61

=ГЕОФИЗИКА =

VДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC. 2022.45.59.004

Оригинальная статья

Некоторые предварительные данные о спектрах колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей

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: 10.08.2022, доработана: 07.09.2022, одобрена в печать: 14.09.2022

Резюме: Актуальность работы. Тема учета влияния локальных грунтово-геоморфологических условий традиционно является одной из основных в оценках сейсмической опасности территорий. Однако несмотря на успехи, достигнутые в данной области, здесь еще остаются вопросы, требующие дальнейшего уточнения. Так, например, российскими нормативами рекомендуется производить вышеозначенный учет путем введения в расчеты некоторой поправки, которая для данного грунта является постоянной величиной, не зависящей от величины и удаленности воздействующих на данный грунт землетрясений. В то же время результаты ряда эмпирических и теоретических данных показывают, что реакция одного и того же грунта может меняться при изменении характеристик воздействующих на него сейсмических возмущений. Такое положение дел объясняется тем, что на практике (особенно при вероятностных расчетах, когда оценивается кумулятивный эффект большого количества отдельных воздействий, характеристики каждого из которых обычно невозможно прогнозировать с необходимой точностью) эти, в принципе имеющиеся возможности трудно реализовать в полном объеме. В данном контексте настоящая работа, направленная на получение новых данных о сейсмической реакции грунтов, представляется актуальной. Цель исследования. Изучение изменчивости реакции разных типов грунтов в зависимости от характера воздействующих на них сейсмических колебаний и на этой базе разработка более точного и в то же время удобного для практического применения способа количественного учета влияния местных грунтовых условий при прогнозировании (в том числе вероятностном) возможных в данном месте сейсмических воздействий. Методы исследования. В работе использован представительный материал – 2362 спектра колебаний «мягких» и 1021 «твердых» грунтов, зарегистрированных в различных районах мира при землетрясениях с магнитудами 2,5-7,3 на расстояниях 1-658 км. С использованием методов математической статистики раздельно рассмотрены зависимости уровней спектральной плотности Фурье ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов от магнитуды землетрясения, расстояния до очага и частоты спектральной составляющей. Результаты работы. Получены новые эмпирические данные об особенностях сейсмических колебаний разных типов грунтов существенно отличающиеся от подобных оценок, применяющихся в ряде отечественных и зарубежных инженерно-сейсмологических практик (при сейсмическом микрорайонировании, уточнении сейсмичности для отдельных объектов и др.), практическое использование которых может корректировать получаемые традиционными способами результаты. Изучение вопроса о том, как именно и в какой мере применение этих новых данных может повлиять на вышеуказанные прогнозные (особенно вероятностные) оценки в различных сейсмогеологических условиях представляется основным в продолжении исследований по данной тематике.

Ключевые слова: сейсмические свойства «мягких» и «твердых» грунтов, спектры ускорения колебаний грунта, сейсмическое микрорайонирование, сильные землетрясения.

Для цитирования: 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. 12 (3): 61-78. DOI: 10.46698/VNC. 2022.45.59.004.

62 Geology and Geophysics of Russian South

12 (3) 2022

=GEOPHYSICS =

DOI: 10.46698/VNC. 2022.45.59.004

Original paper

Some preliminary data on the vibration spectra of «soft» and «hard» soils during earthquakes of different magnitudes and distances

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

Reseived: 10.08.2022, revised: 07.09.2022, accepted: 14.09.2022

Abstract: Relevance. The topic of the influence of local soil-geomorphological conditions` consideration is traditionally one of the main ones in the seismic hazard of territory estimation. However, despite the progress made in this area, there are still issues that require further clarification. Thus, Russian standards recommend carrying out the above consideration by introducing into the calculations a certain correction, which for a given soil is a constant value that does not depend on the magnitude and distance of earthquakes affecting this soil. At the same time, the results of a number of empirical and theoretical data show that the response of the same soil can change when the characteristics of seismic disturbances affecting it change. This is explained by the fact that these, in principle, available opportunities are difficult to realize fully in practice (especially in probabilistic calculations, when the cumulative effect of numerous individual impacts, the characteristics of each of which are usually impossible to predict with the required accuracy, is estimated). In this context, this work aimed at obtaining new data on the seismic response of soils seems to be relevant. Aim. The aim of the work is the study of the variability of different types of soils response depending on the nature of seismic vibrations affecting them and the development, on this basis, of a more accurate and at the same time convenient for practical application method for quantitative consideration of local soil conditions influence in the prediction (including probabilistic prediction) of possible seismic impacts in a given place. Methods. Representative material was used in the work – 2362 and 1021 vibration spectra of "soft" and "hard" soils respectively, recorded in various regions of the world during earthquakes with magnitudes of 2.5-7.3 at distances of 1-658 km. Using the methods of mathematical statistics, the dependences of the levels of the Fourier spectral density of the accelerations of "soft" and "hard" soils vibrations on the earthquake magnitude, the distance to the source, and the frequency of the spectral component are considered separately. Results. New empirical data on the features of seismic vibrations of different types of soils have been obtained. These data differs significantly from similar estimates used in a number of domestic and foreign engineering and seismological practices (during seismic microzonation, seismicity refinement for individual objects, etc.). The practical use of such data can correct the results obtained by traditional methods. The study of how exactly and to what extent the application of these new data can affect the above predictive (especially probabilistic) estimates under various seismogeological conditions seems to be the main one in ongoing research on this topic.

Keywords: seismic properties of "soft" and "hard" soils, acceleration spectra of ground vibration, seismic microzonation, strong earthquakes.

For citation: Chernov Yu. K. Some preliminary data on the vibration spectra of "soft" and "hard" soils during earthquakes of different magnitudes and distances. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (3): 61-78. DOI: 10.46698/VNC. 2022.45.59.004.

Введение

Среди природных факторов, влияющих на характер возможных в данном месте сейсмических воздействий, важную роль играют местные инженерно-геологиче-

ские условия. Поэтому уже многие десятилетия во всем мире по данной проблематике проводятся исследования и разрабатываются соответствующие нормативнометодические документы. К настоящему времени в данном направлении достигнуты значительные успехи, решены многие важные задачи. В то же время здесь еще остаются вопросы, которые требуют дальнейшего рассмотрения и уточнения. Один из них – это способы количественного учета влияния местных грунтово-геоморфологических условий при вероятностных оценках сейсмической опасности территорий. Так, например, пока традиционно в большинстве отечественных исследований (а также, например, в последней версии российских нормативов по сейсмическому микрорайонированию (СМР)) при оценке влияния грунтов на возможное сейсмическое воздействие это влияние («грунтовая» поправка) вводится в расчеты как некая константа, независящая от удаленности и магнитуды землетрясения (см., например, [Заалишвили и др., 2018]). В то же время результаты ряда эмпирических наблюдений (см., например, [Чернов, 1989; Джурик и др., 2011]) показывают, что реакция одного и того же грунта может меняться при изменении характеристик воздействующих на него сейсмических возмущений. Теоретические расчеты, вообще однозначно указывают на зависимость, например, спектральных характеристик одного и того же грунтового разреза от интенсивности падающих на его подошву сигналов, от углов подхода сейсмических волн, геометрии грунтовых слоев и др. (см., например, [Штейнберг и др., 1993; Заалишвили и др., 2022]. Другое дело, что на практике (особенно при вероятностных расчетах, когда оценивается кумулятивный эффект большого количества отдельных воздействий, характеристики каждого из которых обычно невозможно прогнозировать с необходимой точностью) эти, в принципе имеющиеся возможности модельных расчетов, затруднительно реализовать в полном объеме.

В данном контексте представляется актуальной задача дополнительного изучения возможности разработки более адекватного и в то же время удобного для практического применения способа количественного учета влияния местных грунтовых условий при прогнозировании (в том числе вероятностном) возможных в данном месте сейсмических воздействий.

Исходя из изложенного цель настоящего исследования – изучение изменчивости реакции разных типов грунтов в зависимости от характера воздействующих на них сейсмических колебаний.

Методика исследований

В настоящем исследованиив качестве исходных привлечены данные об амплитудных спектрах Фурье ускорений колебаний грунта, рассчитанных по акселерограммам, а также велосиграммам и сейсмограммам колебаний грунта, зарегистрированным при реальных землетрясениях в различных сейсмоактивных районах мира. Краткая характеристика этих данных приведена в таблице 1.

Как видно из этой таблицы в выборку включены записи землетрясений с широким разбросом по магнитудам, удаленностям и региональным сейсмотектоническим условиям. Это сделано для того, чтобы сформировать некоторую «среднестатистическую» выборку, которая бы, по возможности, учитывала и, соответственно, на выходе нивелировала различные обстоятельства возникновения землетрясений, которые могут влиять на рассматриваемое явление, как таковое. Ограничением является то, что здесь рассматриваются неглубокие (глубина очагов до 30-40 км) зем-

12 (3) 2022

летрясения, и те, для которых имеются сведения о грунтовых условиях в пункте регистрации. Большая часть записей слабых и умеренных из указанные в таблице 1 землетрясений заимствованы из материалов исследований, в разное время проведенных ИС АН Узбекистана, ИФЗ РАН, ИМГиГ ДВО РАН (см. [Рустанович, 1974; Дагестанское..., 1981; Адылов и др., 1988; Чернов, 1989; Газлийские землетрясения..., 1986; Геодинамика..., 1997; Чернов и др., 2019]. По более сильным землетрясениям исходные данные взяты из баз сильных движений (Strong-Motion Virtual Data Center (VDC); European Strong-Motion Datebase (ESD)), а также из публикаций [Strong-motion..., 1975-1979; Analysis..., 1969-1976; Bull. of international..., 1978; Bull. of strong-motion..., 1984; San-Fernando..., 1973; Porcella et al., 1982; Preliminary..., 1979; The Northridge..., 1994].

Таблица 1 / Table 1

Характеристики используемых данных по инструментальной регистрации землетрясений с оценками спектров Фурье / Characteristics of the used data on instrumental registration of earthquakes with estimates of the Fourier spectra

Регион; зарегистриро- ванные характеристи-	«Мягкий» грунт / "Soft" soil			«Твердый» грунт / "Hard" soil		
ки колебаний грунта / Region; recorded characteristics of ground vibration	Mагни- туды / Magni- tudes	Рассто- яния (км) / Distances (km)	Коли-чество спектров / Number of spectra	Магни- туды / Magni- tudes	Рассто- яния (км) / Distances (km)	Коли-чество спектров / Number of spectra
Азорские острова; ускорения / Azores; accelerations	5,0	5	2	-	-	-
Дагестан; смещения, скорости / Dagestan; displacements, velocities	2,5-4,7	3-32	56	2,5-5,0	3-26	49
Дальний Восток; скорости, ускорения / Far East; velocities, accelerations	2,5-7,2	4-413	84	4,0	21	2
Запад США; ускорения / US West; accelerations	4,7-6,9	4-350	52	5,0-6,7	8-403	10
Индия; ускорения / India; accelerations	-	-	-	4,5-7,1	14-153	52
Иран; ускорения / Iran; accelerations	6,0-7,3	5-70	14	-	-	-
Кавказ; смещения, скорости, уско- рения / Caucasus; displacements, velocities, accelerations	7,0	40	2	3,0-5,5	5-25	14
Калифорния; уско- рения / California; accelerations	4,2-7,2	2-598	1468	2,5-7,1	1-268	549
Курильские острова; скорости / Kuril Islands; velocities	3,6-6,6	37-340	94	-	-	-

Geology and Geophysics of Russian South

12 (3) 2022

65

Новая Зеландия; уско- рения / New Zealand; accelerations	5,1-5,8	11-672	74	4,8-7,1	10-672	290
Тайвань; ускорения / Taiwan; accelerations	7,3	2-23	48	7,3	4-10	12
Туркменистан; сме- щения / Turkmenistan; displacements	-	-	-	3,3-4,0	5-15	8
Турция; ускорения / Turkey; accelerations	6,8	2	2	-	-	-
Узбекистан; смеще- ния, скорости, уско- рения / Uzbekistan; displacements, velocities, accelerations	2,5-7,3	8-45	324	4,5-4,8	18-42	4
Юг Европы, ускоре- ния / South of Europe; accelerations	3,3-7,0	7-245	128	3,8-6,5	6-240	21
Япония; ускорения / Japan; accelerations	6,9	1-10	14	6,9	2-7	10
Всего: смещения, ско- рости, ускорения / In total: displacements, velocities, accelerations	2,5-7,3	1-598	2362	2,5-7,3	1-672	1021

Спектры из таблицы 1 разделены на две группы, различающиеся типом грунта в месте регистрации. Первая группа – это спектры, зарегистрированные на грунтах, которые объединены под названием «мягкие» грунты. Это неплотные глины, суглинки, супеси, пески разной степени плотности и влажности, слабосцементированные галечники, лессы, сильно выветрелые скальные и полускальные породы, а также грунты, которые в первоисточниках называются «аллювием». Грунты данной группы предположительно могут быть отнесены к грунтам II категории СНиП по сейсмическим свойствам. Вторая группа – это спектры, зарегистрированные на песчаниках, известняках, сланцах, гнейсах, конгломератах, плотных глинах, хорошо сцементированных галечниках, породах вулканического и магматического происхождения, которые объединены под названием «твердые» грунты. Эти грунты можно отнести к грунтам I категории СНиП по сейсмическим свойствам.

Разделение всего массива данных из таблицы 1 на вышеописанные две группы, является достаточно грубым и не учитывающим возможное влияние других факторов. Однако корректный учет этих факторов потребовал бы многократного увеличения статистики используемых записей землетрясений. Поэтому в данном исследовании сделан пока первый шаг в данном направлении – производится сравнение спектров по одному относительно явному показателю – по степени прочности грунтов, играющей существенную роль в формировании реакции этих грунтов на входящее сейсмическое воздействие.

В первоисточниках при описании землетрясений, приводятся разные оценки магнитуд землетрясений (по поверхностным и объемным волнам, моментные и локальные магнитуды), которые в численном выражении часто не совпадают. В данном исследовании эти различные определения магнитуд объединены под общим показателем, считая, что данные различия носят несистемный (случайный) характер.

В первоисточниках приведены также различные по физическому смыслу расстояния, на которых зарегистрированы спектры – «расстояния до разрыва», а также гипоцентральные и реже эпицентральные расстояния. В настоящем исследовании в качестве меры удаленности точки регистрации спектра от источника сейсмических возмущений, как имеющие ясный физический смысл, приняты «расстояния до очага землетрясения», к которым приведены данные первоисточников. При этом «расстояния до разрыва» приравнены к «расстояниям до очага», а в гипоцентральные и эпицентральные расстояния в соответствие с процедурами, подробно описанными в [Чернов и др., 2019] введены корректирующие поправки.

Полученные вышеописанным способом массивы спектров для «мягких» и «твердых» грунтов разделены по величине (магнитуде) землетрясений. Некоторые характеристики итоговых массивов данных сведены в таблицу 2.

Таблица 2 / Table 2

Характеристики сформированных итоговых массивов данных по инструментальной регистрации землетрясений с оценками спектров Фурье / Characteristics of the formed resulting datasets based on the instrumental registration of earthquakes with estimates of the Fourier spectra

«Мягкие» грунты / "Soft" soil			«Твердые» грунты / "Hard" soil			
Mагнитуды землетрясе- ний / Earthquakes magnitudes	Расстояния до очага (км) / Distances to the source (km)	Количество спектров / Number of spectra	Магнитуды землетрясе- ний / Earthquakes magnitudes	Расстояния до очага (км) / Distances to the source (km)	Количество спектров / Number of spectra	
7 (6,5-7,3)	0,5-584	1045	7 (6,5-7,3)	0,5-658	305	
6 (5,5-6,4)	0,5-405	612	6 (5,5-6,4)	0,5-423	331	
5 (4,5-5,4)	0,5-201	271	5 (4,5-5,4)	1-248	224	
4 (3,5-4,4)	0,5-148	271	4 (3,5-4,4)	0,5-26	100	
3 (2,5-3,4)	2-38	163	3 (2,5-3,4)	2-15	61	

Спектры, первоначально рассчитанные по записям скоростей или смещений колебаний грунта пересчитаны в спектры ускорений путем стандартной процедуры умножения первоначальных значений (|S|(f)), зарегистрированных на частоте (f), на величину ($2\pi f$) или ($2\pi f$)², соответственно.

В соответствие с концепцией данных исследований, предполагается, что общие различия между спектрами колебаний «твердых» и «мягких» грунтов носят не случайный характер. Различия же, наблюдаемые внутри каждой их этих двух групп спектров (при одинаковых магнитудах и удаленностях землетрясений), случайны. Оценки параметров функций распределения вероятностей этих случайных величин и соответствующих аппроксимирующих выражений произведены с использованием методов корреляционного, регрессионного, дисперсионного и других стандартных методов статистического анализа.

Для удобства расчетов так же, как в [Чернов, 1989] оригинальные спектры Фурье параметризованы, т.е. представлены в разряженном виде – в виде дискретного набора значений |S| (f) для 18 спектральных составляющих логарифмически равно-

мерно распределенных по частоте в диапазоне 0,28-22 Гц. В этой же работе изложены основания, по которым принято, что значения |S|(f) как для «мягких», так и «твердых» грунтов – случайные величины, имеющие логнормальное распределение во всем рассматриваемом диапазоне M, D и f.

Результаты работы и их обсуждение

На рисунке 1 в графическом виде приведены примеры итоговых массивов значений |S| (*f*), принятых для «мягких» и «твердых» грунтов при различных *M*, *D* и *f*. При построении этих графиков в целях общего сглаживания выборки из общего массива данных исключены немногочисленные экстремальные выбросы значений |S| на отдельных частотах спектров, к которым (с учетом обычно встречающихся стандартных отклонений величины lg|S| при заданных *M*, *D* и *f* порядка 0,25) отнесены значения |S|, отличающиеся от среднего в большую или меньшую сторону более чем в 4 раза.

Несмотря на наблюдаемый разброс отдельных значений |S| (*M*, *D*, *f*), несколько затушевывающий общую картину, из приведенных примеров видно, что уровни спектров «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях одних и тех же маг-



Рис. 1. Примеры значений lg|S| (|S| в см/с – ось ординат); черный и красный цвет – «мягкий и «твердый» грунт, соответственно для f= 0,47 Гц (a) и 13 Гц (b) при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей (lgD в км – ось абсцисс). Пустые кружки – отдельные измерения, линии – аппроксимирующие кривые. Сплошные линии – реальные данные, пунктир – экстраполяции

Fig. 1. Examples of the values of |g|S| (|S|, in cm/s, is the ordinate axis); black and red colors denote "soft" and "hard" ground, respectively, for f=0.47 Hz (a) and 13 Hz (b) during earthquakes of different magnitudes and distances (lgD, in km, is the abscissa axis). Empty circles are individual measurements; lines are approximating curves. Solid lines are real data; dotted lines are extrapolations нитуд в общем различны. И различия эти неодинаковы на различных расстояниях от очага. Кроме того, они меняются в зависимости от магнитуды землетрясений и частот спектральных составляющих. Более отчетливо эти тенденции видны при рассмотрении не индивидуальных оценок спектров при разных значениях M, D, f, а средних значений S|(M, f), рассчитанных для отдельных интервалов значений lgD, на которые с шагом 0,2 лог. единицы разбит рассматриваемый диапазон расстояний до очага землетрясения (D). Примеры таких построений приведены на рисунке 2.

В процессе дальнейшего анализа по сформированным выборкам произведены аппроксимации в виде аналитических выражений. За основу этих аппроксимаций взята общая структура аналитических выражений, полученная в результате разработки моделей сильных движений, описанная в [Чернов и др., 2019]. Принято, что искомые функции затухания спектров как «мягких», так и «твердых» грунтов с расстоянием |S| (*M*, *D*, *f*) во всем рассматриваемом диапазоне магнитуд землетрясений состоят из отдельных участков, которые характеризуются своими коэффициентами затухания с расстоянием. По мере удаления от очага землетрясения первой наблюдается так называемая ближняя зона, затем идет переходная зона от ближней зоны к дальней зоне, далее следует дальняя зона, состоящая из трех подзон – сначала идет собственно дальняя зона, затем следует первая подзона, в которой скорость затухания уровней спектров с расстоянием замедляется по сравнению с собственно дальней зоной, после которой, начиная с некоторых расстояний скорость затухания с расстоянием уровней спектров вновь возрастает – это вторая самая удаленная от очага подзона дальней зоны. Конкретные параметры аппроксимирующих выражений (моделирующих колебания «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разной величины и удаленности) также как в [Чернов и др., 2019] определялись методом подбора с тем условием, чтобы данные модели оптимальным образом описы-



Рис. 2. Примеры значений lg|S| (S| в см/с – ось ординат) зарегистрированных на «мягких» (черный цвет) и «твердых» (красный цвет) грунтов на различных частотах при землетрясениях разных магнитуд на различных расстояниях до очага (lgD в км – ось абсцисс). Пустые кружки – поинтервальные средние значения, линии – аппроксимирующие кривые. Сплошные линии – реальные данные, пунктир – экстраполяции /

Fig. 2. Examples of lg|S| (S|, in cm/s, is the ordinate axis) recorded on "soft" (black color) and "hard" (red color) soils at different frequencies during earthquakes of different magnitudes at different distances to the source (lgD, in km, is the abscissa axis). Empty circles are interval mean values; lines are approximating curves. Solid lines are real data; dotted lines are extrapolations

вали весь объем данных во всех рассматриваемых диапазонах изменения величин M, D и f.

Важным элементом данных построений является определение уровней спектров Фурье |S| (M, f) в ближних зонах землетрясений и определение размеров самих этих ближних зон. Размеры ближних зон землетрясений всех рассматриваемых магнитуд в соответствие с рекомендациями работы [Чернов и др., 2019] определены по участкам слабого изменения уровней спектров по мере приближения к очагу землетрясения. Эти зоны достаточно отчетливо видны на соответствующих графиках, приведенных на рисунках 1 и 2. Размеры этих зон (т. е. $D = r'_0$) в пределах точности измерений одинаковы для функций |S| (M, D, f) как «мягких», так и «твердых» грунтов и не зависят также от частоты спектральной составляющей. Они зависят только от магнитуды землетрясения. Эту зависимость можно описать выражениями:

$$lg r_0 = 0,185 M - 0,595$$
 для $M \ge 4,5$ (1)
 $lg r_0 = 0,258 M - 0,925$ для $M \le 4,5$

где r_0' – в км.

Согласно выражениям (1) в дальнейших построениях для землетрясений с M = 7, 6, 5, 4 и 3 приняты размеры ближних зон 5 км, 3,3 км, 2,1 км, 1,3 км и 0,7 км, соответственно. Эти оценки несколько отличаются от аналогичны оценок, полученных в [Чернов и др., 2019] для «среднестатистических» грунтов. Однако различия эти незначительны и могут объясняться погрешностями самих статистических построений. Главным, на наш взгляд, в данном случае является то, что результаты независимых оценок, полученные по трем различным выборкам (для «мягких», «твердых» и «среднестатистических» грунтов), оказались достаточно близкими и не зависящими от типов сравниваемых грунтов. Это свидетельствует об устойчивости и, соответственно, реалистичности данного вида оценок.

Далее, в соответствие с результатами наших предыдущих исследований (см. [Чернов, 1989; Чернов и др., 2019] принято, что в ближней зоне землетрясений разных магнитуд средняя скорость изменения величины lg|S| (M, f) на фиксированных частотах при изменении магнитуды землетрясения ($\overline{\beta}_M = Dlg|S|/DM$) может быть описана линейной зависимостью. Статистический анализ зарегистрированных на расстояниях $D \leq r'_0$ значений |S| (M, f) показывает, что эта зависимость несколько различается для спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов. В аналитическом виде эти зависимости могут быть представлены выражениями:

$$eta_{M} = -0,367 \, lgf + 0,547 \,$$
для «мягких» грунтов (2)
 $\overline{eta_{M}} = -0,345 \, lgf + 0,559 \,$ для «твердых» грунтов

где f – частота в Гц.

Сравнивая выражения (2) с аналогичными определениями [Чернов и др., 2019] можно видеть, что, как и в случае определений r'_0 , оценки $\overline{\beta_M}(f)$ близки и как бы подтверждают друг друга. Это тест на внутреннюю согласованность полученных результатов. Второе важное обстоятельство – это то, что данные оценки хорошо вписываются в выполненные ранее раздельные определения зависимостей $\overline{\beta_M}(f)$ для землетрясений взбросового и сдвигового типов [Чернов, 1989]. Так, по скорости изменения величины $\overline{\beta_M}$ при изменении *f* выражения (2) занимают промежу-

точное положение между землетрясениями «сдвигами» и «взбросами», для которых эти величины варьируют в пределах 0,29-0,33 и 0,40-0,48, соответственно. В нашем случае наблюдается некоторый сдвиг значений β_M в сторону «сдвиговых» землетрясений, что корреспондирует с исходными данными (см. таблицу 1), согласно которым большинство используемых спектров зарегистрировано в районах, в которых происходят землетрясения с преобладанием сдвиговой составляющей подвижки в очаге. Таким образом, полученные соотношения (2) показывают и хорошую внешнюю согласованность.

На следующем этапе посредством введения поправочных коэффициентов k_{β} , учитывающих уменьшение b_M при росте M (см. [Чернов и др., 2019] полученные «средние» значения $\overline{\beta}_M(f)$ преобразованы в окончательный вид $\beta_M(f) = k_{\beta} \overline{\beta}_M(f)$.

Значения $b_M(f)$ дают оценки значений lg|S|(M, f) относительно некоторой «точки отсчета». За такую «точку отсчета» приняты «средневзвешенные» спектры, рассчитанные для «средневзвешенных» землетрясений. При расчете таких «средневзвешенных» землетрясений статистические веса принимались пропорциональными доли землетрясений данной магнитуды в общей выборке (см. таблицу 2). Для спектров колебаний на «мягких» грунтах такое «средневзвешенное» землетрясение имеет магнитуду M=5,9, для спектров колебаний на «твердых» грунтах – магнитуду M=5,7. Для этих «средневзвешенных» землетрясений по имеющимся массивам данных таким же способом определены соответствующие «средневзвешенные» спектры колебаний (средневзвешенные значения lg|S|(M, f)). Эти «средневзвешенные» спектры для землетрясений «средневзвешенных» магнитуд затем, посредством вышеописанных соотношений $\beta_M(f)$, пересчитаны на другие рассматриваемые в данном исследовании магнитуды землетрясений. В графическом виде примеры результатов этих построений приведены на рисунке 3.

Сравнивая средние значения между полученными спектрами ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов в ближних зонах землетрясений с *M*=7-3 с



Рис. 3. Примеры наиболее вероятных значений спектральной плотности Фурье ускорений колебаний «мягких» (сплошная линия) и «твердых» (пунктирная линия) грунтов при землетрясениях разных магнитуд (М) на расстояниях до очага 1,0, 12,6 и 20,0 км (индексы а, б, в, соответственно). Ось ординат – lg|S| в см/с; ось абсцисс – lgf в Гц /

Fig. 3. Examples of the most probable values of the Fourier spectral density of vibration accelerations of "soft" (solid line) and "hard" (dotted line) soils during earthquakes of different magnitudes (M) at distances to the source of 1.0, 12.6 and 20.0 km (indices a, b, c, respectively). The ordinate axis is |g|S| in cm/s; the abscissa axis is |g|f in Hz

такими же оценками для ближних зон «среднестатистических» спектров (см., например, [Чернов, 1989; Чернов и др., 2019]) можно видеть, что спектры настоящего исследования несколько отличаются от «среднестатистических» оценок. Наибольшие различия наблюдаются в спектрах с M = 7, где спектры настоящего исследования в среднем на 0,09 лог. единицы ниже «среднестатистических» спектров. По мере понижения магнитуды землетрясений эта разница уменьшается до величины -0,01 лог. единицы при M = 3. Принимая во внимание, что стандартные отклонения уровней lg||S| при заданных M, D, f по данным разных исследований обычно составляют 0,2-0,3, можно считать, что наши оценки достаточно хорошо согласуются с результатами предыдущих работ.

Согласно принятой структуре функций затухания спектров с расстоянием (см. выше) по мере увеличения D после ближней зоны следует переходная или промежуточная зона. Ее размеры (т. е. $D = r_0$) также как и размеры ближней зоны (r'_0) зависят от магнитуды землетрясения. Эти зависимости, определенные по описанным выше исходным данным, оказались одинаковыми (в пределах точности построений) для «мягких» и «твердых» грунтов. Их можно представить выражениями:

$$lg r_0 = 0,250M - 0,391$$
 для $M \ge 4,5$ (3)
 $lg r_0 = 0,290M - 0,569$ для $M \le 4,5$

где $r_0 - в км.$

Согласно данным выражениям, переходные или промежуточные зоны распространяются до расстояний $D = r_0 = 23$ км при M = 7, до $D = r_0 = 13$ км при M = 6, до $D = r_0 = 7,2$ км при M = 5, до $D = r_0 = 3,9$ км при M = 4 и до $D = r_0 = 2$ км при M = 3. Также как значения r'_0 величины r_0 в настоящем исследовании несколько отличаются от подобных определений, выполненных по другим выборкам (см., например, [Чернов и др., 2019]. Но эти различия незначительны и находятся в пределах погрешностей построений.

Коэффициенты затухания уровней спектров с расстоянием в переходных зонах (n^*) зависят от частоты и не зависят от магнитуды землетрясения и связаны с коэффициентами затухания в следующей за ней собственно дальней зоне (n) как $n^* = 0,349n$ для «мягких» грунтов и $n^* = 0,794n$ для «твердых» грунтов.

Собственно дальняя зона распространяется до расстояний D = 50 км независимо от магнитуды землетрясения. Значения коэффициентов затухания с расстоянием в этой зоне *n* в зависимости от частоты спектральной составляющейдля частот $f \ge f_c$, (где f_c – угловая частота спектра по Дж. Бруну [1981]) описываются выражениями:

$$n = -0.253 lgf - 1.113 npu f < 3.6 \Gamma u$$

$$n = -0.478 lgf - 0.975 npu 3.6 \le f \le 10 \Gamma u$$

$$n = -1.138 lgf - 0.322 npu f > 10 \Gamma u$$
(4)

где n=Dlg|S|/DlgD.

На частотах $f < f_c$ затухание n(f) = const и равно затуханию на частоте f_c .

Полученные коэффициенты n(f), в графическом виде показаны на рисунке 4. Здесь же приведены сделанные ранее оценки для «среднестатистических» грунтов.

Из этого рисунка видно, что коэффициенты затухания с расстоянием для «мягких» и «твердых» грунтов в собственно дальней зоне и подзонах дальней зоны одинаковы. В пределах дальней зоны и первой подзоны дальней зоны не сильно отли-

12 (3) 2022

чаются от них и коэффициенты затухания с расстоянием «среднестатистических» грунтов. Ситуация резко меняется в переходной зоне. Здесь коэффициенты $n^*(f)$ для «твердых» грунтов значительно превышают по абсолютной величине относительно близкие между собой аналогичные коэффициенты для «мягких» и «среднестатистических» грунтов. Также значительные различия можно видеть между теперь уже близкими между собой коэффициентами затухания в первой подзоне дальней зоны $n^{**}(f) = 0,659n(f)$ и коэффициентами затухания во второй подзоне дальней зоны $n^{***}(f) = 2n(f)$ для «мягких» и «твердых» грунтов с одной стороны и такими же оценками для «среднестатистических» грунтов, с другой.



Рис. 4. Коэффициенты затухания с расстоянием наиболее вероятных уровней спектров ускорений колебаний «мягких» (толстая сплошная линия), «твердых» (толстая пунктирная линия), совместно «мягких» и «твердых» (тонкая сплошная линия) полученные по результатам настоящего исследования и «среднестатистических» грунтов из [Чернов и др., 2019] (тонкая пунктирная линия) – ось ординат, в зависимости от логарифма частоты спектральных составляющих (lgf) – ось абсцисс, в зонах, расположенных на разных удалениях от очага /
Fig. 4. Attenuation coefficients with the distance of the most probable levels of the vibration acceleration spectra of "soft" (thick solid line), "hard" (thick dotted line), jointly "soft" and "hard" (thin solid line) obtained from the results of this research and "average" soils from [Chernov et al., 2019] (thin dotted line) – the ordinate axis, depending on the logarithm of the frequency of spectral components (lgf) – the abscissa axis, in zones located at different distances from the focus

Сходство между независимыми оценками коэффициентов затухания с расстояниями величин lg|S|(f) для «мягких» и «среднестатистических» грунтов объясняется тем, что они описывают колебания грунтов с близкими инженерно-геологическими характеристиками (в большинстве случаев это грунты ІІкатегории СНиП по сейсмическим свойствам). Различия же в коэффициентах затухания, в переходной и второй подзоне дальней зоны, по-видимому, имеют разную природу. Если в случае далеких землетрясений может сказываться немногочисленность самих выборок и, как следствие, большая погрешность определения трендов, то в близких к очагу переходных зонах, где статистика многочисленнее, вероятно, имеет место влияние именно «грунтового» фактора.

Рассматривая результаты проведенного исследования в целом, можно видеть, что полученные функции затухания спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов имеют существенные различия, которые достаточно сложным образом зависят от магнитуды землетрясения, расстояния до очага и частоты спектральных составляющих (рисунок 5).

В структуре показанных на рисунке 5 зависимостей, выделяются три участка, связанных с ближними, переходными и дальними зонами землетрясений. На первом участке (в ближних зонах) низкочастотные области спектров «мягких» и «твердых» грунтов различаются незначительно. По мере возрастания частоты колебаний уровень спектров ускорений «твердых» грунтов начинает все больше превышать уровень спектров ускорений «мягких» грунтов. При этом скорость нарастания



Рис. 5. Примеры отношений наиболее вероятных уровней спектров Фурье ускорений колебаний «мягких» грунтов к уровням спектров Фурье ускорений колебаний «твердых» грунтов (ось ординат) для f = 0,36; 1,67; 7,8; 17 Гц (индексы a, b, c, d, соответственно) при землетрясениях с разными M (цифры около кривых) и D (ось абсцисс – lgD, D в км /

Fig. 5. Examples of ratios of the most probable levels of the Fourier spectra of vibration accelerations of "soft" soils to the levels of the Fourier spectra of vibration accelerations of "hard" soils (the ordinate axis) for f = 0.36; 1.67; 7.8; 17 Hz (indices a, b, c, d, respectively) during earthquakes with different M (numbers near the curves) and D (the abscissa axis – lgD, D in km)

этого эффекта тем больше, чем больше магнитуда землетрясения. Так, например, спектры колебаний «твердых» грунтов на частотах 17-22 Гц при землетрясениях с M=7 превышают спектры колебаний «мягких» грунтов на ~ 40%.

На втором участке (в переходных зонах) наблюдаются наибольшие изменения в поведении рассматриваемых зависимостей. В этих зонах происходит основная перестройка (инверсия) соотношений между спектрами двух сравниваемых типов грунтов. Именно в этих зонах уровни спектров колебаний «мягких» грунтов по отношению к спектрам «твердых» грунтов повышаются и достигают максимума. Наиболее интенсивно этот процесс происходит для высоких значений f и M. Так, при землетрясениях с M=7 разница в уровнях спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов для частот f=17-22 Гц на участке от r'_0 до r_0 изменяется от -40% до +230%. Сходным образом изменяются вышеописанные соотношения и для землетрясений других магнитуд и для спектральных составляющих на других частотах.

На третьем участке, включающем собственно дальние зоны и подзоны дальней зоны наблюдается стабилизация достигнутых в переходных зонах соотношений между спектрами «мягких» и «твердых» грунтов, которые здесь составляют ~200% (170-230%).

Полученным результатам могут быть даны разные интерпретации. Так можно предположить, что исходные спектры «мягких» грунтов отражают некоторую «среднестатистическую» реакцию верхнего «мягкого» слоя, лежащего на подстилающем его жестком «скальном» полупространстве. Реакцию же (тоже «среднестатистическую») самого «скального» полупространства, без верхнего «мягкого» слоя, в наших опытах представляют спектры «твердых» грунтов. Верхний более рыхлый слой может усиливать сейсмические колебания, подходящие к нему снизу из более твердого полупространства. В формировании общего эффекта такого усиления важную роль обычно играют два фактора. Первый – разница в сейсмических жесткостях верхнего «мягкого» слоя и подстилающего его более «твердого» полупространства. Второй фактор связан с конструктивной интерференцией сейсмических волн в верхнем более «мягком» слое. В то же время верхний более «мягкий» слой может и ослаблять подходящие снизу сейсмические сигналы за счет нелинейного поведения во время интенсивных сейсмических воздействий (см., например, [Заалишвили и др., 2021]. Влияние этих двух факторов может происходить по-разному при различных сочетаниях величин M, D и f. Tak, например, в ближней зоне, где из-за протяженности очага землетрясения и хаотичности распределения в нем отдельных «субисточников», с работой которых обычно связано короткопериодное излучение, первичные очаговые сейсмические сигналы становятся некогерентными (см. [Костров, 1975]), вследствие чего, ухудшаются условия для конструктивной интерференции. Кроме того, из-за высокой интенсивности подходящих из более жесткой среды сейсмических сигналов в «мягких» грунтах возрастают нелинейные эффекты, ограничивающие по амплитуде колебательную составляющую сейсмических движений. Данный эффект тем больше, чем интенсивнее сейсмические колебания в «твердом» слое т.е. чем больше М. Учитывая также, что «мягкие» грунты в верхней части разреза как правило имеют ограниченную мощность можно ожидать, что влияние вышеуказанных факторов наиболее отчетливо может проявляться в высокочастотных областях спектров. Именно такое поведение колебаний «мягких» и «твердых» грунтов наблюдается в наших опытах.

По мере удаления от очагов землетрясений (в переходных зонах) постепенно начинают преобладать факторы, повышающие наблюдаемые ускорения «мягких» грунтов по отношению к «твердым». Так, с одной стороны, на более далеких расстояниях первичные очаговые сейсмические сигналы становятся более когерентными и улучшаются условия для возникновения конструктивной интерференции сейсмических волн, а с другой, при уменьшении с расстоянием интенсивности колебаний снижаются и нелинейные эффекты в «мягких» грунтах. Совместное влияние этих факторов приводит к тому, что в переходных зонах в условиях «мягких» грунтов наблюдается затухание сейсмических сигналов более медленное, чем в условиях «твердых» грунтов, где влияние этих двух факторов изначально имеет меньшее значение. Здесь также, как и в ближних зонах в наиболее явном виде указанные эффекты проявляются на высоких частотах

Не противоречит данной версии и наблюдаемое в наших опытах поведение «мягких» и «твердых» грунтов в дальней зоне и в последующих подзонах, где влияние некогерентности очагового излучения и нелинейности «мягких» грунтов практически прекращается и остаются только факторы (различия в сейсмических жесткостях и меньше, конструктивная интерференция), стабильно повышающие интенсивность колебаний на «мягких» грунтах по отношению к «твердым» в среднем в 2 раза. Этот результат полностью согласуется с многочисленными натурными данными полученными многими исследователями при изучении удаленных и слабых землетрясений, в различных сейсмоактивных районах мира.

Заключение

Результаты настоящих исследований показывают, что различия между сейсмическими воздействиями, наблюдаемые в условиях более «мягких» и более «твердых» грунтов, могут иметь иной, более сложный характер, чем это принимается сейчас во многих практиках по оценке сейсмической опасности и сейсмического риска (см. выше). Эти различия могут быть количественно описаны в удобных для дальнейших прогнозных оценок терминах магнитуд, удаленностей и частот. Очевидно, что практическое использование этих новых данных будет корректировать оценки, выполняемые с обычно используемыми соотношениями. Вопрос о том, в каких случаях и насколько велики могут быть такие коррекции планируется рассмотреть на следующем этапе исследований по данной тематике. Следует подчеркнуть, что полученные результаты в определенной мере имеют предварительный характер и могут в дальнейшем корректироваться и уточняться, особенно в части определения отдельных параметров аппроксимирующих выражений и других деталей. В то же время по ряду более общих позиций, как представляется, уже сейчас могут быть сделаны следующие основные выводы:

1. Проведенные исследования показали, что количественные соотношения между характеристиками ускорений колебаний грунтов с существенно различными сейсмическими свойствами («мягких» и «твердых» грунтов) имеют сложный характер и зависят от различных сочетаний таких факторов, как магнитуда землетрясения, удаленность от очага и частота сейсмического колебания.

2. Полученные в результате исследований соотношения существенно отличаются от большинства используемых в отечественных и ряда других инженерносейсмологических практиках.

3. Вопрос о том, как именно и в какой мере применение этих новых данных может повлиять на современные вероятностные оценки сейсмической опасности и

сейсмического риска в различных сейсмогеологических условиях Российской Федерации представляется основным в продолжении исследований по данной тематике.

Литература

1. Адылов С.К., Соколов В.Ю., Фремд В.М., Чернов Ю.К. Сильные землетрясения Узбекистана в 1984-1985 гг. – М.: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1988. – 121 с.

2. Брун Дж. Н. Физика сильных движений, вызванных землетрясениями. // Сейсмический риск и инженерные решения. – М.: Недра, 1981. – С. 129-161.

3. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. – Ташкент: Изд-во «ФАН» Узбекской ССР, 1986. – 368 с.

4. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Том VI. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. – Южно-Сахалинск, 1997. – 340 с.

4. Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. (Разрушительные последствия. Инженерная сейсмология. Вопросы сейсмостойкого строительства.). – М.: Наука, 1981. – 265с.

5. Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннов А.Ф., Брыжак Е.В., Усынин Л.А., Шагун А.Н., Еськин А.Ю. К районированию сейсмической опасности территории г. Иркутска. // Серия «Наук о Земле». – 2011. – Т. 4. № 2. – С. 61-81.

6. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Макиев В.Д. Макросейсмическое проявление сейсмических событий, обусловленное влиянием грунтовых условий и формирование карт сейсмического микрорайонирования. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – Т. 8. № 1. – С. 48-55.

7. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // Геология и геофизика Юга России. –2021. – Т. 11. №4. – С. 70-82. DOI: 10.46698/VNC. 2021.77.59.006

8. 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. – Т. 12. № 1. – С. 75-88. DOI: 10.46698/VNC. 2022.74.27.006.

9. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 174 с.

10. Рустанович Д.Н. Колебания поверхности земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений. – М.: Наука, 1974. – 97 с.

11. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. – Ташкент: Изд-во «ФАН», 1989. – 295 с.

12. Чернов Ю.К., Чернов А.Ю., Читишвили М.И. Модели сильных движений грунта для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. Часть 2. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 161-178. DOI: 10.23671/ VNC. 2019.3.36753

13. 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.

14. 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.

15. Bull. of international. Seismol. Cent. - 1978. - Vol. 13. No. 5, No. 6, No. 7, No. 8, No. 9.

16. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms University "Kirill and Mefodij". Skopje, Yugoslavia. – 1984. No. 1-3.

17. 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.

18. Preliminary analysis of strong motion records from April 15, 1979. Montenegro, Yugoslavia earthquake, Skopje. – 1979. No. 64. – 78 p.; No. 67. – 184 p.

19. 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.

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

21. 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.

References

1. Adylov S.K., Sokolov V.Yu., Fremd V.M., Chernov Yu.K. Strong earthquakes in Uzbekistan in 1984-1985. Moscow. Publishing House of the Institute of Physics of the Earth AS USSR. 1988. 121 p. (In Russ.)

2. Brun Dzh. N. Physics of strong motions caused by earthquakes. Seismic risk and engineering solutions. Moscow. Nedra. 1981. pp. 129-161. (In Russ.)

3. Gazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent. Publishing house "FAN" of the Uzbek SSR. 1986. 368 p. (In Russ.)

4. Geodynamics of the tectonosphere of the conjunction zone of the Pacific Ocean with Eurasia. Vol. 6. Problems of seismic hazard in the Far East region. Yuzhno-Sakhalinsk. 1997. 340 p. (In Russ.)

4. Dagestan earthquake on May 14, 1970 (Destructive consequences. Engineering seismology. Issues of earthquake-resistant construction). Moscow. Nauka. 1981. 265 p. (In Russ.)

5. Dzhurik V. I., Serebrennikov S. P., Drennov A. F., Bryzhak E. V., Usynin L. A., Shagun A. N., Eskin A. Yu. Zoning of seismic hazard of the territory of Irkutsk. Earth Sciences. 2011. Vol. 4. No. 2. pp. 61-81. (In Russ.)

6. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Makiev V.D. Macroseismic evidence of seismic events caused by influence of ground conditions and formation of maps of seismic Microzonation. Geology and Geophysics of Russian South. 2018. Vol. 8 (1). pp. 48-55. (In Russ.)

7. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikin T.I. Nonlinear vibrations of soil strata according to instrumental and numerical data. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11 (4). pp. 70-82. DOI: 10.46698/VNC. 2021.77.59.006 (In Russ.)

8. 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. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12 (1): pp. 75-88. DOI: 10.46698/VNC. 2022.74.27.006. (In Russ.)

9. Kostrov B. V. Focal mechanics of a tectonic earthquake. Moscow. Nauka. 1975. 174 p. (In Russ.)

10. Rustanovich D.N. Vibrations of the ground surface in the epicentral zones of strong earthquakes. Moscow. Nauka. 1974. 97 p. (In Russ.)

11. Chernov Yu. K. Strong ground motions and quantitative assessment of the seismic hazard of territories. Tashkent. Publishing House "FAN". 1989. 295 p. (In Russ.)

12. Chernov Yu. K., Chernov A. Yu., Chitishvili M. I. Models of strong ground motions for probabilistic detailed seismic zoning of the territory of North Ossetia-Alania. Part II. Geology and Geophysics of Russian South. 2019. Vol. 9 (3). pp. 161-178. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36753. (In Russ.)

13. Shteinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. etc. Methods for seismic effects assessment (textbook). Issues of engineering seismology. Issue 34. Moscow. Nauka. 1993. pp. 5-94. (In Russ.)

14. 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.

15. Bull. of international. Seismol. Cent. - 1978. Vol. 13. No. 5, No. 6, No. 7, No. 8, No. 9.

16. Bull. of strong-motion Earthquake accelerograms University "Kirill and Mefodij". Skopje, Yugoslavia. 1984. No. 1-3.

17. 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.

18. Preliminary analysis of strong motion records from April 15, 1979. Montenegro, Yugoslavia earthquake, Skopje. 1979. No. 64. 78 p.; No. 67. 184 p.

19. 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.

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

21. 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.