

УДК 550.34

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ГРУНТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РСО-АЛАНИЯ

© 2020 г. Ю. К. Чернов^{1, *}, В. Б. Заалишвили^{1, **}, А. Ю. Чернов^{2, ***}

¹Геофизический институт ВНЦ РАН, г. Владикавказ, Россия

²Инженерный институт ФГАОУ ВО “Северо-Кавказский федеральный университет”, г. Ставрополь, Россия

*E-mail: chenta-26@mail.ru

**E-mail: vzaal@mail.ru

***E-mail: cgi_ras@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2019 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 23.04.2020 г.

Предложены построенные на основе эмпирических данных модели для вероятностного прогнозирования характеристик сильных движений грунта (СДГ) при землетрясениях, потенциально опасных для территории РСО-Алания. Рассматриваются модели имеющих наибольшее значение в инженерной практике характеристик СДГ (макросейсмических интенсивностей сотрясений, пиковых ускорений, периодов, длительностей, спектров и акселерограмм колебаний грунта) вблизи очагов землетрясений разных магнитуд и на различных удалениях от них применительно к сейсмогеологическим условиям исследуемой территории. Разработки выполнены с использованием как традиционного статистического анализа большого объема данных по инструментальной регистрации и макросейсмическому описанию сильных и ощутимых землетрясений Кавказа и других сейсмоактивных районов мира, так и нового метода восстановления спектров сильных землетрясений по их макросейсмическому полю. Перекрестным сопоставлением полученных на основе предложенных моделей оценок между собой, а также с разработками других авторов показана достаточная степень их реалистичности и надежности.

Ключевые слова: землетрясения, сильные движения, ближняя и дальняя зоны, сейсмическая опасность, макросейсмическая интенсивность, РСО-Алания.

DOI: 10.31857/S0002333720050014

ВВЕДЕНИЕ

Проводимые Геофизическим институтом ВНЦ РАН исследования по уточнению сейсмической опасности территории РСО-Алания предполагают использование эффективных региональных моделей сильных движений грунта (СДГ).

Многочисленные публикации, посвященные моделированию СДГ (см., например, обзор [Douglas, 2016]), показывают, что данная задача на региональном уровне может решаться двумя способами – выбором подходящей модели из уже имеющихся альтернатив и разработкой нового варианта. В настоящей работе реализуется второй способ – предлагается своя версия применительно к условиям территории РСО-Алания.

Считается, что характеристики СДГ по причине их зависимости от большого числа трудно контролируемых факторов имеют случайную природу, из-за чего их целесообразно описывать в вероятностной форме. Возникающие при этом неопре-

деленности можно разделить на эпистемические и алеаторные [Budnitz et al., 1997; Abrahamson, 2000; Соколов, 2012]. Эпистемические неопределенности связаны с особенностями самих моделей [Афанасьева, 2008]. Мы условно называем их “субъективными”. Алеаторные же неопределенности (мы их также условно называем “объективными”) формируются большим числом трудно контролируемых природных факторов, определяющих параметры СДГ. В настоящем исследовании алеаторные неопределенности учитываются путем построения функций распределения вероятностей случайных величин (параметров СДГ). Для учета “эпистемических” неопределенностей обычно в анализ включаются две или более альтернативные модели (о чем подробнее можно найти, например, в работе [Delavaud et al., 2012; Kale, Akkar, 2017]). Элементы данной технологии также применены в настоящем исследовании.

Рассмотрены модели всех, как правило, используемых в инженерных целях параметров СДГ –

макросейсмических интенсивностей (I), амплитуд (PGA), периодов (T_a), длительностей (τ), спектров Фурье ($|S(f)|$), спектров реакции ($SA(f)$) и временных функций ускорений (акселерограмм) колебаний грунта. Принимая во внимание известные ограничения при прогнозировании реальных СДГ теоретическими методами, разрабатываемые модели строились с использованием, в основном, эмпирических данных по инструментальной регистрации и макросейсмическому описанию землетрясений Кавказа и других сейсмоактивных районов страны и мира.

Модели строились в рамках описанной нами ранее (см. [Чернов, 1989; Чернов Ю., Чернов А., 2017; Zaalishvili, Chernov, 2018]) общей расчетной схемы, с акцентом на ее адаптацию к сейсмогеологическим условиям исследуемой территории. Учет регионального фактора в данном случае является важным ресурсом для обеспечения должного качества результирующих оценок.

Конечная цель исследований — разработка комплекса взаимосвязанных и реалистичных моделей различных характеристик СДГ, оптимальным образом подходящих для дальнейшего использования при оценках вероятных сейсмических воздействий, сейсмической опасности и сейсмического риска.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматриваемые параметры СДГ при землетрясениях с заданными магнитудой и удаленностью (см. [Zaalishvili, Chernov, 2018]) моделировались в виде логарифмически нормально распределенных случайных величин. Оценки этих распределений выполнены с использованием данных нескольких типов. Первый — это известные и апробированные в мире зависимости пиковых ускорений грунта и балльности сотрясения от магнитуды и расстояния. Сведения о более ранних из них можно найти в работе [Чернов, 1989]. Более поздние описаны в публикациях [Шебалин, 1991; Ambraseys, Bommer, 1991; Joyner, Boore, 1993; Штейнберг и др., 1993; Boore et al., 1994; Campbell, Bozorgnia, 1994; 2008; Оскорбин, Бобков, 1977; Комплект..., 1999; Jimenez et al., 1999; Shedlock, 1999; The global..., 1999; Smit et al., 2000; Boore, Atkinson, 2008; Чернов Ю., Чернов А., 2017; Sokolov, Sahran, 2018; Свод..., 2018а; 2018б]. Во многих из этих зависимостей функции затухания даются в виде расстояний до очага (D). Когда же исходные функции затухания даются относительно эпицентральных (Δ) или гипоцентральных (r) расстояний, сделан их пересчет в зависимости от D . При этом принято, что, например, D меньше r на величину, зависящую от габаритов, минимальной глубины и ориентации очага землетрясения. Исходя из среднестатистических

оценок этих характеристик (сделанных с учетом данных из работ [Чернов, 1989; Штейнберг и др., 1993]) и считая равновероятной ориентацию очага по отношению к точке наблюдения, принималось, что, например, для землетрясений с $M = 7, 6, 5$ и 4 такая поправка составляет $15, 8, 4$ и 2.5 км соответственно. Учитывая приближенность этих пересчетов, сделаны сравнения полученных оценок с зависимостями непосредственно от D , которые показали относительно небольшие расхождения, что говорит о возможности использования данной корректировки. В исходных зависимостях пиковых ускорений давались оценки как PGA , так и PHA (пиковых горизонтальных ускорений), что учтено использованием соотношения $PGA/PHA = 0.86$. Всего для дальнейшего анализа сформированы подборки из 35 зависимостей $PGA(M, D)$ и 23 зависимостей $I(M, D)$, построенных в диапазоне $M = 3-7$ и расстояний $D = 1-200$ км. Следует отметить, что в этом случае в анализ включаются не отдельные (как обычно) измерения PGA и I с соответствующими M и D , а уже обобщающие их зависимости. Это намного увеличивает статистический объем первичной информации. В графическом виде примеры этих зависимостей приведены на рис. 1а и 1б.

Анализировались также параметры колебаний грунта, измеренные непосредственно по записям ощутимых и сильных землетрясений из разных районов мира, краткое описание которых приведено в табл. 1. Это второй тип данных. На рис. 1а и 1б в графическом виде показаны примеры результатов этих измерений.

К этой же (второй) группе данных относятся макросейсмические определения I в пунктах инструментальной регистрации СДГ (табл. 1), а также макросейсмические описания Алтайского (07.09.2003 г.), Нижнекубанского (09.11.2002 г.), Сальского (22.05.2001 г.), Нефтегорского (27.05.1995 г.), Рачинского (29.04.1991 г.), Приморского (13.11.1990 г.), Спитакского (07.12.1988 г.), Назарбекского (11.12.1980 г.), Папского (18.02.1984 г.), Газлийских (08.04.1976 г. и 17.05.1976 г., 20.03.1984 г.), Дагестанского (14.05.1970 г.), Ашхабадского (05.10.1948 г.), Лесогорско-Углегорского (15.03.1924 г.), Ахалкалакского (31.12.1899 г.) и других сильных и ощутимых землетрясений исследуемого и других районов. Пример таких данных приведен на рис. 1б. По этим данным строились “традиционные” функции $I_T(M, D)$.

Модели спектров Фурье строились на основе более 2600 спектров, полученных по записям землетрясений из табл. 1. Для дальнейших операций спектры табулированы в виде отдельных значений уровней спектральной плотности на фиксированных частотах. Шаг дискретизации 0.11 лог. единицы в частотном диапазоне $0.28-22$ Гц. На рис. 2 приведен пример таких первичных постро-

ений для землетрясений с $M \approx 7.0$ (6.5–7.4) и $M \approx 5.0$ (4.5–5.4).

Объединенный массив данных как первого, так и второго типов характеризует землетрясения, происходящие в районах с разным сеймотектоническим строением, с разными механизмами очагов, разными условиями распространения сейсмических волн, с разными грунтовыми условиями. Поэтому его можно принять (с определенной долей субъективизма, конечно) как некий “среднестатистический срез”, а полученные на этой базе аппроксимирующие оценки как “среднестатистические” характеристики рассматриваемых параметров СДГ, являющиеся первым приближением. Аппроксимации (описывающие наиболее вероятные значения параметров) произведены как в виде уравнений регрессии, так и матриц значений рассматриваемых параметров с различными сочетаниями M , D и f . Дисперсии (стандартные отклонения) оценивались по соответствующим выборкам при помощи стандартных процедур. Принцип построения этих зависимостей – оценки уровней рассматриваемых параметров в ближней зоне землетрясений и характера их трансформации по мере удаления от очага. Примеры таких “среднестатистических” оценок для некоторых из рассматриваемых характеристик СДГ в виде графиков приведены на рис. 1 и рис. 2. Здесь и далее все “среднестатистические” и производные от них итоговые региональные оценки для всех рассматриваемых параметров СДГ сделаны для “средних” грунтовых условий.

Итоговые модели, лучше подходящие к региональным условиям, получены корректировкой вышеописанных “среднестатистических” зависимостей. Корректирующие коэффициенты определялись с учетом результатов наших предыдущих исследований (см., например, [Чернов Ю., Чернов А., 2008]), а также материалов по данной тематике других авторов. Так, основываясь на данных о повышенном уровне макросейсмических эффектов в эпицентральных зонах северокавказских землетрясений, принято, что в итоговых моделях уровни амплитуд, балльности и высокочастотной части спектров в ближних зонах землетрясений на 5–15% выше “среднестатистических” значений. Так как исследуемый район расположен в горной области, характеризующейся большей (по сравнению с платформами), раздробленностью земной коры, то скорости затухания с расстоянием параметров PGA , I и $|S|$ также увеличены на 5–15% по сравнению со “среднестатистическими” оценками. В графическом виде примеры откорректированных таким образом моделей для сравнения также приведены на рис. 1 и рис. 2.

При разработке итоговых моделей спектров использованы также описанные в работе [Чер-

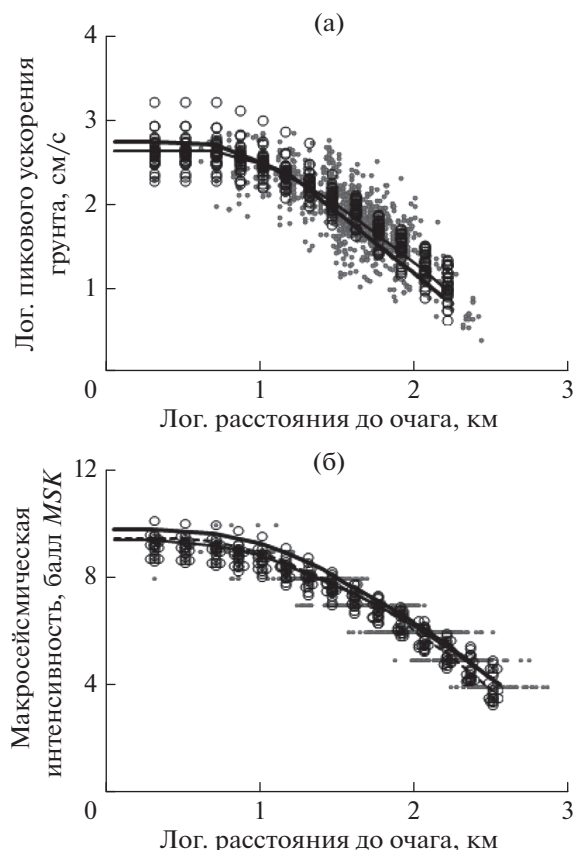


Рис. 1. Примеры исходных данных и наиболее вероятных значений аппроксимирующих зависимостей $\lg PGA(D)$ при землетрясениях с $\bar{M} = 6.5$ (а) и $I_T(D)$, $I_C(D)$ с $\bar{M} = 7.0$ (б). Пустые кружки – исходные подборки зависимостей; точки – данные из табл. 1 и из макросейсмических описаний отдельных землетрясений. Тонкие, толстые и пунктирные линии – “среднестатистические” аппроксимации и откорректированные оценки I_T и I_C соответственно.

нов, 2017] спектры северокавказских землетрясений, разработанные при помощи новой методики восстановления спектров землетрясений по их макросейсмическому полю. Описание этой методики, а также пример ее реализации в северокавказском регионе даны в работах [Чернов Ю., Чернов А., 2008; Чернов, 2017]. Здесь только скажем, что в ней используются связи между наблюдаемыми балльностями сотрясений и уровнями $|S|$ на частотах, “ответственных” за макросейсмический эффект данной силы. Эти соотношения уже давно (см., например, [Чернов, 1989; Sokolov, 2000]) используются для решения “прямой” задачи – определения по известным спектрам колебаний грунта вероятных балльностей сотрясений – так называемой “спектральной” балльности. В данном же случае помимо “прямой” (о чем будет сказано ниже) решается и “обратная” задача – по наблюда-

Таблица 1. Характеристики используемых данных по инструментальной регистрации землетрясений в пунктах с независимыми оценками спектров Фурье и макросейсмической балльности сотрясений

Регион; землетрясение, вид записи (спектра)	Кол-во записей	Магнитуда	Расстояние (км)	Балльность (MSK, MMI)
Газлийское 17.05.1976; ускорение	3	7.3	25	10
Иран 1997; ускорение.	13	6.1–7.3	5–70	8–10
Кобе 16.01.1995; ускорение	13	6.9	10	8–9
Сан-Фернандо 09.02.1971; ускорение	136	6.5	8–105	5–10
Chi-Chi 21.09.1999; ускорение	48	7.6	2–23	9
Турция; ускорение	45	4.5–7.7	5–15	6–10
Саре Мендосино 25.04.1992; ускорение	22	7.0	5–60	7–9
Imperial Valley 15.10.1979; ускорение	22	6.5	6–31	7–10
Loma Prieta 18.10.1989; ускорение	114	7.0	7–137	4–9
Northridge 17.01.94; ускорение	278	6.7	2–150	4–9
Запад США; ускорение	48	5.3–7.7	4–210	5–9
Montenegro 15.04.1979; ускорение	22	7.0	9–110	5–9
Спитакское 07.12.88; ускорение	2	6.9	40	8
Греция; ускорение	43	4.3–6.8	10–118	4–8
Friuli 1976; ускорение	54	3.8–6.2	7–139	4–8
Румыния, ускорение	84	6.5–7.4	3–19	4–8
Landers 28.06.92; ускорение	85	7.2	14–197	4–8
Morgan Hill 24.04.84; ускорение	54	6.1–6.2	5–73	5–8
Whittier Narrows 01.10.87; ускорение	180	6.1	7–108	4–8
Coalinga 02.05.83; ускорение	93	6.7	10–68	5–8
North Palm Springs 08.07.1986; ускорение	59	6.2	5–83	5–8
Hector Mine; ускорение	117	7.1	48–223	4–8
Ташкент 1966; скорость, смещение	11	3.0–5.3	3–25	4–8
Назарбек 1980; скорость, смещение	4	3.3–5.1	5–25	4–6
Азорские острова; ускорение	2	5.0	5	7
Дагестан 1970; смещение	63	2.5–4.3	4–32	3–7
Газли 1976; смещение	282	2.5–5.3	5–45	3–7
Газли 1984; ускорение, скорость	9	3.0–4.5	10–40	3–7
Пап 1984; скорость, смещение	116	2.5–4.8	13–23	3–7
Сан Фернандо 1971; ускорение, смещен.	168	2.5–6.5	4–105	3–10
Morgan Hill 1984; ускорение	2	3.1–3.7	13–14	3
Кавказ; скорость, смещение	14	3.0–5.0	5–16	3–8
Ашхабад; смещение.	4	3.7–5.5	5–25	4–6
Курильские острова; скорость	155	3.5–7.6	65–808	3–6
Дальний Восток; скорость, ускорение	149	3.4–6.5	16–387	3–6

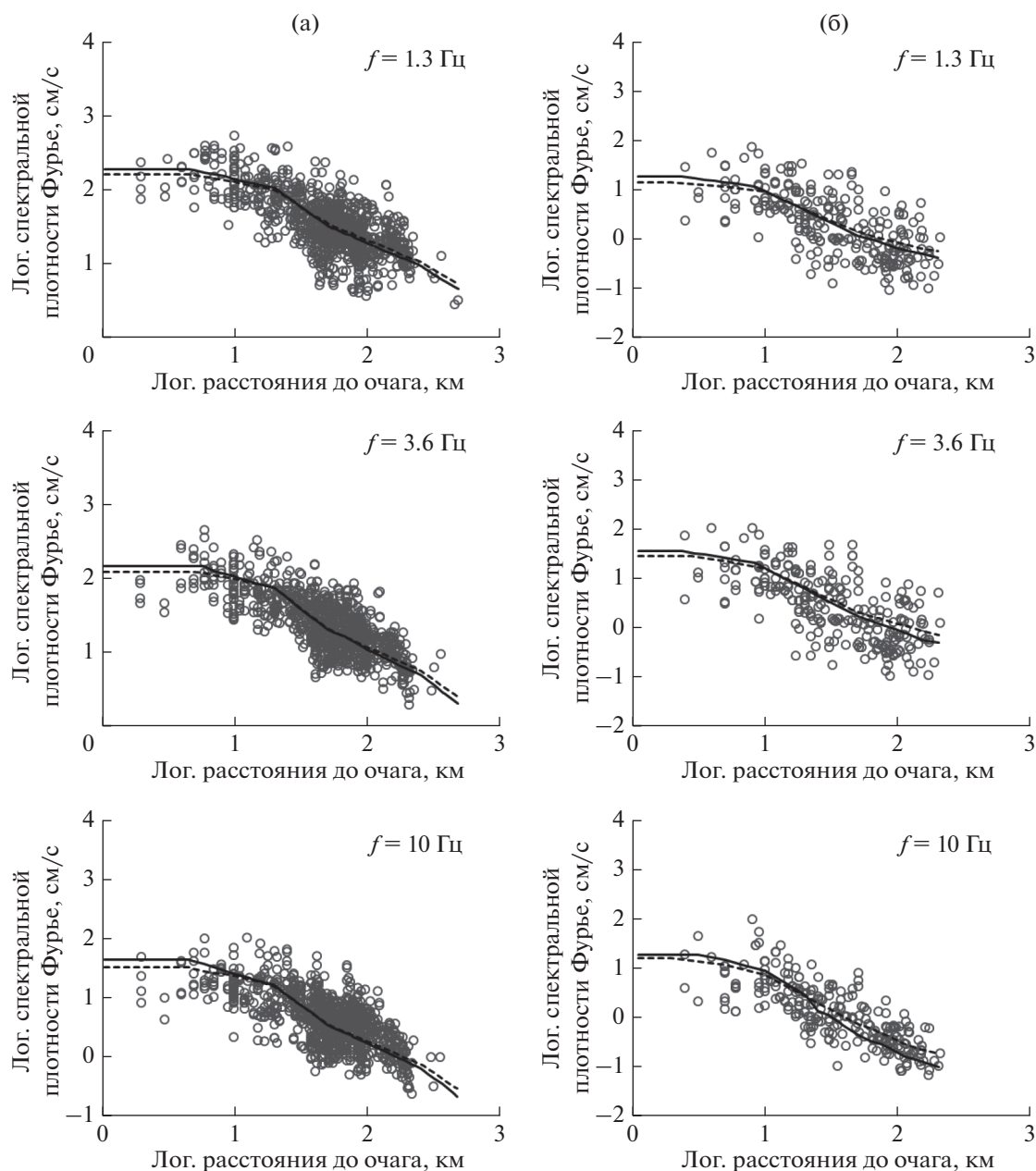


Рис. 2. Примеры первичных данных и результатов построения моделей $|S(M, D, f)|$ при потенциально опасных для изучаемой территории РСО-Алания землетрясениях с $M \approx 7.0$ (а) и $M \approx 5.0$ (б). Пустые кружки — измерения по базе инструментально зарегистрированных спектров землетрясений. Пунктирные и сплошные линии — наиболее вероятные значения “среднестатистических” и скорректированных за счет региональных условий уровней спектральной плотности Фурье соответственно.

емым макросейсмическим эффектам оцениваются спектры вызвавших эти эффекты колебаний.

Для уменьшения эпистемической составляющей неопределенности в качестве альтернативных привлечены также модели спектров Фурье, разработанные ранее разными авторами для ближней зоны землетрясений кавказского региона. С этой же целью помимо “традиционной” модели балльности $I_T(M, D)$ на основе разработанных функций

$|S(M, D, f)|$ построены и вышеупомянутые “спектральные” модели балльности $I_C(M, D)$, управляющие параметры которых приведены в табл. 2.

С учетом материалов, приведенных в работе [Чернов Ю., Чернов А., 2017] результирующие зависимости $\tau(M, D)$ и $T_a(M, D)$, для района РСО-Алания в целом приняты соответствующими “среднестатистическим”.

Таблица 2. Уровни спектров Фурье ускорений колебаний грунта ($|S|_{f_{отв}}$) на “ответственных” частотах ($f_{отв}$) для различных макросейсмических интенсивностей (I), соответствующие принятой “спектральной” модели балльности

Параметры спектра	I , балл <i>MSK</i>									
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$ 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
$f_{отв}$, Гц	10.0	10.0	7.8	4.8	3.6	1.68	1.0	0.78	0.78	0.78

Спектры реакции (значения $SA(M, D, f)$) определялись из соответствующих значений $|S|(M, D, f)$ по методике [Ванмарке, 1981].

Акселерограммы моделируются двумя способами. Первый – синтезирование методом случайных колебаний [Салганик, 1987]. Второй – подбор и масштабирование в спектрально-временной области реальных записей землетрясений. Результирующий ансамбль формируется так, чтобы спектры, амплитуды, периоды и длительности входящих в него акселерограмм, в среднем, были близки к прогнозным значениям этих параметров, вытекающим из разработанных моделей СДГ и последующих интегральных оценок вероятных сейсмических воздействий.

Итоговые функции затухания различных параметров СДГ путем сопоставления между собой, а также с результатами других исследований проверялись на “внутреннюю” и “внешнюю” согласованность и непротиворечивость.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Параметры моделей спектров ($|S|(M, D, f)$) определялись в несколько этапов. Сначала построен “опорный” вероятностный спектр ускорений колебаний грунта в ближней зоне землетрясений с $\bar{M} = 5.0(4.5-5.4)$. На рис. 3а приведены графики нескольких альтернативных вариантов таких оценок, где: I – для района Дагестанского зем-

летрясения 1970 г. (уточнение данных Ю.К. Чернова [1989]; 2 – по данным А.Ю. Чернова [2011]; 3 – спектры настоящего исследования, построенные по макросейсмическим данным; 4 – то же по инструментальным данным; 5 – по данным из работы [Соколов, 1998]; 6 – оценки по данным из работы [Чернов, 2006]. Результирующий (прогнозный) спектр получен весовым осреднением этих альтернативных версий. При этом (“инструментальному” и “макросейсмическому” спектрам (как более представительным) придан вес равный 2 каждому, остальным – по 1. На втором этапе “опорный” спектр с использованием соотношений $\bar{\beta}_M(f)$ (см. [Чернов Ю., Чернов А., 2017]) пересчитан в прогнозные спектры для ближних зон других потенциально опасных для территории РСО-Алания землетрясений (рис. 3б). Далее по значениям $S|(M, f)$ в ближних зонах и скорректированным коэффициентам затухания (см. выше) получены оценки уровней спектров на расстояниях D (типичные примеры приведены на рис. 4). На рис. 5а также приведен пример прогнозного спектра, рассчитанного для одного из возможных сильных землетрясений с заданными M и D . Здесь же, для сравнения, приведен спектр в ближней зоне данного землетрясения. Также на рис. 5б в качестве примера показаны прогнозные спектры реакции (затухание 0.05), рассчитанные для землетрясения с заданными M и D . Стандартные от-

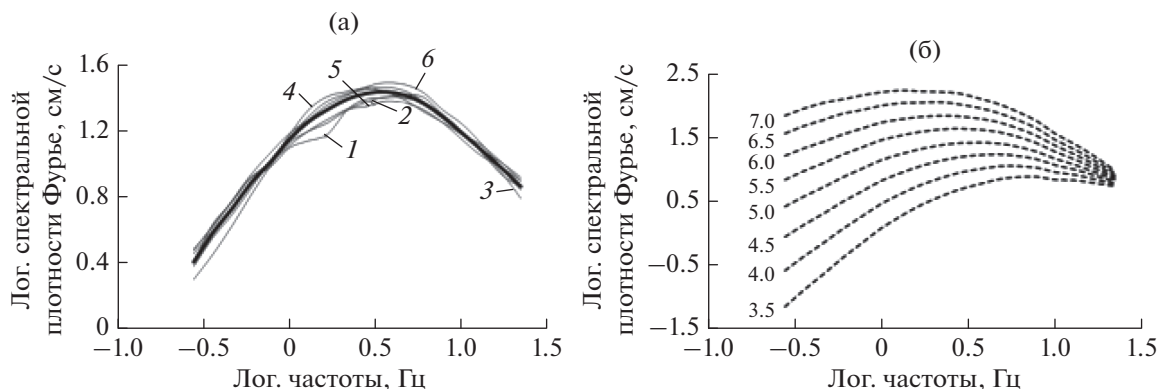


Рис. 3. Наиболее вероятные значения $|S|(f)$ в ближних зонах потенциально опасных для территории РСО-Алания землетрясений с $\bar{M} = 5.0$ (а) и с $\bar{M} = 3.5-7.0$ (б). Цифры около кривых (рис. 3а) – альтернативные варианты оценок. Толстая линия – результирующие (итоговые) значения $|S|(f)$.

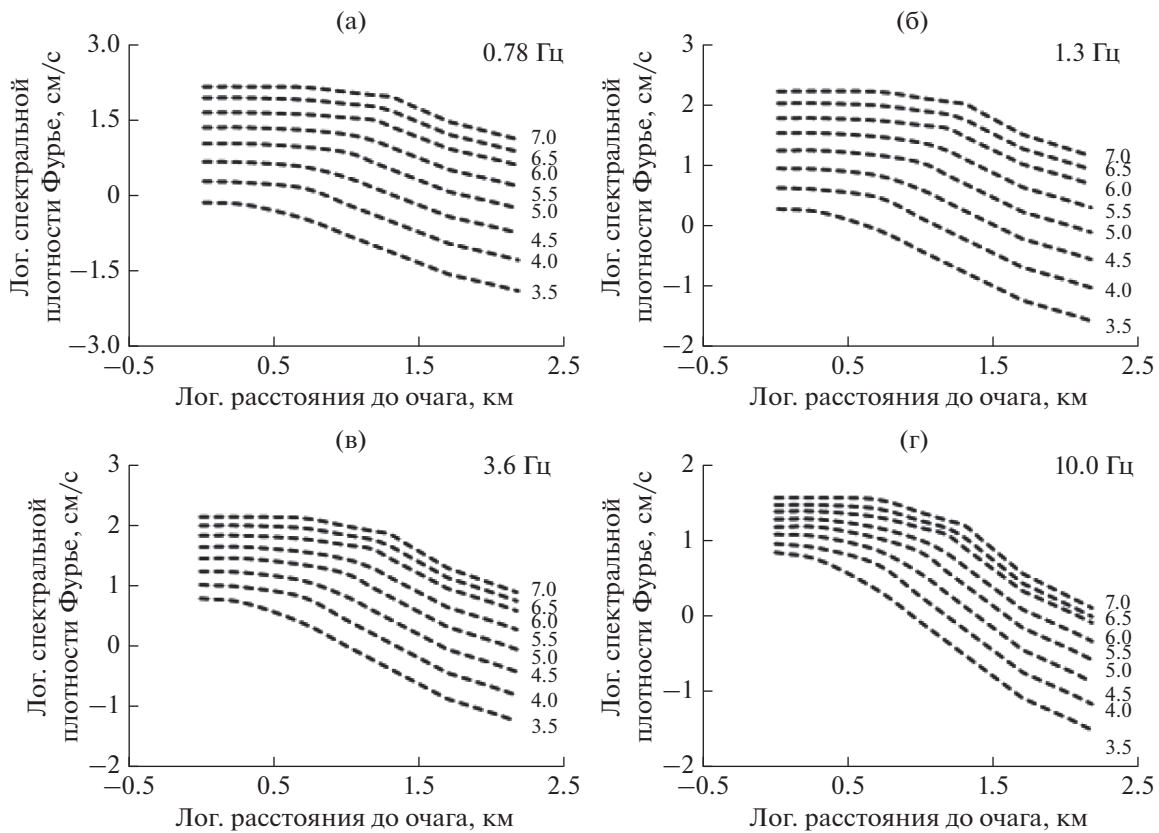


Рис. 4. Примеры итоговых функций затухания $|S|(M, D, f)$ (наиболее вероятные значения), принятые для прогнозирования вероятных спектров при землетрясениях разных магнитуд (цифры около кривых) и удаленностей в исследуемом районе.

клонения $\sigma_{\lg|S|}$ и $\sigma_{\lg SA}$ приняты одинаковыми для всех M , D и f и ≈ 0.30 .

Типичные примеры полученных по описанным выше процедурам итоговых функций $I_T(M, D)$ приведены на рис. 6б и рис. 1б. Стандартные отклонения в этом случае приняты равными $\sigma_I \approx 0.4$ балла

MSK для всех значений M и D . Примеры функции затухания балльности, соответствующей “спектральной” модели, приведены на рис. 1б, рис. 7 и рис. 8. Стандартные отклонения балльности для всех значений M и D принимаются равными ≈ 0.3 балла MSK .

Таблица 3. Наиболее вероятные значения логарифмов пиковых ускорений ($\lg PGA$), длительностей основной фазы ($\lg \tau_{0.3}$, $\lg \tau_{0.5}$), периодов колебательных ускорений с максимальной амплитудой ($\lg T_a$) и макросейсмических интенсивностей (I_C , I_T , I^*) в ближней зоне потенциально опасных для территории РСО-Алания землетрясений разных магнитуд (\bar{M}) и скорость изменения амплитуд с расстоянием в дальней зоне (n_{PGA}). “Средние” грунтовые условия. PGA – в см/с/с; T_a , $\tau_{0.5}$ и $\tau_{0.3}$ – в с; I_C , I_T , I^* – в баллах MSK

\bar{M}	Параметры сейсмических воздействий							
	$\lg PGA$	n_{PGA}	$\lg \tau_{0.5}$	$\lg \tau_{0.3}$	$\lg T_a$	I^*	I_C	I_T
3.0	2.251	-1.69	-0.68	-0.38	-0.97	5.62	5.65	5.40
3.5	2.339	-1.65	-0.52	-0.22	-0.90	6.13	6.20	6.07
4.0	2.427	-1.62	-0.36	-0.06	-0.82	6.65	6.70	6.71
4.5	2.505	-1.59	-0.20	0.10	-0.75	7.28	7.30	7.27
5.0	2.590	-1.56	-0.04	0.26	-0.68	7.76	7.76	7.82
5.5	2.640	-1.53	0.13	0.43	-0.61	8.26	8.25	8.35
6.0	2.690	-1.50	0.29	0.59	-0.54	8.77	8.80	8.88
6.5	2.740	-1.47	0.45	0.75	-0.47	9.29	9.33	9.35
7.0	2.790	-1.44	0.61	0.91	-0.40	9.82	9.80	9.80

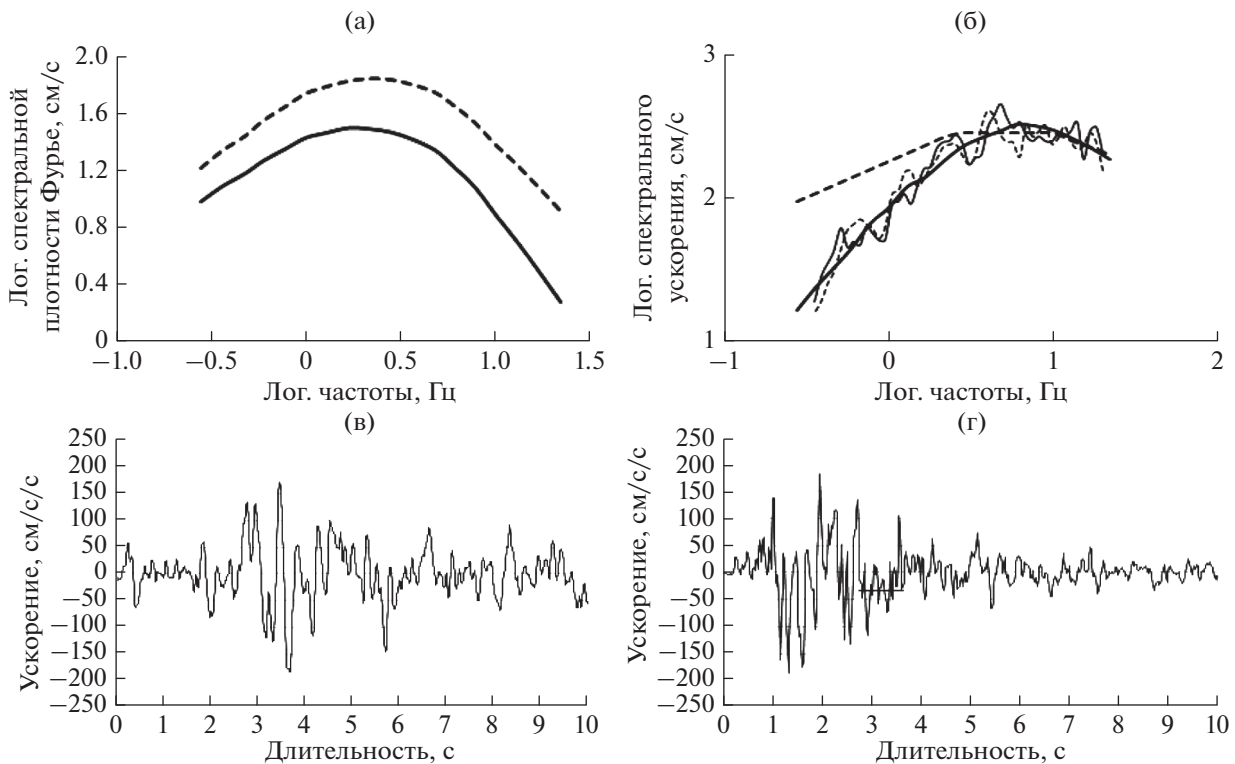


Рис. 5. Примеры моделей СДГ для землетрясения с $M = 6.0$ в ближней зоне и для $D = 15$ км: (а) – наиболее вероятные значения $|S(f)|$ в ближней зоне (пунктир) и при $D = 15$ км (сплошная линия); (б) – толстые сплошная и пунктирная линии – наиболее вероятные значения $SA(f)$ по нашей модели и вытекающая из нормативов [Свод..., 2018а] соответственно; тонкая сплошная линия – спектральные ускорения, рассчитанные по “масштабированной” акселерограмме землетрясения Греции 25.02.1981 г. с $M = 6.1$, $D = 24$ км, $I = 6-7$ баллов MSK (в); тонкий пунктир – то же для “синтетической” акселерограммы (г).

Прогнозные оценки уровней PGA , принятые в качестве итоговых для ближних зон возможных на территории РСО-Алания землетрясений приведены в табл. 3. Так же как в вышеописанном случае спектров, значения $PGA(M)$ из ближней зоны пересчитаны на разные расстояния до очага. Типичные примеры полученных таким образом зависимостей показаны на рис. 6а. Стандартные отклонения значений $\lg PGA$, с учетом результатов предыдущих исследований, приняты одинаковыми и равными 0.25 для землетрясений всех магнитуд и удаленностей.

В табл. 3 приведены также результаты оценок длительностей основной фазы колебаний на уровнях, превышающих 0.3 от максимальных ($\lg \tau_{0.3}$) и периодов колебательных ускорений с максимальной амплитудой ($\lg T_a$). Значения $\lg \tau_{0.3}(M)$ в ближней зоне взяты с учетом рекомендаций работы [Штейнберг и др., 1993]. Скорости возрастания длительности с расстоянием в дальней зоне ($D = 50-150$ км) уточнены (по сравнению с работой [Чернов Ю., Чернов А., 2017]) и приняты равными $n_{\tau_{0.3}} = \Delta \lg \tau_{0.3} / \Delta \lg D = 0.55$. Результирующие графики зависимостей $\tau_{0.3}(M, D)$ приведены на рис. 6в. Длительности колебаний на уровнях, превышаю-

щих 0.5 максимальных ($\tau_{0.5}$), во всех случаях приняты $\approx 0.50 \tau_{0.3}$. Стандартные отклонения величин $\lg \tau_{0.3}(M, D)$ и $\lg \tau_{0.5}(M, D)$ для всех M и D приняты одинаковыми и равными 0.30. Аналогичные построения для моделей $T_a(M, D)$, выполненные с учетом рекомендаций из работ [Чернов Ю., Чернов А., 2017; Штейнберг и др., 1993; Свод..., 2018б], в табличном и графическом виде приведены в табл. 3 и на рис. 6г.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки реалистичности разработанных моделей и степени их пригодности для дальнейшего использования проведено сопоставление получаемых на их основе оценок разных параметров между собой и с результатами сходных исследований других авторов. По нашей терминологии это анализ на “внутреннюю” и “внешнюю” согласованность.

Для проверки согласованности прогнозируемых параметров PGA , T_a и $\tau_{0.3}$ между собой использован модернизированный нами функционал:

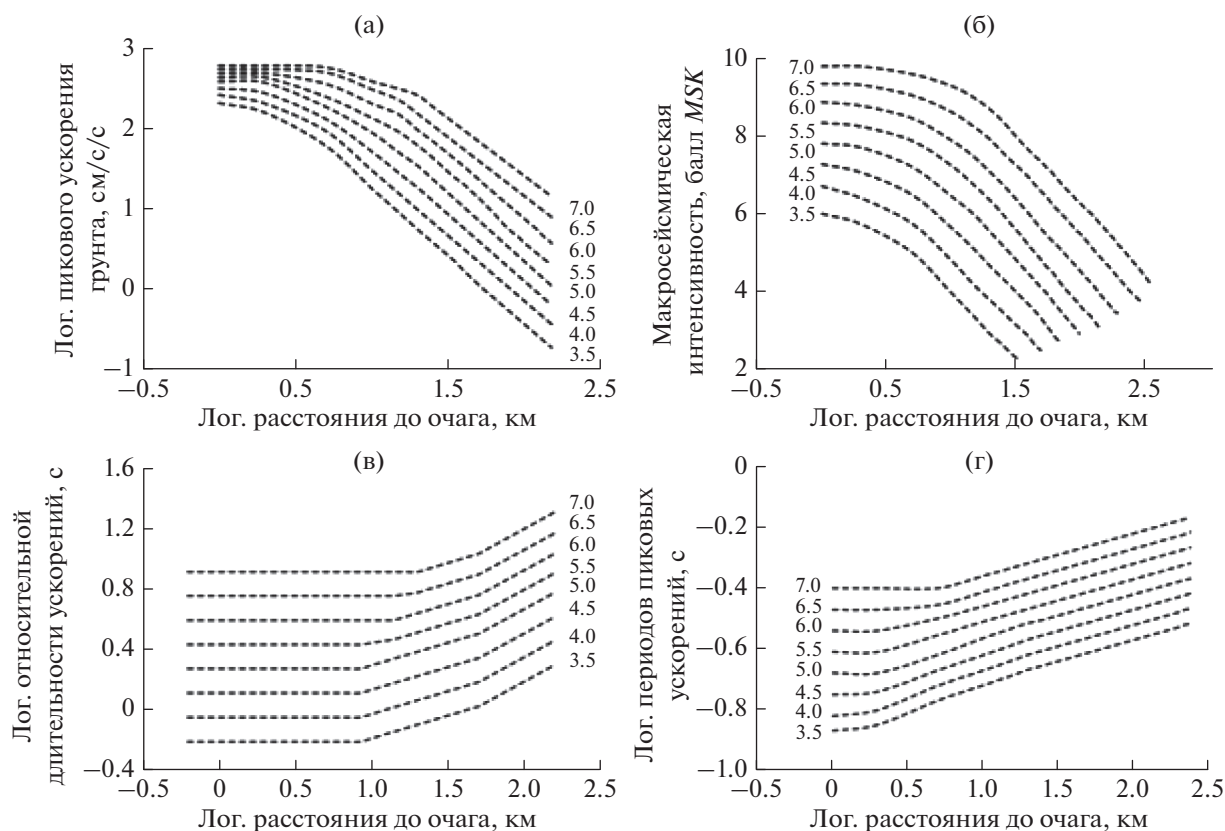


Рис. 6. Наиболее вероятные прогнозные значения PGA (а), I_T (б), $\tau_{0.3}$ (в) и T_a (г) при землетрясениях изучаемого района с различными M и D .

$$I^* = (0.222M + 1.146)\lg PGA + 0.300\lg T_a + 0.450\lg \tau_{0.3} + 2.000, \quad (1)$$

где: M – магнитуда землетрясения; I^* – в баллах MSK ; PGA – в $см/с$; T_a , и $\tau_{0.3}$ – в секундах.

Полученные оценки балльности I^* для ближней зоны даны в табл. 3. Для сравнения в этой же таблице приведены оценки I_T и I_C . Проведено также сопоставление значений I^* , I_T и I_C , рассчитанных для землетрясений различных M и D . На рис. 7а приведены характерные примеры этих сопоставлений.

Высокую степень согласованности прогнозируемых характеристик СДГ показало перекрестное сопоставление рассчитанных по нашим моделям спектров, акселерограмм, традиционных и “спектральных” балльностей между собой и с моделями единичных параметров, что иллюстрируется данными табл. 3 и примерами, приведенными на рис. 5, рис. 7 и рис. 8. Так, зависимости $I_T(M, D)$, с одной стороны, близки к зависимостям $I^*(M, D)$, которые определяются соответствующими значениями PGA , T_a и τ , а с другой – почти совпадают с оценками $I_C(M, D)$, которые, в свою очередь, определяются функциями $|S(M, D, f)|$. Спектры

модельных акселерограмм, например, не противоречат прогнозным оценкам $SA(M, D, f)$. По пиковым амплитудам, периодам и длительностям смоделированные акселерограммы также согласуются с прогнозными значениями.

Тестировать разработанные модели на предмет “внешней согласованности”, в принципе, нет необходимости, так как они по определению являются продуктом обобщения “внешних” оценок (см. рис. 1 и рис. 2). Здесь актуальнее оценить реалистичность “региональной” корректировки “среднестатистических” зависимостей. В этом контексте представляет интерес показанное на рис. 8 хорошее соответствие наших итоговых функций $I_T(M, D)$ и $I_C(M, D)$ данным независимых макросейсмических обследований некоторых сильных и ошутимых землетрясений исследуемого региона – Спитакского, 1988 г. (по данным [Гедаян и др., 1991]), Ахалкалакского, 1899 г. (по данным [Tatevossian et al., 1997]), северокавказских землетрясений с $M \approx 4.5$ (объединенные данные по работам [Рустанович, 1974; Дагестанское..., 1981; Никонов, 1995] и фондам ОИФЗ РАН).

В этом же ключе можно трактовать и результаты сопоставления спектров, построенных по нашим моделям с подобными оценками других авторов.

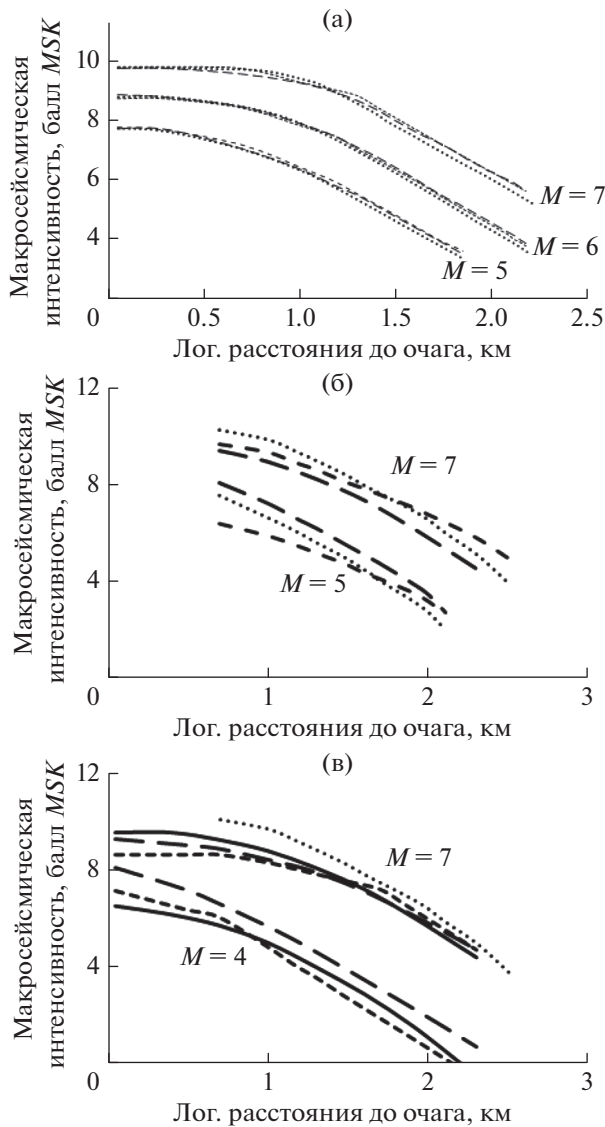


Рис. 7. Сравнение вероятных балльных значений землетрясений разных магнитуд и удаленностей, рассчитанных с использованием: (а) – моделей настоящего исследования, где сплошные, пунктирные и точечные линии – значения I^* , I_T и I_C соответственно; (б) – моделей ОСР, где точечные линии, длинный и короткий пунктиры соответствуют оценкам по зависимостям $I(M, D)$, по функционалу I^{**} и по $MMSK-84$; (в) – норматив для ДСР, где сплошные линии – наши “среднестатистические” модели, точечные линии – то же по моделям ОСР; короткий и длинный пунктир – I^{**} и по $MMSK-84$ соответственно.

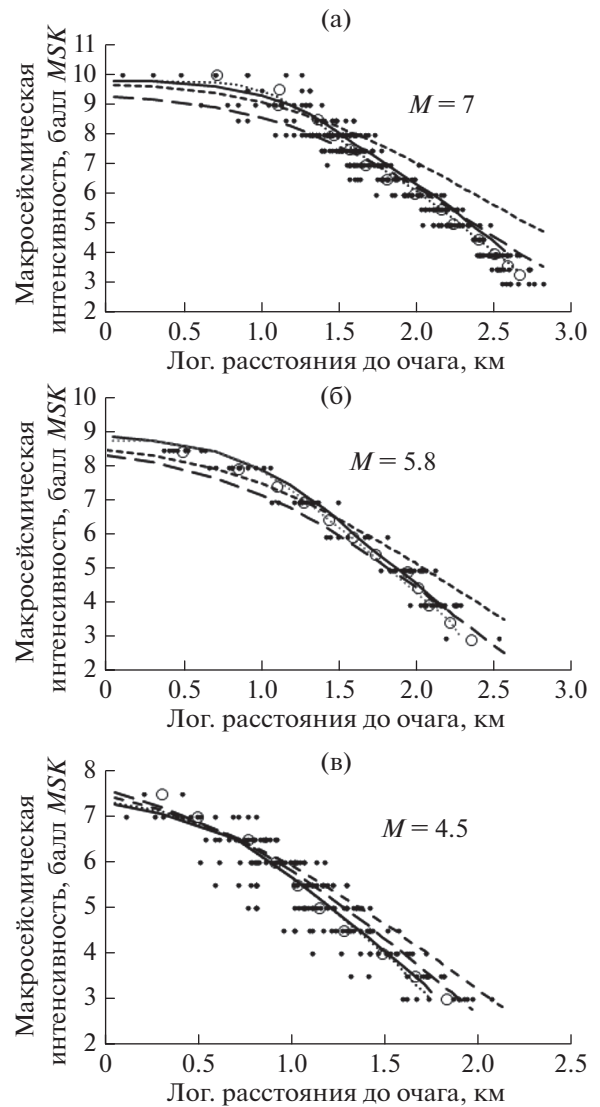


Рис. 8. Сопоставление данных макросейсмических обследований Спитакского, 1988 г. (а), Ахалкалакского, 1899 г. (б) и северокавказских землетрясений с $M \approx 4.5$ (в) с нашими оценками вероятных значений $I(D)$ для землетрясений тех же магнитуд, а также с рекомендациями нормативов. Пустые и залитые кружки – результаты натуральных обследований и их осреднение, сплошные и точечные линии – значения I_T и I_C , длинный и короткий пунктир – оценки, вытекающие из нормативов в работе [Свод..., 2018б] для районов Северного Кавказа и Дагестана соответственно.

Так, например, наши оценки в области частот 0.8–6.0 Гц примерно на 5–20% выше аналогов для землетрясений Приташкентского района, Ферганской долины, Западного Узбекистана и Запада США (см. например, [Чернов, 1989; Campbell, Vozorgnia, 1994; Voore et al., 1994]). Наши спектры также примерно на 10% выше приведенных в работе [Чернов Ю., Чернов А., 2008] аналогичных оценок для взбросо-сдвиговых (этот тип подвижки

распространен в исследуемом районе) землетрясений. По уровням $S(M, f)$ наши оценки приближены к оценкам, полученным для землетрясений района Фриули (север Италии), находящегося в сходных с изучаемой территорией сеймотектонических условиях.

В целом разработанный комплекс моделей сильных движений грунта выглядит в достаточной степени реалистичным, сбалансированным и

обладающим некоторыми элементами консерватизма. Но такая осторожность сейчас представляется уместной. Во-первых, потому, что она, как нам представляется, отражает сейсмогеологические особенности изучаемого района. Вторая причина — уменьшение связанного с упоминавшейся ранее статистической ограниченностью использованных в данной работе региональных записей СДГ риска возможной недооценки уровня сейсмической опасности, последствия которой могут быть значительно тяжелее переоценки. Однако, несмотря на некоторый консерватизм, наши спектры реакции в низкочастотной области (важной для проектирования высоких и гибких сооружений) все же существенно ниже нормативных (см. рис. 5б). Такие расхождения часто наблюдались нами и в других регионах, что может свидетельствовать об их системном характере.

Рассматривая в целом описанные выше перекрестные проверки разработанного комплекса моделей СДГ и, обращая внимание на их объем и особенно на их положительные результаты, можно отметить, что в этом аспекте наше исследование несколько отличается от ряда подобных отечественных работ, где такие процедуры пока не нашли прямого отражения. Это, в частности, относится к моделям СДГ, предназначенным для оценок в рамках ОСР [Комплект..., 1999; Свод..., 2018а] и ДСР [Свод..., 2018б]. Поэтому мы сами попробовали провести тестирование вышеуказанных двух комплексов моделей СДГ на “внутреннюю” и “внешнюю” согласованность. Степень “внутренней” согласованности моделей ОСР можно оценить по рис. 7б, сравнивая разработанные для этих целей зависимости $I(M, D)$ с функционалом $I^{**}(PGA, \tau_{0,5})$, который, судя по первоисточникам (см., например, [Гусев, Шумилина, 1999]), также использовался в процессе этих исследований. Значения $PGA(M, D)$ при этом взяты непосредственно из рекомендаций ОСР, а оценки $\tau_{0,5}(M, D)$ из работы [Свод..., 2018б], так как они близки тем, которые рассматривались при ОСР. “Внешняя” согласованность моделей ОСР может иллюстрироваться сопоставлением вышеуказанных функций затухания $I(M, D)$ из ОСР с зависимостями, рекомендуемыми шкалой $MMSK-84$, где r , также как описано выше, пересчитано в D . Результаты подобных сопоставлений по моделям из нормативов для ДСР приведены на рис. 7в. Для оценки “внутренней” согласованности здесь сопоставлены значения I , рассчитанные по рекомендованному в работе [Свод..., 2018б] функционалу $I^{**}(PGA, \tau_{0,5})$ и по выражению (8.1) данного документа. При этом коэффициенты a , v и c данного выражения приняты такими же, как в шкале $MMSK-84$, а r преобразовано в D . Для иллюстрации “внешней” согласованности на этом же рисунке показаны балльности, рассчитанные по зависимостям $I(M, D)$ из ОСР, а также описан-

ные выше “среднестатистические” оценки. В этой связи интересными также представляются приведенные на рис. 8 сопоставления оценок, выполненных по рекомендациям для ДСР (см. выше) с натурными региональными данными.

В целом результаты проведенного общего и сравнительного анализа свидетельствуют о достаточной обоснованности, реалистичности и надежности разработанных моделей СДГ и, следовательно, об их способности конкурировать с имеющимися альтернативами. Исходя из этого, их можно предложить в качестве одной из альтернативных версий для дальнейшего использования в вероятностном и детерминистском анализе сейсмической опасности территории РСО-Алания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Присущие оценкам сейсмической опасности эпистемические неопределенности в настоящем исследовании учитываются на основе анализа различных вариантов исходных данных, способов их анализа и применяемых расчетных схем. Тем не менее, предлагаемый комплекс моделей СДГ — только одна из возможных версий. При формировании же более полного набора альтернатив могут быть полезными разработки, описанные в работах [Akkar et al., 2014; Boore, Atkinson, 2008; Campbell, Bozorgnia, 2008; Bommer et al., 2010].

Подводя итог выполненным исследованиям, можно заключить следующее:

1. Представленный комплекс вероятностных моделей сильных движений грунта при потенциально опасных для территории РСО-Алания землетрясениях по основным показателям соответствует принятым инженерно-сейсмологическим стандартам, а по некоторым (по критерию “согласованности”, например) может и превышать их.

2. Использование разработанных моделей, учитывающих амплитудные, спектрально-временные, макросейсмические и иные особенности СДГ, характерные для землетрясений региона, будет способствовать повышению качества прогнозируемых здесь уровней сейсмических воздействий, сейсмической опасности и сейсмического риска.

3. Хотя предлагаемые модели относительно полно отражают имеющиеся на сегодняшний день сейсмогеологические данные и общий уровень подобных исследований в стране и за рубежом, они достаточно просто могут “перенастраиваться” для учета поступающей новой информации. Это, с одной стороны, делает их более удобными (по сравнению с некоторыми аналогами) в технологическом отношении, а с другой — свидетельствует о том, что их следует воспринимать как один из фрагментов в общем ряду постоянно

совершенствующихся инженерно-сейсмологических решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьева В.В.* Онтология научной неопределенности. Саратов: Наука. 2008. 108 с.
- Ванмарке Э.Х.* Реакция сооружений на землетрясения. Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра. 1981. С. 256–299.
- Гедакян Э.Г., Голинский Г.А., Папалишвили В.Г., Хромецкая Е.А., Шебалин Н.В.* Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г., карты изосейст. Землетрясения в СССР в 1988 году. М. 1991. С. 74–84.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. № 4–5. 1999. С. 29–40.
- Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Разрушительные последствия. Инженерная сейсмология. Вопросы сейсмостойкого строительства. М.: Наука. 1981. 265 с.
- 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 РАН, Объединенный Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М. 1999. 57 с.
- Никонов А.А.* Каталог ощутимых землетрясений Ставропольского края. Объединенный институт физики Земли РАН. 1995. 16 с.
- Оскорбин Л.С., Бобков А.О.* Макросейсмическое проявление землетрясений на территории южной части Дальнего Востока. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения тихоого океана с Евразией. Т. VI “Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона”. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. 1977. С. 45–74.
- Рустанович Д.Н.* Колебания поверхности земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений. М.: Наука. 1974. 97 с.
- Салганик М.П.* О моделировании сейсмических воздействий на строительные сооружения // Вопросы инженерной сейсмологии. 1987. Вып. 28. М.: Наука. С. 157–173
- Свод правил СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. СНиП II 7-81* М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. М. 2018а. 126 с.
- Свод правил. СП 408.1325800.2018. Детальное сейсмическое районирование и сейсмомикрорайонирование для территориального планирования. Издание официальное. М. 2018б. 31 с.
- Соколов В.Ю.* Спектры ускорений колебаний грунта при землетрясениях на Кавказе // Физика Земли. № 8. 1998. С. 56–69.
- 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.
- Чернов Ю.К.* Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. Ташкент: изд-во “ФАН”. 1989. 295 с.
- Чернов Ю.К.* Опыт уточнения сейсмической опасности отдельных территорий в Ставропольском крае с учетом новых требований СНиП и мировой практики // Инженерная геология. 2006. Вып. 1. С. 23–35.
- Чернов А.Ю.* Северо-Кавказская 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, Днепрпетровск. 2011. С. 60–61.
- Чернов Ю.К.* Реконструкция вероятных спектров колебаний грунта при сильных землетрясениях Северного Кавказа по их макросейсмическому полю. Геолого-геофизические исследования глубинного строения Кавказа: геология и геофизика Кавказа: современные вызовы и методы исследований / В.Б. Заалишвили. Владикавказ: ГФИ ВЦ РАН. 2017. С. 251–257.
- 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.
- 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.
- Шебалин Н.В.* Оценка размеров и положения очага Спитакского землетрясения по макросейсмическим данным // Вопросы инженерной сейсмологии. 1991. Вып. 32. М.: Наука. С. 36–44.
- Штейнберг В.В., Сакс М.В., Антикаев Ф.Ф. и др.* Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. М.: Наука. 1993. С. 5–94.
- Abrahamson N.A.* State of the practice of seismic hazard evaluation // GeoEng. 2000. V. 1. P. 659–685.
- 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). P. 359–387. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9461-4>
- Ambraseys N.N., Bommer J.J.* The attenuation of ground accelerations in Europe // Earthquake Eng. Struct. Dyn., 20, 1991. P. 1179–1202.
- 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. P. 94–127.
- Boore DM, Atkinson GM.* 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). P. 99–138.
- Bora S.S., Cotton F., Scherbaum F.* NGA-West2 Empirical Fourier and Duration Models to Generate Adjustable Response

- Spectra // Earthquake Spectra. 2018. № 35(1). P. 61–93. <https://doi.org/10.1193/110317EQS228M>
- Budnitz R.J., Apostolakis G., Boore D.M., Cluff L.S., Copper-smith K.J., Cornell C.A., Morris P.A.* Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of experts // U.S. Nuclear Regulatory Commission Report NUREG/CR-6372. 1997. 256 p.
- 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. V. III. P. 283–292.
- 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). P. 139–171. <https://doi.org/10.1193/1.2857546>
- Danciu L., Kale O., Akkar S.* The 2014 earthquake model of the Middle East: ground motion model and uncertainties // Bulletin of Earthquake Engineering. 2016. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9989-1>
- Delavaud E., Cotton F., Scherbaum F. et al.* Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe // J Seismol. 2012. V. 16. P. 451–473. <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9281-z>
- Douglas J.* Consistency of ground-motion prediction from the past four decades // Bull. Earthq. Engineering. 2010. V. 8(6). P. 1515–1526. <https://doi.org/10.1007/a10518-010-9195-5>
- Douglas Jh.* Ground motion prediction equations 1964–2016. 2016. <http://www.gmpe.org.uk>
- 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. V. 42. № 6. P. 1057–1065.
- Sokolov V., Sahran H.M.* Generation of stochastic earthquake ground motion in western Saudi Arabia as first step development of regional ground motion prediction model // Arabian Journal of Geosciences. 2018. 11638. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3394-9>
- Sokolov V.Yu.* Macroseismic intensity as a Fourier amplitude spectra: a tool to evaluate the regional and local peculiarities of the intensity distribution. Proc. XXII General assembly of European seismological commission (ESC). Lisbon, Portugal. 10–15 September 2000. P. 373–377.
- The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992–1999. Summary Volume // Annali di Geofisica. 1999. V. 42. № 6. 1232 p.
- Zaalishvili V., 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. V. 12. P. 309–318. <https://doi.org/10.2174/1874836801812010309>
- Tatevossian R.E., Albini 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. P. 383–400.

Strong Ground Motion Simulation for Forecasting the Probable Seismic Impacts in the Territory of the Republic of North Ossetia–Alania

Yu. K. Chernov^{a, *, **}, V. B. Zaalishvili^{a, ***}, and A. Yu. Chernov^b

^aGeophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, 362002 Russia

^bInstitute of Construction, North-Caucasian Federal University, Stavropol, 355029 Russia

*e-mail: cgi_ras@mail.ru

**e-mail: chenta-26@mail.ru

***e-mail: vzaal@mail.ru

The models based on the empirical data are proposed for probabilistic forecasting the characteristics of strong ground motions (SGM) from the earthquakes, potentially dangerous for the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. We consider the models of SGM characteristics that are most important in the engineering practice (macroseismic intensities of ground shaking, peak ground accelerations, periods, durations, spectra, and strong-motion accelerograms) in the vicinity of the sources of earthquakes of different magnitudes and at different distances from the sources in application to the seismogeological conditions of the study region. The models are developed using both the conventional statistical analysis of a large amount of data on instrumental recording and macroseismic description of the strong and perceivable earthquakes in the Caucasus and other seismically active regions of the world and a new method for reconstructing the spectra of the strong earthquakes from their macroseismic field. The cross-comparison of the estimates obtained based on the proposed models with each other and with the estimates obtained by the other authors has shown that they are fairly realistic and reliable.

Keywords: earthquakes, strong motion, near and far zones, seismic hazard, macroseismic intensity, Republic of North Ossetia–Alania