

УДК 550.347

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УРАВНЕНИЯ ПРОГНОЗА ДВИЖЕНИЙ ГРУНТА В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

© 2023 г. В. А. Павленко¹, *, О. В. Павленко¹, **

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

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

**E-mail: olga@ifz.ru

Поступила в редакцию 30.11.2021 г.

После доработки 08.07.2022 г.

Принята к публикации 08.07.2022 г.

Для получения реалистичных и корректных оценок сейсмических воздействий в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) построено уравнение прогноза движений грунта, на основе записей местных землетрясений (магнитуды $m_b \sim 3.4\text{--}5.5$, гипоцентральные расстояния $R \sim 15\text{--}220$ км), полученных сейсмостанциями “Улан-Удэ” и “Северомуйск”. На первом этапе (в прошлых работах авторов) с помощью стохастического моделирования акселерограмм зарегистрированных местных землетрясений оценены региональные параметры излучения и распространения сейсмических волн (сброшенного в очагах напряжения, добротности среды, геометрического расхождения, ослабления волн на высоких частотах, локального усиления и других). Затем эти параметры использованы для генерации набора акселерограмм землетрясений в широком диапазоне магнитуд ($M_w \sim 4.0\text{--}8.0$) и расстояний ($R \sim 1\text{--}200$ км) на скальном грунте, и построено уравнение прогноза движений грунта (УПДГ), описывающее зависимость пиковых ускорений (PGA) и скоростей (PGV) от магнитуды и расстояния. Полученные оценки PGA сравнены с оценками, полученными по УПДГ, рекомендованным для БРЗ международным проектом GEM (Global Earthquake Model). Разброс оценок, полученных по УПДГ рекомендованным проектом GEM, говорит об актуальности выработки своих УПДГ для российских регионов на основе записей местных землетрясений. Полученные в настоящей работе УПДГ могут использоваться для оценки сейсмической опасности в восточной части БРЗ и будут совершенствоваться с поступлением новых данных.

Ключевые слова: Байкальская рифтовая зона, стохастическое моделирование, уравнения прогноза движений грунта, PGA, GEM, сброшенное напряжение, добротность среды, геометрическое расхождение, локальное усиление, длительность сильных движений.

DOI: 10.31857/S0002333723010039, EDN: BZYNN

ВВЕДЕНИЕ

Байкальская рифтовая зона является одним из районов с высокой сейсмической активностью на территории Российской Федерации (РФ). В то же время, это район с достаточно высокой плотностью населения, с крупными городами, такими как Иркутск, Улан-Удэ, Северобайкальск; здесь проходят крупные транспортные магистрали, строится 2-я ветка Северомуйского тоннеля на трассе БАМ. Все это определяет необходимость надежных оценок сейсмической опасности в регионе.

Для сейсмостойкого строительства требуются оценки параметров колебаний земной поверхности при возможных в будущем сильных землетрясениях: пиковых ускорений и скоростей, интенсивности, спектров реакции, продолжительности, преобладающих периодов колебаний и

других. Эти параметры требуется оценить для конкретных условий площадок строительства.

Основой для таких оценок служат записи землетрясений, полученные в данном регионе. Если имеется достаточно большое количество записей, для региона выводятся уравнения прогноза движений грунта (УПДГ), которые и дают необходимые оценки. УПДГ позволяют оценивать значения параметров сейсмических движений на поверхности при землетрясениях в зависимости от магнитуды, расстояния от эпицентра, локальных условий в точке наблюдения и, в некоторых случаях, ряда других параметров. Это эмпирические уравнения, в основу которых положены современные представления инженерной сейсмологии о факторах, определяющих выраженность сейсмического воздействия на поверхности. Такие уравнения имеют привязку к региону и создаются

методами регрессии на основе региональной базы данных по сильным движениям.

Однако в России достаточное количество данных для разработки региональных УПДГ накоплено лишь в Курило-Камчатской зоне. Особенности сейсмичности в Курило-Камчатской зоне изучены достаточно детально, что отражено в большом количестве научных публикаций [Abubakirov, Gusev, 1990; Гусев, Мельникова, 1990; Гусев, Гусева, 2006; 2017; Гусев и др., 2006; Pavlenko, 2013; и др.].

В других районах РФ с высокой сейсмичностью, таких как Алтае-Саянский регион, Байкальская рифтовая зона, Приморский край, Магаданская область и другие накоплено существенно меньше записей сильных землетрясений, так что эти районы остаются недостаточно изученными в сейсмическом плане.

В таких районах с небольшим количеством записей сильных землетрясений для построения УПДГ можно применить другой подход: по имеющимся записям местных землетрясений оценить региональные характеристики излучения и распространения сейсмических волн: сброшенное в очагах напряжение, добротность среды, параметры геометрического расхождения, локального усиления и другие и использовать эти параметры для построения акселерограмм возможных в будущем сильных землетрясений, которые описывали бы колебания поверхности в широком диапазоне магнитуд и расстояний. По таким акселерограммам затем можно построить УПДГ для региона.

УПДГ имеют фундаментальное значение для вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО); новые УПДГ регулярно публикуются в ведущих геофизических журналах. Помимо этого, регулярно публикуются обновленные списки и описания уже существующих уравнений [Douglas 2011; 2017]. УПДГ широко применяются для оценки сейсмической опасности в таких странах как Япония, США, Турция, Италия.

Существующие уравнения классифицируются по типу описываемой сейсмичности. Выделяются три основных группы уравнений: 1) уравнения для сейсмически активной земной коры, для которой характерны частые мелкофокусные землетрясения, например, [Abrahamson et al., 2014; Boore et al., 2014]; 2) уравнения для стабильных континентальных плит, характеризующихся более редкими крупными землетрясениями, например, [Graizer, 2016; Boore, 2018]; 3) уравнения для зон субдукции, характеризующихся повышенной сейсмоактивностью, например, [Zhao et al., 2016].

Все три перечисленные типа зон очагов землетрясений представлены в России. Однако региональные характеристики сильных движений пока изучены слабо, не разработано УПДГ для регионов России за исключением регионального

УПДГ для острова Сахалин [Kononov et al., 2019]. Поэтому для России чрезвычайно актуальной является задача создания и накопления региональных баз данных для дальнейшего анализа и построения региональных УПДГ.

В настоящей работе такой подход применен для разработки УПДГ в Байкальской рифтовой зоне, в ее восточной части. С накоплением записей сильных движений в регионе можно будет уточнять региональные характеристики излучения и распространения сейсмических волн, параметры сильных движений и УПДГ.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Сейсмическую обстановку в Байкальской рифтовой зоне иллюстрирует рис. 1, взятый из Экспертного заключения В.И. Уломова О сейсмической опасности участка трассы нефтепровода ВСТО “Тайшет–Сковородино” [Уломов, 2005] (позднее трасса была перенесена к северу, в обход сейсмичной зоны).

Мы приводим этот рисунок, поскольку он является информативным: содержит данные как об общем сейсмическом районировании региона, так и об активных разломах и прошлых землетрясениях. Также рисунок наглядно показывает, что в этом районе проходят крупные магистрали как транспортные (автомобильные, железнодорожные), так и различные трубопроводные.

Как видно из рисунка, Байкальская рифтовая зона — опасный в сейсмическом плане регион, где в прошлом неоднократно происходили сильные землетрясения. Согласно действующим в настоящее время картам общего сейсмического районирования территории РФ ОСР-2015 (и ранее созданным картам ОСР-97), для периодов повторяемости 500 и 1000 лет район характеризуется балльностью 9 шкалы МСК-64, для периода повторяемости 5000 лет — балльностью 10 баллов. Поясним, что действующие карты ОСР-2015 являются практически компиляцией карт ОСР-97, за исключением районов Калининграда и Якутии, где без каких-либо пересчетов внесены коррективы, с механически присоединенными картами ОСР-2004 Крыма.

Высокая сейсмичность Байкальской рифтовой зоны видна и в модели зон ВОЗ (возникновения очагов землетрясений), на основе которой разрабатывались карты общего сейсмического районирования ОСР-2016. Максимальная магнитуда землетрясений в западной части Байкальской рифтовой зоны, согласно новым картам — 8, а в центральной и восточной частях — 7.5; при этом активные сейсмогенерирующие разломы преимущественно вытянуты вдоль озера Байкал.

В наших прошлых работах выполнены исследования по оценке характеристик излучения и распространения сейсмических волн в централь-

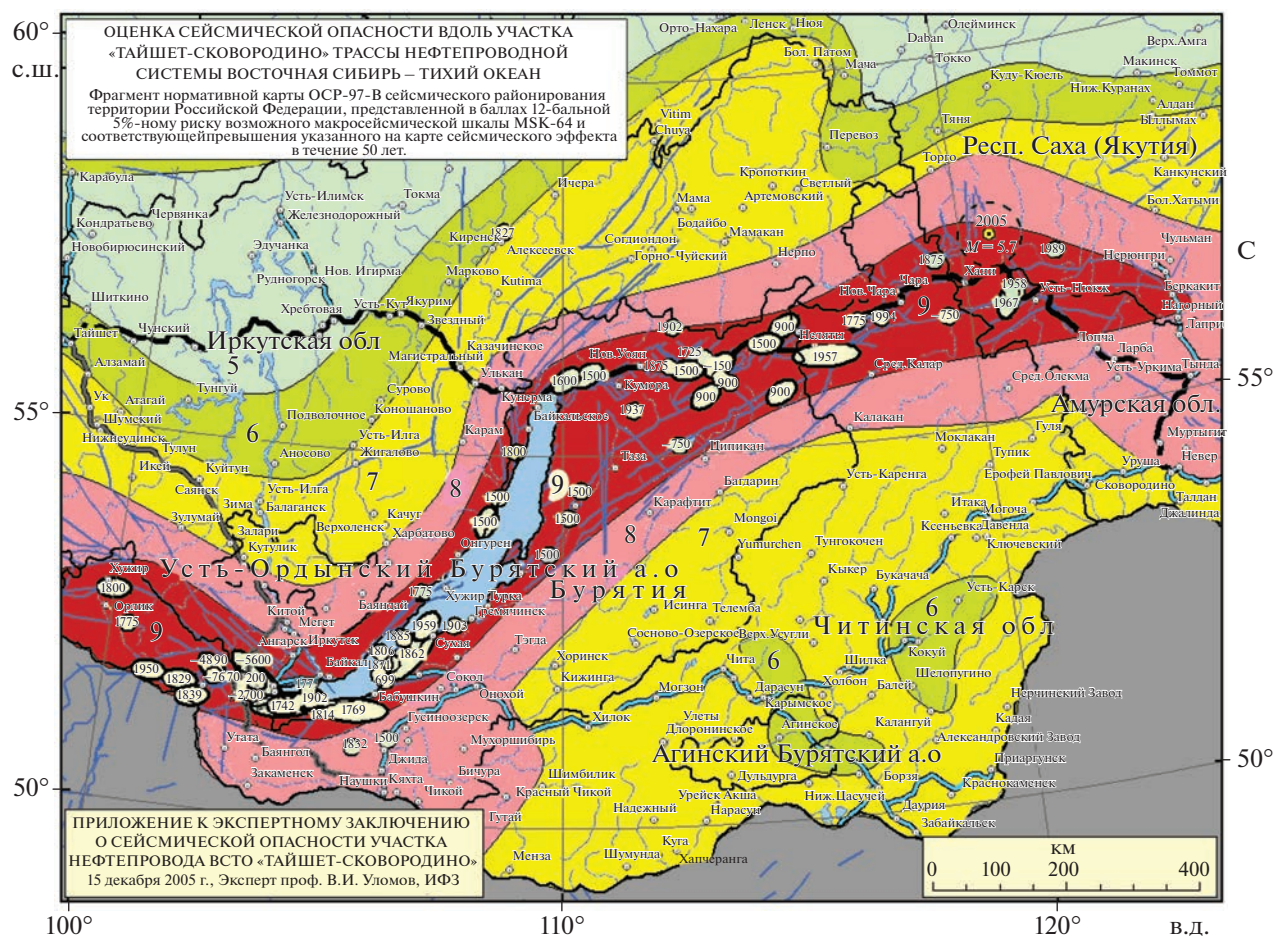


Рис. 1. Сейсмическая обстановка в Байкальской рифтовой зоне по карте ОСР-97В и предполагаемая трасса нефтепровода ВСТО (Восточная Сибирь – Тихий океан) – черная линия. Кружки и эллипсы – очаги землетрясений с магнитудой $M = 6.5$, $M = 7.0$ и $M = 7.5$ с указанием года возникновения; синие линии – активные разломы земной коры. Голубым цветом показаны дороги, а темно-серым цветом – один из альтернативных и менее сейсмоопасных вариантов «южной трассы» нефтепровода (на юго-восток от Тайшета до Кяхты, а далее на восток – до Сковородино). В северо-восточной части 9-балльной зоны пунктирной окружностью ооконтурен район потенциального очага предстоящего сильного землетрясения, а внутри этой окружности – эпицентр землетрясения с магнитудой $M = 5.7$, произошедшего 11.12.2005 г. (из заключения [Уломов, 2005]).

ной и восточной частях Байкальской рифтовой зоны, необходимых для построения акселерограмм возможных в будущем сильных землетрясений в регионе. Такие акселерограммы используются при проектировании сейсмостойких зданий.

В работе [Павленко, Тубанов, 2017] смоделированы акселерограммы наиболее сильных землетрясений ($M_w \sim 3.4\text{--}4.8$), зарегистрированных сейсмостанцией «Улан-Удэ» в 2006–2011 гг. с эпицентрными расстояниями $\sim 96\text{--}125$ км и глубинами очагов $\sim 8\text{--}12$ км; в работе [Павленко, 2022] смоделированы записи местных землетрясений, полученных сейсмостанцией «Северомуйск» (SVKR) в 2005–2010 гг. (магнитуды $m_b \sim 4.2\text{--}5.5$, гипоцентральные расстояния $r \sim 15\text{--}220$ км, глубины очагов h – от 1.5 до 22 км). В табл. 1 и табл. 2 приведены данные об использованных в работах записях местных землетрясений, а на рис. 2 – рас-

положение сейсмостанций и очагов этих землетрясений.

В табл. 2 (из работы [Павленко, 2022]) координаты и глубины очагов h землетрясений приводятся в соответствии с данными ISC (International Seismological Center); магнитуды приведены в двух вариантах: в соответствии с ISC и в соответствии с данными Российской Геофизической Службы (в скобках).

В работах [Павленко, Тубанов, 2017; Павленко, 2022] получены оценки региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн в регионе: сброшенного в очагах напряжения $\Delta\sigma$, форм очаговых спектров, параметров геометрического расхождения, ослабления волн на высоких частотах (параметр каппа κ), параметров, определяющих форму и длительность акселерограмм и других, уточнены оценки добротности

Таблица 1. Параметры местных землетрясений (велосиграммы), зарегистрированных сейсмостанцией “Улан-Удэ” (из работы [Павленко, Тубанов, 2017])

№	Дата события	Координаты эпицентра		Магнитуда m_b	Эпицент. расст. r , км	Глубина очага, h , км	Пиковая скорость, мкм/с		Ср. пиков. скорость модель, мкм/с
		°с.ш.	°в. д.				EW	NS	
1	13.12.2006	52.81	107.36	4.6	107	12	262	359	393 ± 42
2	19.08.2007	52.76	107.37	4.4	103	11	86.6	125	287 ± 27
3	26.07.2009	52.59	106.84	3.8	98	10	57.2	78.2	79 ± 8
4	10.10.2009	52.49	106.70	3.5	96	10	29.0	49.2	40 ± 5
5	26.07.2010	52.57	106.49	3.8	111	10	77.0	72.1	60 ± 12
6	18.03.2011	52.81	106.71	3.4	125	8	32.3	38.1	18 ± 2
7	14.10.2011	52.77	107.19	4.1	105	11	125	136	135 ± 11
8	19.11.2011	52.71	107.31	3.5	99	8	39.3	51.6	39 ± 3
9	01.02.2011	50.98	107.85	4.8	105	12	432	508	663 ± 78

Таблица 2. Параметры местных землетрясений, зарегистрированных сейсмостанцией “Северомуйск” SVKR (из работы [Павленко, 2022])

	Дата	Широта	Долгота	h , км	r_h , км	m_b	PGA, см/с ²		D ₉₅ , с	
1	21.8.2005	55.228	112.92	17.2	108	4.2(4.5)	1.1	0.9	13	14
2	08.02.2006	55.36	110.80	2.7	191	4.7(4.8)	1.0	0.8	15	13
3	03.08.2006	55.346	110.44	10.0	212	4.5(4.7)	0.4	0.4	14	14
4	03.08.2006	55.367	110.44	10.8	211	4.5(4.8)	0.6	0.3	13	15
5	04.12.2006	55.756	110.09	12.0	219	5.2(5.3)	49.1	31.5	11	13
6	11.12.2006	55.788	110.16	11.3	213	4.9(5.0)	1.7	1.8	14	13
7	15.12.2006	55.637	110.25	13.3	212	4.3(4.7)	1.1	0.7	12	12
8	21.01.2007	55.01	111.65	1.5	170	4.3(4.6)	0.8	0.7	13	14
9	21.03.2007	55.769	113.53	7.0	42	4.4(4.4)	3.8	6.1	10	11
10	05.04.2007	56.077	114.45	14.4	59	5.0(5.2)	14.9	12.3	7	6
11	04.07.2007	55.509	110.39	10.8	208	5.3(5.5)	1.7	1.2	15	14
12	23.08.2007	55.966	113.49	21.8	30	4.9(5.1)	23.7	28.2	3	3
13	27.08.2007	55.473	110.40	1.7	208	4.8(4.9)	0.9	0.7	11	10
14	03.01.2009	56.206	113.43	4.5	16	4.5(4.6)	81.3	143	4	4
15	10.06.2009	55.475	111.19	17.3	164	4.9(5.0)	1.7	1.8	10	11
16	08.12.2010	56.2033	113.130	10.0	27	4.2(4.6)	15.6	28.7	5	5

коры и верхней мантии $Q(f)$. Оценено изменение длительности сильных движений в зависимости от эпицентрального расстояния, по скоростному разрезу получены оценки локального усиления $A(f)$.

Очаги землетрясений, зарегистрированных станцией “Улан-Удэ”, располагались в южной и центральной частях озера Байкал, а очаги землетрясений, зарегистрированных станцией “Северомуйск”, – в северной части озера; все землетрясения произошли в Байкальской рифтовой зоне, и полученные параметры излучения и распространения сейсмических волн очевидно характеризуют центральную и восточную части Байкальской рифтовой зоны.

Полученные в двух работах [Павленко, Тубанов, 2017; Павленко, 2022] параметры совпадают или очень близки; они определяют движения на скале, без учета отклика грунта (при наличии грунтовой толщи пересчитываются в движения на поверхности грунта) и приведены в табл. 3 (в случаях, когда параметры, оцененные по записям станций “Улан-Удэ” и “Северомуйск”, несколько различны, выбраны параметры, оцененные по записям ст. “Северомуйск” – в большем диапазоне расстояний). В обеих работах в число входных параметров моделирования входили оценки локального усиления сейсмических волн в верхних слоях земной коры оцененные по данным о скоростном строении коры и верхней мантии до глу-

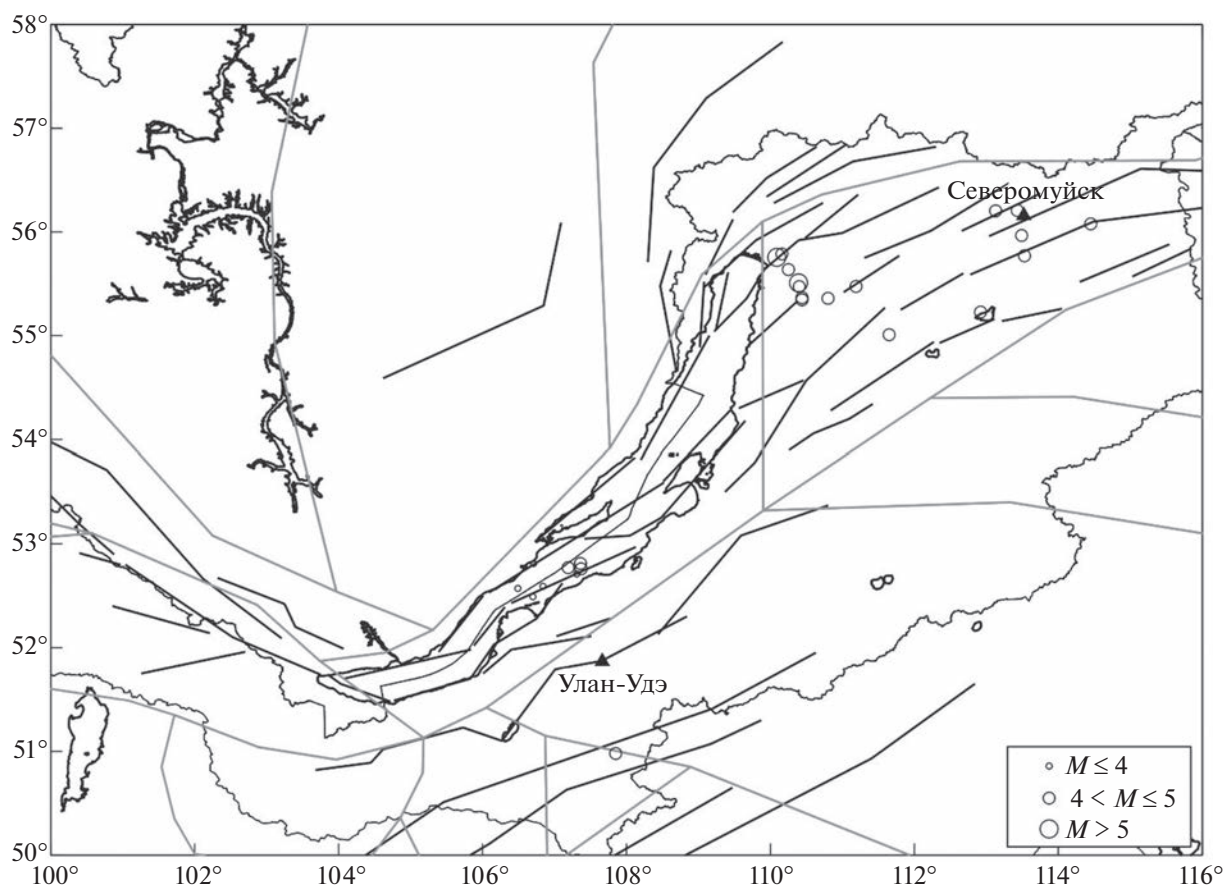


Рис. 2. Фрагмент карты региона, показывающей сейсмогенерирующие структуры (модель зон ВОЗ, положенную в основу при разработке карт ОСР) — линеаменты (черные линии) и границы доменов (серые линии), расположение сейсмостанций “Северомуйск” и “Улан-Удэ” (треугольники) и очагов землетрясений (кружки), изучавшихся в работах [Павленко, Тубанов, 2017; Павленко, 2022].

бин более 40 км Байкальской рифтовой зоны и сопредельных районов, полученных методом ГСЗ [Суворов и др., 1999]; они представлены в табл. 4. Усиление сейсмических волн в верхних слоях коры возникает вследствие снижения сейсмических скоростей и плотностей при приближении к поверхности, в частности, как результат процессов выветривания и разрушения земной коры, при распространении сейсмических волн с глубины к поверхности.

В настоящей работе параметры излучения и распространения сейсмических волн, приведенные в табл. 3 (с учетом локального усиления — табл. 4), использованы для построения набора акселерограмм колебаний поверхности (на скале с локальным усилением) в восточной части Байкальской рифтовой зоны в широком диапазоне магнитуд и расстояний: $M_w = 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5$ и 8.0 с эпицентрными расстояниями 1–200 км.

Акселерограммы рассчитаны методом стохастического моделирования [Boore, 2003]. Достаточно простой, но эффективный стохастический

подход основан на представлениях, подтверждаемых наблюдениями о том, что акселерограммы в окнах вступлений S -волн представляют собой ограниченный по спектру Гауссовский белый шум. Частотные ограничения определяются граничной частотой спектра f_0 и частотой $f_{\max}$ — наивысшей частотой, определяемой регистрирующим прибором или затуханием в земной коре [Hanks, McGuire, 1981]. Как показывает практика, в смоделированных акселерограммах мы получаем адекватное представление высокочастотных составляющих колебаний ($f > 0.1$ Гц), наиболее интересных для инженерной сейсмологии. Используя стохастический подход, можно с хорошей точностью моделировать сильные движения по записям слабых, поэтому метод широко применяется для расчетов в сейсмичных районах, где не имеется записей сильных землетрясений. Метод успешно применялся для расчетов параметров колебаний при землетрясениях с сейсмическими моментами в диапазоне более 12 порядков в различных тектонических условиях [Boore, 2003], т.е. входные параметры расчетной про-

Таблица 3. Параметры излучения и распространений сейсмических волн в Байкальской рифтовой зоне из работ [Павленко, Тубанов, 2017; Павленко, 2022]

Параметр напряжения $\Delta\sigma$	100 бар
Геометрическое расхождение	$1/r$ для $r < 50$ км $1/50$ для $50 \leq r < 150$ км $1/r^{0.5}$ для $r > 150$ км
$Q(f)$	$\sim 60f^{1.05}$ для $r \sim 15-30$ км, $\sim 80f^{1.0}$ для $r \sim 40-60$ км, $\sim 90f^{0.9}$ для $r \sim 100-110$ км, $\sim 150f^{0.7}$ для $r \sim 160-220$ км
Параметр длительности сигнала $dur(r)$	0 для $0 < r < 5$ км $0.222r$ для $5 < r < 50$ км $10 + 0.015r$ для $r > 50$ км
Каппа κ	0.012 с
Скорость S -волн в земной коре на глубинах очагов (в среднем)	3.6 км/с
Средняя плотность земной коры на глубинах очагов (в среднем)	2.8 г/см ³

граммы, полученные по слабым землетрясениям, позволяют корректно рассчитывать движения на поверхности при сильных землетрясениях.

При расчете акселерограмм амплитуды колебаний рассчитываются как детерминированные функции со случайным фазовым спектром, а интенсивность и продолжительность колебаний задаются в зависимости от магнитуды землетрясения и расстояния до источника.

Входные данные расчетной программы — параметры, описывающие особенности излучения (эффекты очагов) и распространения (эффекты пути распространения) сейсмических волн в данном регионе, а также параметры, описывающие локальные эффекты вблизи источников и приемников (табл. 3). Также использованы оценки локального усиления сейсмических волн в верхних слоях земной коры (табл. 4), оцененные по данным о скоростном строении коры и верхней мантии до глубин более 40 км Байкальской рифтовой

зоны и сопредельных районов [Суворов и др., 1999]. Усиление $A(f)$ было рассчитано по методике, предложенной в работе [Boore, Joyner, 1997].

В расчетах использовалась программа D. Boore SMSIM, дополненная автором для возможности учета протяженности сейсмических очагов (в программе D. Boore источник предполагается точечным). В моделировании этих землетрясений использован опыт автора в моделировании сильных землетрясений Курило-Камчатской зоны [Pavlenko, 2013].

Очаги землетрясений с магнитудами $M_w = 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0$ и 6.5 моделировались как точечные, а очаги с магнитудами $7.0, 7.5$ и 8.0 — как протяженные, с размерами, выбранными в соответствии с рекомендациями работы [Гусев, Мельникова, 1990]. Площади очагов с магнитудами $7.0, 7.5$ и 8.0 составляли $900, 2700$ и 8500 км²; очаги моделировались как совокупности субочагов с размерами 10 на 10 км².

В соответствии с моделью зон ВОЗ для Байкальской рифтовой зоны (положенной в основу карт ОСР региона), угол падения разломных плоскостей протяженных очагов выбран 90° , т.е. падение вертикальное. Длинные стороны очагов были направлены вдоль земной поверхности, а короткие — вглубь.

Для разработки УПДГ расчеты для протяженных очагов землетрясений с магнитудами $7.0, 7.5$ и 8.0 велись в 3-х вариантах, с эпицентром в средних точках разломных плоскостей и с регистрацией (пунктом наблюдения): 1) на поверхности, на линии вдоль длинной оси очага, 2) на поверхности, на линии, перпендикулярной длинной оси очага, 3) на поверхности, на линии, расположенной под углом 45 градусов к длинной оси очага

Таблица 4. Коэффициенты частотно-зависимого усиления сейсмических волн в верхних слоях земной коры относительно окрестности очагов в Байкальской рифтовой зоне

f , Гц	$A(f)$
0.021	1.25
0.0244	1.289
0.046	1.358
0.0566	1.378
0.194	1.438
0.3425	1.462
1.283	1.557

(как промежуточный вариант 1) и 2)). Для этих магнитуд предполагалось вспарывание поверхности (выход разлома на поверхность).

При построении УПДГ использовались результаты всех 3-х вариантов расчетов с равными весами, чтобы по возможности учесть все варианты.

Рассчитанные акселерограммы использованы для разработки УПДГ для восточной части Байкальской рифтовой зоны.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По набору построенных синтетических акселерограмм получены оценки пиковых ускорений и скоростей с доверительными интервалами, на основе которых выполнены оценки параметров регионального УПДГ для Байкальской рифтовой зоны.

В вопросе выбора функциональной формы УПДГ авторы разделяют подход Джойнера и Бура, предписывающий использовать простые функциональные формы с минимальным числом независимых переменных. В соответствии с этим подходом в качестве модели УПДГ были сначала опробованы уравнения из работ [Joyneg, Booge, 1993; Booge et al., 1997]. Эти простые функции дают хорошее согласие с нашими данными для магнитуд $4 \leq M \leq 7$, однако не позволяют смоделировать эффекты насыщения амплитуд пиковых ускорений и скоростей при $M > 7$. В качестве итоговой формы УПДГ было принято уравнение [Booge, Atkinson, 2008], которое позволило получить искомые эффекты. Уравнение имеет вид:

$$\ln(Y) = F_M(M) + F_D(R, M) + \varepsilon\sigma, \quad (1)$$

где: Y — значение пикового ускорения (PGA) в долях g или пиковой скорости (PGV) в см/с; функции F_M и F_D описывают функциональную зависимость $\ln(Y)$ от магнитуды и расстояния, т.е. эффекты очага и пути распространения; M — моментная магнитуда; R — эпицентральное расстояние либо расстояние Джойнера–Бура; ε — невязка регрессионной модели, отражающая разброс наблюдаемых значений $\ln(Y)$ относительно оценок регрессионной модели; σ — стандартное отклонение распределения невязки.

В уравнении (1) опущена функция F_S , отвечающая за локальные эффекты, поскольку анализируются записи станций “Северомуйск” и “Улан-Удэ”, грунтовые условия на которых характеризуются как скальный грунт.

$$F_M(M) = e_1 + \begin{cases} e_2(M - M_h) + e_3(M - M_h)^2, & M \leq M_h \\ e_4(M - M_h), & M > M_h \end{cases} \quad (2)$$

где: e_1, e_2, e_3, e_4 — параметры регрессии; M_h — магнитуда, при которой происходит переход от квадратичной зависимости амплитудных факторов к линейной.

$$F_D(R, M) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \times \ln(R_h/R_{ref}) + c_3(R_h - R_{ref}), \quad (3)$$

где: $R_h = \sqrt{R^2 + h^2}$; h — параметр, отвечающий за насыщение на близких эпицентральных расстояниях; c_1 — параметр, характеризующий геометрическое расхождение; c_2 — параметр, описывающий убывание значений $\ln(Y)$ с расстоянием в зависимости от магнитуды; c_3 — параметр, отвечающий за неупругое поглощение; M_{ref}, R_{ref} — референтные значения магнитуды и расстояния.

Для определения значений параметров уравнения (1) был использован двухэтапный метод регрессии [Joyneg, Booge, 1993; Booge, Atkinson, 2008], позволяющий разделить определение коэффициентов в функциях F_D и F_M . На первом этапе оцениваются значения параметров функции F_D , а также набор амплитудных факторов, уникальных для каждого землетрясения в базе данных регрессии. На втором этапе выясняется зависимость амплитудных факторов от магнитуды. Этот метод подробно описан в статье [Booge, Atkinson, 2008].

Полученные таким образом оценки значений параметров уравнения (1) показаны в табл. 5, на рис. 3 представлены зависимости пиковых ускорений и скоростей от магнитуды и расстояния, полученные с помощью этого уравнения. Заметны эффекты насыщения амплитуд PGA и PGV в ближней зоне и на старших магнитудах.

Полученное УПДГ применимо для $M = 4-8$ и $R = 1-200$ км. В дальнейшем, с получением новой информации, модель УПДГ планируется доработать для учета локальных эффектов в точке приема, а также оценить коэффициенты уравнения для оценки амплитуд компонент спектра реакции по ускорению.

Попробуем сравнить полученные оценки PGA с оценками тех уравнений, которые рекомендует проект Global Earthquake Model (GEM, <http://www.globalquakemodel.org>) для Байкальской рифтовой зоны. Проект GEM — это публичная некоммерческая организация с государственным участием, созданная в 2009 г. в городе Павия, Италия. Организация занимается совершенствованием и унификацией методик оценки сейсмического риска. Одним из продуктов GEM является программа, выдающая список рекомендуемых УПДГ для разных регионов Земли.

Для Байкальской рифтовой зоны проект GEM рекомендует пять уравнений: два УПДГ [Akkar, Bommer, 2007; Cauzzi, Faccioli, 2008], которые со-

Таблица 5.1. Коэффициенты уравнения (1), зависящие от периода

T	c_1	c_2	c_3	e_1	e_2	e_3	e_4
$PGA(R_{EPI})$	-1.1201	0.1477	-0.0046	0.8278	0.6136	-0.0158	0.0000
$PGV(R_{EPI})$	-1.0145	0.1450	-0.0033	4.4790	0.7283	-0.1506	0.0000
$PGA(R_{JB})$	-1.0973	0.1110	-0.0040	0.7605	0.4151	-0.1101	0.0000
$PGV(R_{JB})$	-0.9778	0.1204	-0.0033	4.3296	0.5197	-0.2353	0.0000

здавались с целью использования в регионах Европы, а также три УПДГ, разработанные в рамках проекта Next Generation Attenuation [Boore, Atkinson, 2008; Campbell, Bozorgnia, 2008; Chiou, Youngs, 2008], которые позиционируются как универсальные УПДГ для коровой сейсмичности. Далее в тексте эти УПДГ будут обозначаться аббревиатурами: АКВО07 – [Akkar, Bommer, 2007];

CAFA08 – [Cauzzi, Faccioli, 2008]; BOAT08 – [Boore, Atkinson, 2008]; CABO08 – [Campbell, Bozorgnia, 2008]; CHYO08 – [Chiou, Youngs, 2008].

Уравнение CAFA08 не содержит параметров, описывающих насыщение в ближней зоне очага, и неприменимо на близких расстояниях ($R_{hyp} < 15$ км), поэтому было исключено из сравнения.

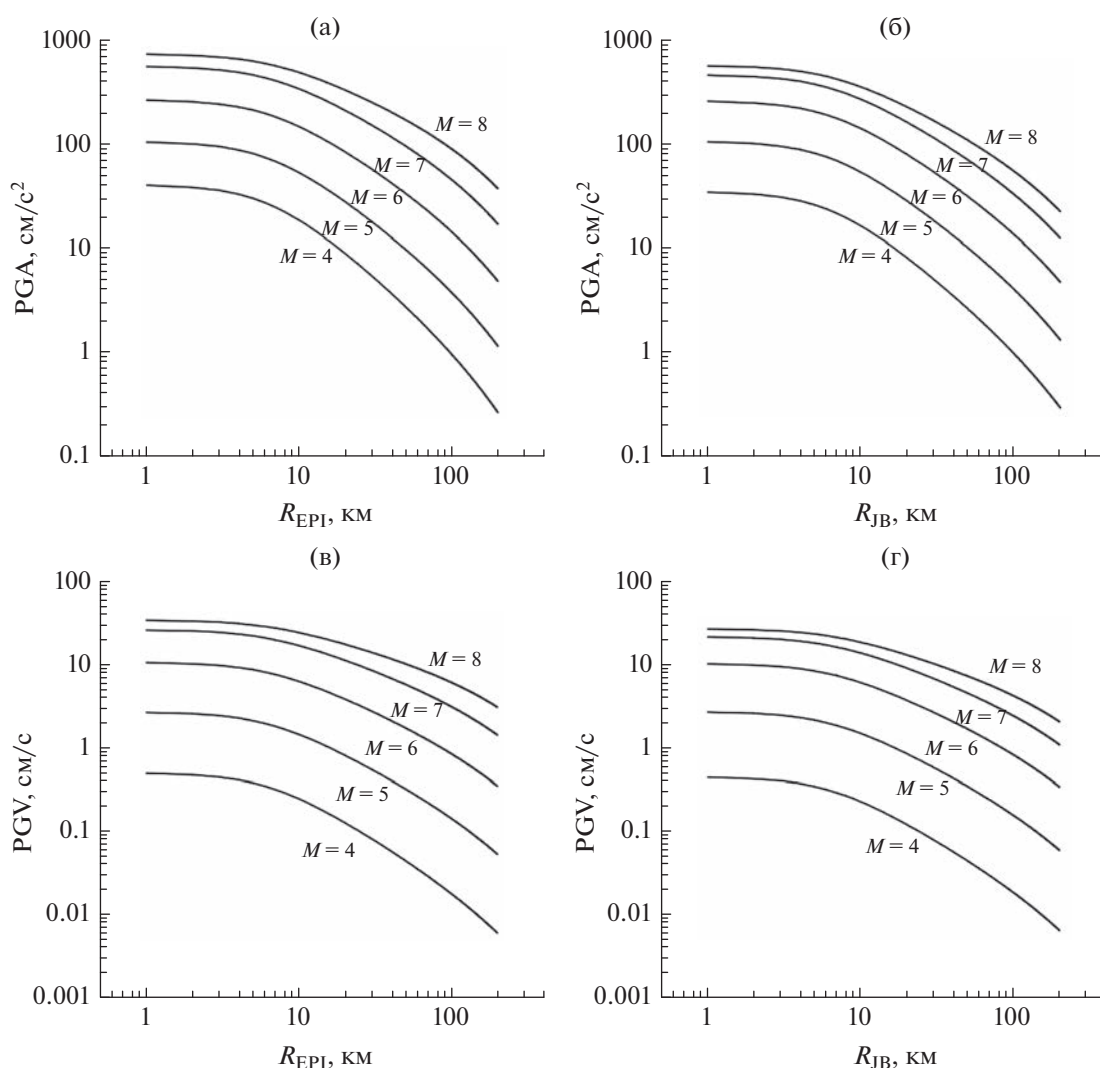


Рис. 3. Графики зависимости значений PGA (а), (б) и PGV (в), (г) от эпицентрального расстояния и расстояния Джойнера–Бура для значений моментной магнитуды $M = 4-8$.

В моделях АКВО07, ВОАТ08 в качестве меры расстояния используется расстояние Джойнера–Бура (R_{JB}), т.е. кратчайшее расстояние от точки наблюдения до проекции разломной плоскости на поверхность Земли. В моделях САВО08, СНУО08 используется кратчайшее расстояние до разломной плоскости (R_{rip}). Для корректности сопоставления оценок перечисленных УПДГ значения R_{rip} рассчитывались по формуле $R_{rip} = R_{JB} + \Delta(M)$, где $\Delta(M)$ для $M = 5-6$ принималась с учетом средней глубины очагов землетрясений в 10 км, а для $M = 7-8$ предполагалось вспарывание поверхности (выход разлома на поверхность) и $R_{rip} = R_{JB}$.

Разные авторы в своих УПДГ используют различные метрики для описания расстояния от источника, поэтому в настоящей работе для удобства пользователей и корректного сравнения с уравнениями, рекомендуемыми GEM, были выполнены расчеты с использованием двух наиболее простых метрик описания расстояния от источника, т.е. эпицентрального расстояния и расстояния Джойнера–Бура. Для этих двух случаев оценены коэффициенты УПДГ (табл. 5.1).

Корректное сравнение, не требующее преобразования метрик расстояния, показало, что оценки PGA нашего УПДГ и УПДГ, рекомендованных проектом GEM, достаточно хорошо согласуются между собой. На рис. 4. показаны графики зависимости PGA от расстояния для $M = 5-8$, рассчитанные по уравнению (1) и с помощью перечисленных выше УПДГ, рекомендованных проектом GEM.

Из рис. 4 видно, что приведенные уравнения несколько различаются как уровнем прогнозируемых значений PGA (разброс оценок достигает 2 раз), так и скоростью убывания этих значений с расстоянием; такой разброс представляется вполне естественным и характеризует так называемую эпистемическую неопределенность [Budnitz et al., 1997], связанную с оценками сейсмических воздействий. Таким образом, перечисленный набор УПДГ можно использовать для получения независимых оценок сейсмических воздействий в Байкальской рифтовой зоне и для построения логического дерева в рамках ВАСО.

В целом очевидно каждое УПДГ определяется использованной в анализе базой данных (т.е. записями землетрясений), которые характеризуются своими значениями эффектов очагов (сброшенное напряжение, очаговый спектр) и эффектов среды (частотно-зависимое неупругое поглощение, поглощение волн на высоких частотах каппа, локальное усиление в верхних слоях земной коры).

Таким образом, различия в полученных нами оценках и оценках, даваемых набором УПДГ из базы GEM, с одной стороны, могут быть связаны с различиями характеристик сейсмических оча-

Таблица 5.2. Коэффициенты уравнения (1), не зависящие от периода

h	M_h	M_{ref}	R_{ref}	σ
6.23	6.75	4.5	1.0	0.55

гов и среды распространения сейсмических волн в Байкальской рифтовой зоне и регионах, описываемых УПДГ, рекомендованными проектом GEM. С другой стороны, нужно иметь в виду некоторое различие определений параметров: так, авторы УПДГ, рекомендованных проектом GEM, определяют PGA как среднее геометрическое горизонтальных компонент, а в настоящей работе под PGA понимается максимальная горизонтальная компонента.

Такой разброс понятий лишь еще раз показывает важность выработки своих УПДГ на основе изучения своих региональных записей местных землетрясений.

Как показано выше, построенное в настоящей работе УПДГ основано преимущественно на сейсмических записях, полученных в восточной части Байкальской рифтовой зоны, и относится к восточной части БРЗ. В то же время, в западной части БРЗ расположены многие станции Байкальской сети сильных движений, и в последние годы получены цифровые записи сильных землетрясений.

Так 27.08.2008 г. в районе юго-западного замыкания озера Байкал произошло Култукское землетрясение с магнитудой $M_w = 6.3$ – первое по настоящему сильное сейсмическое событие в Южном Прибайкалье, произошедшее после перевода региональной сети станций на цифровую регистрацию [Мельникова и др., 2014]. Станциями Байкальского филиала ГС СО РАН записаны акселерограммы землетрясения на эпицентральных расстояниях 28.8–204.3 км.

Сравним прогнозные оценки пиковых ускорений, даваемые полученным в настоящей работе УПДГ, с записями Култукского землетрясения. На рис. 5 приведены акселерограммы Култукского землетрясения (из работы [Мельникова и др., 2014]) и (справа) – акселерограммы, построенные в настоящей работе; для сравнения из построенных выбраны акселерограммы, соответствующие магнитуде $M_w = 6.3$ и эпицентральному расстоянию, близким к расстояниям до станций сети Байкальского филиала ГС РАН.

В табл. 6 приведены инструментальные данные о сильных движениях при Култукском землетрясении 27.08.2008 г. на ближайших к эпицентру сейсмических станциях, а также прогнозные пиковые ускорения по УПДГ, полученным в настоящей работе.

К сожалению, до сих пор для сейсмических станций ГС РАН не изучены грунтовые условия

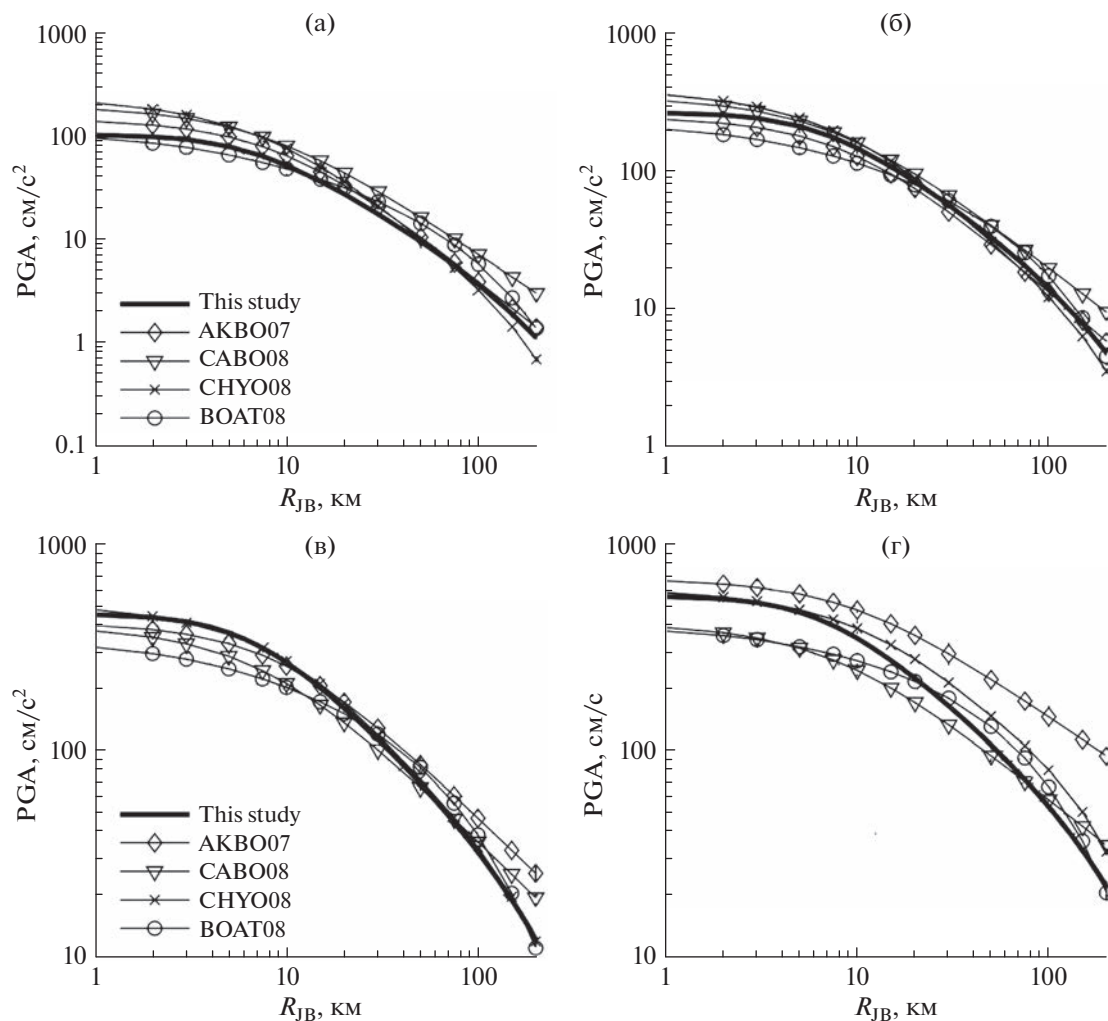


Рис. 4. Сравнение оценок PGA, полученных по уравнению (1) (толстая черная линия) и по УПДГ, рекомендуемым проектом GEM для (а) – $M = 5$; (б) – $M = 6$; (в) – $M = 7$; (г) – $M = 8$.

(за исключением нескольких станций в Петропавловске-Камчатском), т.е. не определены скоростные разрезы до глубин 80–100 м, как это сделано, например, для станций японской сети *KiK-net*. Наличие информации о сейсмических скоростях в грунтовых толщах под станциями давало бы возможность моделировать полученные записи сильных движений с учетом поведения грунта, чтобы более точно определять параметры очага, пути распространения, изучать поведение приповерхностных грунтов при землетрясении.

Описание грунтовых условий для станций Байкальского филиала ГС СО РАН дается в виде “глыбы, щебень, дресва до 5 м, мраморы, сланцы” – на станции “Талая” или “суглинки микропористые до 13 м” – на станции “Иркутск” (табл. 6), и такое описание не позволяет делать каких-либо заключений о вкладе приповерхностных грунтов в движения на поверхности.

В настоящей работе, как показано выше, акселерограммы и УПДГ построены для скального грунта с небольшим локальным усилением (табл. 4). По виду акселерограмм и пиковым ускорениям можно предположить, что похожие грунтовые условия наблюдаются на станции “Закаменск” (ЗАК), где зарегистрированы пиковые ускорения, совпадающие с предсказанными построенными УПДГ (рис. 5).

На ближайшей к очагу станции “Талая” акселерограмма имеет вид двух импульсов, что может говорить об очаговых эффектах – двух крупных подвижках в очаге. И на трех станциях, “Талая”, “Иркутск” и “Аршан” очевидно происходит усиление сейсмических волн в приповерхностных грунтах, представляющих собой “глыбы, щебень, дресву до 5 м, мраморы, сланцы” (“Талая”), “суглинки микропористые до 13 м” (“Иркутск”) “глыба, дресва, щебень, супесчаный заполнитель до 5 м” (“Аршан”), так что пиковые ускорения

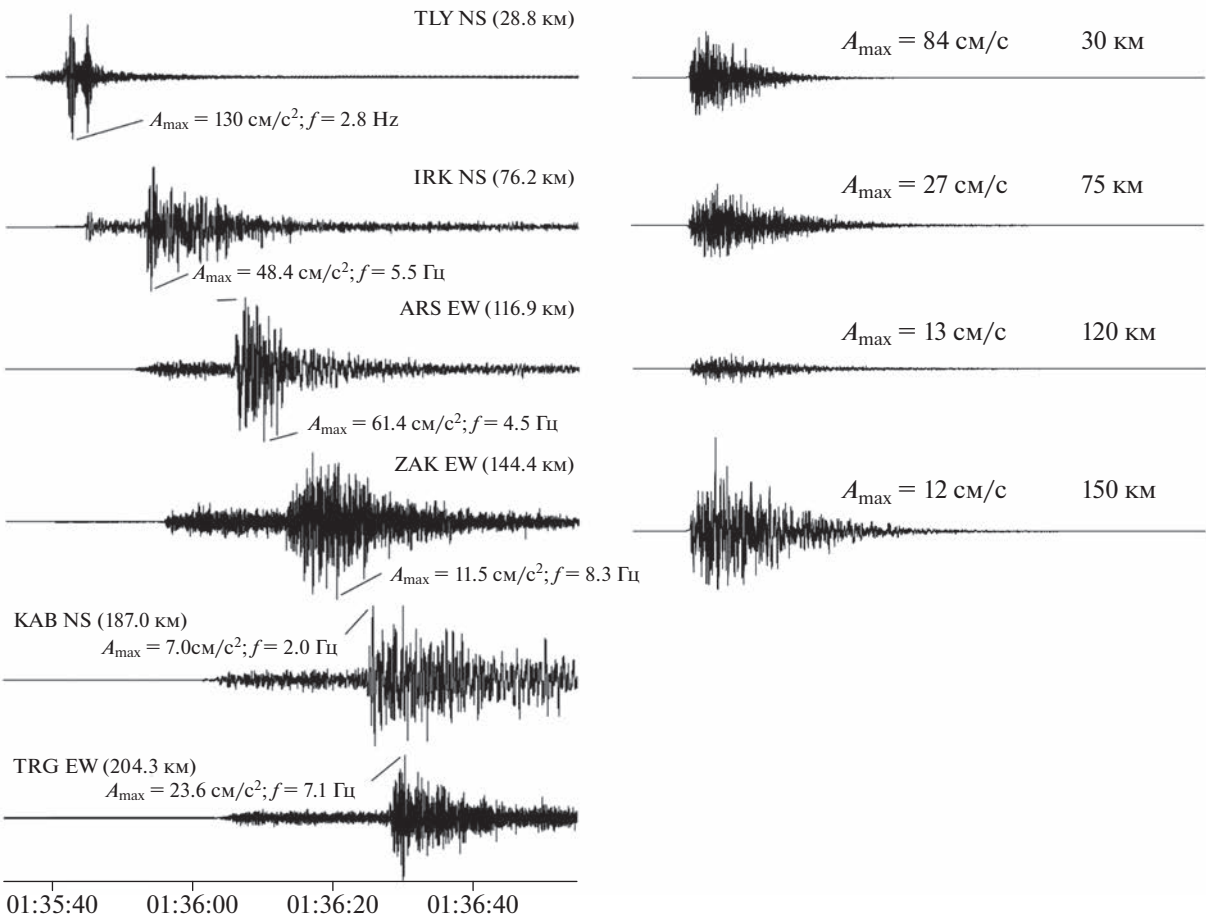


Рис. 5. Акселерограммы Култуковского землетрясения (из работы [Мельникова и др., 2014]) в сравнении с акселерограммами, построенными в настоящей работе. Горизонтальные и вертикальные оси имеют один масштаб для акселерограмм, расположенных на одном уровне по горизонтали.

Таблица 6. Инструментальные данные о сильных движениях при Култуковом землетрясении 27.08.2008 г. на ближайших к эпицентру сейсмических станциях и прогнозные пиковые ускорения по полученным УПДГ

Станция, код	С.ш., град.	В.д., град.	Высота, м	Тип ЦСС на 01.01.2003	Подпочва	R, км	$A_{\max}$, см/с ²	$A_{\max}$, см/с ² (УПДГ)
Талая TLY	51.681	103.644	579	“IRIS”	Глыбы, щебень, дресва до 5 м, мраморы, сланцы	28.8	130.0	84.0
Иркутск IRK	52.243	104.271	467	“Байкал-10”	Суглинки микропористые до 13 м	76.2	48.4	27.0
Аршан ARS	51.920	102.423	970	“Байкал-11”	Глыба, дресва, щебень, супесчаный заполнитель (до 5 м)	116.9	61.4	13.0
Закаменск ZAK	50.382	103.281	1200	“Байкал-11”	Глыба, дресва, щебень, с заполнителем песком	144.4	11.5	12.0
Кабанск KAB	52.050	106.654	468	“Байкал-10”	Пески зернистые до 5 м, пески с гравием	187.0	7.0	
Тырган TRG	52.760	106.348	718	“Байкал-11”	Глыбы, дресва, гнейсы, сланцы до 10 м	204.3	23.6	

возрастают относительно пиковых ускорений на скале.

Для станций Байкальского филиала ГС СО РАН сделаны оценки амплитудно-частотных характеристик методом Накамуры (по отношению спектров горизонтальных и вертикальных колебаний), выделены группы станций с устойчивой АЧХ, независимой от сезона (такой является например станция “Закаменск”) и с неустойчивыми АЧХ, с заметными суточными или сезонными вариациями АЧХ; это, в частности, станции “Аршан”, “Иркутск”, “Талая”, “Тырган”. В летнее время (когда и произошло землетрясение) АЧХ на этих станциях в определенных диапазонах частот заметно выше, чем в зимнее время, что может быть связано с замерзанием и оттаиванием приповерхностных грунтов.

Таким образом, в целом, ускорения, прогнозируемые предлагаемым УПДГ, согласуются с зарегистрированными при Култукском землетрясении; более высокие ускорения, зарегистрированные станциями “Талая” и “Иркутск”, чем прогнозируемые УПДГ, очевидно связаны с откликом приповерхностных грунтов на этих станциях.

Расхождения в пиковых ускорениях, зарегистрированных станцией “Аршан” и прогнозируемых УПДГ, довольно существенны и указывают на необходимость детального изучения локальных эффектов на станции “Аршан”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день, полученное в настоящей работе на основе записей местных землетрясений УПДГ, т.е. уравнение прогноза пиковых ускорений и скоростей на скальном грунте в зависимости от магнитуды землетрясения и расстояния от очага, можно применять в задачах оценки сейсмической опасности в Байкальской рифтовой зоне. Сравнение оценок пиковых ускорений, полученных на основе предложенного в статье УПДГ и на основе УПДГ, рекомендуемых для Байкальской рифтовой зоны проектом GEM, показало, что эти рекомендуемые УПДГ можно использовать для построения логических деревьев для целей ВАСО.

Вместе с тем, данные наблюдений показывают заметную анизотропию среды, т.е. различия, по крайней мере, характеристик затухания сейсмических волн по разным направлениям, поэтому исследования нужно продолжать, и мы планируем совершенствовать полученное УПДГ с появлением новых данных наблюдений.

Эта работа будет продолжена с накоплением записей сильных движений в Байкальском регионе для уточнения региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн, параметров сильных движений и УПДГ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников Байкальского и Бурятского филиалов ФИЦ “Единая геофизическая служба РАН” за записи сейсмостанций “Северомуйск” и “Улан-Удэ”, использованные в настоящей работе. Авторы благодарны трем анонимным рецензентам за их ценные замечания, которые позволили улучшить текст статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами — среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.
- Гусев А.А., Гусева Е.М. Свойства колебаний грунта при сильных землетрясениях Камчатки (ОБЗОР) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 14–24.
- Гусев А.А., Петухин А.Г., Гусева Е.М., Гордеев Е.И., Чебров В.Н. Средние спектры Фурье сильных движений грунта при землетрясениях Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 60–70.
- Гусев А.А., Гусева Е.М. Характер масштабирования очаговых спектров для землетрясений Камчатки в диапазоне магнитуд 3.5–6.5 // Докл. РАН. 2017. Т. 472. № 5. С. 580–583.
<https://doi.org/10.7868/S0869565217050164>
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И. Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. с $M_W = 6.3$, $I_0 = 8-9$ (Южный Байкал). Землетрясения Северной Евразии. 2008 год. Обнинск: ГС РАН. 2014. С. 386–407.
- 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. 2022. № 2. С. 247–263.
<https://doi.org/10.15372/GiG2020203>
- Суворов В.Д., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф. Земная кора и ее изостатическое состояние в Байкальской рифтовой зоне и прилегающих территориях по данным ДСС // Геология и геофизика. 1999. № 40. С. 303–316.
- Уловов В.И. Заключение эксперта В.И. Уломова, доктора физико-математических наук, профессора геофизики, члена экспертной комиссии Государственной экологической экспертизы материалов по обоснованию строительства “Трубопроводной системы первого пускового комплекса Восточная Сибирь–Тихий океан (ВСТО)” /ТЭО (проект)/по оценке сейсмической опасности О сейсмической опасности участка трассы нефтепровода ВСТО “Тайшет-Сквородино”. 2005. <http://seismos-u.ifz.ru/personal/control.htm>
- Abrahamson N.A., Silva W.J., Kamai R. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions // Earthquake Spectra. 2014. V. 30. № 3. P. 1025–1055.
- Abubakirov I.R., Gusev A.A. Estimation of scattering properties of lithosphere of Kamchatka based on Monte-Carlo simulation of record envelope of a near earthquake // Phys Earth Planet Inter. 1990. V. 64. P. 52–67.

- Akkar S., Bommer J.J.* Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and the Middle East // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2007. V. 36. P. 1275–1301.
- Boore D.M., Joyner W.B.* Site amplifications for Generic Rock Sites // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1997. V. 87. P. 327–341.
- Boore D.M.* Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method // *Pure and Applied Geophysics*. 2003. V. 160. P. 635–676.
- Boore D.M., Atkinson G.M.* Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s // *Earthquake Spectra*. 2008. V. 24. № 1. P. 99–138.
- Boore D.M.* Ground-motion models for very-hard-rock sites in eastern North America: An update // *Seismological Research Letters*. 2018. V. 89. № 3. P. 1172–1184.
- 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.
- 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 for periods ranging from 0.01 to 10 s // *Earthquake Spectra*. 2008. V. 24. № 1. P. 139–171.
- Cauzzi C., Faccioli E.* Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records // *J. Seismology*. 2008. V. 12. P. 453–475.
- Chiou B.S.-J., Youngs R.R.* An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra // *Earthquake Spectra*. 2008. V. 24. № 1. P. 173–215.
- Douglas J.* Ground-motion prediction equations 1964–2010. Final Rept. RP-59356-FR, Bureau de Recherches Geologiques et Minières (BRGM), Orleans, France. 2011. 444 p.
- Douglas J.* Ground motion prediction equations 1964–2017. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Strathclyde. 2017. <http://www.gmpe.org.uk/gm-pereport2014.pdf>
- Graizer V.* Ground-motion prediction equations for central and eastern North America // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2016. V. 106. № 4. P. 1600–1612.
- Hanks T.C., McGuire R.K.* The character of high frequency strong ground motion // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1981. V. 71. P. 2071–2095.
- Joyner W.B., Boore D.M.* Methods of regression analysis of strong motion data // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1993. V. 83. № 2. P. 469–487.
- Kononov A.V., Manaychev K.A., Stepanov A.A., Gavrilov A.V.* Regional ground motion prediction equation for Sakhalin island // *Seismic Instruments*. 2019. V. 55. № 1. P. 70–77.
- Pavlenko O.V.* Simulation of Ground Motion from Strong Earthquakes of Kamchatka Region (1992–1993) at Rock and Soil Sites // *Pure and Applied Geophysics*. 2013. V. 170. № 4. P. 571–595.
- Zhao J.X., Liang X., Jiang F., Xing H., Zhu M., Hou R., Zhang Y., Lan X., Rhoades D.A., Irikura K., Fukushima Y., Somerville P.G.* Ground-motion prediction equations for subduction interface earthquakes in Japan using site class and simple geometrical attenuation functions // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2016. V. 106. № 4. P. 1518–1534.

Stochastic Simulation and Development of the Ground Motion Prediction Equation for the Baikal Rift Zone

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

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

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

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

To obtain realistic and correct estimates of seismic effects in the Baikal Rift Zone (BRZ), a ground motion prediction equation has been developed based on the records of local earthquakes (magnitudes $m_b \sim 3.4$ –5.5, hypocentral distances $R \sim 15$ –220 km) obtained by Ulan-Ude and Severomuisk seismic stations. At the first step, in our previous works, using stochastic simulation of the accelerograms of the recorded local earthquakes we estimated the regional parameters of radiation and propagation of seismic waves (stress drop in an earthquake source, quality function of the medium, geometrical spreading, wave attenuation at high frequencies, local site amplification, etc. These parameters were then used to generate a set of earthquake accelerograms over a wide range of magnitudes ($M_w \sim 4.0$ –8.0) and distances ($R \sim 1$ –200 km) on a rock site, and a ground motion prediction equation (GMPE) describing the dependence of peak ground accelerations (PGA) and peak ground velocities (PGV) on magnitude and distance are constructed. The obtained PGA estimates are compared with those estimated from GMPE recommended for BRZ by the international Global Earthquake Model (GEM) project. The scatter of the estimates obtained based on GEM GMPE indicates the relevance of developing the own GMPEs for Russian regions based on the records of local earthquakes. The GMPE derived in this work can be used for seismic hazard assessment in the BRZ eastern part and will be updated as new data are acquired.

Keywords: Baikal Rift Zone, stochastic simulation, ground motion prediction equations, PGA, GEM, stress parameter, quality function of the medium, geometrical spreading, local amplification, strong motion duration