

УДК 550.347

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УРАВНЕНИЕ ПРОГНОЗА ПИКОВЫХ УСКОРЕНИЙ, СКОРОСТЕЙ И СПЕКТРОВ РЕАКЦИИ В УРАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

© 2025 г. В. А. Павленко^{1,*}, О. В. Павленко^{1,**}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, г. Москва, Россия

*E-mail: pavlenko.vasily@gmail.com

**E-mail: olga@ifz.ru

Поступила в редакцию 29.01.2024 г.

После доработки 01.08.2024 г.

Принята к публикации 01.08.2024 г.

На основе стохастического моделирования записей местных землетрясений уточнены характеристики излучения и распространения сейсмических волн в Уральском регионе; они соответствуют переходным от областей стабильной континентальной сейсмичности к сейсмически активным регионам с коровой сейсмичностью. Построено уравнение прогноза движений грунта (УПДГ) для Уральского региона, описывающее зависимость пиковых ускорений (PGA), пиковых скоростей (PGV) и амплитуд спектра реакции (SA) на скальном грунте от магнитуды и расстояния. УПДГ применимо в широком диапазоне магнитуд ($M_w \sim 4\text{--}6.5$) и расстояний (1–250 км) и может использоваться для оценки сейсмической опасности при проектировании и строительстве сейсмостойких сооружений в Уральском регионе. Для учета эпистемической неопределенности оценок сейсмических воздействий в вероятностном анализе сейсмической опасности и построения логического дерева подобраны пять альтернативных современных УПДГ из других регионов: глобальная модель для коровой сейсмичности, две модели, разработанные для горных областей Швейцарских и Французских Альп, две модели для регионов стабильной континентальной сейсмичности — восточной части Северной Америки и территории Великобритании. Модели протестированы на массиве синтетических параметров колебаний поверхности; наиболее близким к разработанному УПДГ для Урала оказалось уравнение для Швейцарских Альп.

Ключевые слова: уравнения прогноза движений грунта, записи местных землетрясений, стохастическое моделирование, характеристики излучения и распространения сейсмических волн, анализ сейсмической опасности.

DOI: 10.31857/S0002333725030136, **EDN:** FFXFTN

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе изучаются параметры сейсмических воздействий на Урале — геодинамически активном регионе, где продолжаются тектонические процессы, о чем свидетельствуют регулярно происходящие землетрясения. Уральские горы являются частью Урало-Монгольского складчатого геосинклинального пояса, где на поверхность выходят деформированные и метаморфизованные горные породы преимущественно палеозойского возраста. Толщи

осадочных и вулканических пород сильно смяты, нарушены разрывами и в целом образуют меридиональные полосы, обуславливающие линейность и зональность структур Урала. Можно предположить, что причиной повышения тектонической активности Урала могла быть деформация и разрушение земной коры в результате взаимодействия (столкновения) Русской плиты Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и Западно-Сибирской плиты (ЗСП) [Гуляев, 2022]. Вдоль Уральских гор проходит крупный

геологический разлом — Главный Уральский глубинный разлом.

Наибольшая концентрация эпицентров землетрясений наблюдается в пределах Среднего Урала и примыкающих к нему частях Северного и Южного Урала от 55° с.ш. до 60° с.ш.; это скопление эпицентров образует Среднеуральскую область повышенной сейсмичности. Очаги располагаются, как правило, на глубинах от 3–5 до 10–15 км преимущественно в жестких породах фундамента. Возможно, эта Среднеуральская линеamentная зона отражает наличие в литосфере крупной флесурно-разрывной зоны, представляющей собой крупный сдвиг. Эта структура просматривается также в морфологии поверхности ранне-архейского фундамента и основных физических полей [Сейсмичность ..., 2001].

На картах сейсмического районирования территории РФ (ОСР-2015) практически весь Средний Урал отнесен к районам потенциально возможных 6–8-балльных сотрясений по международной шкале MSK-64. Сводный каталог сейсмических событий Урала [Сейсмичность..., 2001] содержит сведения о событиях за период с 1693 по 2000 гг. с магнитудами $M_s \sim 1.7$ –5.5. Распределение эпицентров уральских землетрясений показывает, что практически все землетрясения приурочены к разрывным тектоническим нарушениям [Тектоническая карта..., 1986], причем наиболее сильные из них связаны с надвигами [Дружинин и др., 2004].

04.09.2018 г. в Катав-Ивановском районе Челябинской области произошло Катав-Ивановское землетрясение, которое стало самым сильным инструментально зафиксированным сейсмическим событием на Урале $M_s \sim 4.5$ ($M_w \sim 5.0$); оно сопровождалось афтершоками, продолжавшимися более одного года [Дягилев и др., 2020].

Очаг Катав-Ивановского землетрясения расположен в зоне рассеянной сейсмичности, согласно нормативным картам ОСР-2015 — домене D.0184, с максимально возможной магнитудой $M_s \sim 5.0$, с периодом повторяемости ~250 лет в пределах домена.

Землетрясения с магнитудами $M_s \sim 4.0$ –4.5 ($M_w \sim 4.63$ –5.0), близкими к магнитуде Катав-Ивановского землетрясения, происходили в Уральском регионе и в прошлом: это, напри-

мер, Пермь-Кунгурское землетрясение 1798 г. ($M_L \sim 4.7$), землетрясения 12.12.1836 г. (район Златоуста–Кыштыма), 11.09.1841 г. (Нижний Тагил и окрестности), 27.04.1847 г. (бассейн реки Серебрянка, Кушвинский, Верхнетуринский, Нижнетуринский и Бисертский районы), 10.07.1892 г. (Косулино, Верхнее Дуброво, Сысерть), Билимбаевское землетрясение 1914 г. ($M_L \sim 5$), землетрясения 28.07.1956 г. (Пермь, Кунгур, район Лысьвы), 03.09.1958 г. (Кунгур, Красноуфимск), 21.02.1970 г. (поселок Павда), Средне-Уральское землетрясение 18.10.2015 г. ($M_L \sim 4.7$) [Годзиковская, 2016; Верховланцев и др., 2021].

Уральский регион активно развивается в последние десятилетия, здесь расположены крупные города и промышленные центры, такие как Екатеринбург, Челябинск, Нижний Тагил. В этих городах строятся высотные здания, объекты атомной промышленности, что обуславливает необходимость построения надежных и корректных оценок сейсмической опасности в регионе.

Региональные параметры излучения и распространения сейсмических волн являются входными параметрами программ расчета синтезированных акселерограмм максимальных возможных землетрясений в регионе, по которым можно оценить требуемые в сейсмостойком строительстве параметры сейсмических движений поверхности: пиковые ускорения, пиковые скорости, спектры реакции, длительность сильных движений и т.д. Такой подход эффективен в рамках детерминированного анализа сейсмической опасности [Kramer, 1996], когда предметом анализа является ограниченный набор наиболее опасных сценарных землетрясений.

В вероятностном анализе сейсмической опасности (ВАСО) в расчетах учитываются вклады всех возможных сценарных землетрясений в некоторой достаточно большой окрестности объекта [Cornell, 1968], и набор сценарных землетрясений многократно возрастает, что делает подход на основе построения синтетических акселерограмм малопригодным. Поэтому за редким исключением (см., например, работы [Costa et al., 1993; Orozova, Suhadolc, 1999]) для оценки сейсмических воздействий при выполнении ВАСО применяются так называемые уравнения прогноза движений грунта (УПДГ) — эмпириче-

ские модели, позволяющие оценивать амплитуды сейсмических воздействий на поверхности в зависимости от магнитуды, расстояния от очага, локальных условий в точке наблюдения. Эти модели основываются на современных представлениях инженерной сейсмологии об эффектах очага, эффектах пути распространения и локальных эффектах, определяющих сейсмические воздействия.

УПДГ имеют принципиальное значение для анализа сейсмической опасности. Они применяются для оценки сейсмических воздействий в наиболее сейсмоактивных регионах мира: в западной части Северной и Южной Америки, в Северной Африке, Гималаях, Италии, Турции и Японии. Созданию новых и совершенствованию существующих УПДГ уделяется большое внимание. Регулярно обновляется список уже опубликованных моделей [Douglas, 2022], насчитывающий сотни УПДГ для разных регионов мира.

Эти уравнения обычно создаются методами регрессии на основе сформировавшейся региональной базы данных по сильным движениям. В тех случаях, когда объема накопленной базы данных оказывается недостаточно для создания регионального УПДГ, для оценки сейсмических воздействий могут быть заимствованы УПДГ из регионов со сходными сеймотектоническими свойствами.

В наших прошлых работах по изучению параметров сейсмических воздействий в Уральском регионе [Павленко, 2022] на основе записей Катав-Ивановского землетрясения и его афтершоков были получены предварительные оценки характеристик излучения и распространения сейсмических волн в регионе; получено, что они соответствуют характеристикам, переходным от областей стабильной континентальной сейсмичности к сейсмически активным регионам с коровой сейсмичностью. Также был определен набор УПДГ, рекомендуемых проектом GEM (<https://www.globalquakemodel.org/>) для Уральского региона, и оценки этих уравнений сопоставлялись со спектром реакции Катав-Ивановского землетрясения. Оказалось, что УПДГ, рекомендованные проектом GEM, завышают оценки амплитуд спектра реакции на высоких частотах и поэтому не подходят для Урала.

В настоящей работе методами стохастического моделирования акселерограмм местных зем-

летрясений уточнены характеристики излучения и распространения сейсмических волн в Уральском регионе. Уточненные параметры позволили создать набор синтетических акселерограмм колебаний поверхности в широком диапазоне магнитуд и расстояний от очага, на основе которого построено УПДГ для Уральского региона. Кроме того, для учета эпистемической неопределенности параметров движений грунта в ВАСО [Budnitz et al., 1997] были выбраны и протестированы пять альтернативных УПДГ. Этот набор уравнений можно использовать для построения логического дерева при выполнении ВАСО для Урала.

МЕТОД И ДАННЫЕ

Регистрация землетрясений на Урале ведется сейсмостанцией Арти (ARU) с 1971 г.; с 1988 г. станция входит в глобальную сейсмическую сеть IRIS/IDA (международная сеть акселерометров) и ведет цифровую регистрацию. Сейсмостанция ARU входит в состав геофизической лаборатории-обсерватории “Арти”, расположенной на окраине поселка Арти, в ~50 км от г. Красноуфимска и в ~140 км от г. Екатеринбурга.

Это восточная часть Предуральского краевого прогиба, район с относительно простым геологическим строением. С поверхности закартированы терригенные отложения нижнепермского возраста: чередование плитчатых песчаников и аргиллитов с линзами и прослоями известняков и конгломератов. Отложения перекрыты маломощным (1–3 м) чехлом четвертичных деллювиальных и эллювиальных-деллювиальных образований. Регистрирующие приборы на станции ARU установлены в подземном приборном сооружении на бетонном постаменте на глубине около 6 м от поверхности, поэтому предполагаем, что станция установлена на скальном грунте. Нижняя граница земной коры по данным ГСЗ и магнитотеллурического зондирования в районе Арти залегает на глубине 46–47 км.

Для анализа из базы данных IRIS/IDA получена выборка записей (велосиграмм) землетрясений Уральского региона, с 1990-х годов по настоящее время. На рис. 1 показаны эпицентры, а в табл. 1 приведен каталог этих землетрясений. Магнитуды m_b и M_l , приведенные на сайте IRIS, переведены в моментные магнитуды M_w по среднемировым формулам [Гусев, Мельникова, 1990].

Записи местных землетрясений являются ценным материалом — основой для оценки региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн, т.е. параметров, описывающих особенности излучения (эффекты очагов) и распространения (эффекты пути распространения) сейсмических волн в регионе, а также параметров, описывающих локальные эффекты вблизи источников и приемников.

Параметры излучения и распространения сейсмических волн оцениваются методами решения обратных задач, т.е. моделированием записей зарегистрированных местных землетрясений и подбором параметров, дающих наилучшее соответствие зарегистрированных (т.е. пересчитанных из велосигналов) и смоделированных акселерограмм. Относительно простой, но эффективный стохастический подход, предложенный и развитый Дэвидом Буром [Boore, 2003], основан на представлениях, подтверждаемых наблюдениями, что акселерограммы в окнах вступлений S -волн представляют собой ограниченный по спектру Гауссовский белый шум (ограничения определяются граничной частотой спектра f_0 и наивысшей частотой $f_{\max}$, определяемой регистрирующим прибором, или затуханием в земной коре) [Hanks, McGuire, 1981]. Практика показывает, что, используя стохастический подход, можно с хорошей точностью моделировать сильные движения по записям слабых. Стохастический метод успешно применялся для расчетов параметров колебаний при землетрясениях с сейсмическими моментами в диапазоне более 12 порядков в различных тектонических условиях [Boore, 2003].

При расчете акселерограмм интенсивность и продолжительность колебаний задаются в зависимости от магнитуды землетрясения и расстояния до источника. В настоящей работе моделируются записи достаточно слабых и удаленных землетрясений, поэтому сейсмический источник предполагается точечным.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Уточнение характеристик излучения и распространения сейсмических волн

Записи землетрясений моделировались стохастическим методом [Boore, 2003] с использованием полученных в прошлых работах [Павленко, 2022] параметров излучения и распространения

сейсмических волн для Уральского региона; в ходе моделирования параметры уточнялись. Уже первые результаты моделирования показали, что большинство записей каталога очевидно относятся не к землетрясениям, а к горным ударам: об этом свидетельствует достаточно низкий уровень ускорений зарегистрированных акселерограмм, который оказывается в 5–10 раз ниже, чем у модельных акселерограмм. Как известно, сброс напряжений при таких сейсмических событиях — горных ударах и техногенной сейсмичности — существенно ниже, чем обычно наблюдается при естественной сейсмичности [Еманов и др., 2019]. В табл. 2 приведен каталог сейсмических событий, которые были идентифицированы как землетрясения с пиковыми ускорениями и оцененной длительностью сильных движений.

Координаты и глубины очагов и магнитуды землетрясений, полученные по записям станций IRIS, отличаются от данных региональных каталогов ФИЦ ЕГС РАН. В табл. 3 приведены эти параметры для событий из табл. 1, о которых приводятся сведения на сайте ФИЦ ЕГС РАН. В последней колонке табл. 3 показана природа событий по данным ЕГС РАН. Пустые ячейки соответствуют пустым ячейкам региональных каталогов.

По результатам стохастического моделирования были уточнены региональные характеристики излучения и распространения сейсмических волн Уральского региона.

В моделировании использованы ранее полученные данные о частотно-зависимом локальном усилении сейсмических волн в верхних слоях земной коры. Для оценки локального усиления сейсмических волн в окрестностях станции ARU (табл. 4) был использован скоростной разрез земной коры до глубин ~50 км по центральной части Свердловского профиля (рис. 2), полученный методами глубинного сейсмического зондирования [Дружинин и др., 1976; Глубинное строение..., 1985].

Как известно, усиление сейсмических волн возникает вследствие снижения сейсмических скоростей и плотностей в земной коре при распространении сейсмических волн с глубины к поверхности. Усиление $A(f)$ рассчитано по методике, предложенной в работе [Boore, Joyner, 1997].

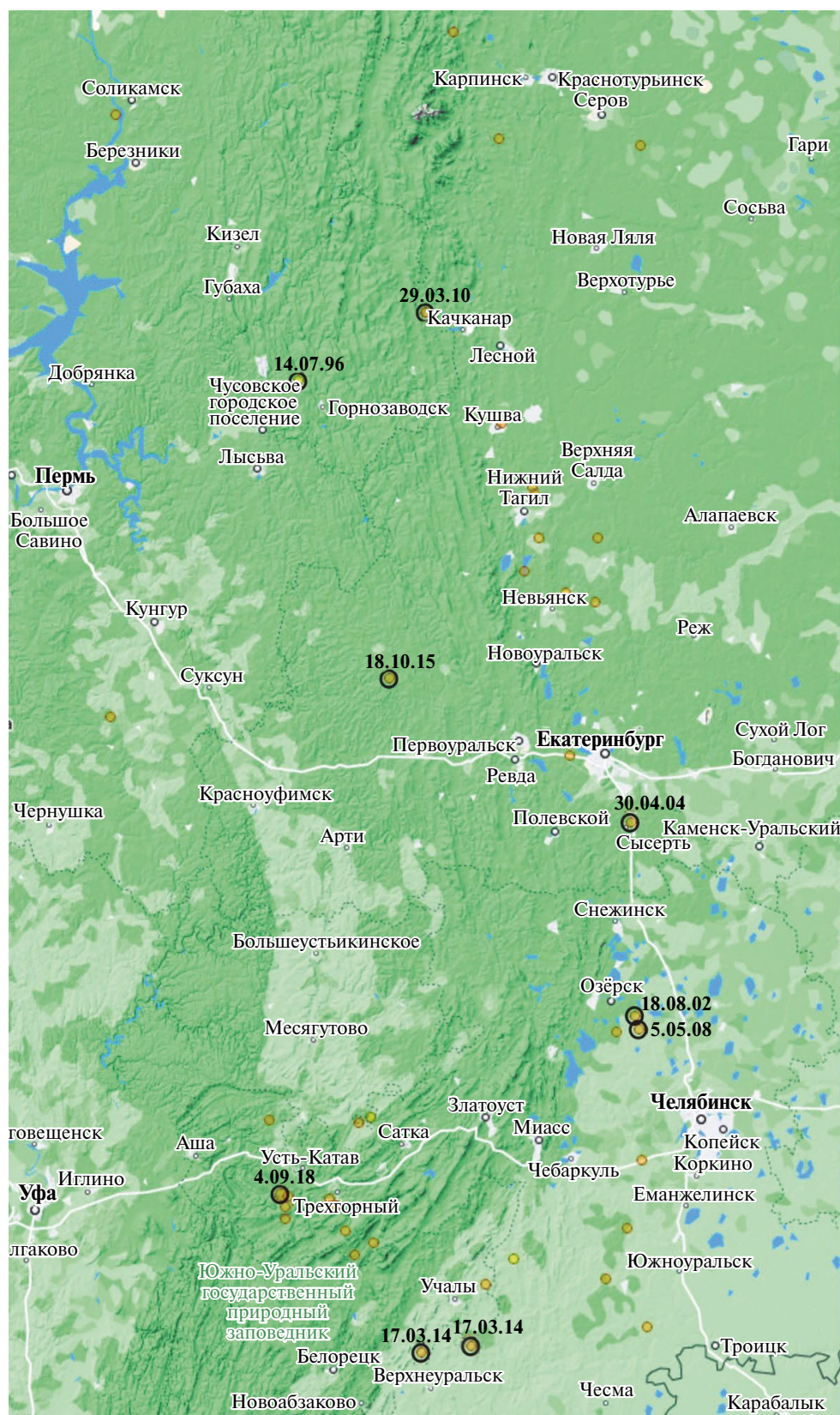


Рис. 1. Карта эпицентров местных землетрясений Уральского региона, по записям которых изучены региональные характеристики излучения и распространения сейсмических волн. Эпицентры землетрясений и горных ударов, сведения о которых приведены в табл. 1, показаны желтыми кружками. Очаги идентифицированных землетрясений обведены черными кружками, и для них приведена дата события.

Таблица 1. Каталог сейсмических событий, зарегистрированных сейсмостанцией ARU (56.4302° с.ш., 58.5625° в.д. до 08.09.2018 г.), ARTI (56.3879° с.ш., 58.3849° в.д. с 08.09.2018 г.) в период с 1990-х годов по настоящее время

	Дата	Широта, °	Долгота, °	h , км	$m_b(M_w)$	r_h , км
1	04.09.2018	54.8088	57.9818	10	(5.0)	177.5
2	28.05.1990	55.1451	58.6259	10	4.5(4.66)	137.9
3	28.05.1990	55.1695	58.7173	33	4.5(4.66)	139.1
4	07.06.2022	54.4047	60.6501	10	4.5(4.66)	256.2
5	15.11.2018	54.803	58.0397	10.0	4.4(4.6)	171.2
6	29.09.2018	54.7481	58.0138	10.0	4.4(4.6)	177.2
7	05.09.2018	54.6923	58.0189	10.0	4.2(4.4)	189.3
8	18.10.2015	57.1839	58.8706	15.36	4.2(4.4)	84.2
9	26.01.2014	57.9947	60.0716	3.7	3.7(4.0)	177.1
10	22.12.2013	57.965	59.9027	1.8	3.6(3.92)	192.0
11	25.10.2006	56.8357	60.3549	31.1	3.6(3.92)	122.1
12	29.03.2010	58.7769	59.1708	7.5	3.6(3.92)	253.6
13	29.09.2013	58.0245	60.0526	10.8	3.5(3.85)	202.2
14	30.09.2011	55.5691	60.7395	0	3.5(3.85)	164.0
15	02.10.2006	54.6368	58.5078	0	3.4(3.78)	191.8
16	06.08.2006	57.5604	60.3273	0	3.4(3.78)	164.5
17	02.07.2006	57.8024	60.5901	0	3.4(3.78)	191.3
18	17.03.2014	54.0509	59.1368	0	3.4(3.78)	257.1
19	24.08.2012	54.1749	60.9928	0	3.4(3.78)	286.3
20	07.07.2004	54.5	59.9	33.0	3.4(3.78)	225.5
21	14.07.1996	58.4858	58.1295	33.0	M13.4(3.83)	223.8
22	27.03.2012	54.9724	60.9562	0	3.3(3.71)	216.6
23	07.07.2004	54.7565	58.4347	10	3.3(3.71)	179.5
24	02.10.2006	54.5208	58.5916	0	3.2(3.64)	204.2
25	17.03.2014	54.0841	59.5485	0	3.2(3.64)	258.6
26	03.09.2011	54.6497	60.8322	0	3.2(3.64)	238.2
27	16.12.2008	57.0124	56.5826	0	3.1(3.57)	136.1
28	03.10.2006	54.5756	58.7461	0	3.1(3.57)	198.7
29	05.05.2008	55.5824	60.9329	0	3.0(3.5)	173.3
30	04.07.2006	54.7853	58.3791	10	3.0(3.5)	176.6
31	15.01.2006	57.6568	59.9881	0	3.0(3.5)	157.1
32	18.08.2002	55.644	60.902	10	3.0(3.5)	168.5
33	04.11.2005	57.5189	60.5675	0	mpv3.2	168.5
34	19.01.2015	58.3026	59.7945	0	M13(3.6)	213.5
35	05.06.2005	57.8045	60.1017	0	mpv3	174.0
36	30.04.2004	56.5369	60.861	17.1	mpv3	142.9
37	29.01.2004	55.1616	57.884	27.3	mpv3	144.8

Таблица 2. Каталог местных землетрясений Уральского региона, зарегистрированных сейсмостанцией ARU (до 08.09.2018 г.) и ARTI (с 08.09.2018 г.)

	Дата	Широта, °	Долгота, °	h , км	$m_b(M_w)$	r_h , км	Dur., s	PGA, см/с ²	
1	18.10.2015	57.184	58.871	15.36	4.2(4.4)	84.2	4.25	1.15	0.68
2	30.04.2004	56.537	60.861	17.1	mpv3	142.9	5.5	0.01	0.006
3	18.08.2002	55.644	60.902	10	3.0(3.5)	168.5	4.7	0.044	0.06
4	05.05.2008	55.582	60.933	0	3.0(3.5)	173.3	5.1	0.016	0.031
5	04.09.2018	54.809	57.982	10	(5.0)	177.5	13.	0.45	0.41
6	14.07.1996	58.486	58.130	33.0	M13.4(3.8)	223.8	5.4	0.073	0.075
7	29.03.2010	58.777	59.171	7.5	3.6(3.92)	253.6	6.4	0.039	0.047
8	17.03.2014	54.051	59.137	0	3.4(3.78)	257.1	8.1	0.006	0.007
9	17.03.2014	54.084	59.549	0	3.2(3.64)	258.6	11.7	0.002	0.002

Таблица 3. Каталог землетрясений Уральского региона по данным ФИЦ ЕГС РАН

	Дата	Широта, °	Долгота, °	h , км	$M_L \approx M_w$	r_h , км	Событие
1	18.10.2015	57.12	59.05	12	4.4	80.5	землетрясение
2	07.07.2004	55.19	58.79	22	2.2	135.2	возм. землетрясение
3	05.09.2018	54.9	57.97	10	3.6	168.1	
4	02.10.2006	54.84	57.85		3.3	175.9	
5	15.11.2018	54.74	58.12	8	3.9	177.2	
6	04.07.2006	54.773	58.208	3	2.8	178.6	
7	04.09.2018	54.766	58.152	5.9	5.0	179.9	землетрясение
8	26.01.2014	57.97	59.86	1	2.9	182.4	ГТУ
9	02.10.2006	54.7	58.2		2.6	186.4	
10	29.09.2013	57.96	59.89		2.0	191.1	ГТУ
11	29.09.2018	54.31	57.95	10	4.2	224.1	
12	07.07.2004	54.5	59.9	33	1.7	225.5	возм. землетрясение
13	17.03.2014	54.18	59.0	5	3.1	242.3	
14	29.03.2010	58.86	59.16	21	3.9	263.1	землетрясение

Оценки добротности среды распространения сейсмических волн получены методом огибающих [Aki, Chouet, 1975]; авторы с использованием модели однократного рассеяния получили выражение для спадающих со временем спектральных амплитуд кода-волн $A(\omega|t)$ в диапазоне частот Δf :

$$\ln(A(\omega|t) \cdot t) = C - bt, \quad (1)$$

где C — константа, зависящая от очагового спектра; $b = \pi f / Q_c$. Отфильтровав велосигramмы

полосовым фильтром в окрестностях каждой из исследуемых частот и построив линейную регрессию (1) по огибающим амплитуд кода-волн, находим угловые коэффициенты b и получаем оценки добротности $Q_c(f)$. Оценки добротности получены для эпицентральных расстояний ~80–250 км; они оказались близки к оценкам добротности на Камчатке и в Байкальской рифтовой зоне [Pavlenko, 2013; Павленко, Тубанов, 2017; Павленко, 2020], они также согласуются с оценками добротности литосферы в Уральском

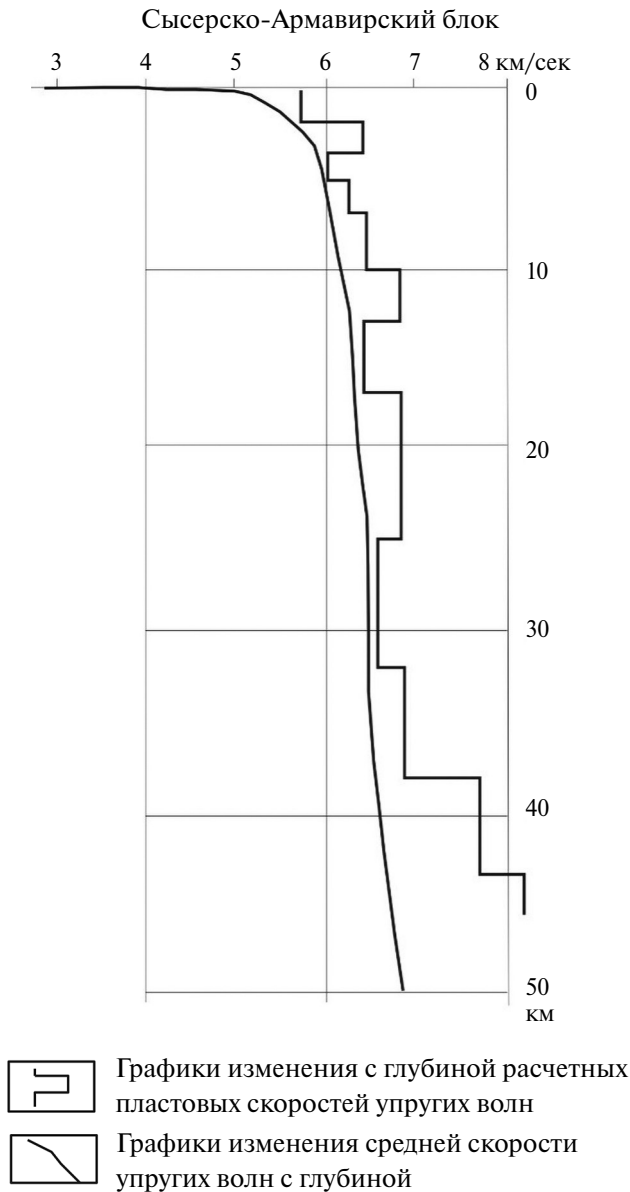


Рис. 2. Скоростной разрез земной коры по центральной части Свердловского профиля, полученный методами глубинного сейсмического зондирования (по работе [Дружинин и др., 1976; Глубинное строение..., 1985]).

регионе для S -волн $Q_s = 187 \cdot f^{0.72}$, полученными в работе [Дягилев, Скоркина, 2012] по записанным парами станций взрывам, лежащим на одной прямой с событиями, зарегистрированными в 2006–2011 гг.

На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты моделирования записей местных землетрясений с использованием координат и глубин очагов и магнитуд по данным станций IRIS и по данным ФИЦ ЕГС РАН: зарегистрированные и смоделированные акселерограммы горизонтальных

Таблица 4. Коэффициенты частотно-зависимого усиления сейсмических волн в верхних слоях земной коры относительно окрестности очагов на Урале

f , Гц	$A(f)$
0.021	0.997
0.023	1.01
0.025	1.02
0.030	1.03
0.038	1.04
0.055	1.058
0.072	1.068
0.092	1.089
0.129	1.108
0.180	1.125
0.238	1.183
0.388	1.240
1.562	1.407

компонент и их амплитудные спектры Фурье — для сравнения наблюдений и расчетов по частотному составу. Предполагается, что данные ФИЦ ЕГС РАН, полученные по более близким станциям, точнее, чем данные IRIS, однако практика показывает, что и эти данные содержат ошибки как в определении положений очагов, так и в оценках магнитуд землетрясений.

Как видно из рисунков, найденный набор параметров очага и пути распространения позволяет в целом получить достаточно хорошее согласие расчетов и наблюдений. Амплитуды смоделированных акселерограмм несколько превышают амплитуды зарегистрированных акселерограмм, что оправдано, поскольку амплитуды зарегистрированных записей несколько занижены частотным диапазоном регистрации: частота оцифровки всего 20 Гц.

Все же очевидно расхождение в уровне амплитуд расчетов и наблюдений для землетрясений 05.05.2008 г. и 17.03.2014 г. и его афтершока: зарегистрированные акселерограммы заметно ниже по уровню, чем смоделированные. Это можно объяснить тем, что на пути от очагов к сейсмостанции сейсмические волны пересекают горные гряды Урала (см. рис. 1, где

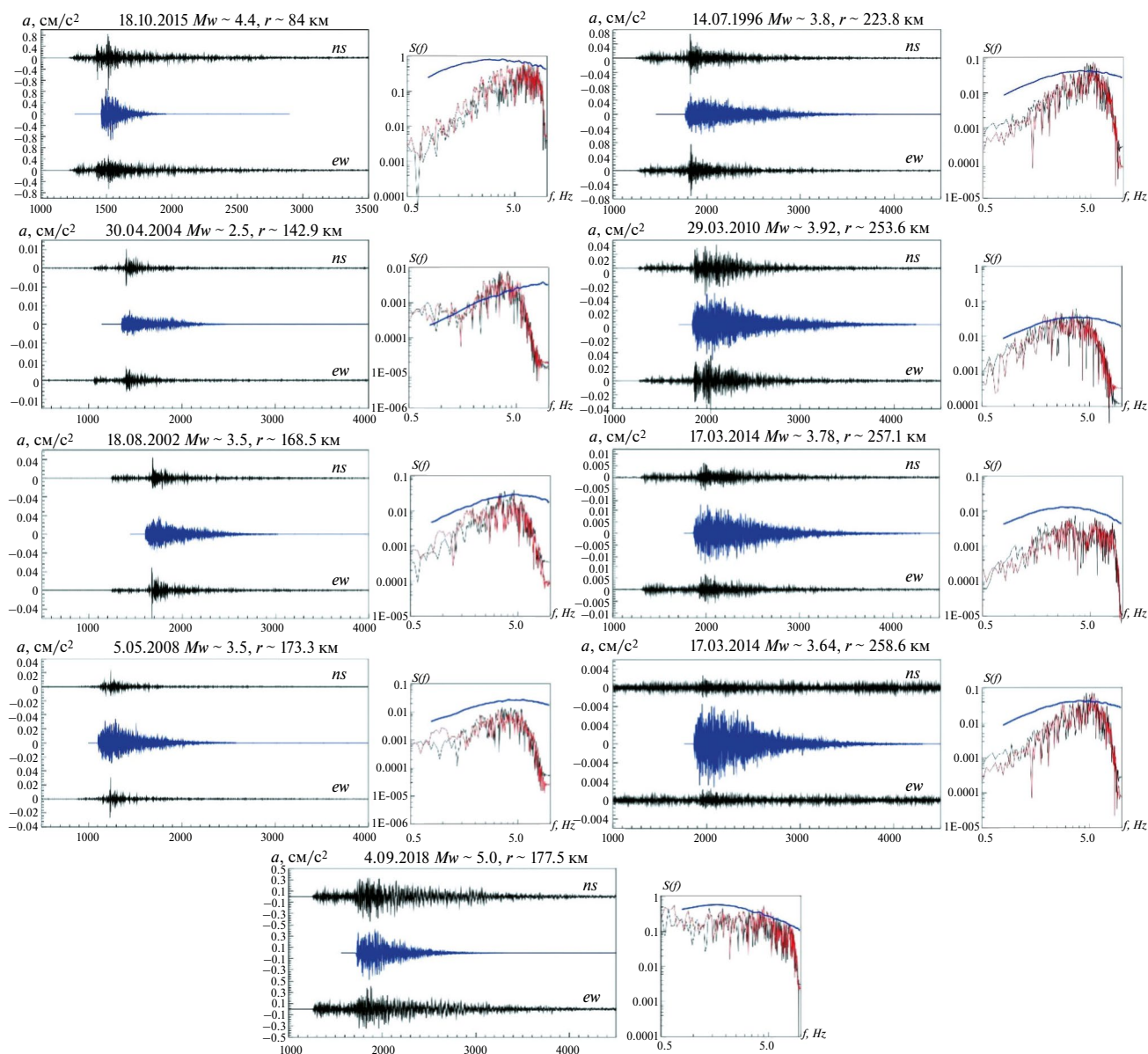


Рис. 3. Зарегистрированные (NS- и EW-компоненты, черные линии) и смоделированные (синие линии) акселерограммы горизонтальных компонент и соответствующие амплитудные спектры Фурье NS- и EW-компонент зарегистрированных акселерограмм (красные и черные линии) и усредненные спектры рассчитанных акселерограмм (синие линии). В моделировании использованы параметры очагов по данным IRIS.

показаны элементы рельефа), ослабляясь при этом. Однако, возможно, такое расхождение связано с некорректными оценками магнитуд землетрясений: по данным ФИЦ ЕГС РАН, магнитуда события 17.03.2014 г. оценивается не $M_w \sim 3.78$, а всего $M_w \sim 3.1$ (что касается события 05.05.2008 г. и афтершока землетрясения 17.03.2024 г., они отсутствуют в региональном каталоге ЕГС РАН).

Данные каталогов ФИЦ ЕГС РАН позволили дополнить список землетрясений, т.е. события,

которые при расчетах с параметрами очагов по данным станций IRIS давали большое расхождение с наблюдениями и квалифицировались как горные удары, при расчетах с уточненными положениями очагов и магнитудами по данным ЕГС РАН дают согласие расчетов и наблюдений и могут квалифицироваться как землетрясения. Моделирование показывает, что все события табл. 3 можно отнести к землетрясениям, за исключением события 29.09.2013 г. Даже событие 26.01.2014 г., отнесенное ЕГС РАН к горным ударам, хорошо моделируется как землетря-

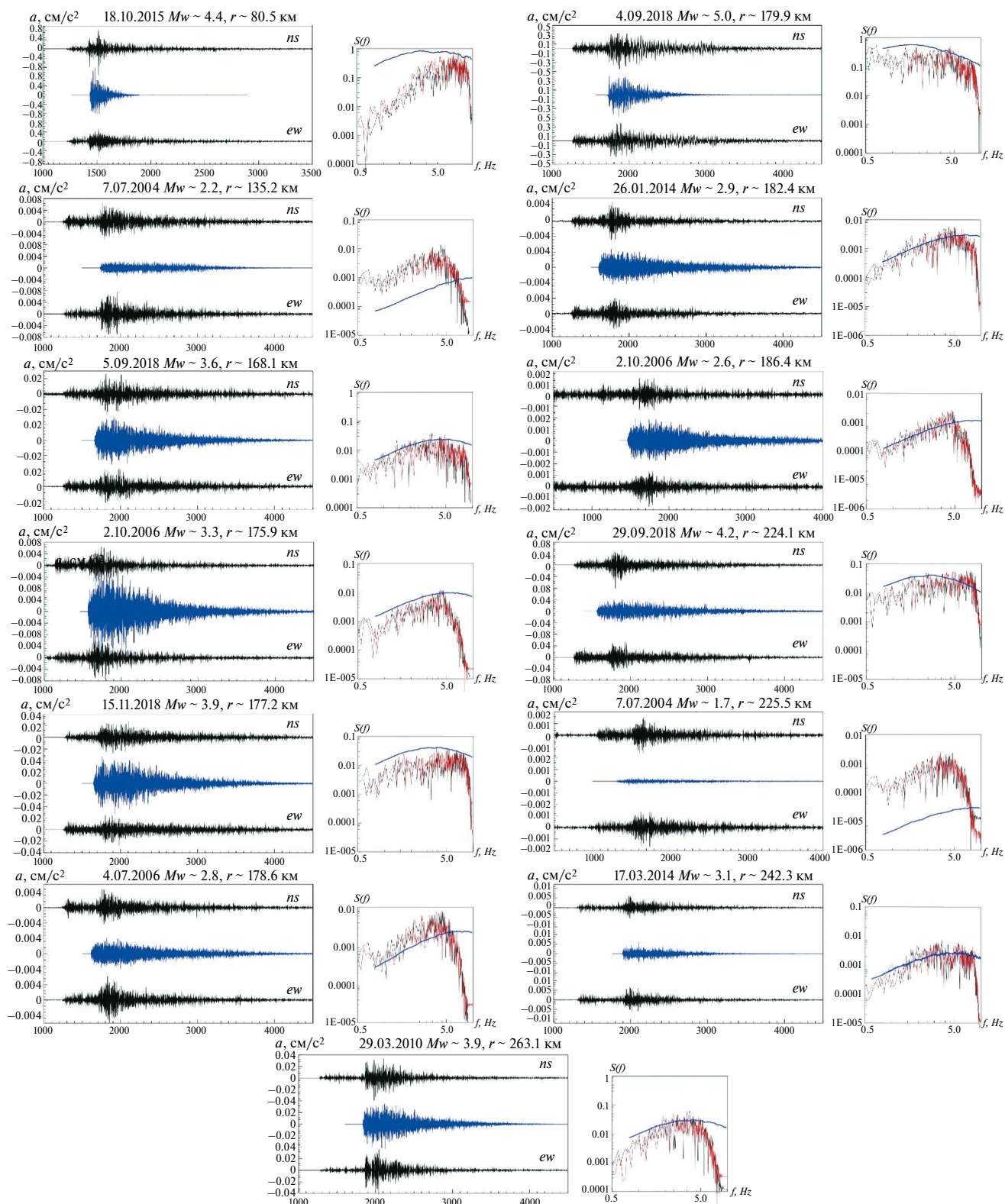


Рис. 4. Зарегистрированные и смоделированные акселерограммы горизонтальных компонент. Обозначения те же, что на рис. 3. В моделировании использованы параметры очагов по данным ФИЦ ЕГС РАН.

сение (рис. 4). В то же время для двух событий 07.07.2004 г., вероятно, недооценена магнитуда, в чем есть существенные расхождения с данными IRIS: по данным IRIS $M_w \sim 3.71$ и 3.78 (табл. 1, табл. 2), тогда как ФИЦ ЕГС РАН оценивает магнитуду как $M_w \sim 2.2$ и 1.7 (табл. 3).

Внизу на рис. 3 показана смоделированная акселерограмма Катав-Ивановского землетрясения с магнитудой $M_w = 5.0$ и глубиной очага 10 км, произошедшего в ночь с 4 на 5 сентября 2018 г. на эпицентральной дистанции от станции Арти (ARU) ~ 177 км. На рис. 4 эта акселерограмма показана первой сверху в правой колонке. По сравнению с параметрами излучения и распространения, оцененными ранее [Павленко, 2022], уточнены частотно-зависимая добротность и параметры длительности сильных движений, т.е. зависимости длительности от гипоцентрального расстояния.

Уточненные региональные характеристики излучения и распространения сейсмических волн представлены в табл. 5 (детальное описание набора параметров стохастического моделирования дано в работе [Booge, 2003]). Эти параметры излучения и распространения сейсмических волн можно использовать для моделирования сильных землетрясений в Уральском регионе и прогноза параметров колебаний поверхности.

В целом параметры излучения и распространения сейсмических волн в Уральском регионе сравнимы с параметрами, полученными для других регионов России. Оценки параметра сброшенного в очагах напряжения ~ 50 бар близки к аналогичным оценкам для Кавказа, региона коровой сейсмичности; параметры геометрического расхождения, определяемые мощностью земной коры в Уральском регионе, соответствуют аналогичным параметрам Кавказа и Байкальской рифтовой зоны [Павленко, Тубанов, 2017; Павленко, 2020], а также среднемировым значениям; по этим параметрам Уральский регион также близок к районам коровой сейсмичности.

Уравнения прогноза движений грунта для Уральского региона

В соответствии с моделью зон ВОЗ для Уральского региона (положенной в основу при построении карт ОСР) угол падения разломных плоскостей очагов землетрясений выбран 90° , т.е. падение вертикальное. Согласно базе данных

Таблица 5. Оценки параметров излучения и распространения сейсмических волн в Уральском регионе

Параметр напряжения $\Delta\sigma$	50 бар
Геометрическое расхождение	$1/r$ для $r < 50$ км $1/50$ для $50 < r < 150$ км $1/r^{0.5}$ для $r > 150$ км
$Q(f)$	$\sim 130 f^{0.6}$ для $r < 200$ км $\sim 150 f^{0.7}$ для $r > 200$ км
Параметр длительности сигнала $dur(r)$	0 для $0 < r < 5$ км $0.0615r$ для $5 < r < 70$ км $4 + 0.15r$ для $r > 70$ км
Каппа k	0.02 с
Скорость S -волн в земной коре на глубинах очагов (в среднем)	3.8 км/с
Средняя плотность земной коры на глубинах очагов (в среднем)	2.6 г/см ³

карт ОСР, максимальная магнитуда землетрясений в регионе $M_S = 6.0$. В этом диапазоне значений магнитуды $M_w \approx M_S$. Максимальная возможная магнитуда была повышена на величину $\Delta = 0.5$ и $M_w = 6.5$ принята в качестве верхнего предела магнитуды при создании синтетических акселерограмм для построения уравнения прогноза движений грунта.

Уточненные параметры излучения и распространения сейсмических волн, приведенные в табл. 5 с учетом локального усиления (табл. 4), были использованы для создания набора акселерограмм колебаний поверхности на скале с локальным усилением в широком диапазоне магнитуд ($M_w = 4.0 - 6.5$ с шагом по магнитуде 0.5) и расстояний от очага (1–250 км).

По набору построенных синтетических акселерограмм получены оценки пиковых ускорений (PGA) и скоростей (PGV), а также ординат спектров реакции (SA) по ускорению с 5%-ным затуханием и доверительные интервалы для этих оценок. На основе полученного массива синтетических параметров колебаний поверхности методами регрессии определены коэффициенты регионального УПДГ для Уральского региона.

Для УПДГ выбрана простая функциональная форма:

$$\ln(Y) = f_1(M_W) + f_2(r_{JB}, M_W) + \varepsilon\sigma, \quad (2)$$

где: Y — геометрическое среднее горизонтальных компонент параметра движения грунта (т.е. PGA или SA в долях g , либо PGV в см/с); функции f_1 и f_2 описывают зависимость переменной $\ln(Y)$ от магнитуды и расстояния, т.е. эффекты очага и пути распространения; M_W — моментная магнитуда; r_{JB} — расстояние Джойнера–Бура (кратчайшее расстояние от точки до проекции разломной плоскости на поверхность Земли); ε — невязка регрессионной модели, отражающая разброс наблюдаемых значений $\ln(Y)$ относительно оценок, получаемых с помощью уравнения (2); σ — стандартное отклонение распределения невязки.

В уравнении (2) отсутствует функция, отвечающая за локальные эффекты в точке наблюдения, поскольку уравнение построено по записям станции, расположенной на скальном грунте, и характеризует сейсмические эффекты на скале.

$$f_1(M_W) = c_1 + c_2(M_W - 6.5) + c_3(M_W - 6.5)^2, \quad (3)$$

где c_1, c_2, c_3 — коэффициенты регрессии.

$$f_2(r_{JB}, M_W) = [c_4 + c_5(M_W - M_{ref})] \times \ln(r / r_{ref}) + c_6(r - r_{ref}), \quad (4)$$

где: $r = \sqrt{r_{JB}^2 + h^2}$; $h = 7.5$ — параметр, отвечающий за насыщение амплитуд движений грунта в ближней зоне; параметры c_4 и c_5 описывают эффекты геометрического расхождения: c_4 характеризует геометрическое расхождение при $M_W = M_{ref}$; c_5 описывает убывание $\ln(Y)$ с расстоянием в зависимости от магнитуды; параметр c_6 описывает неупругое поглощение в среде; $M_{ref} = 4.5, r_{ref} = 1$ — референтные значения магнитуды и расстояния.

Для определения значений параметров УПДГ был использован двухэтапный метод регрессии [Joynер, Boore, 1993; 1994], позволяющий разделить процесс определения коэффициентов в функциях f_1 и f_2 . На первом этапе определяют значения коэффициентов в функции f_2 и рассчитывается набор амплитудных факторов, уникальных для каждого землетрясения в базе

данных регрессии. На втором этапе определяется зависимость амплитудных факторов от магнитуды. Применение этого метода подробно описано в статьях [Boore, Atkinson, 2008; Boore et al., 2014]. Определенные таким образом значения параметров УПДГ представлены в табл. 6.

Уравнение применимо для $M_W = 4 - 6.5$ и $r_{JB} = 1 - 250$ км и позволяет оценивать значения PGA, PGV и SA в широком диапазоне спектральных периодов (от 0.02 до 10 с). На рис. 5 показаны зависимости оценок PGA, PGV и SA для нескольких спектральных периодов от магнитуды и расстояния Джойнера–Бура. На рис. 6 показаны зависимости SA от магнитуды при $r_{JB} = 3$ км, 35 км.

Известно, что с оценками сейсмических воздействий связана так называемая эпистемическая неопределенность, т.е. неопределенность, обусловленная неполнотой информации о характере моделируемого явления [Budnitz et al., 1997]. Для учета этой неопределенности в ВАСО применяют логическое дерево, ветви которого соответствуют нескольким альтернативным моделям УПДГ с соответствующими весами (сумма весов равна 1).

Проект GEM рекомендует для Урала пять УПДГ: это уравнения, описанные в статьях [Toro et al., 1997; Campbell, 2003; Tavakoli, Pezeshk, 2005; Atkinson, Boore, 2006; Atkinson, 2008]. Далее в тексте эти уравнения будут обозначаться аббревиатурами: TEA97 — [Toro et al., 1997]; C03 — [Campbell, 2003]; TP05 — [Tavakoli, Pezeshk, 2005]; AB06 — [Atkinson, Boore, 2006]; A08 — [Atkinson, 2008]. Все пять уравнений создавались для восточной части Северной Америки — региона стабильной континентальной сейсмичности, для которого характерны высокие значения параметра сброшенного напряжения ($\Delta\sigma \approx 100-150$ бар и выше). В дальнейшем авторы УПДГ AB06 предложили набор поправок [Atkinson, Boore, 2007], позволяющих пересчитать оценки параметров движений грунта, получаемых на основе этого УПДГ, для альтернативных значений параметра сброшенного напряжения (по умолчанию значение этого параметра полагалось равным 140 бар).

В настоящей работе продолжен поиск УПДГ, подходящих для использования в расчетах ВАСО для Урала. В качестве альтернативных моделей для оценки сейсмических эффектов вы-

Таблица 6. Коэффициенты уравнения (2)

T	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
PGV	4.336809	0.744910	-0.130586	-1.126551	0.175383	-0.003416
PGA	0.416172	0.322472	-0.109281	-1.293378	0.155847	-0.004688
0.02	0.415749	0.321493	-0.109762	-1.293516	0.155764	-0.004679
0.03	0.801687	0.305289	-0.098167	-1.362806	0.160141	-0.004883
0.05	1.272166	0.359747	-0.091202	-1.361649	0.139198	-0.005664
0.075	1.410837	0.492812	-0.080403	-1.271167	0.107827	-0.006273
0.1	1.378241	0.560808	-0.070222	-1.225126	0.098204	-0.005910
0.15	1.266464	0.602051	-0.103438	-1.143799	0.075067	-0.005510
0.2	1.072517	0.579851	-0.143931	-1.081438	0.065104	-0.005347
0.25	0.975814	0.555843	-0.173150	-1.085642	0.067255	-0.004577
0.3	0.794471	0.534248	-0.212658	-1.041812	0.063583	-0.004568
0.4	0.681295	0.579941	-0.283049	-0.982317	0.039173	-0.004279
0.5	0.470730	0.538343	-0.335968	-0.979191	0.042584	-0.003625
0.75	0.018433	0.658764	-0.399108	-0.893634	0.031907	-0.003565
1.0	-0.255888	0.743144	-0.441062	-0.887694	0.032972	-0.002760
1.5	-0.679593	0.982844	-0.423998	-0.902457	0.046006	-0.001921
2.0	-1.077040	1.214210	-0.368096	-0.910801	0.069596	-0.001399
3.0	-1.541530	1.657328	-0.247342	-0.934430	0.086452	-0.000901
4.0	-2.090791	1.830840	-0.158675	-0.971619	0.123109	-0.000773
5.0	-2.474593	1.948040	-0.109515	-1.001623	0.131642	-0.000387
7.5	-3.251633	2.081267	-0.029487	-1.057991	0.153798	-0.000065
10.0	-3.898346	2.052186	-0.023000	-1.065261	0.158698	-0.000315

Примечание: $\sigma = 0.50$ для всех периодов.

браны 5 современных УПДГ: глобальная модель для коровой сейсмичности [Boore et al., 2014]; 2 модели, разработанные для использования в горных областях Швейцарских и Французских Альп [Cauzzi et al., 2015; Drouet, Cotton, 2015]; 2 модели для регионов стабильной континентальной сейсмичности — восточной части Северной Америки [Atkinson, Boore, 2006] и Великобритании [Rietbrock et al., 2013]. Далее в тексте эти УПДГ будут обозначаться аббревиатурами: BSSA14 — [Boore et al., 2014]; CEA15 — [Cauzzi et al., 2015]; DC15 — [Drouet, Cotton, 2015]; RSE13 — [Rietbrock et al., 2013]. УПДГ AB06 будет применяться с поправками, учитывающими

региональное значение параметра напряжения 50 бар.

На рис. 7 показано сравнение оценок PGA и SA(1.0 с), полученных с помощью уравнения (2) и набора альтернативных УПДГ для магнитуд $M_w = 4.5$ и 6.5. Видно, что эти оценки достаточно сильно различаются между собой. При этом близкими к оценкам предлагаемого УПДГ оказываются оценки моделей CEA15, AB06 и RSE13.

При выборе из набора конкурирующих моделей УПДГ, для количественной оценки степени согласия этих моделей и некоторого набора наблюдаемых значений параметров движений

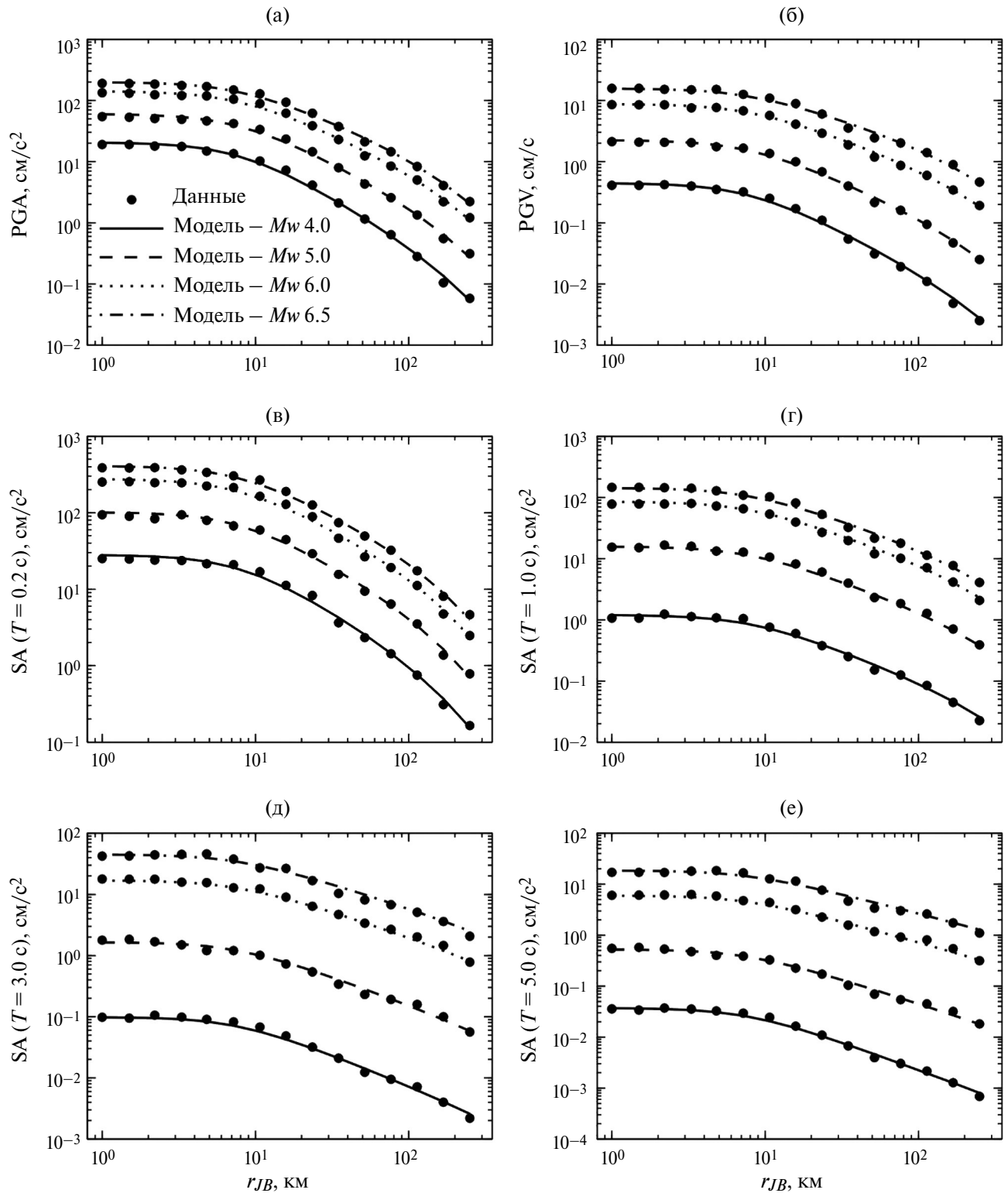


Рис. 5. Зависимость оценок (а) PGA , (б) PGV , (в) SA (0.1 c), (г) SA (0.5 c), (д) SA (1.0 c), (е) SA (5.0 c), получаемых по уравнению (2), от магнитуды и расстояния Джойнера–Бура. Черными точками показаны средние значения оценок соответствующих параметров движения, построенных методом стохастического моделирования. Черными линиями показаны оценки уравнения (2) для магнитуд $M_w = 4.0$ – 6.5 .

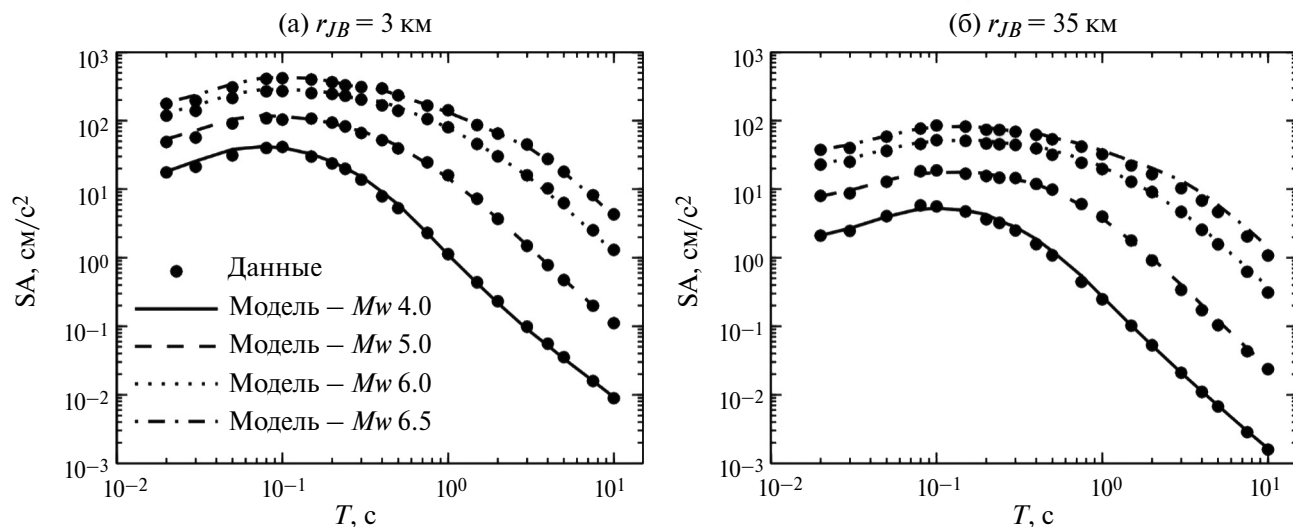


Рис. 6. Спектры реакции по ускорению с 5% затуханием, рассчитанные с помощью уравнения (2), для значений (а) $r_{JB} = 3$ км и (б) $r_{JB} = 35$ км. Черными точками показаны средние значения оценок SA, построенных методом стохастического моделирования. Черными линиями показаны оценки уравнения (2) для магнитуд $M_w = 4.0-6.5$.

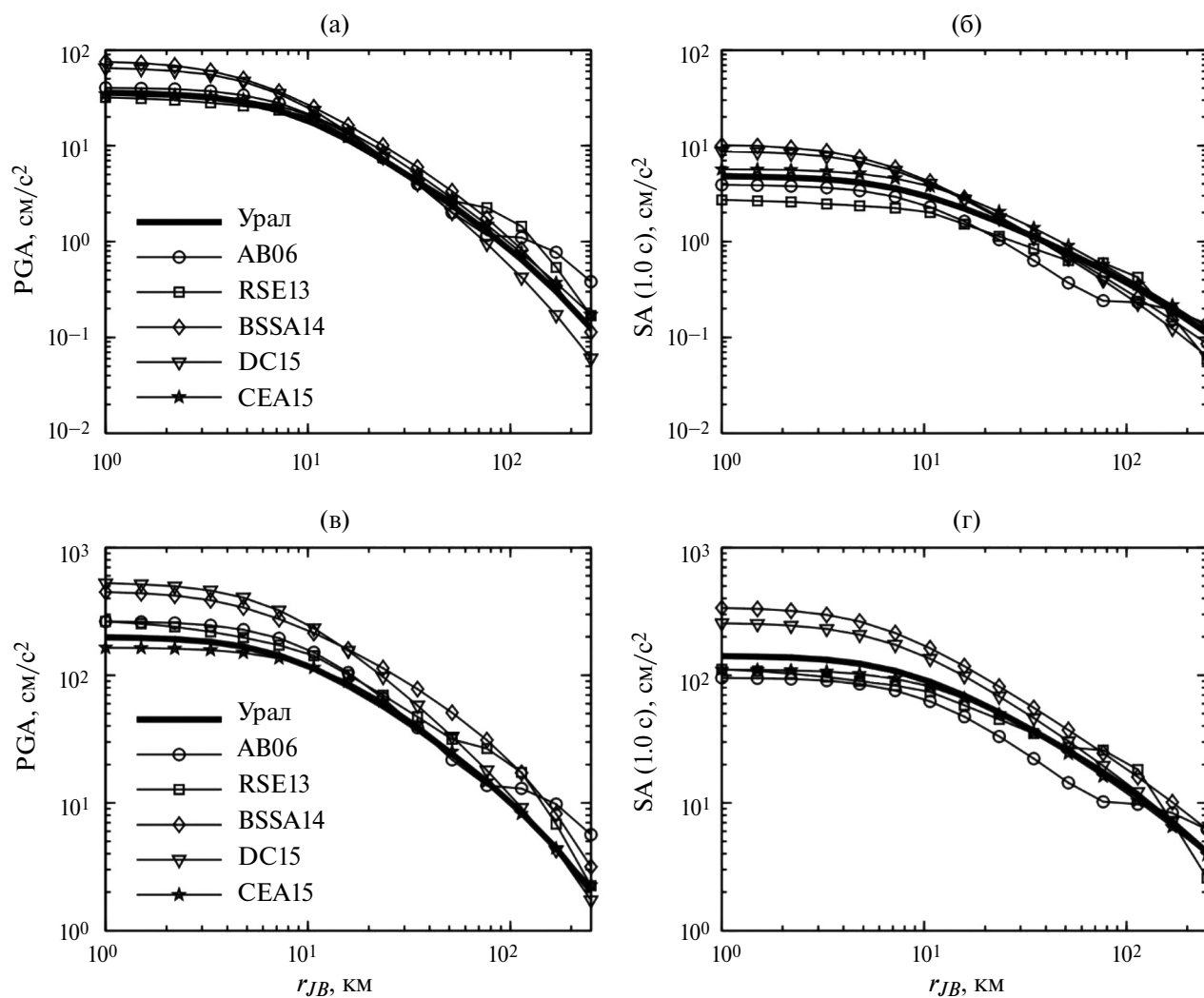


Рис. 7. Сравнение оценок PGA и SA, получаемых по УПДГ различных авторов, и по УПДГ, предложенному в настоящей работе (а), (б) — для $M_w = 4.5$; (в), (г) — для $M_w = 6.5$.

грунта, в работе [Scherbaum et al., 2009] было предложено использовать следующую величину:

$$LLH = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2(g(x_i)), \quad (5)$$

где: N — число наблюдений x_i ; g — функция плотности вероятности, соответствующая выбранной модели (в случае УПДГ обычно предполагается, что g — плотность нормального распределения).

Величина $g(x_i)$ — это правдоподобие возникновения наблюдаемого значения x_i при условии, что верна модель, отвечающая плотности g . Величина LLH — нормированный на объем выборки логарифм правдоподобия, взятый с минусом — является мерой относительной потери информации при использовании соответствующей модели. Если показатель логарифма в (5) равен 2, LLH измеряется в битах. Малые значения LLH свидетельствуют о близости тестируемой модели и выборки наблюдаемых значений. Чем выше значение LLH, тем меньше вероятность того, что тестируемая модель верно описывает процессы, породившие наблюдения.

Для того чтобы получить представление о порядке величины LLH при тестировании различных моделей УПДГ, воспользуемся выборкой случайных величин из нормального распределения, с параметрами (μ_i, σ_i) , отвечающими оценке $\ln(PGA)$ в долях g и стандартному отклонению этой оценки, полученным по УПДГ BSSA14 для $M_W = 5$, $r_{JB} = 50$ км (эти значения выбраны произвольно, при выборе альтернативных значений параметров M_W и r_{JB} результаты будут аналогичны). Будем генерировать случайные величины из исходного нормального распределения и тестировать распределения с модифицированными параметрами на этой выборке, увеличивая ее объем (рис. 8).

Как видно из рис. 8, при тестировании исходной модели LLH принимает значения, близкие к 1.4–1.5. При тестировании моделей с модифицированными параметрами значения LLH возрастают. Для распределений 2 $(\mu_i + \sigma_i, \sigma_i)$ и 3 $(\mu_i - \sigma_i, 2\sigma_i)$ значения LLH стабилизируются чуть выше 2.0. При тестировании модели 4 $(\mu_i + 2.5\sigma_i, 0.8\sigma_i)$ с наиболее смещенным средним, LLH принимает значения, близкие к 10. Наконец, для модели 5 $(\mu_i, 3\sigma_i)$ с несмещенным средним и увеличенной дисперсией, LLH принимает значения, близкие к 2.5.

Полученные результаты показывают, что величина LLH стабилизируется при объеме выборки больше ~40. Это значение можно считать оценкой минимального необходимого объема выборки для получения стабильной оценки LLH при тестировании согласия модели УПДГ и набора наблюдаемых значений параметров движений грунта.

Протестируем теперь альтернативные УПДГ на наборе синтетических данных, построенных методом стохастического моделирования и положенных в основу при разработке УПДГ для Уральского региона. Для каждого УПДГ для набора спектральных периодов, предусмотренных моделью, по формуле (5) были рассчитаны значения LLH (рис. 8а). Для сравнения на рис. 9б показаны аналогичные результаты для набора УПДГ, рекомендованные для Уральского региона проектом GEM [Павленко, 2022].

Как видно из рис. 9а, самые низкие и наиболее стабильные значения LLH для всех спектральных периодов получены для УПДГ SEA15, разработанного для Швейцарских Альп. При тестировании УПДГ RSE13 и AB06, разработанных, соответственно, для Великобритании и восточной части Северной Америки, наблюдаются сходные тенденции, при этом значения LLH оказываются достаточно низкими в диапазоне спектральных периодов от 0.1 до 2.0 с. При тестировании УПДГ DC15, созданного для применения во Французских Альпах, величина LLH оказывается близка к 1.6 для всех спектральных периодов, несколько снижаясь только на периоде 3.0 с, максимальном для данной модели. Глобальная модель для коровой сейсмичности BSSA14 в целом показывает худший результат и наиболее высокие значения LLH для спектральных периодов меньше 0.5 с.

Результаты, показанные на рис. 9б, подтверждают выводы работы [Павленко, 2022]: набор уравнений для стабильной континентальной сейсмичности, рекомендуемых проектом GEM, сильно завышает оценки высокочастотных составляющих спектра реакции, но дает удовлетворительное согласие с данными для низкочастотного диапазона (для периодов 0.5 с и выше).

Полученные результаты позволяют ранжировать рассмотренные УПДГ согласно значениям LLH, что можно использовать при построении логического дерева для назначения весов отдельным моделям.

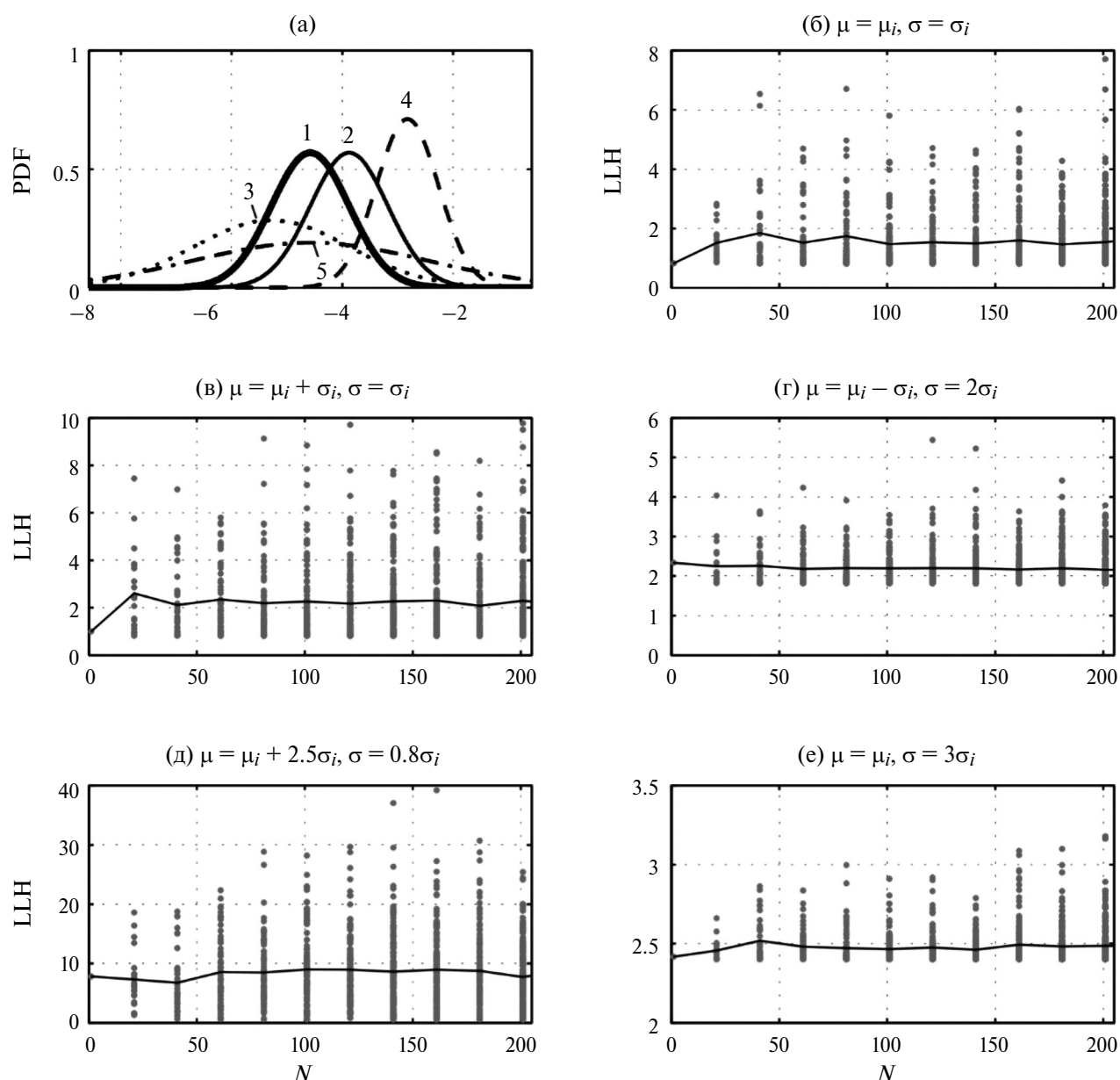


Рис. 8. Расчет величины LLN на случайных выборках: (а) — показано исходное распределение (1) и распределения с модифицированными параметрами (2-5); (б)–(е) — показаны результаты расчета величины LLN при тестировании распределений с измененными параметрами на выборке из исходного распределения. Серыми точками показаны значения правдоподобия отдельных наблюдений, черными линиями показаны значения LLN.

ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

Геологическое строение, тектоника и особенности сейсмичности Урала достаточно хорошо изучены. Установлено, что Уральская горная система прошла несколько тектонических циклов, среди которых были континентальный и океанический рифтогенез, вулканическая островодужная стадия, коллизионная стадия и стадии субдукции, орогенеза, интенсивного геомеханического выветривания и современ-

ного горообразования. Структура Урала носит следы интенсивного сжатия, сопровождавшегося сильным поперечным сокращением геосинклинальной впадины и образованием пологих чешуйчатых надвигов — шарьяжей.

Глубинные сейсмические исследования на Урале, дающие информацию о структуре, физических свойствах и динамическом состоянии земной коры, ведутся с 1930-х годов; создана модель глубинного строения Уральского

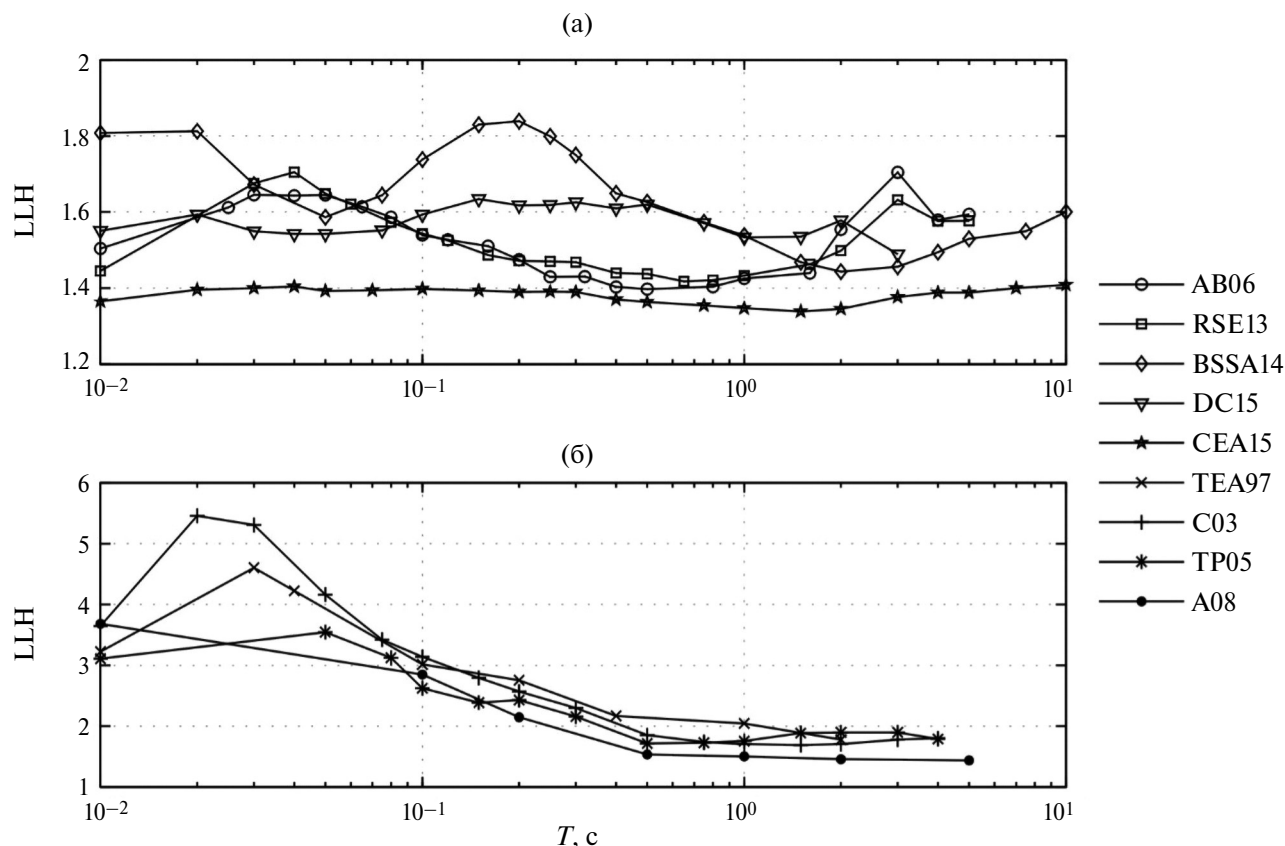


Рис. 9. Значения величины LLH при тестировании различных УПДГ на наборе синтетических параметров колебаний поверхности, построенных методами стохастического моделирования: (а) — для набора из 5 УПДГ, рассмотренных в настоящей работе; (б) — для набора УПДГ, рекомендованных для Урала проектом GEM.

складчатого пояса и прилегающих территорий [Дружинин и др., 1996; 2004]. Комплексные глубинные сейсмические исследования в сочетании с исследованиями поля силы тяжести и других геофизических полей позволили создать карты мощности земной коры региона и гравитационных аномалий.

Установлена аномальность строения земной коры Уральской складчатой системы по отношению к коре соседних областей [Глубинное..., 1991; Ryzhiy et al., 1992]. Выделены следующие особенности земной коры Урала: 1) повышенная мощность — 55–60 км; 2) наличие значительной (до 20 км) и сложной по строению переходной зоны в низах коры с промежуточными между корой и мантией значениями скоростей P -волн (7.2–7.8 км/с); 3) повышенные значения сейсмических скоростей и плотностей по сравнению с соседними структурами на 0.3–0.5 км/с и 0.10–0.15 г/см³; 4) повышенная тектоническая раздробленность и зоны пониженной скорости; 5) повышенная расслоенность верхней мантии

до глубин 120–150 км. По результатам площадных исследований установлена сейсмическая анизотропия земной коры и верхней мантии Урала [Глубинное..., 1997]. Такие особенности строения литосферы характерны для пограничных структур, расположенных между крупными континентальными платформами.

Рекомендации проекта GEM основаны на схеме сейсмических регионов Земли Флинна–Энгдала [Flinn et al., 1974; Youngs et al., 1996], которая относит регионы к одному из трех типов сейсмичности: мелкофокусной коровой, стабильной континентальной, субдукционной.

УПДГ, предлагаемые для Уральского региона проектом GEM, разработаны для платформенных регионов и описывают стабильный континентальный тип сейсмичности. Между тем изучаемый регион — горная местность, особенности строения литосферы которой характерны для пограничных структур, расположенных между крупными континентальными платформами. По оцененным характеристикам излучения

и распространения сейсмических волн Уральский регион оказался близок к сейсмически активным регионам РФ: Кавказу и Байкальской рифтовой зоне.

Более современная модель регионализации Земли, построенная на принципах нечеткой логики [Chen et al., 2018], разделяет регионы со стабильной континентальной сейсмичностью на кратоны и не-кратоны и вводит два дополнительных типа для описания океанических пространств. Тем не менее очевидно, что такая общая классификация не может учитывать специфики каждого отдельного региона, а значит, основанные на ней рекомендации по выбору УПДГ следует воспринимать лишь как первое приближение и использовать с большой осторожностью, что и показал проведенный анализ альтернативных УПДГ.

В настоящей работе методом моделирования акселерограмм зарегистрированных местных землетрясений уточнены оценки характеристик излучения и распространения сейсмических волн в Уральском регионе. На их основе построено УПДГ, при создании которого фактически использованы все имеющиеся на сегодняшний день записи местных землетрясений.

Результаты тестирования альтернативных УПДГ показали, что наиболее близким к условиям Урала оказалось УПДГ, созданное для Швейцарских Альп. Вторыми по рангу, в плане согласия с данными Урала, оказались два УПДГ, созданные для условий восточной части Северной Америки и территории Великобритании, т.е. областей стабильной континентальной сейсмичности. Такой результат хорошо согласуется с полученными характеристиками излучения и распространения сейсмических волн в Уральском регионе, которые соответствуют переходным от областей стабильной континентальной сейсмичности к сейсмически активным регионам с коровой сейсмичностью, поэтому построенное в настоящей работе УПДГ для Уральского региона представляется достаточно надежным.

Для дальнейшего повышения точности и надежности прогнозов сейсмических воздействий в Уральском регионе можно рекомендовать уточнение и детализацию характеристик излучения и распространения сейсмических волн по районам, т.е. Северному, Среднему и Южно-

му Уралу, с учетом анизотропии параметров добротности среды. Однако для таких исследований требуется существенно большее количество записей местных землетрясений, с оцифровкой не менее 50 Гц, что, вероятно, недостижимо в ближайшие годы. Поэтому предложенное в настоящей работе УПДГ и рассмотренный набор альтернативных моделей в ближайшие годы могут служить достаточно надежной основой для построения оценок сейсмических воздействий в регионе в целом.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № FMWU-2022-0013 ИФЗ РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят двух анонимных рецензентов за их ценные комментарии и замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Верхоланцев Ф.Г., Габсатарова И.П., Гусева Н.С., Дягилев Р.А. Среднеуральское землетрясение 18 октября 2015 г. $ML_{\text{рег}} = 4.7$, $I_0 = 6$ // Землетрясения Северной Евразии. 2021. Вып. 24 (2015 г.). С. 314–323.
- Глубинное строение Урала по геофизическим данным. Глубинное строение СССР / В. В. Белоусов (ред.). М.: Наука. 1991. 224 с.
- Глубинное строение Урала по геофизическим данным / В. М. Рыбалка, Е. М. Ананьева, С. Н. Кашубин и др. (ред.). Геология и минерагения подвижных поясов. Екатеринбург: Урал-геолком, 1997. С. 101–118.
- Глубинное строение Урала по меридиональному профилю ГСЗ Нижняя Тура–Орск / В.С. Дружинин, С. Н. Кашубин, В. И. Вальчак и др. (ред.). Советская геология. 1985. № 1. С. 74–86.
- Годзиковская А.А. Каталог сейсмических событий Уральского региона с древнейших времен по 2002 г. (Сопутствующие первичные материалы). М.: ИФЗ РАН. 2016. 258 с.
- Гуляев А. Н. Новейшая тектоника и сейсмичность Урала // Известия высших учебных заведений. 2022. № 2. С. 77–84.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами — среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.
- Дружинин В.С., Рыбалка В.М., Соболев И.Д. Связь тектоники и магматизма с глубинным строением Среднего Урала по данным ГСЗ. Свердловск: УНЦ АН СССР. 1976. 156 с.
- Дружинин В.С., Юнусов Ф.Ф., Парыгин Г.И. Специфика сейсмичности Уральского региона. — Глубинное

- строение и развитие Урала. Екатеринбург: Наука. 1996. С. 102–110.
- Дружинин В.С., Гуляев А.П., Колмогорова В.В. и др. К вопросу о природе землетрясений на Урале // Уральский геофизический вестник. 2004. № 6. С. 29–42.
- Дягилев Р.А., Верхованцев Ф.Г., Варлашова Ю.В., Шулаков Д.Ю., Габсатарова И.П., Енифанский А.Г. Катав-Ивановское землетрясение 04.09.2018 г., $m_b = 5.4$ (Урал) // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 2. С. 7–20. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.2.01 — EDN: CDTJTV
- Дягилев Р.А., Скоркина А.А. Определение параметров затухания сейсмических волн для территории Урала. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы седьмой международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН. 2012. С. 126–129.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Павленко О.В., Фатеев А.В., Куприш О.В., Подкорытова В.Г. Кольванское землетрясение 09.01.2019 с $M_L = 4.3$ и особенности наведенной сейсмичности в условиях Горловского угольного бассейна // Вопросы инженерной сейсмологии. 2019. Т. 46. № 4. С. 29–45.
- Павленко О.В. Характеристики излучения и распространения сейсмических волн на Северном Кавказе, оцененные по записям сеймостанций “Сочи” и “Анапа” // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т. 43. № 1. С. 49–61.
- Павленко О.В., Тубанов Ц.А. Характеристики излучения и распространения сейсмических волн в Байкальской Рифтовой зоне, оцененные моделированием акселерограмм зарегистрированных землетрясений // Физика Земли. 2017. № 1. С. 20–33.
- Павленко О.В. Записи местных землетрясений как основа для корректных оценок сейсмических воздействий (на примере трассы второго Северомуйского тоннеля) // Геология и геофизика. 2020. DOI: 10.15372/GiG2020203
- Павленко В.А. Предварительные оценки характеристик излучения и распространения сейсмических волн и уравнения прогноза движений грунта для Уральского региона // Вопросы инженерной сейсмологии. 2022. Т. 49. № 2. С. 74–84. DOI: 10.21455/VIS2022.2-4
- Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона / С. Н. Кашубин, В. С. Дружинин, А. Н. Гуляев, О. А. Кусонский, В. С. Ломакин, А. А. Маловичко, С. Н. Никитин, Г. И. Парыгин, Б. П. Рыжий, В. И. Уткин (ред.). УРО РАН. 2001. 126 с. ISBN: 5-7691-1212-3
- Тектоническая карта Урала масштаба 1 : 1000000 / И.Д. Соболев, С.В. Автонеен, Р.П. Белковская и др. (ред.). Свердловск: ПГО “Уралгеология”. 1986. 168 с.
- Atkinson G.M. Ground-motion prediction equations for eastern North America from a referenced empirical approach: Implications for epistemic uncertainty // Bull. Seismol. Soc. Am. 2008. V. 98. № 3. P. 1304–1318. DOI: 10.1785/0120070199
- Atkinson G.M., Boore D.M. Earthquake ground-motion prediction equations for eastern North America // Bull. Seismol. Soc. Am. 2006. V. 96. № 6. P. 2181–2205. DOI: 10.1785/0120050245
- Atkinson G.M., Boore D.M. ERRATUM. Earthquake ground-motion prediction equations for eastern North America // Bull. Seismol. Soc. Am. 2007. V. 97. № 3. P. 1032. DOI: 10.1785/0120070023
- Boore D.M. Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method // Pure Appl. Geophys. 2003. V. 160. P. 635–676.
- Boore D.M., Joyner W.B. Site amplifications for Generic Rock Sites // Bull. Seismol. Soc. Am. 1997. V. 87. № 2. P. 327–341.
- Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E., Atkinson G.M. NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes // Earthq. Spectra. 2014. V. 30. № 3. P. 1057–1085. DOI: 10.1193/070113EQS184M
- Budnitz R.J., Apostolakis G., Boore D.M., Cluff L.S., Coppersmith 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.
- Campbell K.W. Prediction of strong ground motion using the hybrid empirical method and its use in the development of ground-motion (attenuation) relations in eastern North America // Bull. Seismol. Soc. Am. 2003. V. 93. № 3. P. 1012–1033.
- Cauzzi C., Edwards B., Fah D., Clinton J., Wiemer S., Kastli P., Cua G., Giardini D. New predictive equations and site amplification estimates for the next-generation Swiss ShakeMaps // Geophys. J. Int. 2015. V. 200. № 1. P. 421–438. DOI: 10.1093/gji/ggu404
- Chen Y.-S., Weatherill G., Pagani M., Cotton F. A transparent and data-driven global tectonic regionalization model for seismic hazard assessment // Geophys. J. Int. 2018. V. 213. № 2. P. 1263–1280. DOI: 10.1093/gji/ggy005
- Cornell C. A. Engineering seismic risk analysis // Bull. Seismol. Soc. Am. 1968. V. 58. № 5. P. 1583–1606.
- Costa G., Panza G.F., Suhadolc P., Vaccari F. Zoning of the Italian territory in terms of expected peak ground acceleration derived from complete synthetic seismograms // J. Appl. Geophys. 1993. V. 30(1–2). P. 149–160. DOI: 10.1016/0926-9851(93)90023-R
- Douglas J. Ground motion prediction equations 1964–2021. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Strathclyde. 2021. <http://www.gmpe.org.uk/gmpereport2014.pdf>
- Drouet S., Cotton F. Regional stochastic GMPEs in low-seismicity areas: scaling and aleatory variability analysis — application to the French Alps // Bull. Seismol. Soc. Am. 2015. V. 105. № 4. P. 1883–1902. DOI: 10.1785/0120140240
- Flinn E.A., Engdahl E.R., Hill A.R. Seismic and geographical regionalization // Bull. Seismol. Soc. Am. 1974. V. 64. № 3–2. P. 771–993.
- Hanks T.C., McGuire R.K. The character of high frequency strong ground motion // Bull. Seism. Soc. Am. 1981. V. 71. P. 2071–2095.

- Joyner W.B., Boore D.M. Methods for regression analysis of strong motion data // Bull. Seismol. Soc. Am. 1993. V. 83. № 2. P. 469–487.
- Joyner W.B., Boore D.M. Methods for regression analysis of strong motion data. ERRATA // Bull. Seismol. Soc. Am. 1994. V. 84. № 3. P. 955–956.
- Orozova I. M., Suhadolc P. A deterministic-probabilistic approach for seismic hazard assessment // Tectonophys. 1999. V. 312. № 2–4. P. 191–202. DOI:10.1016/s0040-1951(99)00162-6
- Pavlenko O.V. Simulation of ground motion from strong earthquakes of Kamchatka region (1992–1993) at rock and soil sites // Pure Appl. Geoph. 2013. V. 170. № 4. P. 571–595.
- Pavlenko O., Kozlovskaya E. Characteristics of radiation and propagation of seismic waves in the Northern Finland estimated based on records of local earthquakes // Pure Appl. Geoph. 2018. V. 175. № 12. P. 4197–4223 <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1919-5>
- Rietbrock A., Strasser F., Edwards B. A stochastic ground-motion prediction model for the United Kingdom // Bull. Seismol. Soc. Am. 2013. V. 103. № 1. P. 57–77. DOI: 10.1785/0120110231
- Ryzhiy B.P., Druzhinin V.S., Yunusov F.F., Ananyin I.V. Deep structure of the Urals region and its seismicity // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1992. V. 75. P. 185–191.
- Scherbaum F., Delavaud E., Riggelsen C. Model selection in seismic hazard analysis: an information-theoretic perspective // Bull. Seismol. Soc. Am. 2009. V. 99. № 6. P. 3234–3247. DOI: 10.1785/0120080347
- Tavakoli B., Pezeshk S. Empirical-stochastic ground-motion prediction for eastern North America // Bull. Seismol. Soc. Am. 2005. V. 95. № 6. P. 2283–2296. DOI: 10.1785/0120050030
- Toro G. R., Abrahamson N. A., Schneider J. F. Model of strong ground motions from earthquakes in central and eastern North America: Best estimates and uncertainties // Seismol. Res. Lett. 1997. V. 68. № 1. P. 41–57.
- Young J.B., Presgrave B.W., Aichele H., Wiens D.A., Flinn E.A. The Flinn-Engdahl regionalisation scheme: the 1995 revision // Phys. Earth Planet Int. 1996. V. 96. № 4. P. 223–297. DOI: 10.1016/0031-9201(96)03141-X

Stochastic Simulations and Ground Motion Prediction Equation for Peak Accelerations, Peak Velocities and Response Spectra for the Ural Region

V. A. Pavlenko^{a, *} and O. V. Pavlenko^{a, **}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: pavlenko.vasily@gmail.com*

^{**}*e-mail: olga@ifz.ru*

Received January 29, 2024; revised August 01, 2024; accepted August 01, 2024

Abstract — The characteristics of radiation and propagation of seismic waves in the Ural region were refined based on stochastic modeling of the records of local earthquakes; these characteristics correspond to transient characteristics from areas of stable continental seismicity to seismically active regions with crustal seismicity. Ground motion prediction equation (GMPE) has been constructed for the Ural region, describing the dependence of peak accelerations (PGA), peak velocities (PGV) and acceleration response spectrum amplitudes (SA) on rock on magnitude and distance. The GMPE is applicable in a wide range of magnitudes ($M_w \sim 4$ –6.5) and distances (1–250 km) and can be applied to assess seismic hazard in the design and construction of earthquake-resistant structures in the Ural region. To account for the epistemic uncertainty of the estimates of seismic impacts in probabilistic seismic hazard analysis and construct a logic tree, five alternative modern GMPEs from other regions were selected: a global model for crustal seismicity, two models developed for the mountain regions of the Swiss and French Alps, two models for regions of stable continental seismicity — eastern North America and Great Britain. These models were tested using the array of synthetic ground motion parameters; the equation for the Swiss Alps turned out to be the closest to the developed GMPE for the Urals.

Keywords: ground motion prediction equations, local earthquake records, stochastic modeling, characteristics of radiation and propagation of seismic waves, seismic hazard analysis