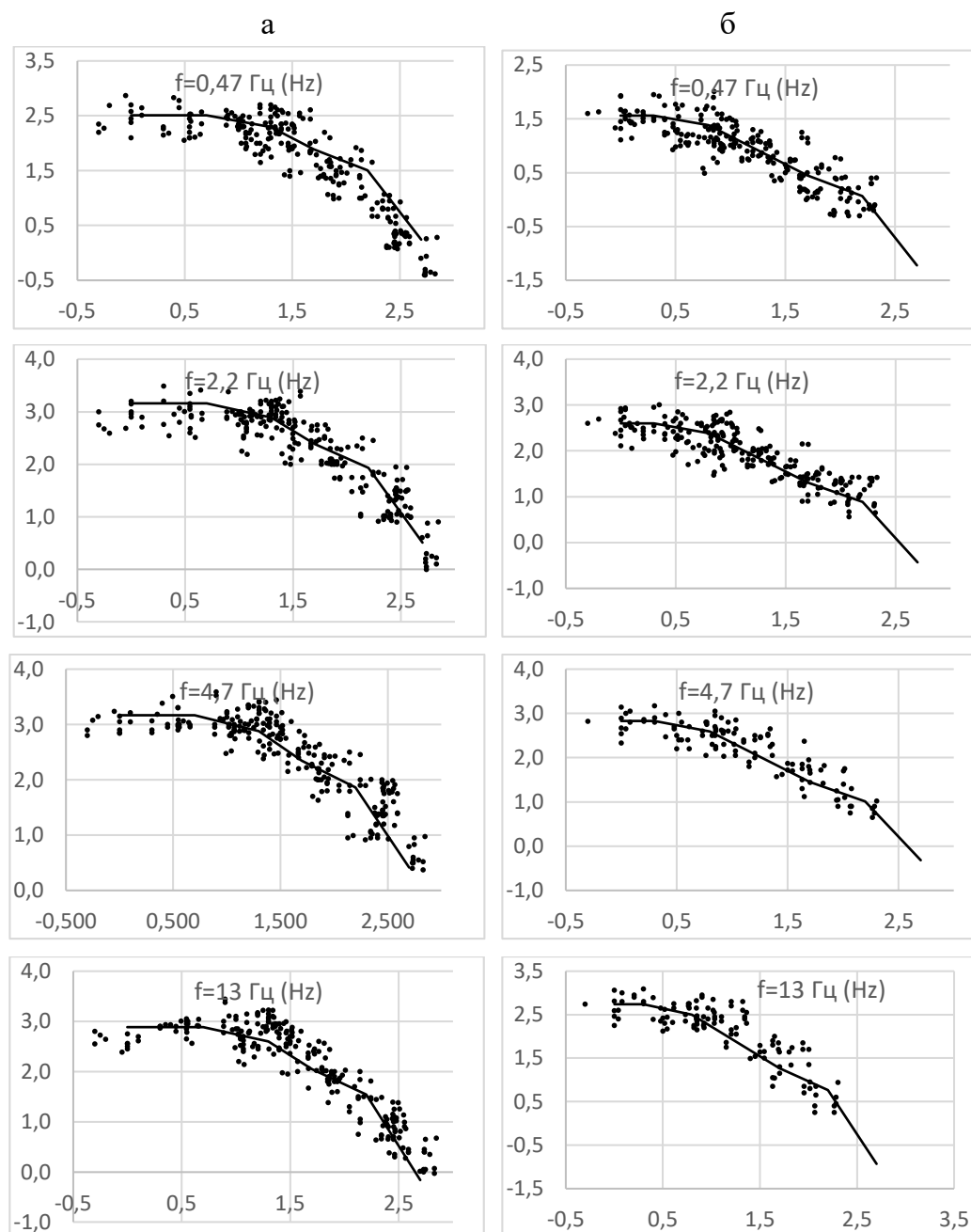


Рис. 2. Примеры сопоставления уровней спектральных ускорений «мягких» грунтов, инструментально зарегистрированных на разных частотах (f) и расстояниях до очага (D) при землетрясениях с разными M (кружки) с пересчетами по выражениям (1) и (2) функций $|S|(M,D,f)$ из [Чернов, 2024] (сплошные линии). а и б – для землетрясений с $M=7$ и $M=5$, соответственно.

Оси абсцисс – значения $\lg D$ (D в км), оси ординат – значения $\lg SA$ (SA в см/с/с) /

Fig. 2. Examples of comparing the levels of spectral accelerations of “soft” soils instrumentally recorded at different frequencies (f) and distances to the source (D) in earthquakes with different M (circles) with recalculations using expressions (1) and (2) of the $|S|(M,D,f)$ functions from [Chernov, 2024] (solid lines). a and b are for earthquakes with $M=7$ and $M=5$, respectively. The abscissa axes are $\lg D$ values (D in km), the ordinate axes are $\lg SA$ values (SA in cm/s/s)

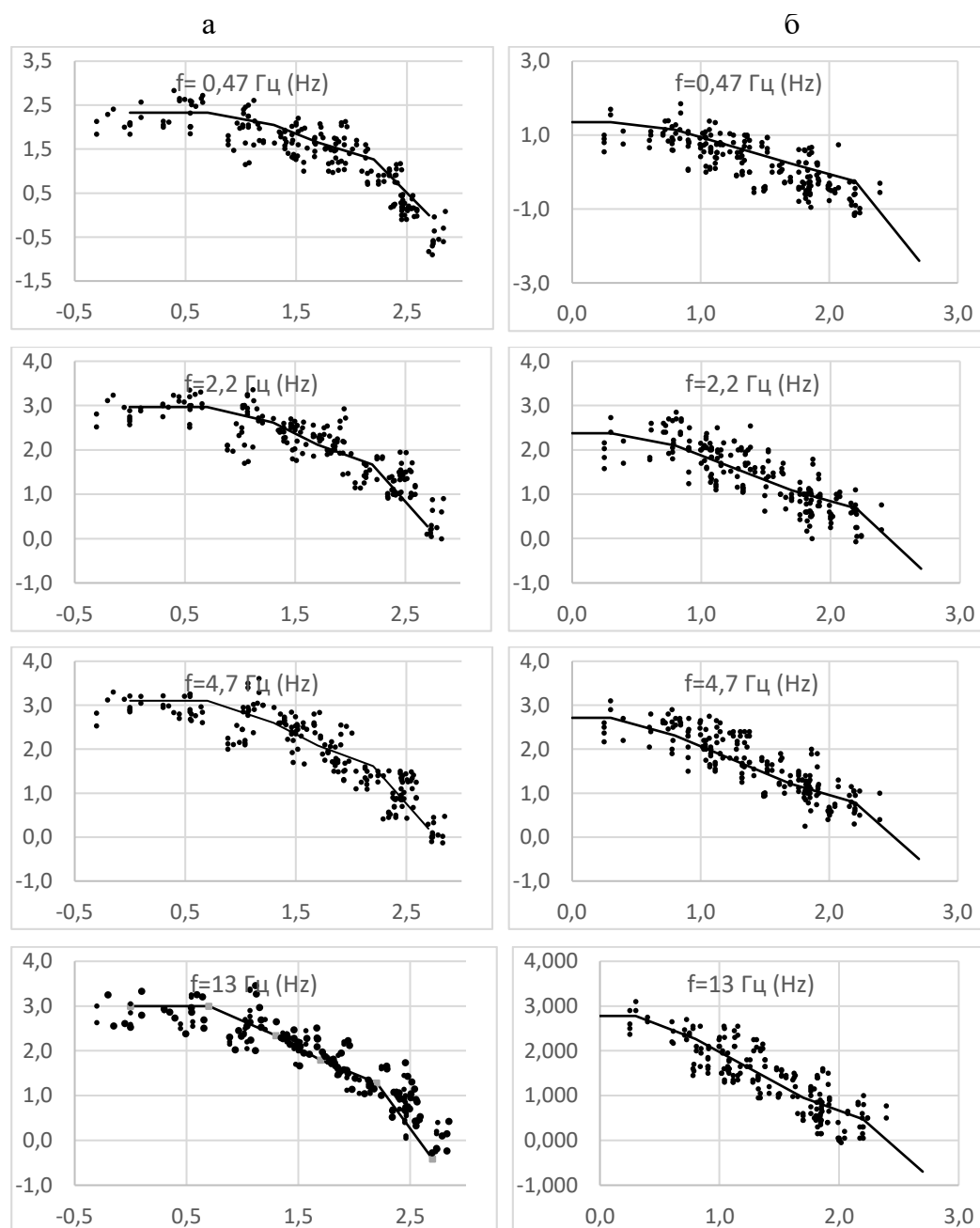


Рис. 3. Примеры сопоставления уровней спектральных ускорений «твердых» грунтов, инструментально зарегистрированных на разных частотах (f) и расстояниях до очага (D) при землетрясениях с разными M (кружки) с пересчетами по выражениям (1) и (2) функций $|S|(M,D,f)$ из [Чернов, 2024] (сплошные линии). а и б – для землетрясений с $M=7$ и $M=5$, соответственно. Оси абсцисс – значения $\lg D$ (D в км), оси ординат – значения $\lg SA$ (SA в см/с/с) /

Fig. 3. Examples of comparing the levels of spectral accelerations of "hard" soils instrumentally recorded at different frequencies (f) and distances to the source (D) in earthquakes with different M (circles) with recalculations using expressions (1) and (2) of the $|S|(M,D,f)$ functions from [Chernov, 2024] (solid lines). a and b are for earthquakes with $M=7$ and $M=5$, respectively. The abscissa axes are $\lg D$ values (D in km), the ordinate axes are $\lg SA$ values (SA in cm/s/s)

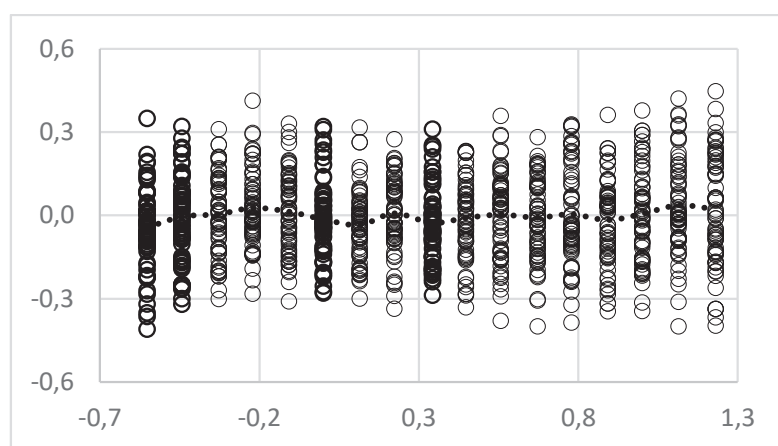


Рис. 4. Оценки разностей между реальными и полученными в результате экспресс-оценок уровнями спектральных ускорений на различных частотах (пояснения в тексте).

Кружки – оценки по отдельным тестовым землетрясениям, пунктир – осреднения тестовых оценок. ($\Delta \lg SA$). Ось абсцисс – значения $\lg f$, где f в Гц, ось ординат – значения $\Delta \lg SA$ /

Fig. 4. Estimates of the differences between the real and the levels of spectral accelerations obtained as a result of express estimates at various frequencies (explanations in the text). Circles are estimates for individual test earthquakes, dotted lines are averages of test estimates. ($\Delta \lg SA$).

The abscissa axis is the $\lg f$ value, where f is in Hz, the ordinate axis is the $\lg SA$ value

Среднестатистические спектры реакции, примеры которых приведены на рисунке 5 использованы для изучения соотношений между максимальными уровнями спектральных ускорений ($SA_{\max}$) и соответствующими уровнями PGA при землетрясениях с разными M и D . При этом пиковые ускорения оценивались в нескольких вариантах. Один из них – это модели $PGA(M,D)$, разработанные в рамках исследований для ДСР территории РСО-Алания [Опасные ..., 2019]. Отметим, что эти модели являются статистическим обобщением 35-ти отдельных зависимостей, разработанных разными авторами, для разных районов мира. Второй – рекомендации по результатам ОСР территории России из [Комплект ..., 1999]. Третий – это пересчет функций затухания макросейсмической интенсивности сотрясений $I(M,D)$, разработанных ранее нами для целей ДСР территории РСО-Алания и для других целей (см. [Опасные ..., 2019; Чернов, 2024]) при помощи выражений:

$$\lg PGA = \begin{cases} 0,271 I + 0,279 & \text{при } 7,5 < I < 11 \\ 0,384 I - 0,568 & \text{при } 4,5 \leq I \leq 7,5 \\ 0,362 I - 0,307 & \text{при } 4,5 \geq I \end{cases} \quad (3)$$

Четвертый вариант – то же, что и третий, но с пересчетом по выражению:

$$\lg PGA = 0.333 I - 0.222 \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) PGA в см/с/с, I в баллах MSK.

Используемые в расчетах по вариантам 3 и 4 функции $I(M,D)$, как и используемые в расчетах по варианту 1 функции $PGA(M,D)$ являются обобщением 23-х зависимостей разных авторов.

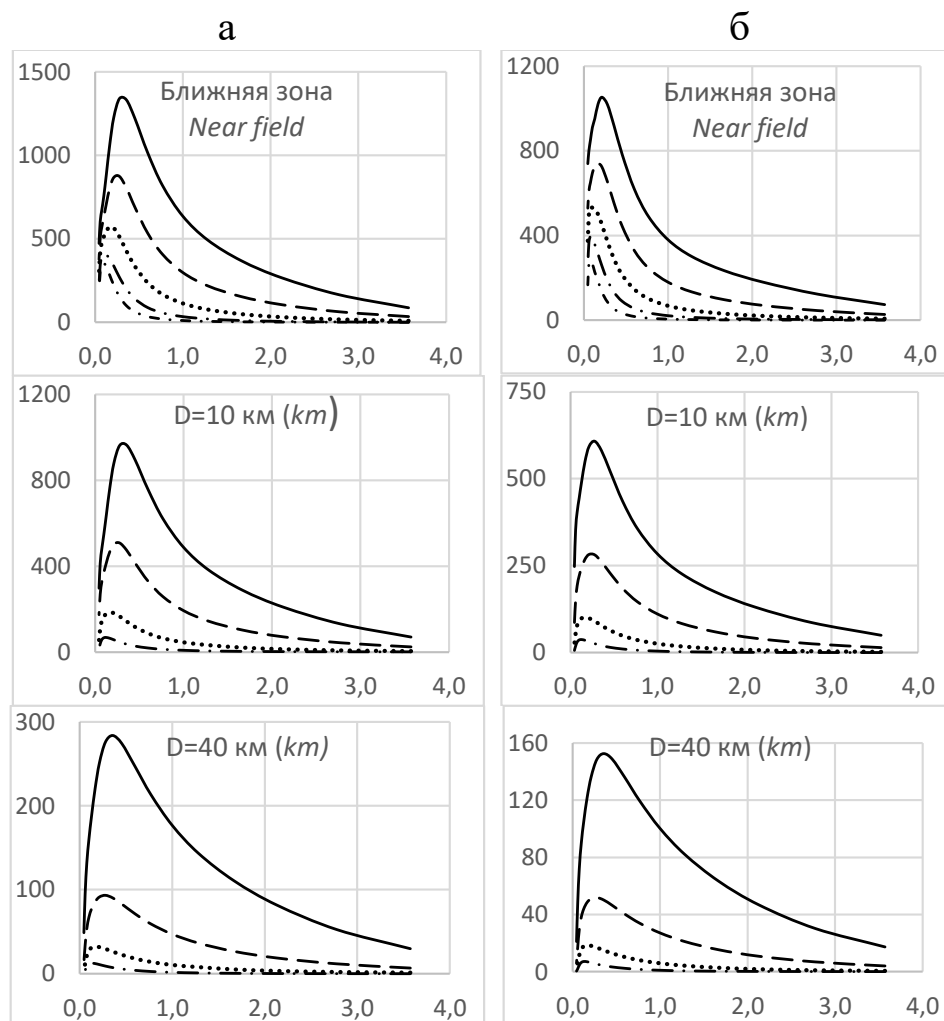


Рис. 5. Примеры наиболее вероятных значений спектральных ускорений (SA) колебаний «мягких» (а) и «твердых» (б) грунтов, рассчитанных по соотношениям (1) и (2) для землетрясений разных магнитуд (M), расстояний до очага (D) и периодов колебаний (T). Сплошные линии, длинный пунктир, точечные линии, длинный пунктир с точкой и короткий пунктир с точкой – оценки для землетрясений с $M=7$; 6; 5; 4 и 3, соответственно.

Ось абсцисс – значения T в с; ось ординат – значения SA в см/с/с /

Fig. 5. Examples of the most probable values of spectral accelerations (SA) of vibrations of “soft” (a) and “hard” (b) soils calculated by the ratios (1) and (2) for earthquakes of different magnitudes (M), distances to the source (D) and periods of motions (T). Solid lines, long dotted lines, dotted lines, long dotted lines with a dot and short dotted lines with a dot are estimates for earthquakes with $M=7$; 6; 5; 4 and 3, respectively. The abscissa axis is the values of T in s; the ordinate axis is the values of SA in cm/s/s

По модельным оценкам $SA_{\max}(M,D)$ и вышеуказанным вариантам оценок $PGA(M,D)$ выполнены 4 варианта оценок $\lg(SA_{\max}/PGA)$ для землетрясений с разными M и D , по которым затем определены средние значения. Результаты этих построений приведены на рисунке 6.

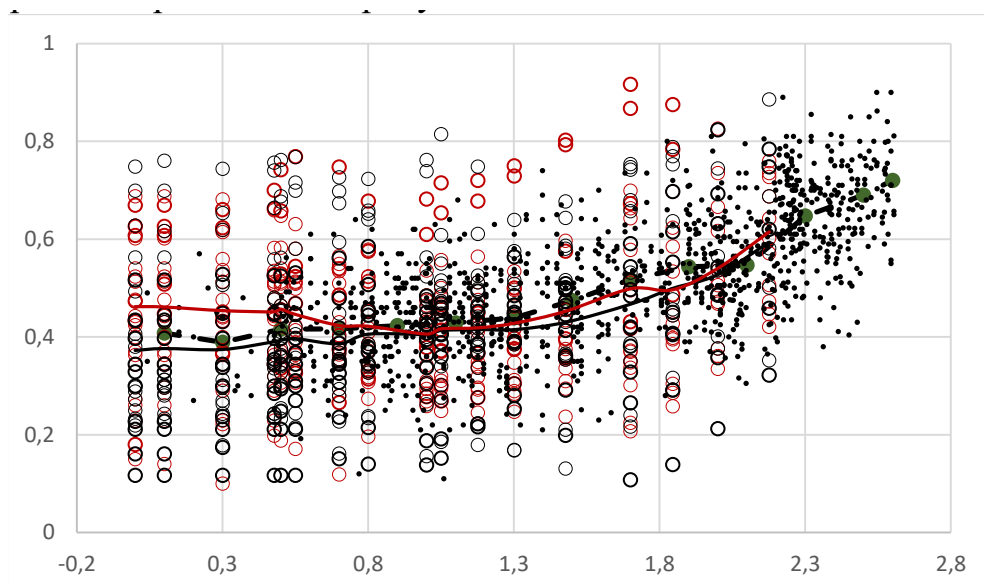


Рис. 6. Соотношения между уровнями SA_{max} и PGA при землетрясениях разных M и D . Круги черного и красного цвета – варианты модельных оценок для «мягких» и «твердых» грунтов, соответственно. Черные точки – оценки по акселерограммам реальных землетрясений. Черные и красные сплошные линии – осреднения модельных оценок для «мягких» и «твердых» грунтов, соответственно; пунктир – осреднение реальных данных. Ось абсцисс – значения lgD , где D в км; ось ординат – значения $lg(SA_{max}/PGA)$, где SA_{max} и PGA в см/с/с /

Fig. 6. The relationship between SA_{max} and PGA levels in earthquakes of different M and D . The black and red circles are variants of model estimates for “soft” and “hard” soils, respectively. Black dots are estimates based on accelerograms of real earthquakes. The black and red solid lines are the averaging of model estimates for “soft” and “hard” soils, respectively; the dotted line is the averaging of real data. The abscissa axis is the lgD values, where D is in km; the ordinate axis is the $lg(SA_{max}/PGA)$ values, where SA_{max} and PGA are in cm/s/s

Так как модельные оценки соотношений SA_{max}/PGA оказались слабо зависящими от M , то в целях упрощения на рисунке 6 эти оценки показаны в виде единых массивов, без разделения по величине M . На рисунке также видно, что рассчитанные по моделям величины SA_{max}/PGA практически одинаковы для «мягких» и «твердых» грунтов. На рисунке также видно, что выполненные по упрощенным моделям экспресс-оценки хорошо коррелируют с аналогичными оценками по натурным данным (см. табл. 1), которые в данном случае объединяют оценки для землетрясений разных M и разных типов грунтов в одном массиве. Это соответствие говорит о работоспособности экспресс-моделей и о возможности их использования в исследовательских и практических целях. Так, например, исходя из данных рисунка 6 можно говорить о том, что средние соотношения SA_{max}/PGA слабо зависят от типа грунта и магнитуды землетрясений, но заметно меняются при изменении расстояний D . На близких расстояниях ($D < 25-30$ км) средние уровни SA_{max}/PGA незначительно колеблются около значений 2,5. Следует отметить, что этот результат близок к оценкам многих других авторов (см. например, [Sadigh et al., 1986; Boore et al., 1994; Campbell, Bozorgnia, 1994; 2008; Atkinson, Sonley, 2000]). Затем, по мере возрастания D , средние уровни SA_{max}/PGA постепенно возрастают, достигая значений ≈ 5 при D порядка 300 км.

На рисунке 7 приведены результаты еще одного анализа – оценки распределения соотношений между максимальными уровнями интегральных спектров ре-

акции ускорений и соответствующими интегральными уровнями PGA. Наиболее вероятными здесь являются значения «интегральных» соотношений $SA_{\max}/PGA \approx 2,42$ при стандарте величины $\lg(SA_{\max}/PGA) \sigma \approx 0,07$.

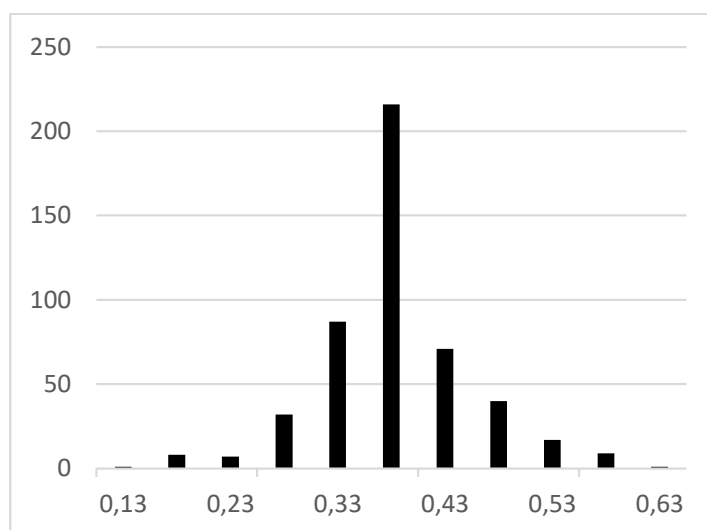


Рис. 7. Гистограмма соотношений логарифмов максимумов интегральных спектров реакции и пиковых амплитуд ускорений колебаний грунта. Ось абсцисс – «интегральные» значения $\lg(SA_{\max}/PGA)$, где $SA_{\max}$ и PGA в см/с/с. Ось ординат – число случаев (измерений) /

Fig. 7. Histogram of the logarithm ratios of the maxima of the integral reaction spectra and peak amplitudes of acceleration of ground motions. The abscissa axis is the “integral” values of $\lg(SA_{\max}/PGA)$, where $SA_{\max}$ and PGA are in cm/s/s. The ordinate axis is the number of cases (measurements)

При формировании анализируемой выборки интегральных оценок, соотношения $SA_{\max}/PGA$, полученные в условиях «мягких» и «твердых» грунтов, ввиду их небольших отличий и относительно небольшого количества последних, объединены в единый массив данных.

Приведенные на рисунках 6 и 7 данные, как указывалось выше, представляют также и практический интерес. Так, например, в российских документах, регламентирующих работы по ДСР и СМР (СП 286.1325800.2016, СП 408.1325800.2018), указано, что среднее значение соотношений $SA_{\max}/PGA = 3,6$. В то же время по рисунку 6 видим, что такие значения характерны для расстояний порядка 100 км, на которых обычно интенсивность сотрясений уже невелика и даже при больших землетрясениях (с $M \sim 7$, например) составляет в среднем 6,0 – 6,5 балла MSK, а для землетрясений с меньшими M и того меньше. Ясно, что такие воздействия не являются основной проблемой, решаемой при антисейсмическом проектировании и строительстве. Применение же коэффициента 3,6 для близких расстояний приводит к значительному завышению прогнозных уровней спектральных ускорений и, как следствие, к неоправданным затратам на усиление зданий и сооружений.

В этой связи интересно отметить, что в принятом приблизительно в то же время документе, регламентирующем строительство в сейсмических районах (СП 14.13330.2018) максимальное значение коэффициента динамичности, имеющего похожий физический смысл с соотношением $SA_{\max}/PGA$, оставлено таким же, как и в предыдущих редакциях СНиП и равным 2,5.

Выводы

1. Разработанные аналитические выражения, описывающие статистические зависимости $SA(f)$ от $|S|(f)$ позволяют с приемлемой для исследовательских и практических нужд точностью оценивать спектральные ускорения колебаний по имеющимся данным об уровнях спектральной плотности Фурье ускорений колебаний грунта.

2. Установленные соотношения между $SA(f)$ от $|S|(f)$ обладают определенной универсальностью и позволяют моделировать спектры реакции землетрясений для разных магнитуд, расстояний и частот, для разных типов грунтов, а также для простых («ситуационных») и интегральных (кумулятивных) оценок.

3. Использование разработанных моделей связи между $SA(f)$ и $|S|(f)$ позволило получить новые альтернативные оценки имеющих существенное практическое значение соотношений между пиковыми ускорениями колебаний грунта и максимальными величинами спектральных ускорений.

Литература

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 2. М.: Мир, 1983. – С. 751–857.
2. Брун Дж.Н. Физика сильных движений, вызванных землетрясениями. / В кн.: Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, 1981. – С. 129–161.
3. Ванмарке Э.Х. Реакция сооружений на землетрясения. / В кн.: Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, 1981. – С. 256–299.
4. Газлийские землетрясения 1976 и 1984гг. Ташкент: Фан, 1986. – 368 с.
5. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. / Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Т. VI. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – 237 с.
6. Глаговский В.П., Кассирова Н.А., Воронков О.К. и др. Исследования сейсмостойкости скважин нефтедобывающей платформы на шельфе Сахалина. // Нефтяное хозяйство. – 2004. – № 6. – С. 72–77.
7. Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Разрушительные последствия. Инженерная сейсмология. Вопросы сейсмостойкого строительства. М.: Наука, 1981. – 265 с.
8. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. / Гл. редакторы В.Н. Страхов, В.И. Уломов. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 57 с.
9. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. – 174 с.
10. Назарбекское землетрясение 11 декабря 1980 г. Ташкент: Фан, 1984. – 145 с.
11. Папское землетрясение 1984 г. Ташкент: Фан, 1986. – 136 с.
12. Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Коллективная монография. / Под редакцией А.В. Николаев, В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2019. – 806 с.
13. Рустанович Д.Н. Колебания поверхности земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений. М.: Наука, 1974. – 97 с.
14. Чернов Ю.К. Эмпирические модели для вероятностных оценок колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 90–106.
15. Чернов Ю.К. О новом подходе к учету влияния «грунтового фактора» при вероятностных оценках сейсмической опасности территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2023 – Т. 13. № 4. – С. 55–70.

16. Шикотанское землетрясение 1994 г. Эпицентральные наблюдения и очаг землетрясения. М.: ОИФЗ РАН, 1995. – 136 с.
17. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1993. – Вып. 34. – С. 5–94.
18. Akkar S., Sandikkaya M.A., Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2014. – Vol. 12. No. 1. – pp. 359–387.
19. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity, and Response Spectra. // *BSSA*. – 2000. – Vol. 90(2). – pp. 533–544.
20. 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.
21. 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.
22. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5%-damped linear elastic response spectra at periods ranging from 0.1 s to 10.0 s. // *Earthquake Spectra*. – 2008. – Vol. 24(1). – pp. 139–171.
23. Campbell K.W., Bozorgnia Y. Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration From Worldwide Accelerograms Recorded from 1957 to 1993. // In: *Proceedings, Fifth U. S. National Conference on Earthquake Engineering, July 10-14 1994 Chicago*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California. – 1994. – Vol. III. – pp. 283–292.
24. Danciu L., Kale O., Akkar S. The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties. // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2018. – Vol. 16. – pp. 3497–3533.
25. Sadigh K., Egan J., Youngs R. Specification of ground motion for seismic design of long period structures. // *Earthquake Note*. – 1986. – pp. 57–132.

References

1. Aki K., Richards P. Quantitative seismology. Vol. 2. Moscow. Mir. 1983. pp. 751–857. (In Russ.)
2. Brun J.N. Physics of strong motions caused by earthquakes. In: *Seismic risk and engineering solutions*. Moscow. Nedra. 1981. pp. 129–161. (In Russ.)
3. Vanmarke E.H. Reaction of structures to earthquakes. In: *Seismic risk and engineering solutions*. Moscow. Nedra. 1981. pp. 256–299. (In Russ.)
4. The Gazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent. Fan. 1986. 368 p. (In Russ.)
5. Geodynamics of the tectonosphere of the junction zone of the Pacific Ocean with Eurasia. Problems of seismic hazard in the Far Eastern region. Vol. VI. Yuzhno-Sakhalinsk. IMGGE FEB RAS. 1997. – 237 p. (In Russ.)
6. Glagovsky V.P., Kassirova N.A., Voronkov O.K. et al. Studies of seismic resistance of oil production platform wells on the Sakhalin shelf. *Oil industry*. 2004. No. 6. pp. 72–77. (In Russ.)
7. Dagestan earthquake on 14 May 1970. Destructive effects. *Engineering seismology. Issues of earthquake engineering*. Moscow. Nauka. 1981. 265 p. (In Russ.)
8. A set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation GSZ-97. Explanatory note and list of cities and settlements located in earthquake-prone areas. Eds. V.N. Strakhov, V.I. Ulomov. Moscow. OIPE RAS. 1999. 57 p. (In Russ.)
9. Kostrov B.V. Mechanics of the tectonic earthquake source. Moscow. Nauka. 1975. 174 p. (In Russ.)
10. The Nazarbek earthquake on 11 Decembe 1980. Tashkent. Fan. 1984. 145 p. (In Russ.)
11. The Pap earthquake of 1984. Tashkent. Fan. 1986. 136 p. (In Russ.)

12. Dangerous natural and anthropogenic processes in mountainous territories: models, systems, technologies. Multi-authored monograph. Eds. A.V. Nikolaev, V.B. Zaalishvili. Vladikavkaz. GFI VSC RAS. 2019. 806 p. (In Russ.)
13. Rustanovich D.N. Fluctuations of the Earth's surface in epicentral zones of strong earthquakes. Moscow. Nauka. 1974. 97 p. (In Russ.)
14. Chernov Yu.K. Empirical models for probabilistic estimates of vibrations of “soft” and “hard” soils during earthquakes. *Geology and geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 90-106. (In Russ.)
15. Chernov Yu.K. A new approach to taking into account the influence of the “ground factor” in probabilistic assessments of the seismic hazard of territories. *Geology and geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 55–70. (In Russ.)
16. The Shikotan earthquake of 1994. Epicentral observations and earthquake source. Moscow. OIPE RAS. 1995. 136 p. (In Russ.)
17. Shteinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. et al. Methods of seismic impact assessment (manual). *Problems of Engineering Seismology*. 1993. Issue 34. pp. 5–94. (In Russ.)
18. Akkar S., Sandikkaya M.A., Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2014. Vol. 12. No. 1. pp. 359–387.
19. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity, and Response Spectra. *BSSA*. 2000. Vol. 90(2). pp. 533–544.
20. 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.
21. 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.
22. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5%-damped linear elastic response spectra at periods ranging from 0.1 s to 10.0 s. *Earthquake Spectra*. 2008. Vol. 24(1). pp. 139–171.
23. Campbell K.W., Bozorgnia Y. Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration From Worldwide Accelerograms Recorded from 1957 to 1993. In: *Proceedings, Fifth U. S. National Conference on Earthquake Engineering, July 10-14 1994 Chicago*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California. 1994. Vol. III. pp. 283–292.
24. Danciu L., Kale O., Akkar S. The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018. Vol. 16. pp. 3497–3533.
25. Sadigh K., Egan J., Youngs R. Specification of ground motion for seismic design of long period structures. *Earthquake Note*. 1986. pp. 57–132.