

## ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34

DOI: [10.23671/VNC.2019.3.36753](https://doi.org/10.23671/VNC.2019.3.36753)

Оригинальная статья

# Модели сильных движений грунта для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания.

## Часть 2

Ю. К. Чернов <sup>1</sup>, д. ф.-м. н., проф., А. Ю. Чернов <sup>2</sup>, к. т. н.,  
М. И. Читишвили <sup>1</sup>, асп.

<sup>1</sup>Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а,  
e-mail: chenta-26@mail.ru;

<sup>2</sup>Инженерный институт «Северо-Кавказский федеральный университет»,  
Россия, 355029, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2

Статья поступила: 26 июля 2019, доработана: 16 сентября 2019, одобрена в печать: 24 сентября 2019.

**Аннотация: Актуальность работы.** Характеристики движений грунта при сильных землетрясениях из-за зависимости от большего числа трудно контролируемых природных факторов имеют случайную природу, вследствие чего их моделирование целесообразно проводить в вероятностной форме. Эпистемическая неопределенность учитывается включением в вероятностный анализ альтернативных моделей. **Целью работы** является разработка региональной модели для территории Республики Северная Осетия-Алания. **Объектом исследования** являются сейсмические воздействия. **Метод исследования** – вероятностный анализ сейсмической опасности. **Результаты работы.** В статье описываются модели спектров и акселерограмм колебаний грунта, а также «нетрадиционных» («спектральных») моделей балльности сотрясений, разработанные в рамках исследований по созданию нового варианта вероятностной карты детального сейсмического районирования (ДСР) территории РСО-Алания. Спектры Фурье и спектры реакции моделируются в виде наборов уровней спектральной плотности (ISI) и спектральных ускорений (SA) на различных частотах ( $f$ ). Эти параметры рассматриваются как случайные величины, имеющие лог. нормальное распределение вероятностей при различных сочетаниях магнитуд землетрясений ( $M$ ) и расстояний до очага ( $D$ ). Построение функций распределения выполнено в два этапа. Сначала определены «среднестатистические» оценки ISI ( $M, D, f$ ) или SA ( $M, D, f$ ), а затем путем корректировок эти оценки приближены к условиям рассматриваемой территории. Корректировки сделаны на основе анализа сейсмогеологических особенностей района, влияющих на рассматриваемые параметры сильных движений грунта (СДГ). Базовые («среднестатистические») построения проведены с использованием более 2500 спектров ускорений колебаний грунта при землетрясениях различных районов мира с  $M=2,5-7,7$ ,  $D=2-808$  км и  $I=3-10$  баллов MSK. Применен также новый метод восстановления спектров колебаний грунта при землетрясениях по их макросейсмическому полю. Для этого использованы данные макросейсмических обследований 27 сильных землетрясений региона с  $M=3,5-7,0$  и силой сотрясений в эпицентре 6-9 баллов MSK. Акселерограммы моделировались как в виде временных функций, генерируемых методом случайных колебаний, так и подбором записей реальных землетрясений с последующим их масштабированием в спектрально-временной области. В обоих случаях критериями точности построений являлись близости спектров, а также амплитуд, периодов и длительностей, измеренных на акселерограммах к соответствующим моделям спектров и описанным в первой части статьи моделям единичных параметров. Получаемые посредством разработанных моделей оценки всех параметров СДГ сопоставлялись между собой, а также с оценками по другим известным в мире моделям. Показан высокий уровень согласованности и непротиворечивости всех моделируемых параметров СДГ при землетрясениях всех рассматриваемых  $M$  и  $D$ . Выполненные для сравнения такие же тесты для некоторых других моделей СДГ, рекомендуемых для использования на территории РФ, показали преимущества наших моделей по данному показателю. **Практическая значимость работы.** Разработанные модели СДГ могут быть полезными при вероятностном и детерминистском («ситуационном») анализе сейсмической опасности территории РСО-Алания и других районов со сходными сейсмогеологическими условиями.

**Ключевые слова:** детальное сейсмическое районирование, землетрясения, сильные движения грунта, вероятные сейсмические воздействия, макросейсмическая интенсивность, сейсмические колебания.

**Для цитирования:** 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. 9 (3): 161-178. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36753.

## GEOPHYSICS

DOI: [10.23671/VNC.2019.3.36753](https://doi.org/10.23671/VNC.2019.3.36753)

Original paper

# Models of strong ground motions for probabilistic detailed seismic zoning of the territory of North Ossetia-Alania.

## Part 2

Y. K. Chernov <sup>1</sup>, A. Y. Chernov <sup>2</sup>, M. I. Chitishvili <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: chenta-26@mail.ru;

<sup>2</sup>Institute of Construction in the North-Caucasian Federal University, 2 Kulakov Str., Stavropol 355029, Russian Federation

*Received 26 July 2019; revised 16 September 2019; accepted 24 September 2019.*

**Abstract: Relevance.** Due to the large number of difficultly controlled natural factors, the characteristics of soil movements during strong earthquakes are random in nature, and therefore it is advisable to model them in a probabilistic form. Epistemic uncertainty is taken into account by the inclusion of alternative models in the probabilistic analysis. **Aim.** To develop a regional model for the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. The object of the study is seismic impact. **Methods.** Probabilistic analysis of seismic hazard. **Results.** The article describes the models of spectra and accelerograms of soil vibrations, as well as “non-traditional” (“spectral”) models of shake intensity, developed as the part of studies to create a new version of the probability map of detailed seismic zoning (DSZ) of the territory of North Ossetia-Alania. Fourier spectra and response spectra are modeled as sets of spectral density levels (ISI) and spectral accelerations (SA) at different frequencies ( $f$ ). These parameters are considered as random variables having a log-normal probability distribution for various combinations of earthquake magnitudes ( $M$ ) and focal distance ( $D$ ). The construction of distribution functions is carried out in two stages. First, “average” estimates ISI ( $M, D, f$ ) or SA ( $M, D, f$ ), and then by adjusting these estimates are close to the conditions of the considered territory. Corrections are made on the basis of the analysis of the seismic and geological features of the area, affecting the parameters under consideration for strong ground motions (SGM). Basic (“average”) calculations were carried out using more than 2500 acceleration spectra of soil vibrations during earthquakes in different parts of the world with  $M = 2.5-7.7$ ,  $D = 2-808$  km and  $I = 3-10$  MSK points. A new method has also been applied for reconstructing the spectra of soil vibrations during earthquakes according to their macroseismic field. For this purpose, data from macroseismic surveys of 27 strong earthquakes in the region with  $M = 3.5-7.0$  and shaking strength at the epicenter of 6–9 MSK points were used. Accelerograms were modeled both in the form of time functions generated by random vibrations and by selecting records of real earthquakes with their subsequent scaling in the spectral-temporal region. In both cases, the criteria for the accuracy of the constructions were the proximity of the spectra, as well as the amplitudes, periods, and durations measured on the accelerograms to the corresponding spectral models and models of unit parameters described in the first part of the article. Estimates of all SGM parameters obtained by means of the developed models were compared with each other, as well as with estimates from other models known in the world. A high level of consistency and consistency of all simulated SGM parameters during earthquakes of all the considered  $M$  and  $D$  is shown. The same tests performed for comparison for some other SGM models recommended for use on the territory of the Russian Federation showed the advantages of our models for this indicator. **Practical significance.** The developed SGM models can be useful in probabilistic and deterministic (“situational”) analysis of seismic hazard in the territory of North Ossetia-Alania and other areas with similar seismic and geological conditions.

**Keywords:** detailed seismic zoning, earthquakes, strong ground motions, probable seismic effects, macroseismic intensity, seismic vibrations.

**For citation:** 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. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. 9(3): 161-178. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36753.

## Ведение

В Геофизическом институте «Владикавказского научного центра РАН» разрабатывается новый вариант вероятностной карты ДСР территории РСО-Алания. Важной составной частью этих исследований является разработка моделей сильных движений грунта (СДГ) при потенциально опасных землетрясениях региона. Моделируются наиболее важные для инженерно-сейсмологической практики параметры сильных движений – так называемые единичные характеристики (пиковые ускорения грунта ( $PGA$ ), периоды ускорений с максимальной амплитудой ( $T_a$ ), длительности основной фазы колебаний ( $\tau$ )), спектры и акселерограммы колебаний грунта, а также макросейсмические интенсивности сотрясений. Модели единичных характеристик СДГ и макросейсмических интенсивностей сотрясений (в традиционном понимании –  $I_T$ ) описаны в первой части статьи (см. [Чернов и др., 2019]). В настоящей (второй) части данной работы приведены результаты разработки вероятностных моделей спектров и акселерограмм при потенциально опасных для изучаемого района землетрясениях. Здесь же рассмотрены и производные от моделей спектров модели так называемых (подробнее см. в [Чернов, 1989]), «спектральных» моделей балльности ( $I_C$ ),

Также как и описанные в первой части статьи модели единичных параметров данные модели строились в контексте общей расчетной схемы, согласно которой моделируемые параметры СДГ являются случайными величинами, задание которых возможно лишь с некоторой долей неопределенности. Согласно концепции современного вероятностного анализа сейсмической опасности (probabilistic seismic hazard analysis или PSHA) рассмотрены два типа таких неопределенностей. Первый обусловлен невозможностью точного учета всех природных факторов, влияющих на поле сильных движений. Второй связан с выбором того или иного массива исходных данных, того или иного способа его анализа и интерпретации получаемых результатов, выбором типа и параметров результирующих моделей и т. д. Данное обстоятельство порождает многообразие возможных решений, каждое из которых само может рассматриваться как реализация другой, более общей случайной величины. Механизм случайности этой величины формируется уже не «объективными» природными, а другими, «субъективным» факторами. В литературе эти неопределенности часто обозначаются как «алеаторные» и «эпистемические», соответственно [Афанасьева, 2008; Bommer, Scherbaum, 2008; Соколов, 2012; Beven et al., 2015]. «Эпистемические» неопределенности могут учитываться в рамках методологии «логического дерева» [Bommer et al., 2010; Cotton et al., 2006; Delavaud et al., 2012; Danciu et al., 2016, Kale, Akkar, 2017]. Настоящее исследование включает в себя элементы данной методологии в виде анализа различных вариантов, первичных данных, способов их обработки, а также вариантов уже известных моделей того же типа. С этих позиций предлагаемые модели в зависимости от контекста можно рассматривать и как одну из возможных альтернатив и как итоговое обобщение различных решений.

Настоящая работа в значительной мере базируется на результатах наших предыдущих исследований (см. [Чернов, 1989; Чернов Ю., Чернов А., 2008; Zaalishvili, Chernov, 2018]). В соответствии с содержащимися в них рекомендациями, также как и приведенные в первой части статьи модели  $PGA$ ,  $T_a$ ,  $\tau$  и  $I_T$ , рассматриваемые здесь модели  $|S|(M, D, f)$ ,  $SA(M, D, f)$ , и  $I_C$ , задают прогнозируемые параметры в виде случайных величин с логарифмически нормальным распределением вероятностей. Поэтому основная задача данной работы – определение характеристик этих распределений применительно к сейсмогеологическим условиям исследуемой территории РСО-Алания.

Получаемые посредством разработанных моделей оценки всех параметров СДГ (и единичных и спектрально-временных) сопоставлены между собой, а также с оценками по другим известным в мире моделям – тестирование на «внутреннюю» и «внешнюю» согласованность. Выполненные для сравнения такие же тесты для некоторых других моделей

СДГ, рекомендуемых для использования на территории РФ, показали преимущества наших моделей по данному показателю.

### Исходные данные и методика исследований

Модели спектров Фурье и спектров реакции колебаний грунта строились в виде набора значений уровня спектральной плотности или спектральных амплитуд ускорений для 18 спектральных составляющих, логарифмически равномерно распределенных в инженерном диапазоне частот 0,28-22,0 Гц. Преимущества такого способа параметризации спектров рассмотрены в [Чернов, 1989]. Функции распределения вероятностей при этом строятся для каждой спектральной составляющей отдельно. Принципы построения те же, что и для единичных параметров колебаний – делаются оценки уровней спектра в ближней зоне землетрясений разных (потенциально опасных) магнитуд и оценки их изменения с расстоянием по мере удаления от очага.

По тем же причинам, что и единичные характеристики колебаний модели спектров для изучаемой территории РСО-Алания построены в два этапа. Сначала рассмотрены базовые «среднестатистические» модели. Затем в них внесены региональные поправки. В качестве «среднестатистических» приняты модели спектров, подробно (включая математические выражения) описанные нами в [Чернов Ю., Чернов А., 2008; 2017]. Исходными данными для этих моделей являлись 2507 инструментально зарегистрированных спектров землетрясений из различных районов мира с  $M=2,5-7,7$ ,  $D=2-800$  км,  $I=3-10$  баллов *MSK*, более подробная информация о которых, дана в первой части статьи. Дополнительно использованы также схожие по формату модели  $|S| (M, D, f)$ , разработанные нами ранее для Северного Кавказа, Средней Азии, Дальнего Востока, запада США, севера Италии и других районов. На рисунке 1 приведены примеры таких первичных построений для землетрясений с  $M \approx 5,0$  (4,5-5,4) и  $M \approx 7,0$  (6,5-7,4). Здесь же приведены полученные на основе этих данных и служащие первым приближением для наших дальнейших построений «среднестатистические» функции затухания спектров для землетрясений взбросо-сдвигового типа. Данный тип зависимостей выбран как подходящий для учета в обобщенном виде механизмов очагов большинства землетрясений исследуемого района.

При разработке моделей спектров в ближней зоне землетрясений помимо «инструментальных» оценок использован также метод реконструкции спектров сильных землетрясений по их макросейсмическому полю. В основе данного метода лежат установленные нами ранее количественные соотношения между наблюдаемыми макросейсмическими эффектами и уровнями спектральной плотности Фурье ускорений колебаний грунта на определенных («ответственных») частотах, своих, для сотрясений разной силы. Данные соотношения успешно использовались во многих сейсмоактивных районах страны и за рубежом для решения «прямой» задачи – определения вероятных балльности сотрясений по известным спектрам колебаний грунта. Это так называемая «спектральная» модель балльности. В данном же случае решается «обратная» задача – по наблюдаемым макросейсмическим эффектам оценивается спектр вызвавших эти эффекты колебаний. Методика таких построений, основана на количественном сопоставлении (методом итераций) функций затухания спектров колебаний с независимыми оценками функций затухания макросейсмической интенсивности землетрясений. Достаточно подробно она описана в [Чернов Ю., Чернов А., 2008]. Здесь только отметим, что приведенные в этой публикации примеры, показывают, что «макросейсмические» оценки спектров, по точности могут быть сопоставимы с «инструментальными».

Для построения «макросейсмических» спектров использованы данные макросейсмических обследований 27 сильных землетрясений изучаемого региона с  $M=3,5-7,0$  и силой сотрясений в эпицентре  $I_0 = 6-9$  баллов *MSK*, среди которых Ахалкалакское землетрясение

31 декабря 1899 г., Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г., Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г., Рачинское землетрясение 29 апреля 1991 г., Сальское землетрясение 22 мая 2001 г., Нижнекубанское землетрясение 9 ноября 2002 г. и др.). Второй тип использованных материалов – приведенные в [Никонов, 1995] оценки балльности сотрясений в эпицентрах 189 землетрясений с магнитудами  $M=2,0-5,6$ , глубинами очагов  $H=3-40$  км и макросейсмическими балльностями  $I_0=3,0-7,5$  балла *MSK*.

Помимо описанной в первой части статьи «традиционной» модели балльности  $I_T(M, D)$  разработана вышеупомянутая «спектральная» модель балльности  $I_C(M, D)$ , основанная на описанной в [Чернов, 1989] тесной связи макросейсмических эффектов землетрясений с уровнями спектров колебаний на «ответственных» частотах, своих для каждого уровня балльности. Принятые в настоящей работе значения этих параметров приведены в таблице 1. В ней значения  $|S|_{\text{отв}}$  для  $I > VII$  баллов – это наши предыдущие оценки, для  $I \leq VII$  баллов – это уточненные по расширенной базе данных (см. первую статью) оценки настоящего исследования.

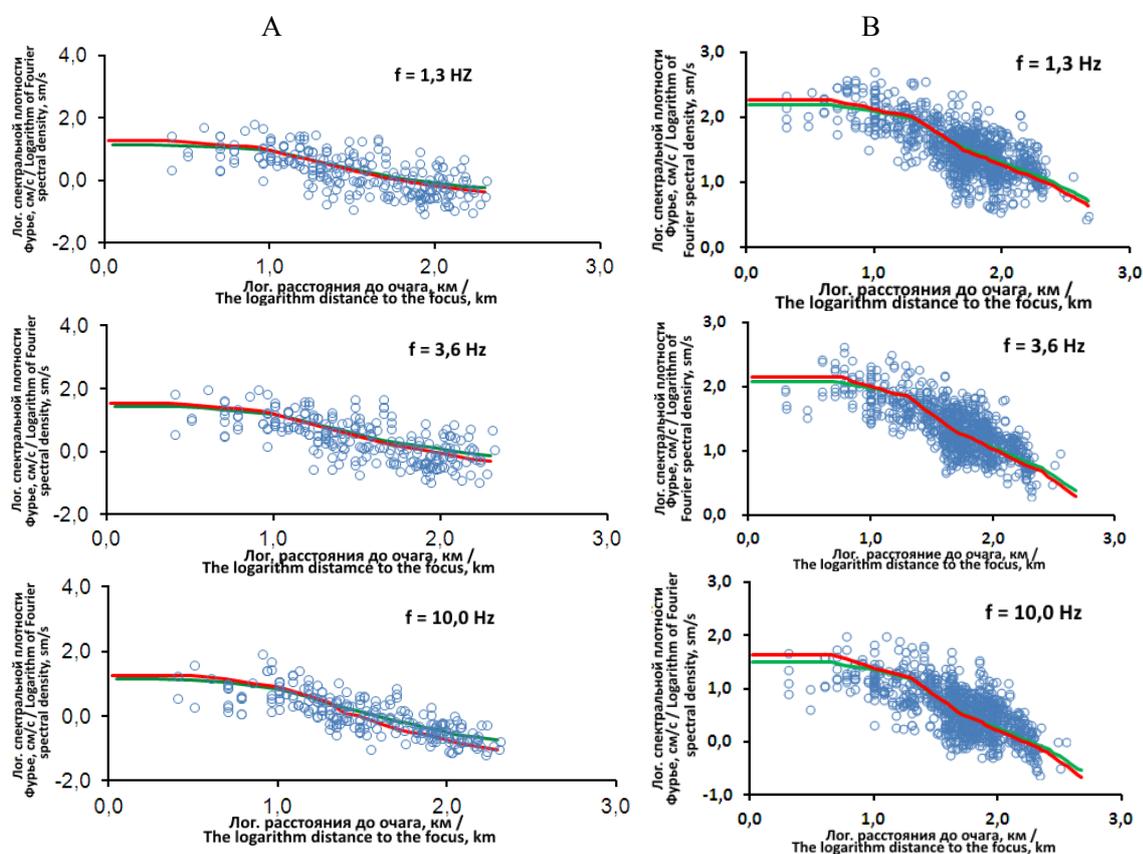


Рис. 1. Примеры первичных данных и результатов построений моделей спектров Фурье ускорений колебаний грунта при потенциально опасных на изучаемой территории РСО-Алания землетрясениях с  $M \approx 5,0$  (А) и  $M \approx 7,0$  (Б). Синие кружки – прямые измерения по базе инструментально зарегистрированных спектров землетрясений. Зеленые и красные линии – «среднестатистические» оценки спектров землетрясений взбросового типа и скорректированные за счет региональных условий, соответственно. /

Fig. 1. Examples of primary data and the results of constructing models of Fourier spectra of accelerations of soil vibrations in case of earthquakes potentially dangerous in the investigated territory of North Ossetia-Alania with  $M \approx 5.0$  (A) and  $M \approx 7.0$  (B). Blue circles – direct measurements based on the instrumentally recorded spectra of earthquakes. The green and red lines are the “average” estimates of the ramp-type earthquake spectra and adjusted due to regional conditions, respectively.

Для получения итоговых, приближенных к региональным условиям, моделей «среднестатистические» оценки скорректированы путем введения соответствующих поправок. Коррекция выполнена с учетом сопоставительных оценок, полученных ранее нами, а также другими исследователями для различных сейсмоактивных районов мира, с разными сеймотектоническими условиями (см. выше). Корректирующие (повышающие ~ на 5-25% уровни высокочастотной части спектров в ближних зонах землетрясений) коэффициенты, приняты на основании результатов многочисленных исследований, свидетельствующих о сравнительно более высоком уровне макросейсмических эффектов в эпицентральных зонах северокавказских землетрясений.

Исследуемый район преимущественно расположен в горной области, характеризующейся раздробленностью земной коры и, как следствие, повышенным (по сравнению с платформами) затуханием сейсмических сигналов с расстоянием. Поэтому в итоговых моделях скорости затухания амплитуд, спектров и балльности с расстоянием увеличены на 5-15% по сравнению с исходными «среднестатистическими» зависимостями. В графическом виде примеры откорректированных таким образом моделей также приведены на рисунке 1.

Для уменьшения эпистемической (субъективной) составляющей неопределенности помимо вышеописанных зависимостей  $|S|(M, D, f)$  в качестве альтернативных привлечены оценки, разными способами выполненные ранее для смежных районов со сходными сеймотектоническими условиями.

Значения спектральных ускорений  $SA(M, D, f)$  (спектров реакции) определялись из соответствующих значений  $|S|(M, D, f)$  по методике [Ванмарке, 1981]. Второй вариант (дополнительный) – оценки спектров реакции через рекомендованные в [Свод..., 2018] стандартные коэффициенты динамичности  $b(T)$ :

$$SA(T) = \beta(T) a_{eff} \quad (1)$$

где  $T$  – период колебаний в с.;  $a_{eff}$  – эффективное ускорение, рассчитываемое по *PGA* (см. первую часть настоящей статьи) или по коэффициентам сейсмичности, вытекающим из рекомендаций СНиП [Свод..., 2018].

Записи ускорений колебаний грунта при землетрясениях (акселерограммы) моделировались двумя способами – синтезированием при помощи метода случайных колебаний [Болотин, 1979; Салганик, 1987; Штейнберг и др., 1993] и подбором реальных записей землетрясений.

При реализации первого способа огибающая цуга колебаний задается по выражению из работ [Штейнберг и др., 1993; Свод..., 2017]:

Таблица 1. / Table 1.

**Значения «ответственных» частот ( $f_{отв}$ ) и уровней спектральной плотности на этих частотах ( $|S|_{f_{отв}}$ ) для различных макросейсмических интенсивностей ( $I$ ), принятые при построении «спектральной» модели балльности. /**

**Values of “responsible” frequencies ( $f_{res}$ ) and spectral density levels at these frequencies ( $|S|_{f_{res}}$ ) for different macroseismic intensities ( $I$ ), adopted when constructing the “spectral” intensity model.**

Параметры спектров / Spectrum Parameters	$I$ , балл <i>MSK</i> / $I$ , point <i>MSK</i>									
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$f_{отв}$ , Гц /	10,0	10,0	7,8	4,8	3,6	1,68	1,0	0,78	0,78	0,78
$ S _{f_{отв}}$ , см/с /	-0,54	-0,08	0,37	0,82	1,28	1,73	2,18	2,65	3,00	3,20

$$a = a_{\max} \frac{3t \cdot \tau}{9t^2 - 9t \cdot \tau + 4\tau^2} \quad (2)$$

где  $\tau = \tau_{0,5}$ .

Оценки значений  $\tau_{0,5}$  выполнены по моделям, описанным в первой части статьи.

Синтезированные акселерограммы рассчитываются для временного интервала, на котором ожидаются опасные ускорения. Помимо соответствия спектрам и огибающим записей ускорений, псевдоакселерограммы конструируются таким образом, чтобы геометрическое среднее максимальных амплитуд ускорений на двух горизонтальных составляющих одной записи было близко к соответствующим прогнозным значениям *PGA*. Кроме этого в разрабатываемый ансамбль акселерограмм включаются синтезированные записи с различными периодами  $T_a$  так, чтобы в совокупности они давали среднее по ансамблю значение  $T_a$ , близкое к своему прогнозному значению.

При подборе акселерограмм реальных землетрясений применяется их масштабирование по амплитудам и в спектрально-временной области, цель которого более точное совпадения спектра реакции масштабированной акселерограммы с прогнозным спектром реакции. Коэффициенты масштабирования рассчитываются по отношениям прогнозных спектров и реальных спектров на «характерных» или «важных» для рассматриваемых объектов периодах. Дополнительно к основному критерию (близости спектра масштабированной акселерограммы к прогнозному спектру) применяются также и критерии близости амплитуд и периодов пиковых ускорений, а также относительных длительностей масштабированных акселерограмм к соответствующим прогнозным значениям этих параметров.

## Результаты и обсуждение

*Модели спектров Фурье ускорений колебаний грунта.* Для определения параметров моделей (функций распределения вероятностей) уровней спектральной плотности Фурье ускорений грунта для каждой спектральной составляющей при возникновении землетрясения с магнитудой  $M$  и расстоянием до очага  $D$  сначала сделаны оценки «опорного» спектра ускорений колебаний грунта в ближней зоне землетрясений с  $\overline{M}=5,0$ . Магнитуды  $\overline{M}=5,0$  выбраны как занимающие среднее по магнитуде положение в ряду потенциально опасных для территории РСО-Алания ( $\overline{M}=3,5-7,0$ ), что дает наименьшую суммарную погрешность при последующих пересчетах (экстраполяциях), полученных для данной магнитуды оценок (см. ниже) в сторону больших и меньших  $M$ . Кроме того данная категория спектров относительно хорошо обеспечена статистическим материалом. Итоговый спектр обобщает несколько версий таких оценок. В графическом виде они показаны на рисунке 2.

Как видно из этого рисунка различные варианты оценок тесно коррелируют между собой, что говорит о возможности получения на их основе достаточно надежных итоговых оценок. Считая точность полученных в процессе настоящего исследования «инструментальных» и «макросейсмических» спектров выше, чем других альтернатив, каждому из них придан статистический вес 2, остальным – по 1. Результирующая средневзвешенная оценка, принятая для дальнейших расчетов также приведена на этом рисунке.

Спектр, полученный для ближней зоны землетрясений с  $\overline{M}=5,0$ , с использованием соотношений  $\beta_m(f)$  для землетрясений взбросо-сдвигового типа из [Чернов Ю., Чернов А., 2017] пересчитан в спектры для ближних зон землетрясений других потенциально опасных магнитуд ( $\overline{M}=3,5-7,0$ ). Итоговые оценки спектров Фурье в графическом виде приведены на рисунке 3.

На следующем этапе из ближней зоны значения  $|S|(M, f)$  при помощи откорректированных (см. выше) коэффициентов затухания  $n_{|g|S|}$  пересчитаны на разные расстояния  $D$ . Примеры, итоговых функций затухания наиболее вероятных значений  $|S|$  для различных спектральных составляющих в графическом виде показаны на рисунках 4 и 6а. Стандартные

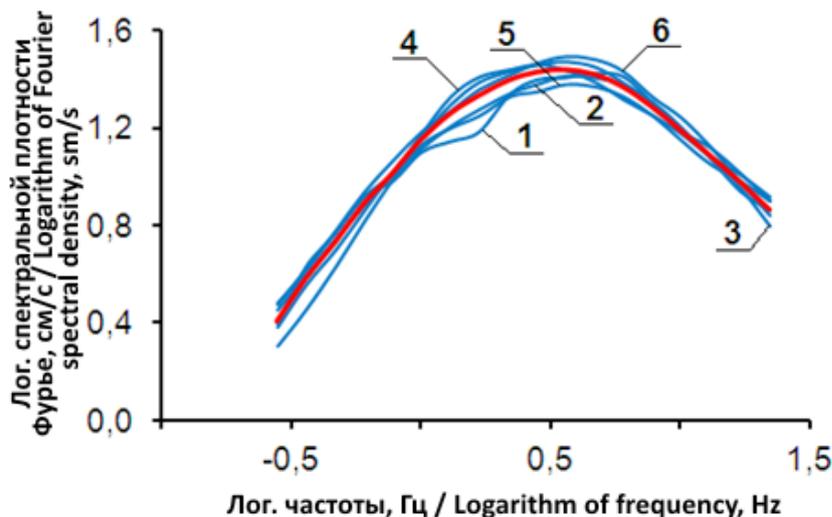


Рис. 2. Наиболее вероятные значения уровней спектральной плотности Фурье ускорений ( $|S|$ ) в ближней зоне потенциально опасных для территории РСО-Алания землетрясений с  $\overline{M} = 5,0$ . «Средние» грунтовые условия. Синие линии: 1 – уточненная оценка спектра для района Дагестанского землетрясения 1970 г. из [Чернов, 1989]; 2 – для землетрясений Центрального Предкавказья из [Чернов, 2011]; 3 и 4 – «макросейсмические» и «инструментальные спектры настоящего исследования, соответственно»; 5 – для кавказских землетрясений из [Соколов, 1998]; 6 – для землетрясений Северного Кавказа из [Чернов, 2006]. Красная линия – принятые (средневзвешенные) оценки. /

Fig. 2. The most probable values of the spectral density levels of Fourier accelerations ( $|S|$ ) in the near zone of earthquakes potentially hazardous for the territory of North Ossetia-Alania with  $\overline{M} = 5.0$ . “Average” soil conditions. Blue lines: 1 – refined spectrum estimate for the 1970 Dagestan earthquake from [Chernov, 1989]; 2 – for earthquakes of the Central Ciscaucasia from [Chernov, 2011]; 3 and 4 – “macroseismic” and “instrumental spectra of the present investigation, respectively”; 5 – for the Caucasian earthquakes from [Sokolov, 1998]; 6 – for earthquakes of the North Caucasus from [Chernov, 2006]. Red line – accepted (weighted average) estimates.

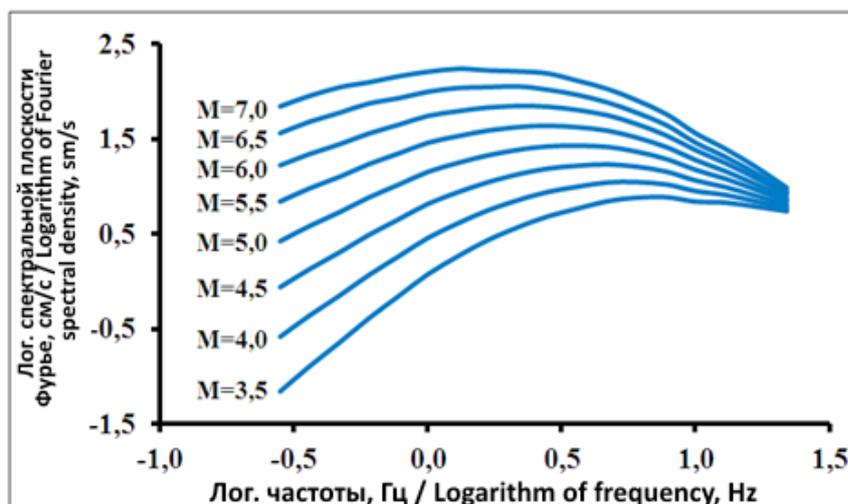


Рис. 3. Наиболее вероятные значения уровней спектральной плотности Фурье ускорений в ближней зоне потенциально опасных для территории РСО-Алания землетрясений разных магнитуд ( $M$ ). «Средние» грунтовые условия. /

Fig. 3. The most probable values of the Fourier spectral density levels of accelerations in the near zone of earthquakes of various magnitudes ( $M$ ) potentially hazardous for the territory of North Ossetia-Alania. “Average” soil conditions.

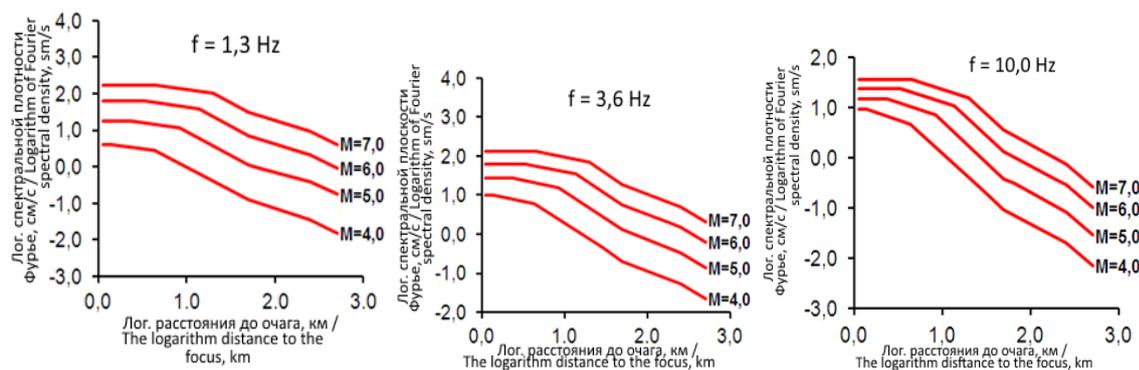


Рис. 4. Примеры наиболее вероятных значений  $|S| (M, D, f)$ , моделирующих спектры землетрясений, потенциально опасных для территории PCO-Алания. /  
 Fig. 4. Examples of the most probable values of  $|S| (M, D, f)$ , simulating the spectra of earthquakes that are potentially hazardous for the territory of North Ossetia-Alania.

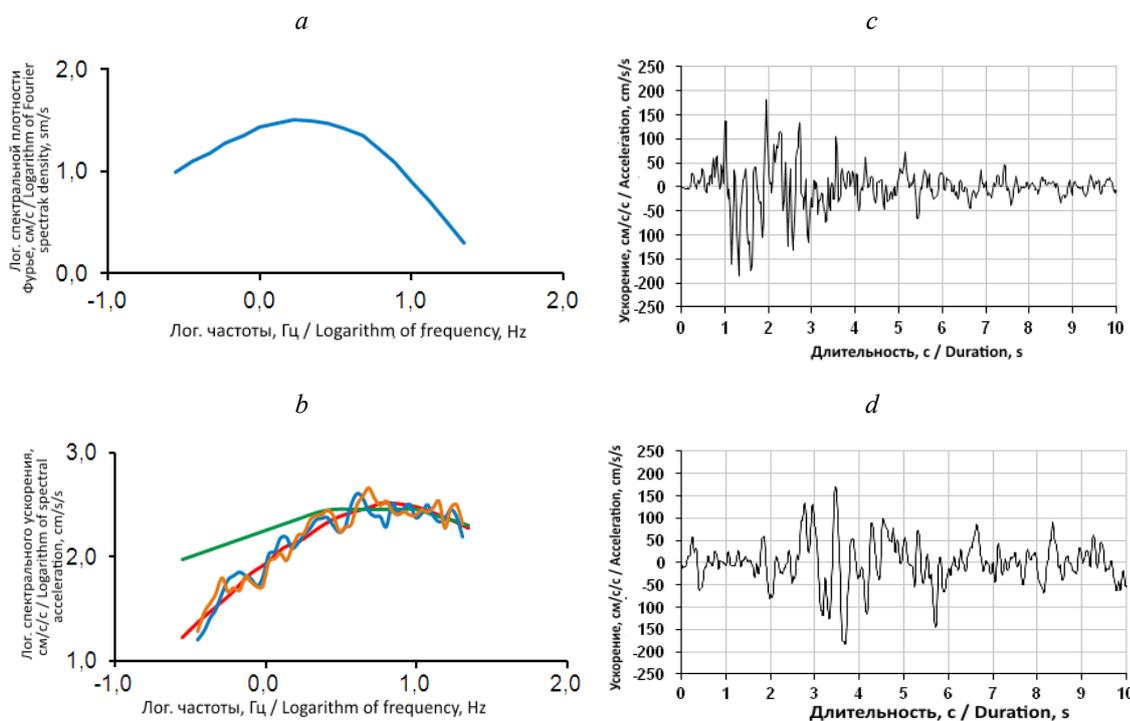


Рис. 5. Примеры моделей СДГ для потенциально опасного на территории PCO-Алания землетрясения с  $M=6,0$  и  $D=15 \text{ км}$ . «Средний» грунт. а – наиболее вероятные значения  $|S| (f)$ ; б – синяя и зеленая линии – наиболее вероятные значения  $SA (f)$  по основному и дополнительному варианту, соответственно; синяя и красная линии – спектры реакции, рассчитанные по акселерограммам, показанным на рисунке под индексами «с» (синтезированная) и «d» (масштабированная запись землетрясения Greece; Alkion Eq. 25.02.1981;  $M_L=6,1$ ;  $D=24 \text{ км}$ . Korinthos –OTE Building; VI+ (MSK), компонента E-W). /

Fig. 5. Examples of SGM models for a potentially hazardous earthquake in the North Ossetia-Alania with  $M = 6.0$  and  $D = 15 \text{ km}$ . "Medium" soil. and – the most probable values  $|S| (f)$ ; b – blue and green lines – the most probable values of  $SA (f)$  for the main and additional options, respectively; the blue and red lines are the reaction spectra calculated from the accelerograms shown in the figure under the indices "c" (synthesized) and "d" (scaled record of the Greece earthquake; Alkion Eq. 02.25.1981;  $M_L = 6.1$ ;  $D = 24 \text{ km}$  Korinthos OTE Building; VI+ (MSK), E-W component).

отклонения  $\sigma_{|g|S} \approx 0,30$  приняты одинаковыми для всех  $M$ ,  $D$  и  $f$ .

*Модели спектров реакции ускорений колебаний грунта.* По итоговым моделям  $|S|$  ( $M$ ,  $D$ ,  $f$ ), а также по описанным в первой части статьи моделям  $PGA$  ( $M$ ,  $D$ ) построены модели спектров реакции  $SA$  ( $M$ ,  $D$ ,  $f$ ), примеры двух вариантов которых (основного и дополнительного) приведены на рисунке 5б.

*Модели акселерограмм колебаний грунта.* Пример двух вариантов моделей колебательных ускорений грунта при сильном землетрясении рассматриваемого района приведен на рисунках 5с и 5d. Спектр реакции, используемый для конструирования этих акселерограмм, показан на рисунке 5б. Здесь же для сравнения приведены спектры реакции рассчитанные по этим акселерограммам.

*Модель «спектральной» балльности сотрясений грунта.* Примеры результатов расчетов по «спектральной» модели приведены на рисунке 6. Стандартные отклонения для всех расчетных значений  $I$  приняты одинаковыми и равными  $\sigma_I \approx 0,3$  балла  $MSK$ .

Также как и рассмотренные в первой части статьи модели единичных параметров СДГ, описанные выше модели спектров, акселерограмм и «спектральных» балльностей сопоставлялись между собой и с моделями вышеупомянутых единичных характеристик (тест на внутреннюю согласованность). Сопоставление показывает высокий уровень согласованности и непротиворечивости. Так, например, функции затухания  $I_C$  ( $M$ ,  $D$ ) и  $I_T$  ( $M$ ,  $D$ ) (рис. 6) очень близки. Здесь также следует иметь в виду, что функции  $I_C$  ( $M$ ,  $D$ ) являются производными от функций затухания  $|S|$  ( $M$ ,  $D$ ,  $f$ ), а функции  $I_T$  ( $M$ ,  $D$ ), в свою очередь, тесно коррелируют с описанными в первой части статьи параметрами  $PGA$ ,  $T_a$  и  $\tau$ . В этом контексте важно отметить еще и то, что разработанные модели хорошо вписываются в данные натурных обследований сильных землетрясений региона (примеры на рисунке 6). На этом рисунке данные обследований по Спитакскому землетрясению 7 декабря 1988 г. взяты из [Геодакян и др., 1991], данные по Ахалкалакскому землетрясению 31 декабря 1899 г. из [Tatevossian et al., 1997]. Данные по северокавказским землетрясениям с  $M \approx 4,5$  (4,1-4,9) – объединение данных по афтершокам Дагестанского землетрясения 1970 г. из [Рустанович, 1974; Дагестанское..., 1981], данных из каталога [Никонов, 1995] и материалов ИФЗ РАН по ДСР Ставропольского края. Осреднение везде выполнено нами.

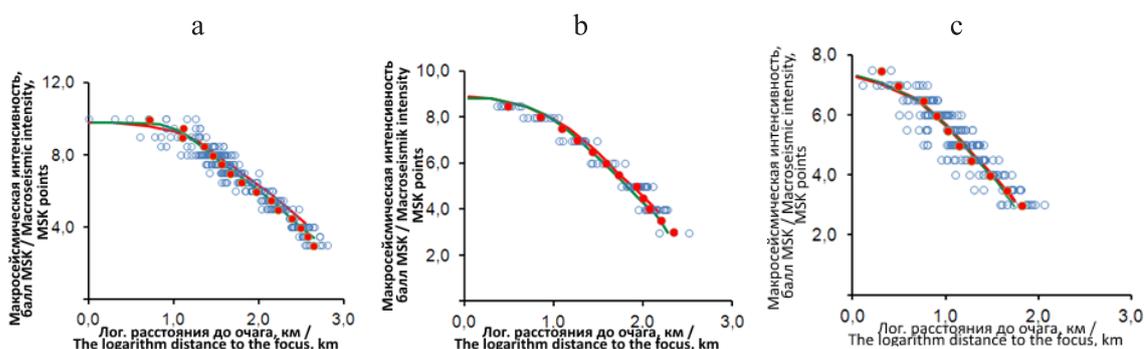


Рис. 6. Сопоставление наиболее вероятных балльностей сотрясений по нашим моделям землетрясений с  $M=7,0$  (а),  $M=6,0$  (б) и  $M=4,5$  (в) с данными макросейсмических обследований для Спитакского землетрясения 1988 г., Ахалкалакского землетрясения 1899 г. и землетрясений рассматриваемого региона с  $M \approx 4,5$ , соответственно.  $I_T$  (красная линия) и  $I_C$  (зеленая линия). Пустые синие и залитые красные кружки результаты натурных обследований и их осреднение, соответственно. /

Fig. 6. Comparison of the most probable tremor intensities from our earthquake models with  $M = 7.0$  (a),  $M = 6.0$  (b) and  $M = 4.5$  (c) with macroseismic surveys for the 1988 Spitak earthquake, 1899 Akhalkalaki earthquake and earthquakes of the considered region with  $M \approx 4.5$ , respectively.  $I_T$  (red line) and  $I_C$  (green line). Empty blue and filled red circles are the results of field surveys and their averaging, respectively.

Спектры модельных акселерограмм близки к соответствующему прогнозному спектру реакции (рис. 5b). Пиковые амплитуды, периоды и длительности, измеренные на этих акселерограммах также близки к их прогнозным значениям (см. первую часть статьи). Таким образом, модели акселерограмм также представляются достаточно реалистичными и обоснованными.

В целом тесты на «внутреннюю» согласованность показывают, что разработанный комплекс моделей СДГ (как единичных, так и спектрально-временных характеристик) хорошо сбалансирован – все моделируемые параметры увязаны между собой и «подтверждают» друг друга во всем рассматриваемом диапазоне магнитуд и расстояний.

Сравнение (в рамках проверки на «внешнюю» согласованность) наших моделей спектров со спектрами из других регионов показывает, что в ряде случаев, они могут быть на 15-30% выше спектров аналогичных по магнитуде землетрясений запада США или района Газли и близки к спектрам землетрясений севера Италии (см., например, [Sadigh et al., 1986; Чернов, 1989; Voore et al., 1994; Campbell, Bozorgnia, 1994, 2008]. «Среднестатистические» спектры также примерно в 1,1 раза ниже спектров, принятых в настоящем исследовании для территории РСО-Алания.

Таким образом, для наиболее опасных на изучаемых территориях землетрясений, разработанный комплекс моделей СДГ является достаточно реалистичным и дающим несколько (~ на 5-15%) завышенные оценки по сравнению со многими используемыми в мировой практике подобными эмпирическими зависимостями. Такой консерватизм оценок на этом этапе представляется оправданным, так как он, с одной стороны, призван отражать особенности сейсмогеологической ситуации исследуемого района, а с другой – уменьшить риск недооценки уровня сейсмической опасности, которая может возникнуть из-за отмеченной ранее ограниченности использованных здесь исходных данных.

В то же время, сравнивая наши модели спектров реакции с оценками, вытекающими из действующих нормативов (рис. 5b) можно видеть, что в низкочастотной области, наоборот, наши оценки существенно ниже нормативных. В этой связи следует отметить, что такие расхождения, возможно, имеют системный характер, так как наблюдались нами и ранее во многих других районах, где проводились подобные исследования.

Продолжая тему согласованности и непротиворечивости результатов модельных построений, как инструмента и важного критерия оценки их обоснованности и надежности, отметим, что, по нашему мнению, выполненный в настоящем исследовании объем таких перекрестных проверок и, главное, их результаты являются одной из отличительных черт настоящей работы. В отечественной инженерно-сейсмологической практике такие проверочные сопоставления пока не имеют достаточного распространения. Поэтому, в целях сравнительного анализа мы сами выполнили подобные сопоставления для двух, как нам кажется, наиболее важных для нашей страны групп моделей СДГ, имеющих схожее с нашими моделями предназначение и содержание. Это версии моделей, разработанные для ОСР территории РФ [Комплект..., 1999; Свод..., 2018] и для производства ДСР [Свод..., 2017]. В материалах по ОСР в явном виде приводятся только функции затухания  $I(M, D)$  и  $PGA(M, D)$ . При разработке  $I(M, D)$  наряду с другими процедурами использован функционал, связывающий балльность, пиковое ускорение и относительную длительность ускорений колебаний грунта  $I^{**}(PGA, \tau_{0,5})$ , который подобен функционалу из [Свод..., 2017]. Исходя из этого, в качестве теста на «внутреннюю» согласованность (см. пример на рис. 7а) сопоставлены значения, вытекающие из вышеозначенной зависимости  $I(M, D)$  и функционала  $I^{**}(PGA, \tau_{0,5})$ , в котором  $PGA(M, D)$  – рекомендации ОСР, а  $\tau_{0,5}(M, D)$  взяты из [Свод..., 2017]. Для оценки «внешней» согласованности на этом же рисунке приведена рекомендованная в шкале *MMSK-84* зависимость  $I(M, r)$ , в которой  $r$  преобразовано в  $D$  (см. первую часть статьи).

На рисунке 7b приведен пример подобных сопоставлений оценок, вытекающих из мо-

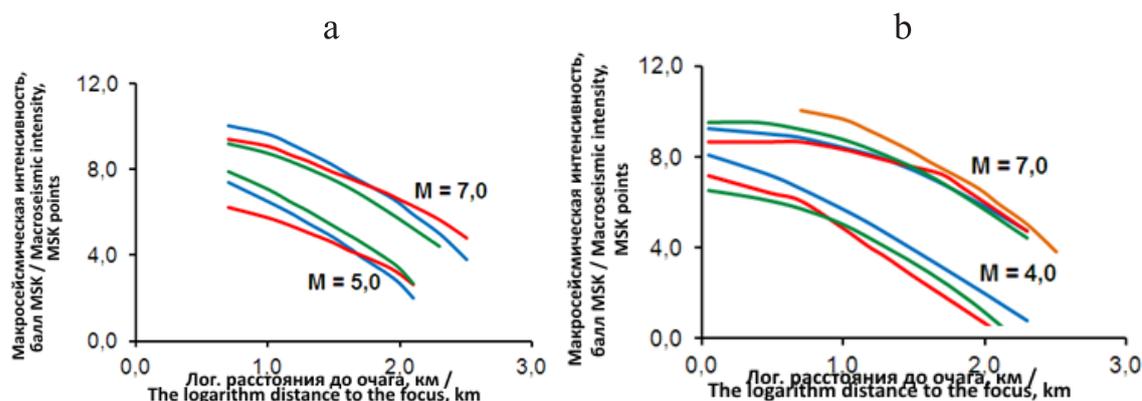


Рис. 7. Наиболее вероятные прогнозные значения макросейсмических интенсивностей сотрясений при землетрясениях разных магнитуд. а – по моделям ОСР, где синие, зеленые и красные линии – оценки по зависимостям  $I(M, D)$ , по функционалам  $I^{**}(PGA, \tau_{0.5})$  и по шкале MMSK-84, соответственно. б – по моделям, рекомендуемым для ДСР, где синие, и красные, зеленые и оранжевая линии – оценки по шкале MMSK-84, по функционалам  $I^{**}(PGA, \tau_{0.5})$ , по нашим «среднестатистическим» зависимостям  $I(M, D)$  и по зависимости  $I(M, D)$  для ОСР. / Fig. 7. The most probable prognosis values of macroseismic intensities of tremors during earthquakes of different magnitudes. a – according to the GSZ models, where the blue, green, and red lines are the estimates for the dependences  $I(M, D)$ , for the functionals  $I^{**}(PGA, \tau_{0.5})$ , and for the MMSK-84 scale, respectively. b – according to the models recommended for DSZ, where the blue, and red, green and orange lines are grades on the MMSK-84 scale, according to the functionals  $I^{**}(PGA, \tau_{0.5})$ , according to our “average” dependencies  $I(M, D)$  and according to the dependence  $I(M, D)$  for GSZ.

делей СДГ, рекомендованных для ДСР. В этом случае, исходя из контекста публикации [Свод..., 2017] в качестве рекомендованных функций затухания балльности приняты оценки по скорректированной зависимости  $I(M, r)$  из шкалы MMSK-84. Для «внешних» сравнений использованы наши «среднестатистические» зависимости, а также зависимости  $I(M, D)$ , принятые для ОСР.

Приведенные иллюстрации и весь выполненный сравнительный анализ в целом показывают, что, предлагаемый в настоящем исследовании комплекс моделей СДГ применительно именно к территории РСО-Алания среди рассмотренных выше альтернатив является конкурентоспособным, а с учетом «критерия согласованности» выглядит даже предпочтительнее.

Исходя из этого и имея в виду современную практику PSHA, в общем случае, предполагающего использование нескольких альтернативных версий, предлагаемый комплекс моделей СДГ можно рекомендовать в качестве одной из возможных альтернатив.

Говоря о полезности многовариантных оценок, все же нужно иметь в виду, что при разработке отечественных нормативных документов (Карт ОСР-97 и ОСР-2015) использована только одна (не эмпирическая и не теоретическая, а по терминологии авторов «описательная», т. е., в нашем понимании, «умозрительная») версия модели СДГ. В рекомендациях для ДСР [Свод..., 2017] также закреплена только одна конкретная версия моделей СДГ. Кроме того, согласно данному документу, сами оценки сейсмической опасности в рамках ДСР, могут производиться как в вероятностной, так и в детерминистской форме. Правда при этом вопрос о том, каким образом эти две оценки, имеющие разный физический смысл соотносятся друг с другом, остается открытым. Тем не менее, если встать на позиции этих документов, то комплекс наших моделей в принципе может рассматриваться и как безальтернативный вариант, который, при отсутствии более сильных конкурентов, также может быть использован в целях ДСР на территории РСО-Алания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как отмечено выше, из-за большой эпистемической неопределенности, для более надежных оценок сейсмической опасности следует использовать (см., например, [Douglas, 2010]) нескольких альтернативных моделей СДГ, процедуры подбора которых, обсуждались многими исследователями (см. выше). В данной работе мы следуем рекомендациям сформулированным [Danciu et al., 2016], согласно которым в рабочий набор моделей СДГ необходимо включать хотя бы одну модель, разработанную для конкретной территории (региона) (группа 1). В настоящем исследовании предлагается вариант таких региональных моделей различных характеристик СДГ. В этих моделях эпистемическая неопределенность учитывалась путем анализа разных наборов исходных данных и разных методик создания моделей СДГ. В исследуемом регионе, так же, как и в большинстве сейсмоактивных районов мира, ограниченный объем записей местных сильных землетрясений пока не позволяет применять методы прямого статистического анализа. Поэтому использовалась техника адаптации моделей, предложенных для других регионов, и «среднемировых» моделей. Такая адаптация широко используется в мировой практике (см. например [Atkinson 2010]), а так же обзор в работе [Bora et al., 2018]).

Характеризуя разработанный комплекс моделей СДГ в целом можно резюмировать следующее:

1. Предлагаемые модели дают возможность на количественном уровне производить оценки всех необходимых для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания характеристик макросейсмических эффектов и колебаний грунта при потенциально опасных для данной территории землетрясениях.

2. Разработанные модели позволяют учитывать региональные и локальные особенности возможных на данной территории землетрясений, такие как интенсивность и спектральный состав сейсмических возмущений в ближней зоне землетрясений разных магнитуд, изменение характеристик сотрясений с расстоянием, геометрические размеры и пространственную ориентацию очагов, механизм подвижки и другие факторы, что повышает точность и детальность прогнозных оценок.

3. Представленные модели достаточно полно отражают имеющиеся на данный момент по исследуемому району сейсмогеологические данные. В то же время они относительно просто могут корректироваться с учетом поступающей новой информации. Это делает их удобными также и в технологическом отношении.

4. Проведенные перекрестные сопоставления прогнозируемых посредством разработанных моделей параметров сильных движений между собой и с оценками для других регионов показывают высокий уровень их согласованности и непротиворечивости, что подтверждает их реалистичность и надежность.

В данной статье не рассматриваются вопросы подбора возможного *полного* набора моделей для вероятностной оценки сейсмической опасности территории РСО Алания. В качестве предварительного варианта для данных сеймотектонических условий в качестве альтернативных можно предложить модель [Akkar et al., 2014] (группа 2 по классификации [Danciu et al., 2016]); модели [Boore, Atkinson, 2008, Campbell, Bozorgnia, 2008] как представители NGA разработок (группа 3 по [Danciu et al., 2016]); и модель [Zhao et al., 2006] (группа 4), которая характеризуется репрезентативным распределением данных по магнитудам и удаленностям землетрясений (см. также [Bommer et al., 2010]).

Изложенное позволяет сделать вывод, что разработанные модели могут использоваться в виде одной из альтернатив при вероятностном анализе сейсмической опасности (PSHA). Наряду с другими разработками в подходящих сеймотектонических условиях их можно также применять и при производстве «детерминистских» (например, «сценарийных») оценок возможных сейсмических воздействий.

В заключение следует отметить, что разработанные модели СДГ являются одним из этапов или вариантов в ряду возможных решений, которые в дальнейшем по мере поступления новых данных должны совершенствоваться, детализироваться и уточняться.

## Литература

1. Афанасьева В. В. Онтология научной неопределенности. – Саратов: Наука, 2008. – 108 с.
2. Болотин В. В. Случайные колебания упругих систем. – М.: Наука, 1979. – С. 29-31.
3. Ванмарке Э. Х. Реакция сооружений на землетрясения. // В кн.: Сейсмический риск и инженерные решения. – М.: Недра, 1981. – С. 256-299.
3. Геодакян Э. Г., Голинский Г. А., Папалишвили В. Г., Хромецкая Е. А., Шнбалин Н. В. Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г., карты изосейст. // Землетрясения в СССР в 1988 году. – М. – 1991. – С. 74-84.
4. Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Разрушительные последствия. Инженерная сейсмология. Вопросы сейсмостойкого строительства. – М.: Наука, 1981. – 265 с.
5. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. // Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. Министерство науки и технологий, Российская Академия наук, Объединенный Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – М. – 1999-57 с.
6. Никонов А. А. Каталог ощутимых землетрясений Ставропольского края. // Объединенный институт физики Земли РАН. – М. – 1995. – 16 с.
7. Рустанович Д. Н. Колебания поверхности земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений. – М.: Наука, 1974. – 97 с.
8. Салганик М. П. О моделировании сейсмических воздействий на строительные сооружения. // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 28. – М.: Наука, 1987. – С. 157-173.
9. Свод правил. СП XXX1325800.2017. Детальное сейсмическое районирование и сеймомикрорайонирование для территориального планирования (Первая редакция). Издание официальное. – М. – 2017. – 32 с. // Интернет доступ: [http://nopriz.ru/upload/iblock/9b4/sp\\_seism\\_raion.pdf](http://nopriz.ru/upload/iblock/9b4/sp_seism_raion.pdf)
10. Свод правил СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. СНиП II 7-81\* М. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – М. – 2018. – 126 с.
11. Соколов В. Ю. Спектры ускорений колебаний грунта при землетрясениях на Кавказе. // Физика Земли. – 1998. – № 8. – С. 56-69.
12. Соколов В. Ю. О моделировании пространственного распределения сильных движений грунта при оценках сейсмической опасности и риска. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2012. – Т. 39. № 2. – С. 5-22.
13. Чернов Ю. К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. – Ташкент: Изд-во «ФАН», 1989. – 295 с.
14. Чернов Ю. К. Опыт уточнения сейсмической опасности отдельных территорий в Ставропольском крае с учетом новых требований СНиП и мировой практики. // Инженерная геология. Вып. 1. – М. – 2006. – С. 23-35.
15. Чернов Ю. К., Чернов А. Ю. Оценка спектров колебаний грунта при землетрясениях по их макросейсмическому полю для прогнозирования расчетных сейсмических воздействий. // Инженерная геология. М. ОАО ПНИИИС. – 2008. – № 17. – С. 21-37.
16. Чернов А. Ю. Северокавказская региональная система спектров сильных движений грунта для антисейсмического проектирования и строительства. // VIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «География, геоэкология, геология: опыт научных исследований в контексте международного сотрудничества и интеграции». Секция «Актуальные вопросы фундаментальных и прикладных геологических исследований». Украина, Днепропетровск. – 2011. – С. 60-61.
17. Чернов Ю. К., Чернов А. Ю. Вероятностные модели сейсмических воздействий для прогнозирования сейсмической опасности в инженерных целях. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 2. – С. 116-128.
- 8 Чернов Ю. К., Чернов А. Ю., Читишвили М. И. Модели сильных движений грунта для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. Часть I. // Геология и

геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. №2. – С. 95-108.

19. 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.

20. Akkar S, Sandikkaya MA, Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. // Bull. Earthq. Eng. – 2014. – V. 12 (1). – Pp. 359-387.

21. Atkinson G.M. Ground motion prediction equations for Hawaii from a referenced empirical approach. // Bulletin of Seismological Society of America. – 2010. – V. 100. – Pp. 751-761.

22. Beven K.J., Aspinall W.P., Bates P.D., Borgomeo E., Goda K., Hall J.W., Page T., Phillips J.S., Rougier J.T., Simpson M., Stephenson D.B., Smith P.J., Wagener T., Watson M. Epistemic uncertainties and natural hazard risk assessment – Part 1: A review of the issues. // Nat. Hazards Earth. Syst. Sci. Discuss. – 2015. No. 3. – Pp. 7333-7377.

23. Bommer J.J., Douglas J., Scherbaum F., Cotton F., Bungum H., Fäh D. On the selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis. // Seismological Research Letters. – 2010. – V. 81. – Pp. 783-793.

24. Bommer J.J., Scherbaum F. The use and misuse of logic trees in probabilistic seismic hazard analysis. // Earthq. Spectra. – 2008. – V. 24 (4). – Pp. 997-1009.

25. 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. – V. 24 (1). – Pp. 99-138.

26. 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.

27. Bora S.S., Cotton F., Scherbaum F. NGA-West<sup>2</sup> Empirical Fourier and Duration Models to Generate Adjustable Response Spectra. // Earthquake Spectra. In-Press. – 2018.

28. 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. – V. 24 (1). – Pp. 139-171.

29. 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.

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. – V. 10. – Pp. 137-156.

31. Danciu L., Kale O., Akkar S. The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties. // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2016. DOI: 10.1007/s10518-016-9989-1

32. Delavaud E., Cotton F., Scherbaum F. et al. Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe. // J. Seismol. – 2012. – No. 16. – Pp. 451-473. DOI 10.1007/s10950-012-9281-z

33. Douglas J. Consistency of ground-motion prediction from the past four decades. // Bull. Earthq. Engineering. – 2010. – V. 8 (6). – Pp. 1515-1526. DOI: 10.1007/a10518-010-9195-5.

34. Kale Ö., Akkar S. A ground-motion logic-tree scheme for regional seismic hazard studies. // Earthquake Spectra. DOI: 33 (3):837-856. – 2017. – Vol. 33. No. 3. – Pp. 837-856.

35. Sadigh, K., J. Egan, and R. Youngs. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. // Earthquake Notes. – 1986. – Pp. 57-132.

36. Tatevossian R. E., Albin P., Camassi R., Mokrusyina N. G., Shebalin N. V., Petrossian A. E. Analyzing and improving supporting dataset of the Akhalkalak, Dtkemdr 31, 1899, earthquake. // Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus. (D. Giadini, S. Balassanian), Kluwer As. Publ. – 1997. – Pp. 383-400.

37. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. Methodology of Detailed Assessment of the Seismic Hazard of The Republic of North Ossetia-Alania. // The Open Construction and Building Technology Journal. DOI: 10.2174/1874836801812010309. – 2018. – No. 12. – Pp. 309-318.

38. Zhao J.X., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Oouchi T., Takahashi T., Ogawa H., Irikura K.,

Thio H. K., Somerville P. G., Fukushima Y. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classifications based on predominant period. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. DOI: 10.1785/0120050122. – 2006. – V. 96. – Pp. 898-913.

## References

1. Afanas'eva V.V. Ontology of scientific uncertainty. Saratov, Nauka, 2008. 108 p. (In Russ.)
2. Bolotin V.V. Random vibrations of elastic systems. M. Nauka, 1979. pp. 29–31. (In Russ.)
3. Vanmarke E.Kh. The response of structures to earthquakes. In the book: *Seismic risk and engineering solutions*. Moscow. Nedra, 1981. pp. 256–299. (In Russ.)
3. Geodakyan E.G., Golinskii G.A., Papalishvili V.G., Khrometskaya E.A., Shnbalin N.V. Spitak earthquake of December 7, 1988, isoseist maps. *Earthquakes in the USSR in 1988*. Moscow. 1991. pp. 74–84. (In Russ.)
4. Dagestan earthquake on May 14, 1970. Destructive consequences. *Engineering seismology. Issues Earthquake-engineering*. Moscow. Nauka, 1981. 265 p. (In Russ.)
5. A set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation OSR-97. Explanatory note and a list of cities and towns located in earthquake-prone areas. Ministry of Science and Technology, Russian Academy of Sciences, The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Moscow. 1999. 57 p. (In Russ.)
6. Nikonov A.A. Catalog of tangible earthquakes in the Stavropol Territory. The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Moscow. 1995. 16 p. (In Russ.)
7. Rustanovich D.N. Vibrations of the earth's surface in the epicenter zones of strong earthquakes. M. Nauka, 1974. 97 p. (In Russ.)
8. Salganik M.P. Modeling of seismic impacts on building structures. *Issues of engineering seismology*. Vol. 28. Moscow. Nauka, 1987. pp. 157–173. (In Russ.)
9. Set of rules. SP XXX1325800.2017. Detailed seismic zoning and seismic microzoning for spatial planning (First edition). The official publication. Moscow. 2017. 32 p. Internet access: [http://nopriz.ru/upload/iblock/9b4/sp\\_seism\\_raion.pdf](http://nopriz.ru/upload/iblock/9b4/sp_seism_raion.pdf) (In Russ.)
10. Set of rules. SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas. SNiP II 7-81 \* Moscow. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. Moscow. 2018. 126 p. (In Russ.)
11. Sokolov V.Yu. Acceleration spectra of soil vibrations during earthquakes in the Caucasus. *Physics of the Earth*. 1998. No. 8. pp. 56–69. (In Russ.)
12. Sokolov V.Yu. Modeling the spatial distribution of strong ground motions in assessing seismic hazard and risk. *Issues of engineering seismology*. 2012. Vol. 39. No. 2. pp. 5–22. (In Russ.)
13. Chernov Yu.K. Strong ground motions and quantitative seismic hazard assessment of the territories. Tashkent: Publishing house “FAN”, 1989. 295 p. (In Russ.)
14. Chernov Yu.K. Experience in refinement of seismic hazard for certain areas in the Stavropol Territory, taking into account the new requirements of SNiP and world practice. *Engineering geology*. Vol. 1. M. 2006. pp. 23–35. (In Russ.)
15. Chernov Yu.K., Chernov A.Yu. Evaluation of the spectra of soil vibrations during earthquakes by their macroseismic field for prognosis of the estimated seismic effects. *Engineering geology*. M. OJSC PNIIS. 2008. No. 17. pp. 21–37. (In Russ.)
16. Chernov A.Yu. North Caucasian regional system of strong ground motions spectra for earthquake-resistant design and construction. VIII International scientific conference of students, graduate students and young scientists “Geography, geocology, geology: the experience of scientific research in the context of international cooperation and integration”. Section “Actual issues of fundamental and applied geological research”. Ukraine, Dnepropetrovsk. 2011. pp. 60-61. (In Russ.)
17. Chernov Yu.K., Chernov A.Yu. Probabilistic models of seismic effects for seismic hazard prognosis for engineering purposes. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2017. No. 2. pp. 116–128. (In Russ.)
18. 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 I. *Geology and geophysics of the*

South of Russia. 2019. Vol. 9. No. 2. pp. 95–108. (In Russ.)

19. Shteinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. et al. Methods for assessing seismic impacts (manual). Issues of engineering seismology, Vol. 34. M. Nauka, 1993. pp. 5–94. (In Russ.)

20. Akkar S, Sandikkaya MA, Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. Bull. Earthq. Eng. 2014. Vol. 12(1). pp. 359–387.

21. Atkinson G.M. Ground motion prediction equations for Hawaii from a referenced empirical approach. Bulletin of Seismological Society of America. 2010. Vol. 100. pp. 751–761.

22. Beven K.J., Aspinall W.P., Bates P.D., Borgomeo E., Goda K., Hall J.W., Page T., Phillips J.S., Rougier J.T., Simpson M., Stephenson D.B., Smith P.J., Wagener T., Watson M. Epistemic uncertainties and natural hazard risk assessment. Part 1: A review of the issues. Nat. Hazards Earth. Syst. Sci. Discuss. 2015. No. 3. pp. 7333–7377.

23. Bommer J.J., Douglas J., Scherbaum F., Cotton F., Bungum H., Fäh D. On the selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis. Seismological Research Letters. 2010. Vol. 81. pp. 783–793.

24. Bommer J.J., Scherbaum F. The use and misuse of logic trees in probabilistic seismic hazard analysis. Earthq. Spectra. 2008. Vol. 24(4). pp. 997–1009.

25. 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.

26. 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.

27. Bora S.S., Cotton F., Scherbaum F. NGA-West2 Empirical Fourier and Duration Models to Generate Adjustable Response Spectra. Earthquake Spectra. In-Press. 2018.

28. 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.

29. 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.

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. Danciu L., Kale O., Akkar S. The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties. Bulletin of Earthquake Engineering. 2016. DOI: 10.1007/s10518-016-9989-1

32. Delavaud E., Cotton F., Scherbaum F. et al. Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe. J. Seismol. 2012. No. 16. pp. 451–473. DOI 10.1007/s10950-012-9281-z

33. Douglas J. Consistency of ground-motion prediction from the past four decades. Bull. Earthq. Engineering. DOI: 10.1007/a10518-010-9195-5.2010. Vol. 8(6). pp. 1515–1526.

34. Kale Ö., Akkar S. A ground-motion logic-tree scheme for regional seismic hazard studies. Earthquake Spectra. DOI: 10.1007/s10950-017-9281-z. Vol. 33. No. 3. pp. 837–856.

35. Sadigh, K., J. Egan, and R. Youngs. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. Earthquake Notes. 1986. pp. 57–132.

36. Tatevossian R.E., Albin P., Camassi R., Mokrusyina N.G., Shebalin N.V., Petrossian A.E. Analyzing and improving supporting dataset of the Akhalkalak, Dtkemdr 31, 1899, earthquake. Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus. (D. Giadini, S. Balassanian), Kluwer As. Publ. 1997. pp. 383–400.

37. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. Methodology of Detailed Assessment of the Seismic Hazard of The Republic of North Ossetia-Alania. The Open Construction and Building Technology Journal. DOI: 10.2174/1874836801812010309. 2018. No. 12. pp. 309–318.

38. Zhao J.X., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Oouchi T., Takahashi T., Ogawa H., Irikura K., Thio H.K., Somerville P.G., Fukushima Y. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classifications based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*. DOI: 10.1785/0120050122. 2006. Vol. 96. pp. 898–913.