
ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34

DOI:10.23671/VNC.2019.2.31980

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

Часть I

**Ю. К. Чернов¹, д. ф.-м. н., проф., А. Ю. Чернов², к. т. н.,
М. И. Читишвили¹, асп.**

¹Геофизический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: chenta-26@mail.ru;

²Инженерный институт ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» Россия, 355029, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2.

Аннотация: В РСО-Алания проводятся исследования по созданию новой вероятностной карты ДСР данной территории. Составная часть этих исследований – разработка эффективных моделей сильных движений грунта (СДГ) при потенциально опасных землетрясениях региона. В первой части посвященной данным исследованиям статьи рассмотрены модели единичных характеристик СДГ – пиковых ускорений грунта (PGA), периодов ускорений с максимальной амплитудой (T_a), длительностей основной фазы колебаний (τ), а также макросейсмической интенсивности (балльности) сотрясений (I). Модели представлены в виде статистически заданных функций распределения вероятностей случайных величин (значений параметров колебаний и силы сотрясений грунта) при различных магнитудах землетрясений (M) и расстояниях до очага (D). Модели строились в два этапа. Сначала определены «среднестатистические» функции изменения с расстоянием PGA (M, D), T_a (M, D), τ (M, D) и I (M, D). Затем, путем введения в эти зависимости корректирующих поправок они приближены к условиям исследуемой территории РСО-Алания. «Среднестатистические» зависимости строились на основе анализа большого объема исходных данных по инструментальной регистрации и макросейсмическим описаниям сильных землетрясений. Использованы данные двух видов. Первый – подборки из 35-ти и 24-х известных и апробированных эмпирических зависимостей PGA (M, D) и I (M, D), построенных разными авторами для различных сейсмоактивных районов мира. Второй – непосредственные измерения по более, чем 2500 акселерограммам ощущимых и сильных землетрясений мира, имеющих одновременную оценку силы сотрясений в точке регистрации. Использованы также макросейсмические описания нескольких десятков сильных землетрясений на территории РФ и других стран. Корректирующие поправки определены на основе анализа общих сейсмотектонических условий территории, особенностей среды распространения сейсмических возмущений, механизмов очагов и других характеристик исследуемого района, влияющих на моделируемые параметры СДГ. Для проверки надежности и реалистичности разработанных моделей, проведено перекрестное (между собой) сопоставление получаемые на их основе оценок PGA , T_a , τ и I . Проведено также сопоставление полученных моделей с разработками других авторов, для других районов. Во всех случаях наблюдается высокий уровень согласованности и непротиворечивости, полученных в настоящем исследовании результатов. В целом разработанные модели отвечают основным требованиям международной и отечественной инженерно-сейсмологической практики, способствуют повышению точности и надежности вероятностных оценок сейсмической опасности на региональном уровне и могут быть использованы в целях ДСР территории РСО-Алания при производстве как вероятностных, так и детерминистских («сценарийных») оценок.

Ключевые слова: 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 I. Геология и Геофизика Юга России. 2019; 9 (2): 95-108. DOI:10.23671/VNC.2019.2.31980.

Введение

Характеристики движений грунта при сильных землетрясениях (сильных движений грунта или СДГ) из-за их зависимости от большого числа трудно контролируемых природных факторов имеют случайную природу, вследствие чего их моделирование целесообразно проводить в вероятностной форме. Имеющие при этом место неопределенности можно разделить на эпистемические и алеаторные [Афанасьева, 2008; Соколов, 2012]. Эпистемическая неопределенность связана с особенностями самих моделей. Мы условно называем ее «субъективной», в отличие от также условно «объективной» алеаторной неопределенности. Эпистемическая неопределенность учитывается включением в вероятностный анализ альтернативных моделей (см., например, [Bommer, Scherbaum, 2008; Kale, Akkar, 2017]). Алеаторная – использованием функций распределения вероятностей случайных величин.

В последние десятилетия число публикаций, посвященных моделированию СДГ в контексте прогноза сейсмической опасности постоянно растет (см., например, обзор [Douglas 2016]). Здесь можно выделить два вида решений – выбор подходящей модели из уже имеющихся альтернатив и разработка нового варианта. В настоящей работе предлагается своя версия моделей СДГ применительно к условиям территории РСО-Алания. Согласно классификации описанной в [Danciu et al., 2016] наши («региональные») модели можно отнести к первой и частично ко второй группе. Рассматриваемые также «среднестатистические» модели, можно отнести к четвертой группе.

Настоящая работа является развитием предыдущих исследований авторов, ориентированных на решение задач именно инженерной сейсмологии. Математическая структура разрабатываемых моделей описана в работах [Чернов Ю., Чернов А., 2017; Zaalishvili, Chernov, 2018]. Рассматриваемые параметры СДГ при возникновении землетрясения с заданными характеристиками очага и среды используются как случайные величины с логарифмически нормальным распределением вероятностей. Определение параметров этих распределений в сейсмогеологических условиях территории РСО-Алания и есть основная цель настоящих исследований.

Моделировались единичные параметры ускорений колебаний грунта (амплитуды, периоды, длительности), спектры, макросейсмические интенсивности (балльности) сотрясений и акселерограммы колебаний грунта. Модели единичных параметров и макросейсмических балльностей рассмотрены в первой части настоящей статьи. Модели других характеристик СДГ рассмотрены во второй ее части.

Исходные данные и методика исследований

Построение статистически заданных функций распределения исследуемых характеристик СДГ для территории РСО-Алания во всем интересующем нас диапазоне магнитуд и расстояний только по записям местных сильных землетрясений (примерно так, как это было сделано нами для некоторых сейсмоактивных районов Узбекистана, Дагестана, запада США, Италии и др.) пока затруднительно из-за недостаточного их количества. Поэтому, в качестве одной из составляющих исходных данных в настоящем исследовании являются эмпирические зависимости пиковых

амплитуд ускорений (PGA) и макросейсмических балльностей (I) от магнитуды землетрясения (M) и расстояния до очага (D), полученные ранее нами, а также другими исследователями для других регионов. Зависимости подбирались таким образом, чтобы в совокупности они представляли некоторый «среднестатистический срез», описывающий землетрясения с разными механизмами подвижки, в разных сейсмотектонических зонах, с разными грунтовыми условиями. Всего сформированы подборки из 35-ти и 24-х известных и апробированных зависимостей PGA (M, D) и I (M, D). Часть этих зависимостей описана в [Чернов, 1989]. Другие заимствованы из работ [Свод правил..., 2017; Оскорбин, Бобков, 1977; Сейсмическое..., 1980; Шебалин, 1991; Штейнберг и др., 1993; Ambraseys, Bommer, 1991; Boore et al., 1994; Boore, Atkinson, 2008; Campbell, Bozorgnia, 1994, 2008; Chandra, 1979; Howell, Schultz, 1975; Jimenez et al., 1999; Jonathan, 1996; Joyner, Boore, 1981, 1988, 1993; Sabetta, Pugliese, 1987; Sadigh et al., 1986; Shedlock, 1999; Smit et al., 2000; The global..., 1999; Twesigomwe, 1997].

Большинство этих зависимостей дают удаленность землетрясения в виде расстояний до очага. В тех же случаях, когда использовались гипоцентральные расстояния (r), r пересчитывались в D . Пересчет выполнен исходя из размеров очагов по [Штейнберг и др., 1993] в предположении их минимальной глубины и равновероятного азимутального расположения к нему точки наблюдения. В результате пересчетов принято, что, например, для землетрясений с $M=6,5$ D на 10 км меньше r , а для $M=7,0$ – на 15 км. Проверочное сопоставление таких пересчетов с зависимостями именно от D показало приемлемость данной корректировки. Когда в первичных за-

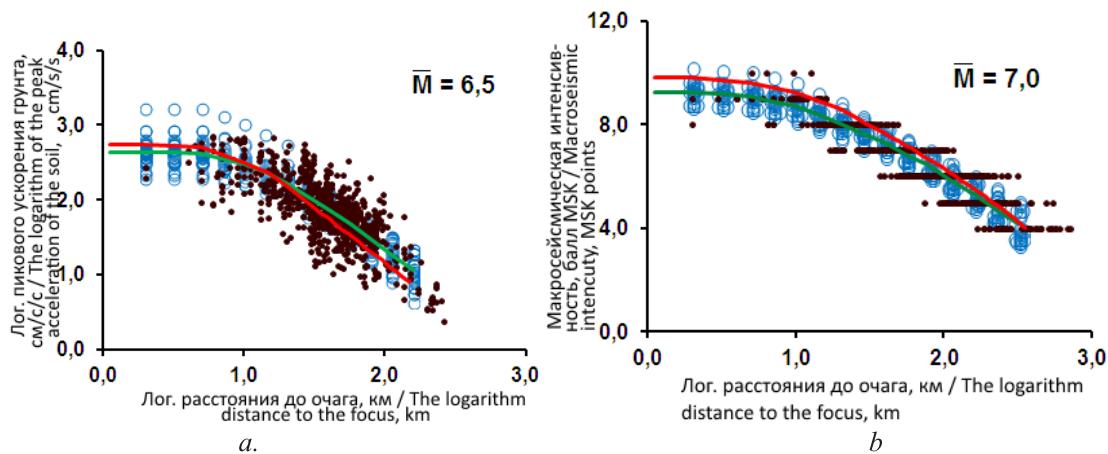


Рис. 1. Исходные данные и аппроксимирующие кривые для зависимостей пиковых ускорений

(*a*) и макросейсмических интенсивностей сотрясений (*b*) грунта от расстояния до очага при землетрясениях с разными магнитудами (M). Синие пустые кружки – исходные подборки зависимостей PGA (M, D) и I (M, D). Коричневые точки – данные из таблицы 1 и из макросейсмических описаний отдельных землетрясений. Зеленые линии – «среднестатистические» зависимости, красные линии – зависимости принятые для «средних» грунтовых условий исследуемой территории. /

*Fig. 1. Source data and approximating curves for the dependences of peak accelerations (*a*) and macroseismic intensities of tremors (*b*) of the soil on the distance to the source during earthquakes with different magnitudes (M). The blue empty circles are the original sets of dependencies PGA (M, D) and I (M, D). Brown dots – data from table 1 and from macroseismic descriptions of individual earthquakes. Green lines are “average” dependencies, red lines are dependencies accepted for “average” soil conditions of the studied territory.*

Таблица 1 / Table 1.

Характеристики базы данных по инструментальной регистрации землетрясений с независимыми определениями макросейсмической балльности в пунктах наблюдений /

Characteristics of the database on the instrumental registration of earthquakes with independent definitions of macroseismic points at the observation points

Район; землетрясение, тип записи (спектра) / Area, Earthquake, Record type (spectrum type)	Кол-во записей / Number of records	Магнитуда / Magnitude	Расстоя- ние (км) / Distance (km)	Балльность (MSK, MMI) / Intensity (MSK, MMI)
Газлийское 17.05.76; ускорение / Gazliy 17.05.76; acceleration	3	7,3	25	10
Иран; ускорение / Iran; acceleration	12	7,3	5-70	8-10
Кобе 1995; ускорение/ Kobe 1995; acceleration	13	6,9	10	8-9
Сан-Фернандо 09.02.71; ускорение / San- Fernando 09.02.71; acceleration	136	6,5	8-105	5-10
Чи-Чи. 21.09.99; ускорение / Chi-Chi. 21.09.99; acceleration	48	7,6	2-23	9
Турция; ускорение / Turkey; acceleration	45	4,5-7,7	5-15	6-10
Мыс Мендосино 25.04.92; ускорение / Cape Mendocino 25.04.92; acceleration	22	7,0	5-60	7-9
Имперская долина 15.10.79; ускорение / Imperial Valley 15.10.79; acceleration	22	6,5	6-31	7-10
Лома-Приета 18.10.89; ускорение / Loma Prieta 18.10.89; acceleration	114	7,0	7-137	4-9
Нортридж 17.01.94; ускорение / Northridge 17.01.94; acceleration	278	6,7	2-150	4-9
Запад США; ускорение / West USA; acceleration	48	5,3-7,7	4-210	5-9
Черногория; ускорение / Montenegro; acceleration	22	7,0	9-110	5-9
Спитакское 07.12.88; ускорение / Spitak 07.12.88; acceleration	2	6,9	40	8
Греция; ускорение / Greece; acceleration	43	4,3-6,8	10-118	4-8
Фриули 1976; ускорение / Friuli 1976; acceleration	54	3,8-6,2	7-139	4-8
Румыния; ускорение / Romania; acceleration	84	6,5-7,4	3-19	4-8
Ландерс 28.06.92; ускорение / Landers 28.06.92; acceleration	85	7,2	14-197	4-8
МорганХилл 24.04.84; ускорение / Morgan Hill 24.04.84; acceleration	54	6,1-6,2	5-73	5-8
Уиттиер Нарроус. 01.10.87; ускорение / Whittier Narrows. 01.10.87; acceleration	180	6,1	7-108	4-8
Коалинга 02.05.83; ускорение / Coalinga 02.05.83; acceleration	93	6,7	10-68	5-8
Норт Палм Спрингс 08.07.86; ускорение / North Palm Springs 08.07.86; acceleration	59	6,2	5-83	5-8
Гектор Майн; ускорение / Hector Mine; acceleration	117	7,1	48-223	4-8
Ташкент 1966; скорость, смещение / Tashkent 1966; speed, displacement	11	3,0-5,3	3-25	4-8

Азорские острова; ускорение / Azores; acceleration	2	5,0	5	7
Дагестан 1970; смещение / Dagestan 1970; displacement	63	2,5-4,3	4-32	3-7
Газли 1976; смещение / Gazliy 1976; displacement	282	2,5-5,3	5-45	3-7
Газли 1984; ускорение, скорость / Gazliy 1984; acceleration, speed	9	3,0-4,5	10-40	3-7
Пап 1984, скорость, смещение / Pap 1984, displacement	116	2,5-4,8	13-23	3-7
Сан-Фернандо 1971; ускорение, смещение / San-Fernando 1971; acceleration, displacement	168	2,5-6,5	4-105	3-10
Морган Хилл 1984; ускорение / Morgan Hill 1984; acceleration	2	3,1-3,7	13-14	3
Кавказ; скорость, смещение / Caucasus; speed, displacement	14	3,0-5,0	5-16	3-8
Ашхабад; смещение / Ashgabat; displacement	4	3,7-5,5	5-25	4-6
Курильские острова; скорость / Kurile Islands; speed	155	3,5-7,6	65-808	3-6
Дальний Восток; скорость, ускорение / Far East; speed, acceleration	147	3,5-6,4	15-386	3-6

висимостях давались оценки PHA , применялся коэффициент $PGA/PHA=0,86$. Пример использованных в итоге исходных зависимостей $PGA(D)$ и $I(D)$ приведен на рисунках 1а и 1б. Данный подход отличается тем, что здесь анализируются уже итоговые зависимости, каждая из которых сама является обобщением сотен, а иногда и тысяч отдельных замеров PGA и I при соответствующих M и D . Это многократно увеличивает статистический объем первичной информации, что положительно влияет на представительность получаемых результатов.

Второй источник исходных данных – параметры ускорений (пиковье амплитуды, соответствующих им периодов (T_a), длительности основной фазы (τ)), измеренные непосредственно по более 2500 записям ощутимых и сильных землетрясений Кавказа, Узбекистана, запада США, Японии, юга Европы и других районов мира, краткое описание которых приведено в таблице 1. На рисунке 1а приведен пример этих измерений.

Объединением вышеозначенного набора зависимостей $PGA(M, D)$ и измерений непосредственно по акселерограммам получены итоговые «среднестатистические» зависимости (пример также приведен на рисунке 1а).

Аналогичным образом при разработке «традиционных» (т. е. построенных по данным макросейсмических обследований) функций затухания, помимо вышеуказанных зависимостей $I(M, D)$, в анализ включены балльности из таблицы 1. Сюда же включены макросейсмические описания Лесогорско-Углегорского 15 марта 1924 г., Ашхабадского 5 октября 1948 г., Дагестанского 14 мая 1970 г., Газлийских 8 апреля и 17 мая 1976 г., 20 марта 1984 г., Спитакского 7 декабря 1988 г., Приморского 13 ноября 1990 г., Рачинского 29 апреля 1991 г., Нефтегорского 27 мая 1995 г., Алтайского 27 сентября 2003 г. и других сильных землетрясений. Пример таких данных приведен на рисунке 1б. Как и в случае пиковых амплитуд, объединением этих двух типов данных получены итоговые «среднестатистические» оценки, пример которых также показан на рисунке 1б.

Таблица 2 / Table 2.

Наиболее вероятные значения логарифмов пиковых ускорений ($lgPGA$), длительностей основной фазы ($lg_{0.3}$), периодов ускорений с максимальной амплитудой (lgT_a) и макросейсмических интенсивностей (I_T, I^*) в ближней зоне потенциально опасных для территории РСО-Алания землетрясений разных магнитуд () и скорости изменения амплитуд, длительностей, периодов с расстоянием в дальней зоне ($n_{PGA}, n_{0.3}, n_{Ta}$). «Средние» грунтовые условия. PGA – в см/с/с; $T_{a, 0.3}$ – в с; I_T, I^* – в баллах MSK /

The most probable values of logarithms of peak accelerations ($lg PGA$), durations of the main phase ($lg_{0.3}$), acceleration periods with a maximum amplitude (lgT_a) and macroseismic intensities (I_T, I^*) in the near zone of potentially hazardous to the territory of the RNO-Alania earthquakes of different magnitudes () and the rate of the amplitudes change, durations, periods with distance in the far zone ($n_{PGA}, n_{0.3}, n_{Ta}$). “Average” soil conditions. PGA – cm/s/s; $T_{a, 0.3}$ – s; I_T, I^* – MSK

	Параметры сейсмических воздействий / Seismic Impact Parameters							
	$lgPGA$	n_{PGA}	$lg_{0.3}$	$n_{0.3}$	lgT_a	n_{Ta}	I^*	I_T
3,5	2,339	-1,65	-0,22	0,60	-0,90	0,14	6,13	6,07
4,0	2,427	-1,62	-0,06	0,60	-0,82	0,14	6,66	6,71
4,5	2,505	-1,59	0,10	0,60	-0,75	0,14	7,19	7,27
5,0	2,590	-1,56	0,26	0,60	-0,68	0,14	7,76	7,82
5,5	2,640	-1,53	0,43	0,60	-0,61	0,14	8,26	8,35
6,0	2,690	-1,50	0,59	0,60	-0,54	0,14	8,77	8,88
6,5	2,740	-1,47	0,75	0,60	-0,47	0,14	9,29	9,35
7,0	2,790	-1,44	0,91	0,60	-0,40	0,14	9,82	9,80

Для получения итоговых, приближенных к региональным условиям моделей, в вышеописанные «среднестатистические» оценки введены соответствующие поправки. Коррекция выполнена с учетом сопоставительных оценок, полученных ранее нами, а также другими исследователями для сейсмоактивных районов мира, с разными сейсмотектоническими условиями. Корректирующие (повышающие ~ на 5-15% уровни амплитуд и балльностей 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 и балльностей с расстоянием увеличены на 5-15% по сравнению с исходными «среднестатистическими» зависимостями. Для периодов и длительностей колебаний, в соответствии с рекомендациями [Свод..., 2018; Чернов Ю., Чернов А., 2017] приняты «среднестатистические» оценки, как для ближней зоны, так и на разных удалениях от очага.

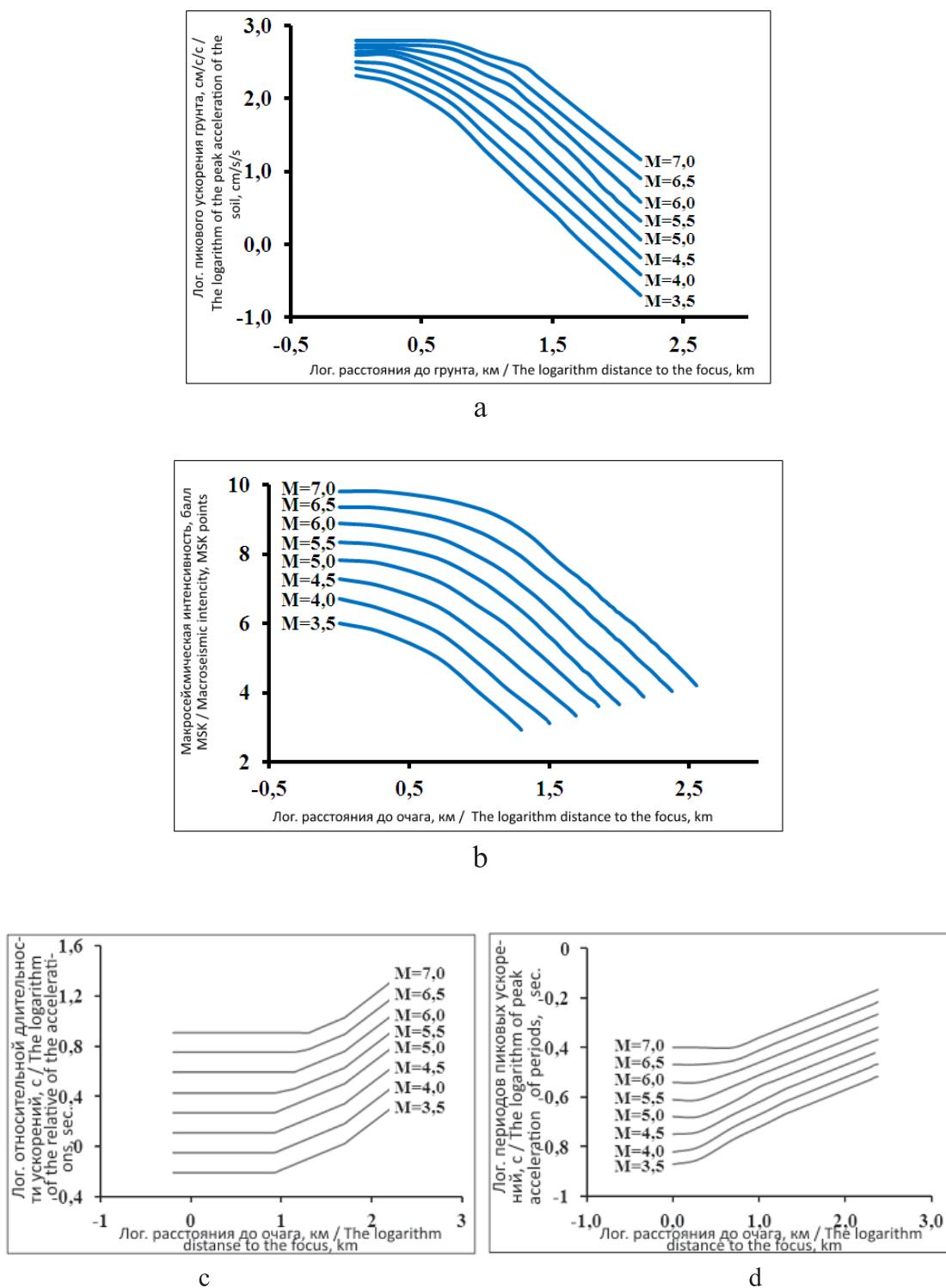


Рис. 2. Оценки наиболее вероятных значений пиковых ускорений грунта (а), макросейсмической балльности сотрясений (б), периодов максимальных ускорений (в) и относительных длительностей (г) на различных расстояниях от очагов потенциально опасных для территории РСО-Алания землетрясений разных магнитуд (M) в «средних» грунтовых условиях /

Fig. 2. Estimates of the most probable values of peak ground accelerations (a), macroseismic intensity of vibrations (b), periods of maximum accelerations (c) and relative durations (d) at various distances from sources of earthquakes of various magnitudes (M) potentially dangerous for the territory of North Ossetia-Alania in “medium” ground conditions

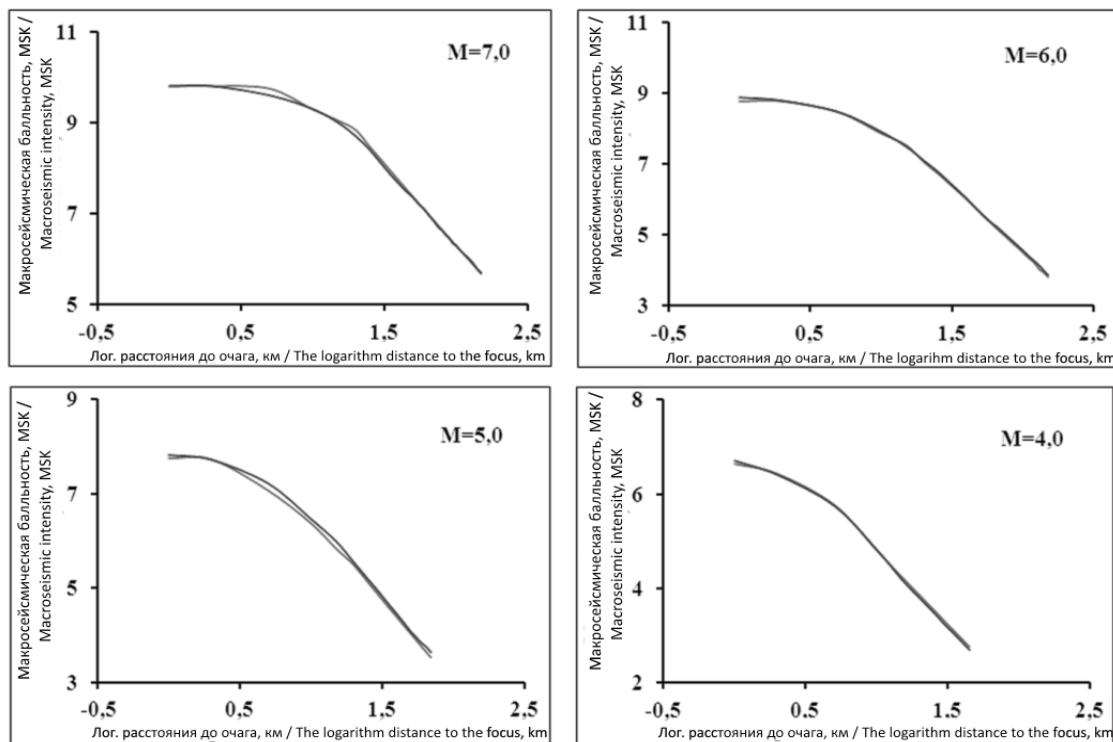


Рис. 3. Сопоставления значений функционала I^* ($PGA, T_{a,0.3}$), рассчитанных для различных расстояний до очага землетрясений разных магнитуд (M) с «традиционными» кривыми затухания балльности. Территория РСО-Алания, «средние» грунтовые условия /

Fig. 3. Comparison of the values of the functional I^* ($PGA, T_{a,0.3}$), calculated for different distances to the source of earthquakes of different magnitudes (M) with the “traditional” curves of the intensity attenuation. Territory of North Ossetia-Alania, “average” ground conditions

Результаты и обсуждение

Модели пиковых амплитуд, периодов и длительностей ускорений колебаний грунта. В таблице 2 приведены итоговые оценки PGA для потенциально опасных для исследуемой территории землетрясений. Эти значения, в соответствии с принятыми математическими процедурами (см. выше) и коэффициентами затухания (n_{PGA}), пересчитаны на различные удаления от очагов. Графики показаны на рисунках 1а и 2а. Стандартные отклонения σ_{lgPGA} , принятые равными 0,25 для землетрясений всех M и D .

В таблице 2 приведены также принятые с учетом рекомендаций [Чернов, 1989; Штейнберг и др. 1993; Чернов Ю. Чернов А., 2017] оценки длительностей колебаний, на уровнях превышающих 0,3 от максимума ($lgT_{0.3}$) и периодов пиковых ускорений $T_a(M, D)$. Скорости возрастания с расстоянием величин $\tau_{0.3}$ и T_a в дальней зоне также приведены в таблице 2. В промежуточной зоне скорость возрастания $ΔlgT_{0.3}/ΔlgD$ составляет $0,50 m_{\tau0.3}$. Стандартные отклонения величин $lgT_{0.3}(M, D)$ и $lg T_a(M, D)$ для всех M и D равны 0,30 и 0,20, соответственно. Графики моделей $\tau_{0.3}(M, D)$ и $T_a(M, D)$ показаны на рисунках 2в и 2г.

Модели макросейсмической интенсивности (балльности) сотрясений грунта. Графики «традиционных» функций затухания $I(M, D)$, разработанные на основе откорректированных «среднестатистических» соотношений приведены на рисунках 1б и 2б. Стандартные отклонения приняты равными $s_I \approx 0,4$ балла MSK для всех I и D .

При оценке качества различных версий моделей СДГ и степени их пригодности для прогнозирования сейсмической опасности следует (см., например, [Cotton et al., 2006; Danciu et al., 2016]) обращать внимание на согласованность и непротиворечивость рассматриваемых параметров СДГ. Мы называем такой анализ проверкой на «внутреннюю» и «внешнюю» согласованность.

Для проверки на «внутреннюю» согласованность (т. е. согласованность между собой) параметров PGA , T_a и $\tau_{0,3}$ выполнен их пересчет в соответствующие балльности сотрясений. Для этого использован модернизированный нами функционал:

$$I^* = (0,222M + 1.146) \lg PGA + 0.300 \lg T_a + 0.450 \lg \tau_{0,3} + 2,000, \quad (1)$$

где M – магнитуда землетрясения; I^* – в баллах MSK; PGA – в см/с/с; T_a и $\tau_{0,3}$ – в с.

Результаты, для ближней зоны показаны в таблице 2. Здесь же даны балльности, оцененные по «традиционным моделям» – I_T . На рисунке 3 сопоставлены значения I^* и I_T , рассчитанные для землетрясений различных M и D .

В целом тесты на «внутреннюю» согласованность показывают, что разработанный комплекс моделей СДГ хорошо сбалансирован по всем параметрам колебаний и макросейсмической интенсивности сотрясений во всем рассматриваемом диапазоне магнитуд и расстояний – все моделируемые параметры увязаны между собой и «подтверждают» друг друга.

Сравнивая наши модели амплитуд ускорений с некоторыми другими известными зависимостями PGA (M, D) (тест на «внешнюю» согласованность) можно видеть следующее. Согласно соотношениям [Свод правил..., 2017] при землетрясениях с $M=5,0-5,5$ и $D=10-12$ км наиболее вероятные значения пиковых ускорений составляют $\sim 0,17-0,23$ г против $0,20-0,25$ г по моделям настоящего исследования. Оценки по [Sadigh et al., 1986] для землетрясений с $M=5,5$ и $D=3,0$ км дают $PGA=0,25$ г, из [Boor et al., 1994] – $PGA=0,20$ г, из [Campbell, Bozorgnia, 1994] – $PGA=0,34$ г против $PGA=0,40$ г по нашей модели.

Таким образом, разработанные модели СДГ являются достаточно реалистичными и на близких расстояниях несколько завышающими значения PGA по сравнению с аналогичными оценками для некоторых других районов. С увеличением расстояний сравниваемые оценки выравниваются. Схожий результат наблюдается и при сравнении моделей балльности. Такой консерватизм наших моделей на данный момент представляется оправданным, так как он, с одной стороны, связан с особенностями сейсмогеологической ситуации исследуемого района, а с другой – уменьшает риск недооценки сейсмической опасности, которая может возникнуть в условиях ограниченности исходных данных.

В целом же выполненные сопоставления свидетельствуют о высокой степени, как «внутренней», так и «внешней» согласованности моделей всех моделируемых характеристик СДГ по всему ряду потенциально опасных для территории РСО-Алания землетрясений, что говорит в пользу их реалистичности и надежности.

Заключение

На основании изложенного и имея в виду принципы современного вероятностного анализа сейсмической опасности (по зарубежной терминологии probabilistic seismic hazard analysis или PSHA), в общем случае, предполагающего при производстве вероятностных оценок использование нескольких альтернативных версий, можно сделать следующие выводы:

1. Разработанные модели пиковых амплитуд, периодов и длительностей колебаний, а также макросейсмических интенсивностей сотрясений грунта отвечают основным требованиям международной и отечественной инженерно-сейсмологической практики. Они хорошо сбалансированы, непротиворечивы и позволяют учитывать особенности сильных землетрясений региона.

2. Характеристики этих моделей позволяют рекомендовать их для использования либо самостоятельно, либо в виде одной из альтернатив при PSHA в целях ДСР территории РСО-Алания. Наряду с другими разработками в подходящих сейсмотектонических условиях их можно также применять и при производстве «детерминистских» (например, «сценарийных») оценок возможных сейсмических воздействий.

3. Предлагаемые 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. Оскорбин Л. С., Бобков А. О. Макросейсмическое проявление землетрясений на территории южной части Дальнего Востока. // В кн. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Том VI «Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона». ИМГиГ ДВО РАН Южно-Сахалинск. – 1977. – С. 45-74.
3. Свод правил СП XXX1325800.2017. Детальное сейсмическое районирование и сейсмомикрорайонирование для территориального планирования (Первая редакция). Издание официальное. – М. – 2017. – 32с. URL: http://nopriz.ru/upload/iblock/9b4/sp_seism_raion.pdf
4. 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.
5. Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. / Отв. ред. В. И. Бунэ, Г. П. Горшков. – М.: Наука, 1980. – 307 с.
6. 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.
7. Чернов Ю. К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. – Ташкент: Изд-во «ФАН», 1989. – 295 с.
8. 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.
9. Шебалин Н. В. Оценка размеров и положения очага Спитакского землетрясения по макросейсмическим данным // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 32. – М.: Наука, 1991. – С. 36-44.
10. 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.

11. Ambraseys N.N., Bommer J.J. The attenuation of ground accelerations in Europe. // Earthquake Eng. Struct. Dyn. – 1991. – V. 20. – Pp. 1179-1202.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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. <https://doi.org/10.1193/1.2857546>
16. 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. Earthq. Engin. Resear. Instit, Oakland, California. – 1994. – Vol. III. – Pp. 283-292.
17. Chandra V. Attenuation of intensities in the United States. //BSSA. – 1979. – V. 69. –Pp. 2003-2024.
18. Danciu L., Kale O., Akkar S. The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2016.
19. Howell W.F., SchultzT. R. Attenuation of Modified Mercalli Intensity with distance from Epicenter //BSSA. – 1975. – V. 65. – Pp. 651-665.
20. Jimenez M. H., Garcia-Fernandez M. et al. Seismic hazard assessment in the Ibero-Maghreb region //The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. // Annali di Geofisica. – 1999 December. – Vol. 42. №6. – Pp. 1057-1065.
21. Jonathan, E. Some aspects of seismicity in Zimbabwe and Eastern and Southern Africa.// M. Sc. Thesis, Institute of Solid Earth Physics, University Bergen. – Bergen, Norway. – 1996. – Pp. 100.
22. Joyner W. B., Boore D. M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion recordings including recordings from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. // Bull Seismol Soc Am 71. – 1981. – Pp. 2011-2038.
23. Joyner, W. B., BooreD. M. Measurement, characterization and prediction of strong ground motion. //Proceedings Earthquake Engineering Soil Dynamics, v. II, GT Div. ASCE, Park City, UT, June 27-30, 1988. – 1988. – Pp. 43-102.
24. Joyner, W. B., Boore D. M. Methods of regression analysis of strong motion data. //BSSA. – 1993. –V. 83. – Pp. 469-487.
25. Kale Ö, Akkar S. A ground-motion logic-tree scheme for regional seismic hazard studies. // Earthquake Spectra. – 2017. – Vol. 33. №3. – Pp. 837-856.
26. Sabetta F., Pugliese A. Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong-motion record //BSSA. – 1987. – V. 77. – Pp. 1491-1513.
27. Sadigh K., EganJ., YoungsR. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. // Earthquake Notes. – 1986. – Pp. 57-132.
28. Shedlock K. M. Seismic hazard map of North and Central America and the Caribbean //The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. // Annali di Geofisica, vol. 42, N 6 December 1999. – 1999. –Pp. 977-997.

29. Smith P., Arzumanian V., Javakhichvili Z. et. al. The Digital Accelerograph Network in the Caucasus // Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction. Kluwer Academic Publishers. – 2000. – Pp. 109-118.
30. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. // Summary Volume. Annali di Geofisica. Vol. 42, N 6. December 1999. – 1999. – 1232 p.
31. Twesigomwe E. Probabilistic seismic hazard assessment of Uganda, Ph. D. // Thesis, Dept. of Physics, Makerere University, Uganda. – 1997.
32. Zalishvili 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. – 2018. – № 12. – Pp. 309-318.

GEOPHYSICS

DOI:10.23671/VNC.2019.2.31980

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

**Y. K. Chernov¹, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., A. Y. Chernov²,
Cand. Sci. (Tech.), M. I. Chitishvili¹, Postgraduate Student**

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

²Institute of Construction in the North-Caucasian Federal University, Russia, 355029,
Stavropol Krai, Stavropol, 355029, Russia, Kulakov str., 2

Abstract: In RNO-Alania studies to establish a new probabilistic maps of the Detailed Seismic Zoning (DSZ) are being conducted. An integral part of these studies is the development of effective models of Strong Ground Motion (SGM) in potentially dangerous earthquakes in the region. In the first part of the article devoted to these studies, the models of single characteristics SGM – Peak Ground Accelerations (PGA), periods of accelerations with maximum amplitude (T_a), durations of the main phase of oscillations (τ), as well as macroseismic intensity (score) of shaking (I) are considered. The models are presented in the form of statistically given functions of probabilities distribution of random variables (values of fluctuations parameters and force of ground shaking) at various magnitudes of earthquakes (M) and distances to the center (D). Models were built in two stages. First, the “average” change functions with the distance PGA (M, D), T_a (M, D), τ (M, D) and I (M, D) are determined. Then, by introducing corrective amendments into these dependences, they were brought to close the conditions of the investigated territory of the RNO-Alania. “Average” dependences were based on the analysis of a large amount of initial data on instrumental registration and macro-seismic descriptions of strong earthquakes. Two types of data were used. The first is a collection of 35 and 24 known and tested empirical dependences of PGA (M, D) and I (M, D), built by different authors for different seismic regions of the world. The second is direct measurements

of more than 2,500 accelerograms of the world's palpable and strong earthquakes, which have a simultaneous assessment of the shaking strength at the point of registration. Also used the macroseismic descriptions of several tens of strong earthquakes in the territory of the Russian Federation and other countries. Corrective amendments are determined on the basis of the analysis of general seismotectonic conditions of the territory, features of the medium of seismic disturbances, mechanisms of foci and other characteristics of the study area affecting the simulated parameters of SGM. To verify the reliability and realism of the developed models, a cross-comparison (among themselves) obtained on the basis of their estimates of PGA, Ta, τ and I. The comparison of the obtained models with the developments of other authors for other areas is also carried out. In all cases, there is a high level of consistency and connectivity in the results obtained in this study. In general, the developed models are in agreement with the basic requirements of international and domestic engineering-seismological practice, contribute to the accuracy and reliability of probabilistic seismic hazard assessments at the regional level and can be used for the purposes of DSZ of the territory of the Russian Federation in the production of both probabilistic and deterministic ("scenario") assessments.

Keywords: 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 I. *Geology of the South of Russia*. (in Russ.). 2019; 9 (2): 95-108. DOI:10.23671/VNC.2019.2.31980.

References

1. Afanas'eva V. V. Ontology of scientific uncertainty. Saratov: Nauka, 2008. 108 p. (in Russ.)
2. Oskorbin L. S., Bobkov A. O. Macroseismic effect of earthquakes in the southern part of the Far East. In the book. Geodynamics of the tectonosphere of the junction of the Pacific Ocean with Eurasia. Volume VI "Problems of seismic hazard of the Far Eastern region. IMGiG FER RAS Yuzhno-Sakhalinsk. 1977. Pp. 45-74. (in Russ.)
3. Set of rules SP XXX1325800.2017. Detailed seismic zoning and seismic microzonation for spatial planning (First edition). Official publication. M. 2017. 32 p. URL: http://nopriz.ru/upload/iblock/9b4/sp_seism_raion.pdf (in Russ.)
4. Set of rules SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas. SNiP II 7-81 * M. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. M. 2018. 126 p. (in Russ.)
5. Seismic zoning of the USSR. Methodical foundations and regional description of the 1978 map / Resp. ed. V. I. Bune, G. P. Gorshkov. M.: Nauka, 1980. 307 p. (in Russ.)
6. Sokolov V. Yu. On the modeling of the spatial distribution of strong ground motion in seismic hazard and risk assessment. Questions of engineering seismology. 2012. Vol. 39. No. 2. Pp. 5-22. (in Russ.)
7. Chernov Yu. K. Strong ground motions and quantitative assessment of seismic hazard of territory. Tashkent: Publishing House "FAN", 1989. 295 p. (in Russ.)
8. 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.)
9. Shebalin N. V. Estimation of the size and position of the source of the Spitak earthquake using macroseismic data. Issues of engineering seismology. Issue 32. M.: Nauka, 1991. Pp. 36-44. (in Russ.)
10. Shteinberg V. V., Saks M. V., Aptikaev F. F. et al. Methods for assessing seismic effects (manual). Problems of engineering seismology, Vol. 34. M.: Nauka, 1993. Pp. 5-94. (in Russ.)
11. Ambraseys N. N., Bommer J. J. The attenuation of ground accelerations in Europe. Earthquake Eng. Struct. Dyn. 1991. V. 20. Pp. 1179-1202.
12. 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.
13. 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.

14. 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.
15. 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. <https://doi.org/10.1193/1.2857546>
16. 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. *Earthq. Engin. Resear. Instit*, Oakland, California. 1994. Vol. III. Pp. 283-292.
17. Chandra V. Attenuation of intensities in the United States. *BSSA*. 1979. V. 69. Pp. 2003-2024.
18. Danciu L., Kale Ö., Akkar S. The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2016.
19. Howell W. F., Schultz T. R. Attenuation of Modified Mercalli Intensity with distance from Epicenter. *BSSA*. – 1975. V. 65. – pp. 651-665.
20. Jimenez M. H., Garcia-Fernandez M. et al. Seismic hazard assessment in the Ibero-Maghreb region. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. *Annali di Geofisica*. 1999 December. Vol. 42. No. 6. Pp. 1057-1065.
21. Jonathan, E. Some aspects of seismicity in Zimbabwe and Eastern and Southern Africa. M. Sc. Thesis, Institute of Solid Earth Physics, University Bergen. Bergen, Norway. 1996. Pp. 100.
22. Joyner W. B., Boore D. M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion recordings including recordings from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull Seismol Soc Am* 71. 1981. Pp. 2011-2038.
23. Joyner, W. B., Boore D. M. Measurement, characterization and prediction of strong ground motion. // *Proceedings Earthquake Engineering Soil Dynamics*, v. II, GT Div. ASCE, Park City, UT, June 27-30, 1988. – 1988. – pp. 43-102.
24. Joyner, W. B., Boore D. M. Methods of regression analysis of strong motion data. // *BSSA*. 1993. V. 83. Pp. 469-487.
25. Kale Ö., Akkar S. A ground-motion logic-tree scheme for regional seismic hazard studies. *Earthquake Spectra*. 2017. Vol. 33. No. 3. Pp. 837-856.
26. Sabetta F., Pugliese A. Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong-motion record // *BSSA*. – 1987. – V. 77. – pp. 1491-1513.
27. Sadigh K., Egan J., Youngs R. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. *Earthquake Notes*. 1986. Pp. 57-132.
28. Shedlock K. M. Seismic hazard map of North and Central America and the Caribbean. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. *Annali di Geofisica*. Vol. 42. No. 6. December 1999. Pp. 977-997.
29. Smith P., Arzumanian V., Javakhichvili Z. et. al. Th Digital Accelerograph Network in the Caucasus. *Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction*. Kluwer Academic Publishers. 2000. Pp. 109-118.
30. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. // Summary Volume. *Annali di Geofisica*. Vol. 42. No. 6. December 1999. 1232 p.
31. Twesigomwe E. Probabilistic seismic hazard assessment of Uganda, Ph. D. Thesis, Dept. of Physics, Makerere University, Uganda. 1997.
32. Zaalistvili 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*. 2018. No. 12. Pp. 309-318.