

## ЗАПИСИ МЕСТНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ КОРРЕКТНЫХ ОЦЕНОК СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ (на примере трассы второго Северомуйского тоннеля)

О.В. Павленко

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
123242, Москва, ул. Б. Грузинская 10, стр. 1, Россия*

Для получения реалистичных и корректных оценок сейсмических воздействий на трассе строительства второго Северомуйского тоннеля исследуются записи местных землетрясений, полученные сейсмостанцией Северомуйск (SVKR) в 2005—2010 гг. (магнитуды  $M_b \sim 4.2$ —5.5, гипоцентральные расстояния  $r \sim 15$ —220 км). Методами стохастического моделирования получены оценки региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн в Северо-Восточной Бурятии: сброшенного напряжения  $\Delta\sigma$ , форм очаговых спектров, ослабления волн на высоких частотах (каппа,  $\kappa$ ), параметров, определяющих форму и длительность акселерограмм и других. Предварительно оценено изменение длительности сильных движений в зависимости от эпицентрального расстояния, по скоростному разрезу получены оценки локального усиления  $A(f)$  и методом огибающих оценена добротность среды  $Q(f)$ . Получены оценки  $\Delta\sigma \sim 100$  бар,  $\kappa \sim 0.012$  с,  $Q(f)$  в виде  $\sim 60 f^{1.05}$  для  $r \sim 15$ —30 км,  $\sim 80 f^{1.0}$  для  $r \sim 40$ —60 км,  $\sim 90 f^{0.9}$  для  $r \sim 100$ —110 км и  $\sim 150 f^{0.7}$  для  $r \sim 160$ —220 км; геометрическое расхождение в виде трехсегментной функции  $1/r$  для  $r < 50$  км,  $1/50$  для  $50 < r < 150$  км и  $1/r^{0.5}$  для  $r > 150$  км; длительность в виде трехсегментной функции 0 для  $0 < r < 5$  км,  $0.222r$  для  $5 < r < 50$  км и  $10 + 0.015r$  для  $r > 50$  км. Эти оценки могут использоваться для прогноза параметров колебаний поверхности при возможных в будущем сильных землетрясениях в регионе.

*Стохастическое моделирование, параметр напряжений, добротность, геометрическое расхождение, локальное усиление, длительность сильных движений, отклик грунта, местные землетрясения*

## RECORDS OF LOCAL EARTHQUAKES AS A BASIS FOR THE CORRECT ESTIMATION OF STRONG GROUND MOTION (the area of the second Severomuisk tunnel)

O.V. Pavlenko

To obtain realistic and correct estimates of strong ground motion in the area of construction of the second Severomuisk tunnel, the records of local earthquakes obtained by the Severomuisk seismic station (SVKR) in 2005—2010 are studied (magnitudes  $M_b$  of  $\sim 4.2$ —5.5, hypocentral distances  $r$  of  $\sim 15$ —220 km). Stochastic-simulation methods are used to estimate the regional parameters of radiation and propagation of seismic waves in northeastern Buryatia: the stress parameter  $\Delta\sigma$ , shapes of source spectra, wave attenuation at high frequencies ( $\kappa$ ), parameters defining the shape and duration of the acceleration time history, etc. Beforehand, the duration of strong motion as a function of the hypocentral distance was evaluated from the records; the local site amplification  $A(f)$  was estimated based on the velocity structure of the region; and the envelope method was applied to estimate the quality function  $Q(f)$ . The following data were obtained:  $\Delta\sigma \approx 100$  bars;  $\kappa \approx 0.012$  s;  $Q(f)$  as  $\sim 60 f^{1.05}$  for  $r$  of  $\sim 15$ —30 km,  $\sim 80 f^{1.0}$  for  $r$  of  $\sim 40$ —60 km,  $\sim 90 f^{0.9}$  for  $r$  of  $\sim 100$ —110 km, and  $\sim 150 f^{0.7}$  for  $r$  of  $\sim 160$ —220 km; geometric spreading as  $1/r$  for  $r < 50$  km,  $1/50$  for  $50 < r < 150$  km, and  $1/r^{0.5}$  for  $r > 150$  km; and duration as 0 for  $0 < r < 5$  km,  $0.222r$  for  $5 < r < 50$  km, and  $10 + 0.015r$  for  $r > 50$  km. These estimates can be used to predict ground motion parameters during future strong earthquakes in the region.

*Stochastic simulation, stress parameter, quality factor, geometric spreading, local site amplification, duration of strong ground motion, stress response, local earthquakes*

## ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и строительстве сейсмостойких конструкций в сейсмических районах необходимы оценки параметров колебаний поверхности при возможных в будущем сильных землетрясениях: интенсивности, пиковых ускорений (PGA — в международной терминологии) и скоростей, спектров реакции, продолжительности и преобладающих периодов колебаний. Эти параметры требуется оценить для конкретных грунтовых условий, на поверхности грунта. В последние десятилетия заметно растет

число строящихся сложных и дорогостоящих объектов, и от сейсмологов требуются оценки параметров колебаний поверхности с наибольшей возможной точностью.

К настоящему времени в сейсмологии разработаны надежные методы оценки параметров колебаний поверхности. Основой для этого служат записи землетрясений, полученные в регионе. Если имеется достаточно большое количество записей, для региона выводятся уравнения прогнозных движений грунта (УПДГ), которые и дадут необходимые оценки. Достаточное количество данных для разработки региональных УПДГ накоплено в Курило-Камчатском регионе.

Курило-Камчатская сейсмическая зона активно изучается в последние годы: исследуются особенности очаговых спектров [Гусев, 1993], оцениваются параметры распространения сейсмических волн: добротность и геометрическое расхождение [Abubakirov, Gusev, 1990], отклик грунтовых толщ [Pavlenko, 2013]. Достаточное количество записей сильных движений, полученных в регионе, позволяет вывести УПДГ и прогнозировать параметры колебаний поверхности при будущих сильных землетрясениях.

Другие регионы России с высокой сейсмичностью — Северный Кавказ, Алтай-Саянский регион, Байкальская рифтовая зона, Приморский край, Сахалин, Магаданская область, Якутия, Чукотка — пока остаются менее изученными в сейсмическом плане.

В регионах, где получено лишь небольшое количество записей сильных движений, недостаточное для разработки региональных УПДГ, применяется другой подход: по имеющимся записям землетрясений оцениваются региональные характеристики излучения и распространения сейсмических волн, которые затем используются для построения акселерограмм возможных в будущем сильных землетрясений [Halldorsson, Parageorgiou, 2005]. По акселерограммам оцениваются необходимые в сейсмостойком строительстве параметры колебаний поверхности [Aki, Irikura, 1991]. С накоплением записей сильных движений в регионе появляется возможность уточнять характеристики излучения и распространения сейсмических волн и повышать точность прогноза параметров колебаний поверхности при будущих сильных землетрясениях.

Такой подход использовался для оценки параметров излучения и распространения сейсмических волн на Северном Кавказе [Павленко, 2008, 2009, 2016], в Бурятии [Павленко, Тубанов, 2017], в Северной Финляндии [Pavlenko, Kozlovskaya, 2018], в Алтай-Саянском регионе [Еманов и др., 2019].

В настоящей работе изучаются области Северо-Восточной Бурятии, Становое нагорье. Исследование характеристик излучения и распространения сейсмических волн в этом районе требуется для оценки сейсмической опасности в связи со строительством второго Северомуйского тоннеля.

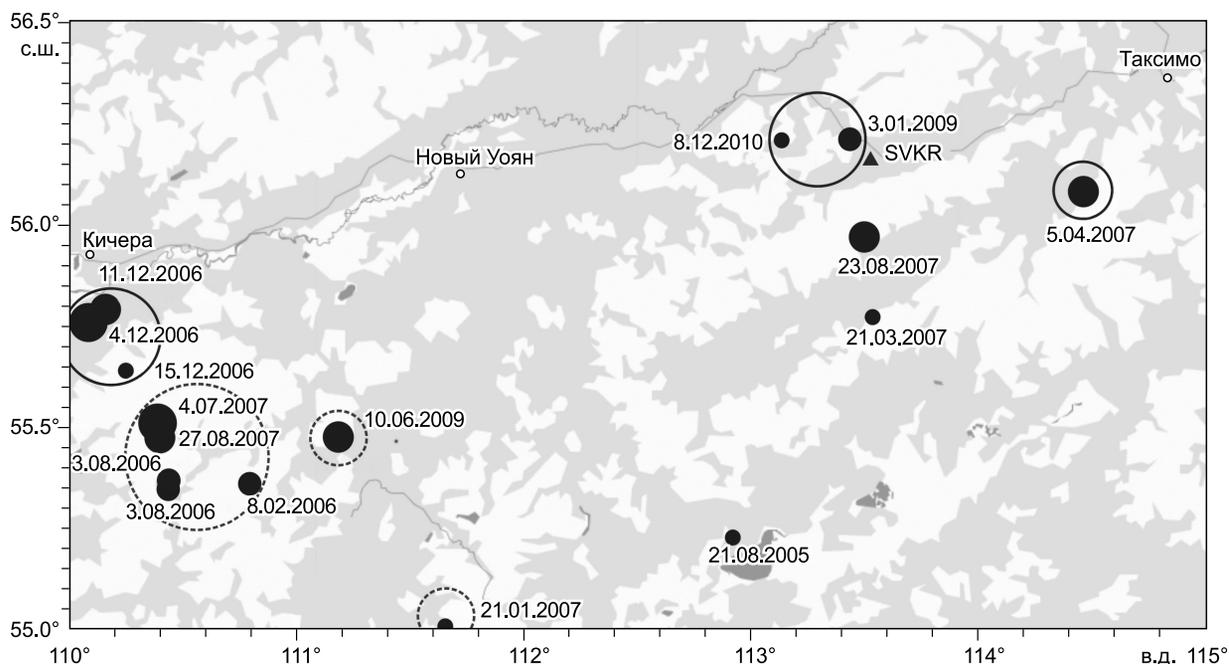
Это опасный в сейсмическом плане регион, где в прошлом происходили сильные землетрясения, что отражено в картах общего сейсмического районирования территории РФ. Согласно действующим картам ОСР-2015, для периодов повторяемости 500 и 1000 лет район характеризуется сейсмической интенсивностью 9 баллов шкалы МСК-64, для периода повторяемости 5000 лет — 10 баллов. В ближайшей окрестности трассы тоннеля возможны землетрясения с максимальными магнитудами 7.5, согласно картам ОСР, причем один из сейсмогенных линеаментов пересекает трассу тоннеля. Для прогноза сейсмической опасности надежные оценки региональных параметров излучения и распространения сейсмических волн необходимы.

## МЕТОД И ДАННЫЕ

Параметры излучения и распространения сейсмических волн оцениваются методами решения обратных задач: моделированием записей зарегистрированных местных землетрясений и подбором параметров, дающих наилучшее согласие зарегистрированных и смоделированных акселерограмм.

Для построения акселерограмм землетрясений применяется стохастический метод [Boore, 2003]. Достаточно простой, но эффективный стохастический подход основан на представлениях, подтверждаемых наблюдениями, что акселерограммы в окнах вступлений  $S$ -волн представляют собой ограниченный по спектру гауссовский белый шум. Частотные ограничения устанавливаются граничной частотой спектра  $f_0$  и наивысшей частотой  $f_{\max}$ , 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 достаточно 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].

Входные данные расчетных программ — 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. К входным



**Рис. 1. Карты эпицентров землетрясений, зарегистрированных сейсмостанцией Северомуйск (SVKR), изучаемых в настоящей работе.**

Треугольником показано расположение сейсмостанции.

параметрам относятся: средняя плотность земной коры и средняя скорость  $S$ -волн в коре в окрестности очага (локальные условия вблизи очага), сброшенное в очаге напряжение (эффект очага), параметры геометрического расхождения и частотно-зависимого неупругого поглощения сейсмических волн, зависимость длительности сейсмического сигнала от эпицентрального расстояния (эффекты пути), локальное усиление и ослабление сигнала на высоких частотах  $k$  (локальные условия вблизи приемника), параметры, определяющие волновые формы акселерограмм. Перечисленные параметры определяют рассчитанные акселерограммы на скале, т. е. без учета отклика грунта; при наличии грунтовой толщи они пересчитываются в акселерограммы на поверхности грунта.

Для оценивания параметров излучения и распространения сейсмических волн в районе трассы второго Северомуйского тоннеля имеются 16 записей местных землетрясений, полученных сейсмостанцией Северомуйск (SVKR, координаты  $56.159^\circ$  с.ш.,  $113.52^\circ$  в.д.) в 2005—2010 гг. Регистрация землетрясений велась сейсмоприемниками СМ-3 (Россия). В таблице 1 приведен каталог землетрясений, а на рис. 1 показана карта расположения эпицентров. 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). Магнитуды изучаемых землетрясений лежат в диапазоне  $m_b \sim 4.2$ — $5.5$ , гипоцентральные расстояния  $r$  изменяются от  $\sim 15.6$  до  $\sim 219$  км, глубины очагов  $h$  от 1.5 до 21.8 км (см. табл. 1).

При расчете акселерограмм стохастическим методом 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. Источник предполагается точечным, и поскольку исследуются записи достаточно слабых землетрясений (см. табл. 1), приближения точечных очагов допустимы. В расчетах использовалась программа Д. Бура SMSIM, модифицированная (дополненная) автором для учета грунтовых условий. Сравнивались рассчитанные и зарегистрированные акселерограммы, а также их спектры, и подбирались входные параметры стохастического моделирования, позволяющие достичь наилучшего согласия расчетов и наблюдений во временной и спектральной областях. Согласие расчетов и наблюдений оценивалось по отклонениям пиковых ускорений и интенсивностей рассчитанных акселерограмм от зарегистрированных и по среднеквадратичным отклонениям спектральных амплитуд.

Предварительно методом огибающих были получены оценки добротности коры и верхней мантии в окрестностях Северомуйска. Метод огибающих описан в работе [Aki, Chouet, 1975], где авторы с ис-

Таблица 1. Информация о землетрясениях, зарегистрированных в 2005—2010 гг. станцией Северомуйск

№ п/п	Дата	Время	Широта	Долгота	$h$	$r$	$m_b$	PGA, см/с <sup>2</sup>		$D_{95}$ , с	
			град.		км			Компонента		Компонента	
			NS	EW	NS	EW					
1	21.8.2005	22:31:28.9	55.2278	112.915	17.2	108	4.2 (4.5)	1.1	0.9	13	14
2	8.02.2006	15:31:18.4	55.3599	110.796	2.7	191	4.7 (4.8)	1.0	0.8	15	13
3	3.08.2006	11:56:43.2	55.3464	110.439	10.0	212	4.5 (4.7)	0.4	0.4	14	14
4	3.08.2006	16:57:15.0	55.3671	110.441	10.8	211	4.5 (4.8)	0.6	0.3	13	15
5	4.12.2006	9:14:4.6	55.7559	110.089	12.0	219	5.2 (5.3)	49.1	31.5	11	13
6	11.12.2006	9:8:46.3	55.7881	110.164	11.3	213	4.9 (5.0)	1.7	1.8	14	13
7	15.12.2006	22:35:27.8	55.6373	110.253	13.3	212	4.3 (4.7)	1.1	0.7	12	12
8	21.01.2007	10:44:34.4	55.0098	111.654	1.5	170	4.3 (4.6)	0.8	0.7	13	14
9	21.03.2007	14:55:43.1	55.7692	113.529	7.0	42	4.4 (4.4)	3.8	6.1	10	11
10	5.04.2007	13:22:53.7	56.0772	114.453	14.4	59	5.0 (5.2)	14.9	12.3	7	6
11	4.07.2007	01:23:23.9	55.5091	110.392	10.8	208	5.3 (5.5)	1.7	1.2	15	14
12	23.08.2007	04:49:19.4	55.9657	113.492	21.8	30	4.9 (5.1)	23.7	28.2	3	3
13	27.08.2007	10:09:30.5	55.4729	110.402	1.7	208	4.8 (4.9)	0.9	0.7	11	10
14	3.01.2009	03:50:15.6	56.2059	113.429	4.5	16	4.5 (4.6)	81.3	143	4	4
15	10.06.2009	18:51:59.1	55.4745	111.185	17.3	164	4.9 (5.0)	1.7	1.8	10	11
16	8.12.2010	10:42:07.5	56.2033	113.130	10.0	27	4.2 (4.6)	15.6	28.7	5	5

пользованием модели однократного рассеяния получили выражение для спадающих со временем спектральных амплитуд кода-волн  $A(\omega|t)$  в диапазоне частот  $\Delta f$ :

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

где  $C$  — константа, зависящая от очагового спектра,  $b = \pi f/Q_c$ . Так, отфильтровав велосигаммы 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  $Q_c(f)$ . С помощью метода огибающих по записям местных землетрясений были впервые получены оценки добротности в Центральной Японии и определены свойства функции добротности — ее рост с частотой и изменчивость от региона к региону [Aki, Chouet, 1975]. Кода-волны на частотах  $\sim 1$  Гц считаются результатом рассеяния волн на приповерхностных неоднородностях, тогда как на высоких частотах кода-волны представляют собой результат рассеяния волн в глубокой высокодобротной литосфере.

Метод огибающих подробно описан в работе [Добрынина и др., 2011], где он применен для оценивания добротности литосферы юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы. В настоящей работе оценки добротности  $Q(f)$  получены для гипоцентральных расстояний  $r \sim 15$ —110 км; записи землетрясений с большими гипоцентральными расстояниями,  $r \sim 160$ —220 км, обрезаны по времени, т. е. не включают кода-волны, поэтому нет возможности применить метод огибающих. Для таких расстояний оценки  $Q(f)$  установлены экстраполяцией оценок, полученных для меньших расстояний.

Нужно отметить, что в методе огибающих геометрическое расхождение предполагается в виде  $1/r$ , что для изучаемого региона, вероятно, справедливо лишь до расстояний  $\sim 50$ —70 км. Как показывают наблюдения, в районах с континентальной земной корой (к каким относится Северо-Восточная Бурятия) амплитуды сейсмических колебаний быстро спадают на удалениях от очагов до 50—70 км и медленнее спадают на удалениях 120—150 км и больше [Boore, 2003; Atkinson, 2004]. На удалениях от 50—70 до 130—150 км спадания амплитуд вследствие геометрического расхождения практически не наблюдается, что объясняется интенсивными посткритическими отражениями волн от границы кора—мантия [Burger et al., 1987; Atkinson, 2004]. Если сейсмический очаг расположен в коре, то на удалениях  $\sim 120$ —150 км и больше мы наблюдаем волновое поле, которое можно рассматривать как суперпозицию поверхностных волн с геометрическим расхождением  $\sim 1/r^{0.5}$  [Wang, Herrmann, 1980; Herrmann, Kijko, 1983]. Таким образом, в районах с континентальной корой геометрическое расхождение обычно описывается трехсегментной функцией вида  $1/r$  для  $r < r_1$ ,  $1/r_1$  для  $r_1 < r < r_2$  км и  $1/r^{0.5}$  для  $r > r_2$ , где  $r_1 \sim 50$ —70 км,  $r_2 \sim 130$ —150 км [Boore, 2003].

Так что на удалениях  $r > 50$ —70 км функция  $1/r$ , очевидно, переоценивает спадание амплитуд вследствие геометрического расхождения, и неупругое поглощение (обратное добротности) при приме-

**Рис. 2. Оценки длительности сильных движений  $D_{95}$  в зависимости от гипоцентрального расстояния.**

1 — EW-компонента, 2 — NS-компонента, 3 — аппроксимация.

нении метода огибающих оказывается недооцененным, а добротность — переоцененной. Поэтому все полученные оценки  $Q(f)$  для расстояний  $r > 50$  км верифицировались стохастическим моделированием.

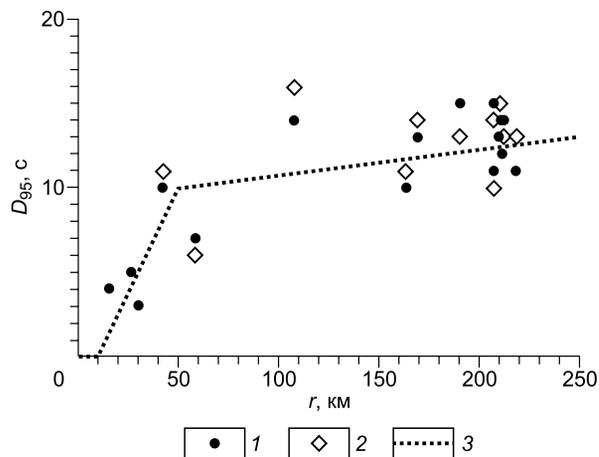
По записям станции Северомуйск также оценено изменение длительности сильных движений в зависимости от расстояния до очага. Длительность сильных движений  $D_T$  — важный параметр стохастического моделирования; она представляет собой сумму длительности, обусловленной эффектами очага  $D_S$ , и длительности, обусловленной эффектами пути распространения  $D_P$ . В стохастическом моделировании используется параметр длительности  $D_{95}$ , определяемый как интервал сильных движений в секундах между моментами времени, в которые кумулятивный интеграл квадрата ускорения (нормированный к единице в конце записи) достигает 5 и 95 % от максимума [Boore, Thompson, 2014]:  $D_{95} = D_S + D_P$ . В таблице 1 приведены значения  $D_{95}$ , рассчитанные для исследуемых записей на горизонтальных компонентах NS и EW, а их зависимость от расстояния приведена на рис. 2. Длительность очагового процесса  $D_S$  определяется угловой частотой и параметром напряжения и составляет  $\sim 1$  с для исследуемых землетрясений ( $M_b \sim 4.2\text{—}5.5$ ), что заметно меньше, чем продолжительность, связанная с эффектами пути  $D_P$ . Пренебрегая  $D_S$ , рассмотрим расчетную продолжительность  $D_{95} \sim D_P$  (см. табл. 1).

Длительность  $D_{95}$  оценивалась для поперечных волн, т. е. в качестве начальной точки отсчета кумулятивного интеграла квадрата ускорения брался момент вступления  $S$ -волн, а в качестве последней точки — момент времени, определяемый как окончание временного окна регулярных  $S$ -волн, т. е. момент, в который снижение амплитуд становилось менее заметным — более плавным. Такие достаточно условные оценки моментов начала и окончания окна  $S$ -волн естественно дали разброс оценок длительности, особенно заметный для записей удаленных землетрясений, где записи обрезаны на coda-волнах (см. рис. 2). Тем не менее оценки длительности можно аппроксимировать трехсегментной функцией вида 0 для  $0 < r < 5$  км,  $0.222r$  для  $5 < r < 50$  км и  $10 + 0.015r$  для  $r > 50$  км (см. рис. 2), и эта функция показала согласие с наблюдениями.

По данным о скоростном строении земной коры и верхней мантии (до глубин более 40 км) Байкальской рифтовой зоны и сопредельных районов, полученных методом ГСЗ [Суворов и др., 1999], оценено локальное усиление сейсмических волн в верхних слоях земной коры по отношению к окрестности сейсмических очагов; результаты приведены в табл. 2. Усиление сейсмических волн возникает вследствие снижения сейсмических скоростей и плотностей в земной коре (в частности, как результат процессов выветривания и разрушения земной коры в верхних слоях) при распространении сейсмических волн с глубины к поверхности, в соответствии с законом сохранения плотности потока сейсмической энергии. Локальное усиление  $A(f)$  рассчитано по методике, предложенной в работе [Boore, Joyner, 1997]. При оценке локального усиления скорости поперечных волн и средние плотности пород в окрестности очагов выбирались в зависимости от глубин очагов, в соответствии с региональной скоростной моделью [Суворов и др., 1999]. Как видно из табл. 2, получены невысокие оценки усиления; эти оценки были использованы в качестве входных параметров моделирования записей сейсмостанции Северомуйск.

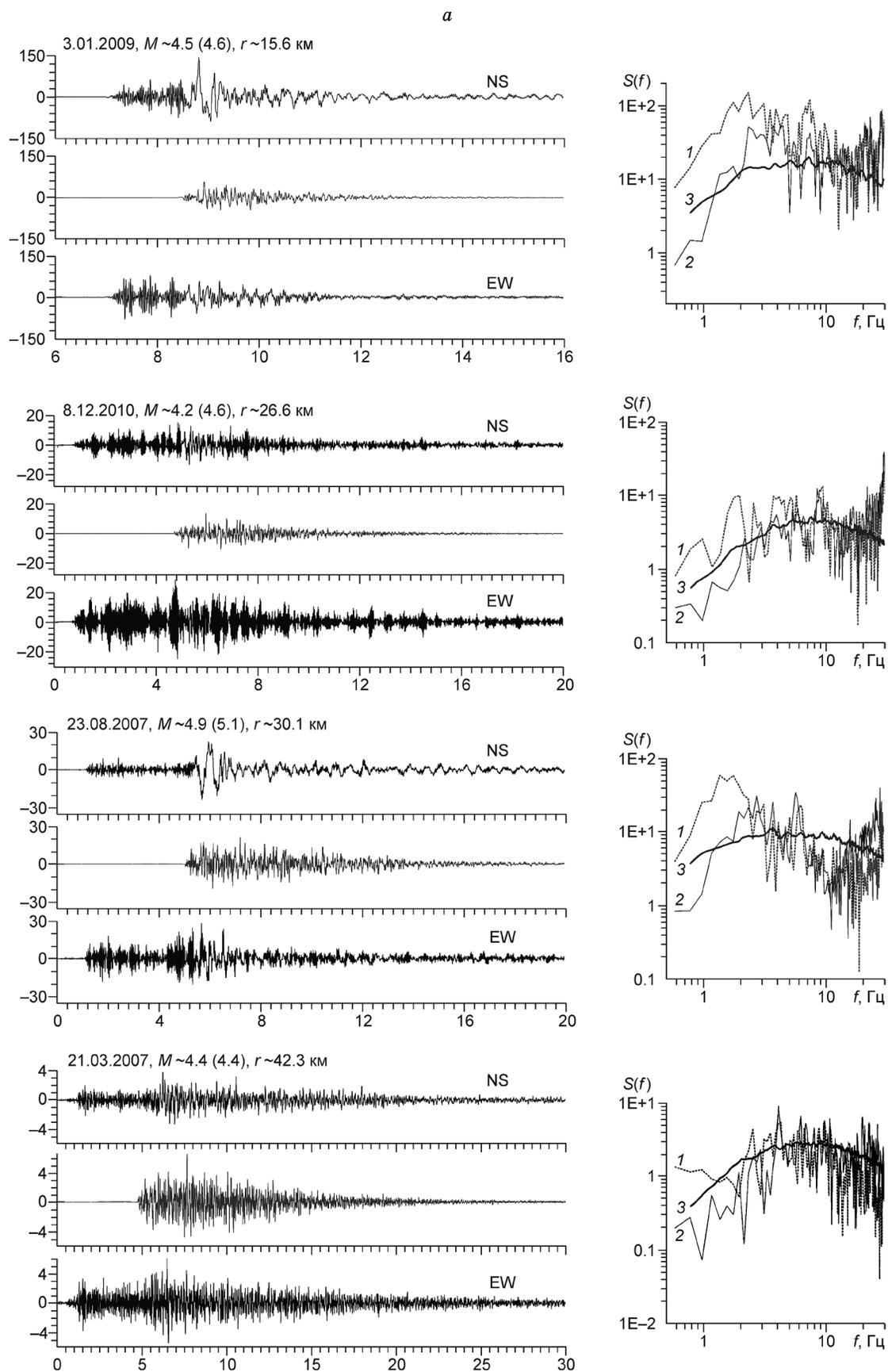
**Таблица 2. Параметры локального усиления, принятые в расчетах**

$f$ , Гц	$A(f)$
0.021	1.25
0.024	1.289
0.046	1.358
0.057	1.378
0.194	1.438
0.343	1.462
1.283	1.557



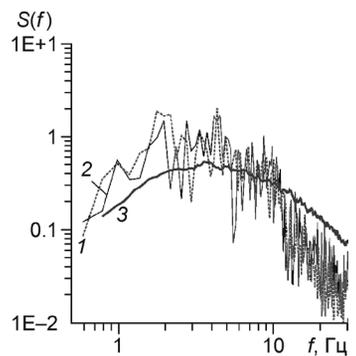
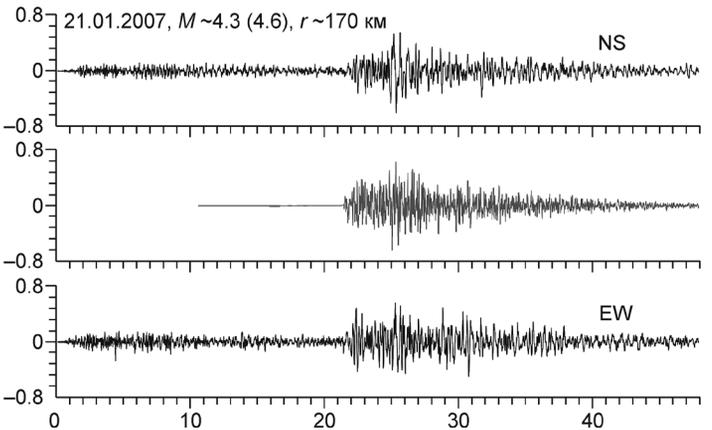
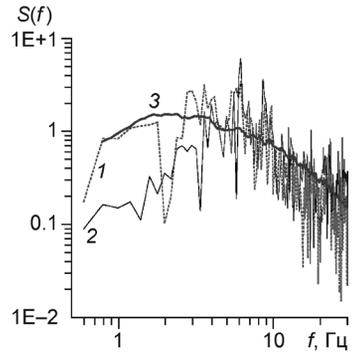
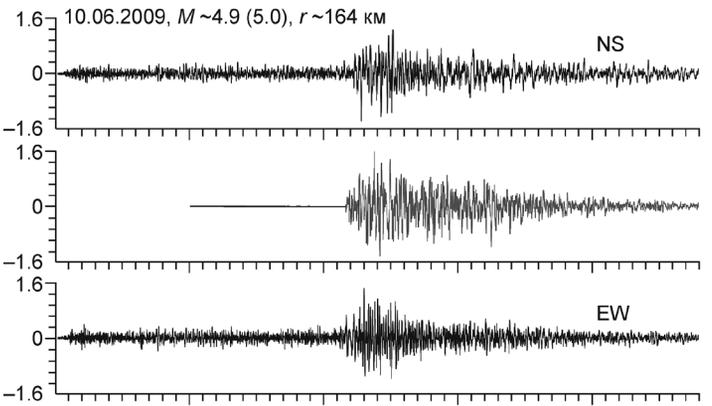
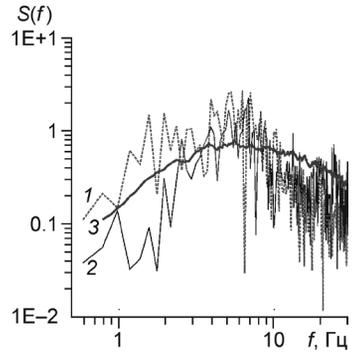
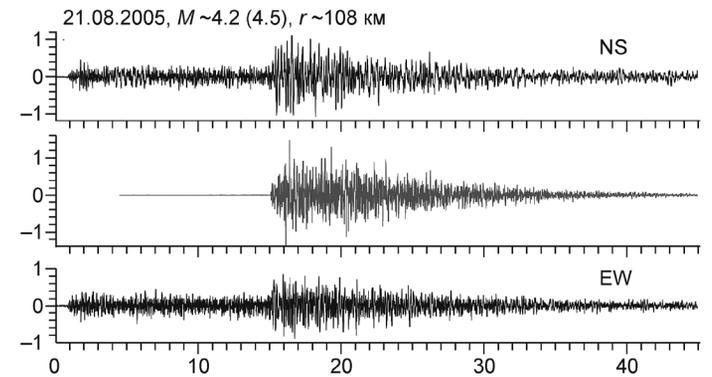
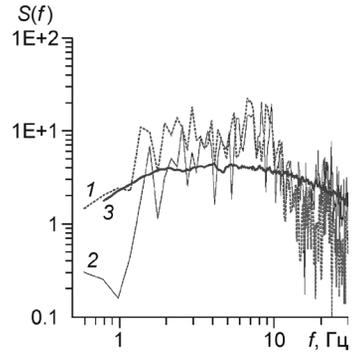
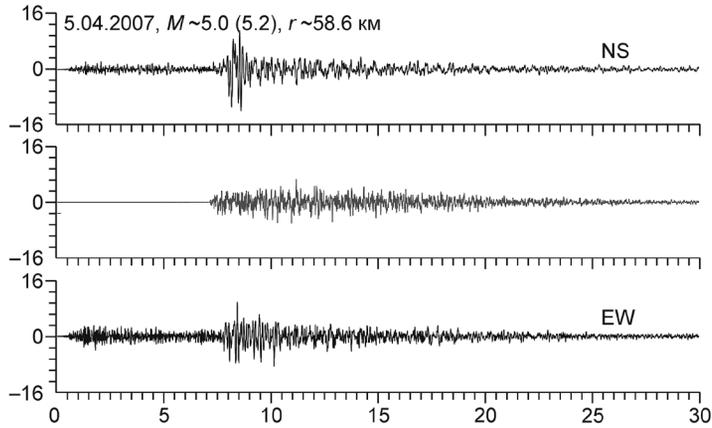
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования приведены на рис. 3,  $a\text{—}z$ , где показаны зарегистрированные акселерограммы, NS- и EW-компоненты и смоделированные максимальные горизонтальные компоненты записей землетрясений в порядке воз-

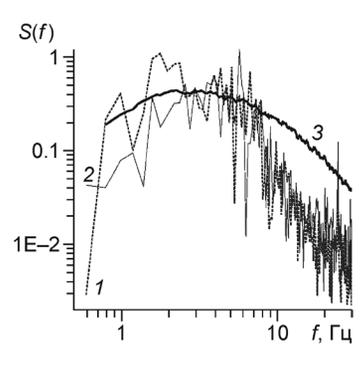
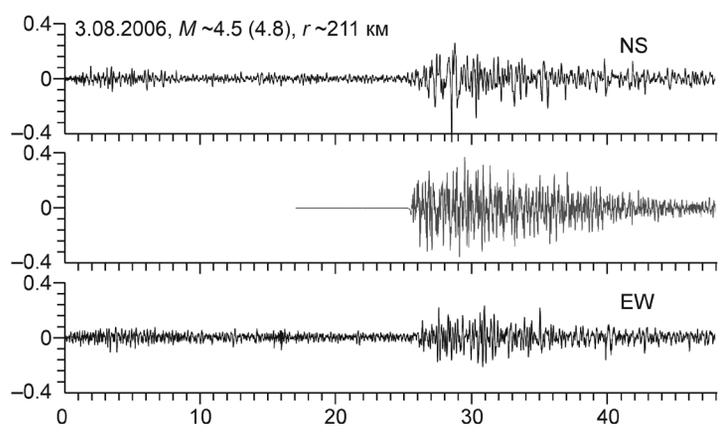
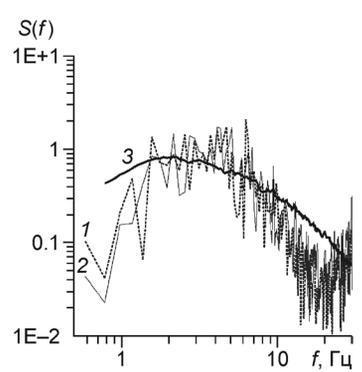
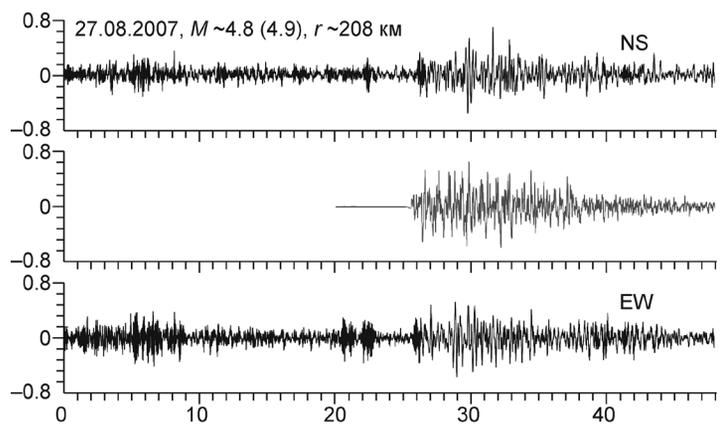
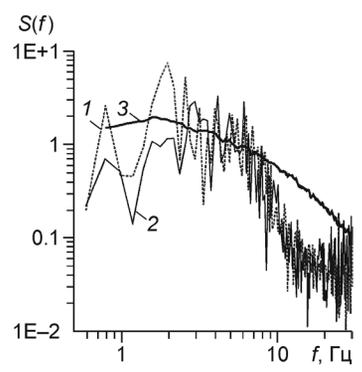
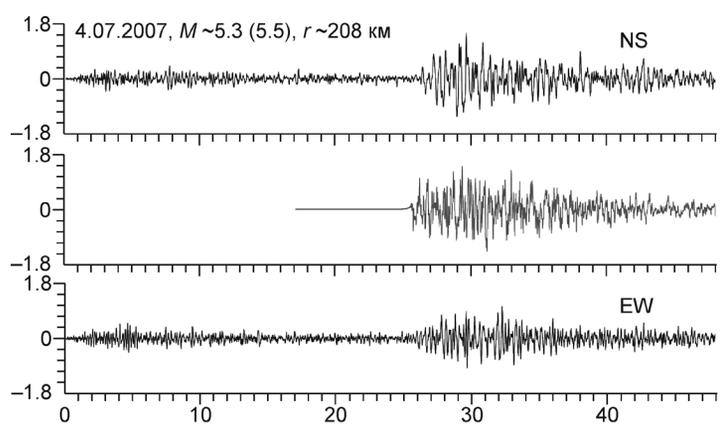
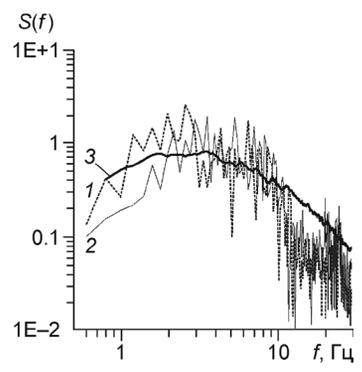
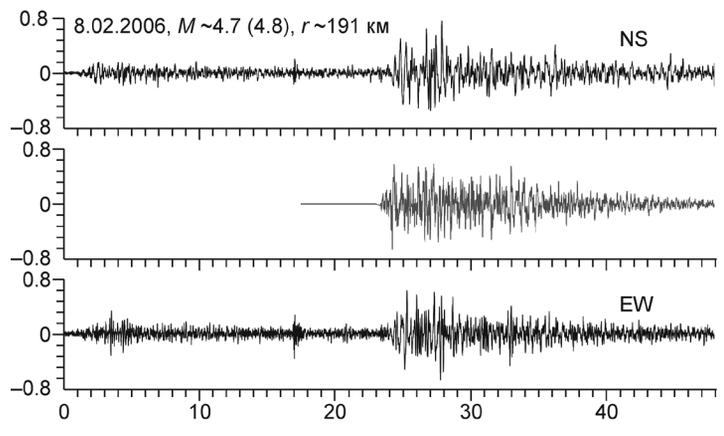


**Рис. 3.** Зарегистрированные (вверху и внизу) станций SVKR и рассчитанные (в середине) акселерограммы землетрясений и амплитудные спектры Фурье ускорений: NS- и EW-компоненты зарегистрированных акселерограмм (1 и 2 соответственно) и модельных акселерограмм (3).

$\sigma$



По вертикальным осям —  $\text{см}/\text{с}^2$ , по горизонтальным осям — с. Расчеты в предположении скального основания сейсмостанции.  $a \rightarrow z$  — пояснения см. в тексте.



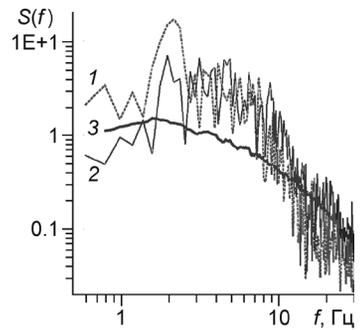
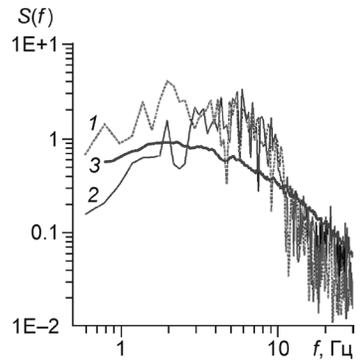
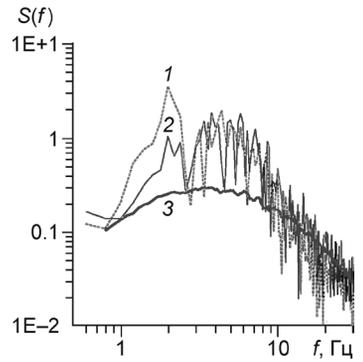
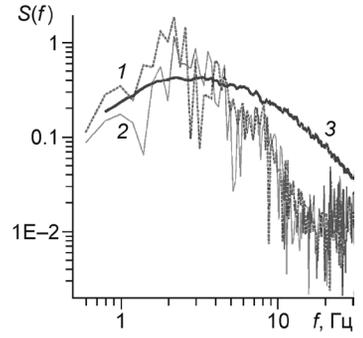
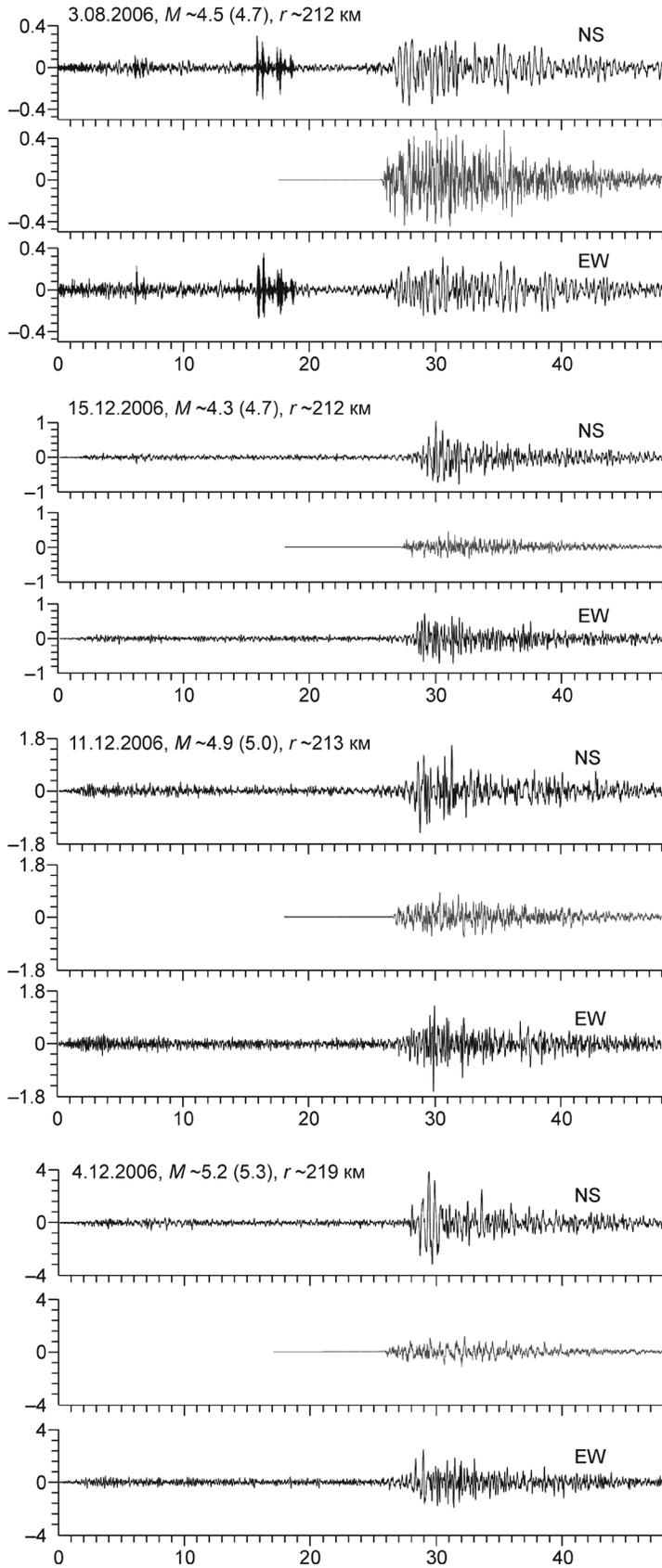


Рис. 3 (окончание).

растания гипоцентрального расстояния, а также спектры зарегистрированных и рассчитанных акселерограмм.

Программа стохастического моделирования построена таким образом, что рассчитывается серия акселерограмм; по ним находят средние характеристики колебаний поверхности. На рисунках показаны единичные акселерограммы из серий рассчитанных акселерограмм и спектры, усредненные в пределах серий рассчитанных акселерограмм. В целом достигнуто достаточно хорошее согласие расчетов и наблюдений. Как видно из рис. 3, *a*, на записях близких землетрясений присутствуют высокочастотные шумы ( $f > 10$ —15 Гц), происхождение которых не вполне понятно.

К сожалению, на сейсмостанциях сети Геофизической службы РАН не принято изучать в должной степени грунтовые условия, как это делается, например, на станциях сети сильных движений Японии KiK-net, где определяются состав грунта и сейсмические скорости *P*- и *S*-волн до глубин  $h \sim 100$ —200 м. Вместо этого дается краткое описание, например, грунт: консолидированный (глыбы, щебень, дресва). Такие описания позволяют отнести грунт к одному из четырех классов, представленных в строительных нормах, но нельзя использовать имеющиеся записи для оценки отклика грунта.

Для станции Северомуйск нет описания грунтовых условий, поэтому моделирование записей на первом этапе проводилось в предположении скального грунта основания (скала).

Сначала моделировались акселерограммы близких землетрясений для минимизации числа настраиваемых параметров пути распространения (геометрического расхождения, зависимости длительности сильных движений от расстояния, добротности).

В качестве магнитуд землетрясений в стохастическом моделировании задаются моментные магнитуды  $M_w$  (на рисунках обозначены  $M$ ); они оценивались как  $m_b + 0.1$  ( $m_b$  взяты в соответствии с данными ISC), так как магнитуды  $M_w$ , как правило, несколько превышают магнитуды  $m_b$ .

Очаги были представлены как точечные источники; их координаты и глубины выбраны в соответствии с данными ISC. Взята модель излучения  $\omega^{-2}$  как наиболее распространенная и удовлетворяющая записям землетрясений.

Параметр напряжения  $\Delta\sigma \sim 100$  бар, общий для всех землетрясений, выбран из условия соответствия уровней спектральных амплитуд, зарегистрированных и смоделированных записей в диапазоне 1—5 Гц.

Моделированием спада спектра акселерограмм на высоких частотах подобраны параметры ослабления волн на высоких частотах к [Anderson, Hough, 1984]; получены оценки  $k \sim 0.012$  с, что показывает довольно слабое затухание на высоких частотах, очевидно, характерное для данного региона. По волновым формам акселерограмм подобраны параметры, определяющие форму и длительность волновых форм смоделированных акселерограмм [Booge, 2003].

Предварительно методом огибающих получены оценки добротности  $Q(f)$  в виде  $\sim 60 f^{1.05}$  для гипоцентральных расстояний  $r \sim 15$ —30 км,  $\sim 80 f^{1.0}$  для  $r \sim 40$ —60 км,  $\sim 90 f^{0.9}$  для  $r \sim 100$ —110 км. Записи землетрясений с гипоцентральными расстояниями  $r \sim 160$ —220 км обрезаны по времени, т. е. не включают coda-волны, поэтому нет возможности оценить функцию добротности для таких расстояний. Оценки  $Q(f) \sim 150 f^{0.7}$  для  $r \sim 160$ —220 км получены экстраполяцией и верифицированы в стохастическом моделировании. В целом эти оценки согласуются с оценками добротности соседних территорий, литосферы юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы, полученными в работе [Добрынина и др., 2011].

Расчеты акселерограмм удаленных землетрясений показали, что кусочно-непрерывная функция геометрического расхождения вида  $1/r$  для гипоцентральных расстояний  $r < 50$  км,  $1/50$  для  $50 \leq r < 150$  км и  $1/r^{0.5}$  для  $r > 150$  км и кусочно-непрерывная функция увеличения длительности акселерограмм с расстоянием от очага, принимающая значения 0 для  $0 < r < 5$  км,  $0.222r$  для  $5 < r < 50$  км и  $10 + 0.015r$  для  $r > 50$  км, в среднем удовлетворяют наблюдениям. Параметры, описывающие длительность акселерограмм, отражают относительно невысокую продолжительность сильных движений местных землетрясений, сравнимую с характеристиками длительности землетрясений Калифорнии или Камчатки.

В целом результаты моделирования акселерограмм в предположении скального основания сейсмостанции Северомуйск показывают согласие расчетов и наблюдений во временной области, но формы рассчитанных спектров иногда не вполне соответствуют формам спектров зарегистрированных землетрясений (см. рис. 3, *a—z*).

Согласие спектров можно постараться улучшить, если предположить плотный грунт в основании сейсмостанции. Поэтому на втором этапе работы стохастическое моделирование проведено в предположении грунтового основания станции Северомуйск; остальные параметры моделирования те же, что и в предположении скального основания. Результаты представлены на рисунке 4, *a—z*.

Параметры грунтовой толщи были выбраны в соответствии с формами спектров зарегистрированных землетрясений: был предположен плотный однородный грунт с  $v_s \sim 600$  м/с и плотностью  $\rho \sim 2.2$  г/см<sup>3</sup>. Мощность грунтовой толщи оценена в  $\sim 65$  м — по соответствию основных преобладаю-

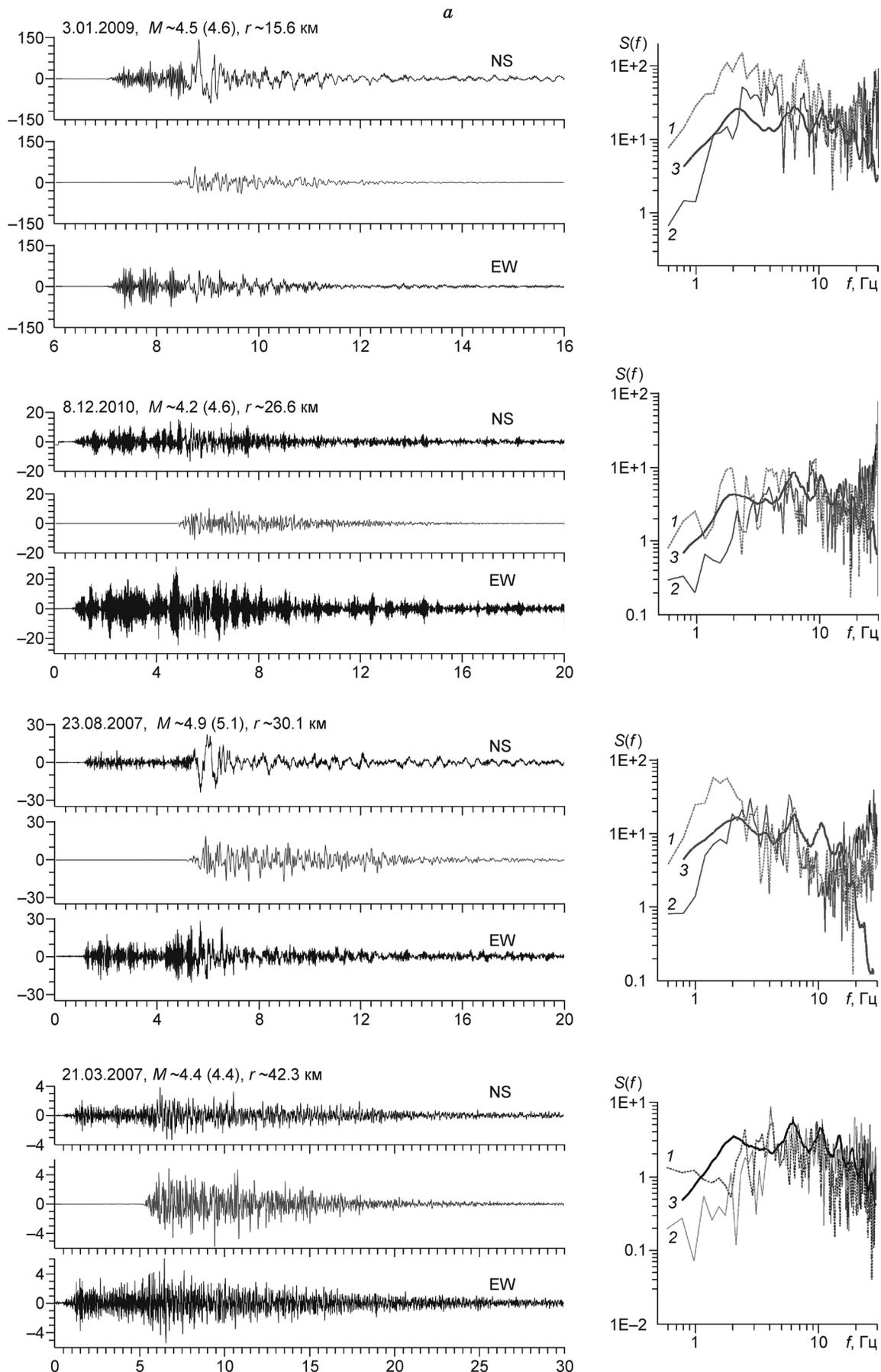


Рис. 4 (начало).

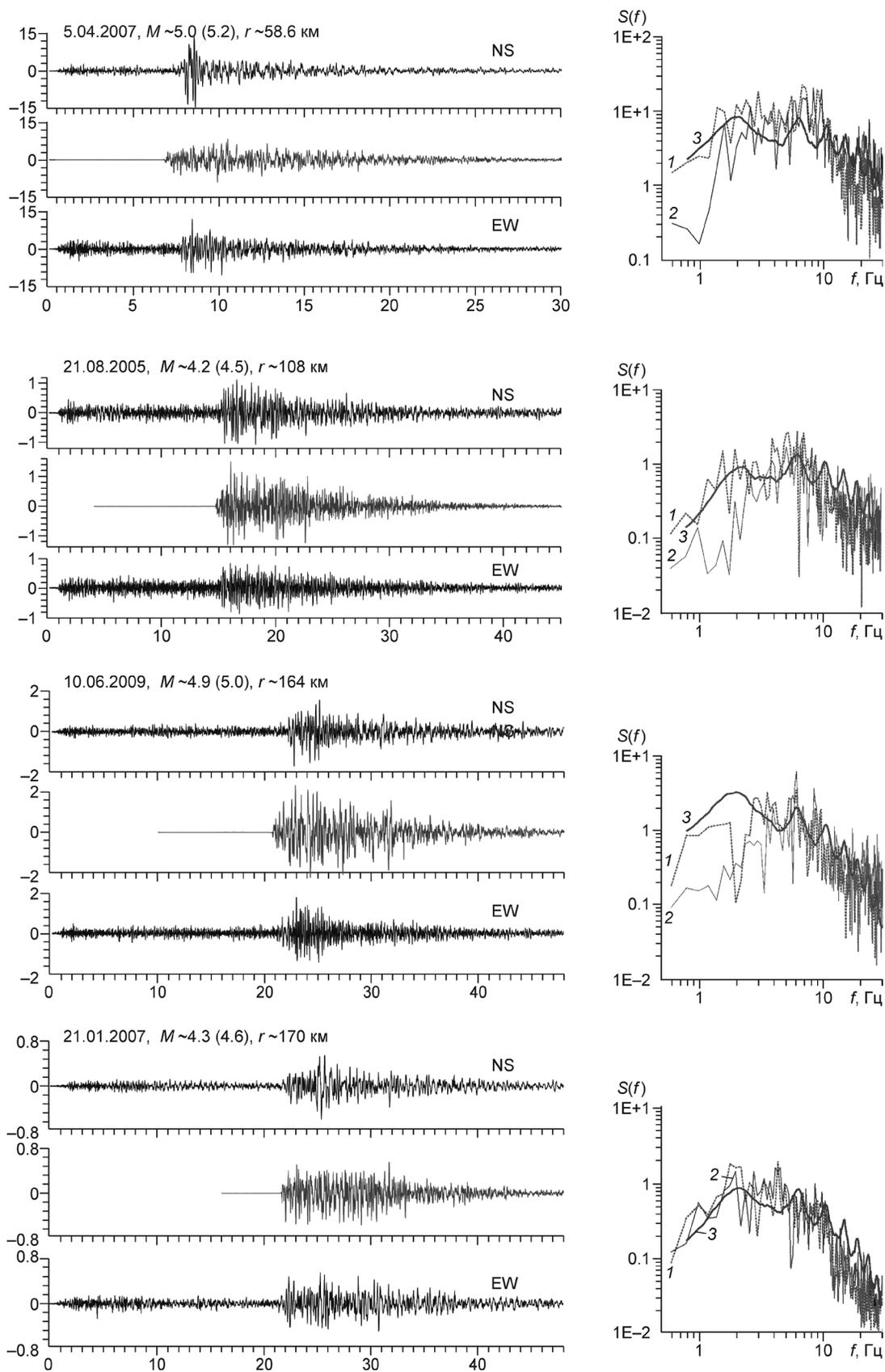
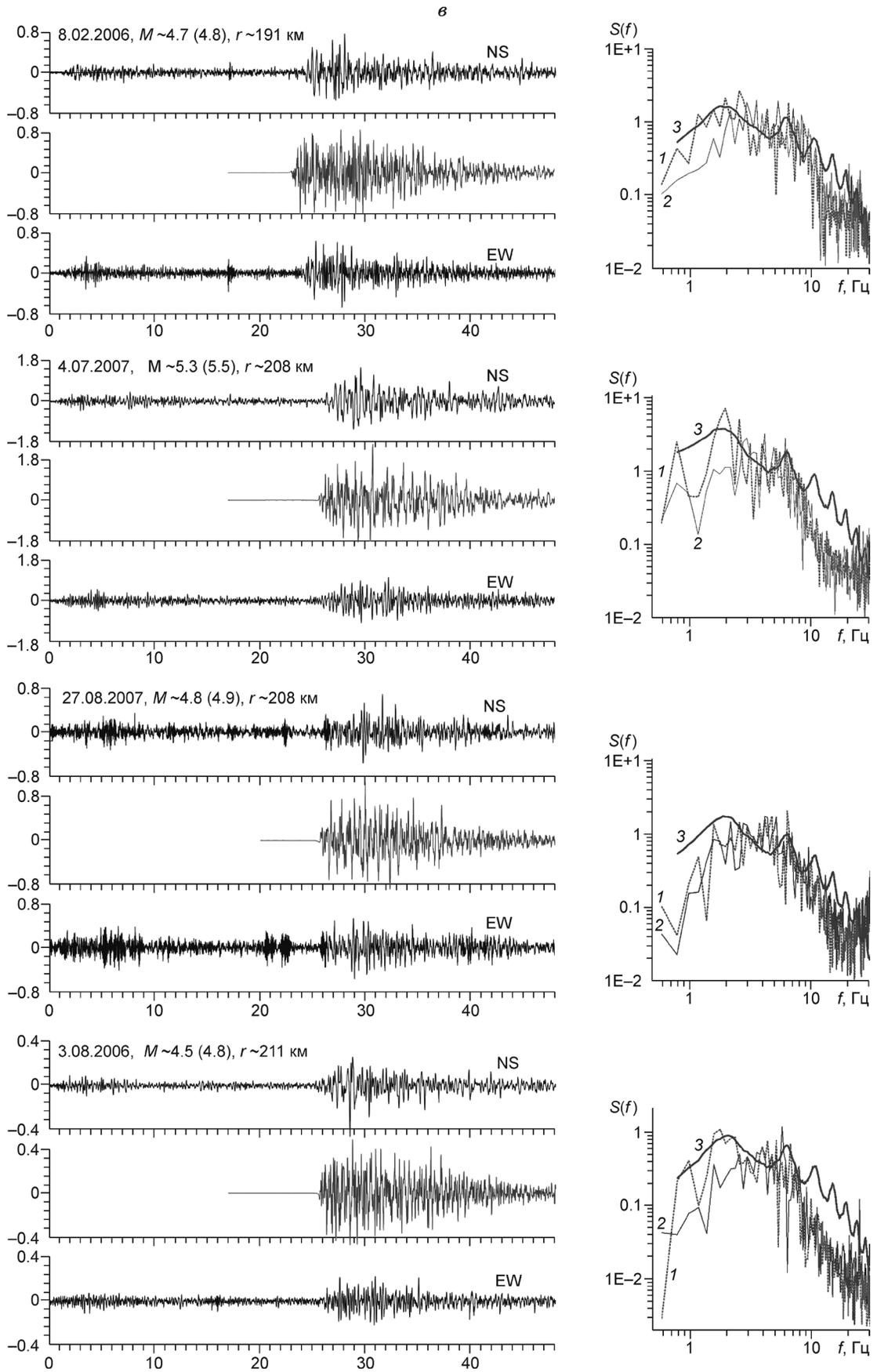


Рис. 4. Зарегистрированные (вверху и внизу) станцией SVKR и рассчитанные (в середине) акселерограммы землетрясений и амплитудные спектры Фурье ускорений: NS- и EW-компоненты зарегистрированных акселерограмм (1 и 2 соответственно) и модельных акселерограмм (3).



По вертикальным осям —  $\text{см}/\text{с}^2$ , по горизонтальным осям — с. Расчеты в предположении грунтового основания сейсмостанции.  $a$ — $z$  — пояснения см. в тексте.

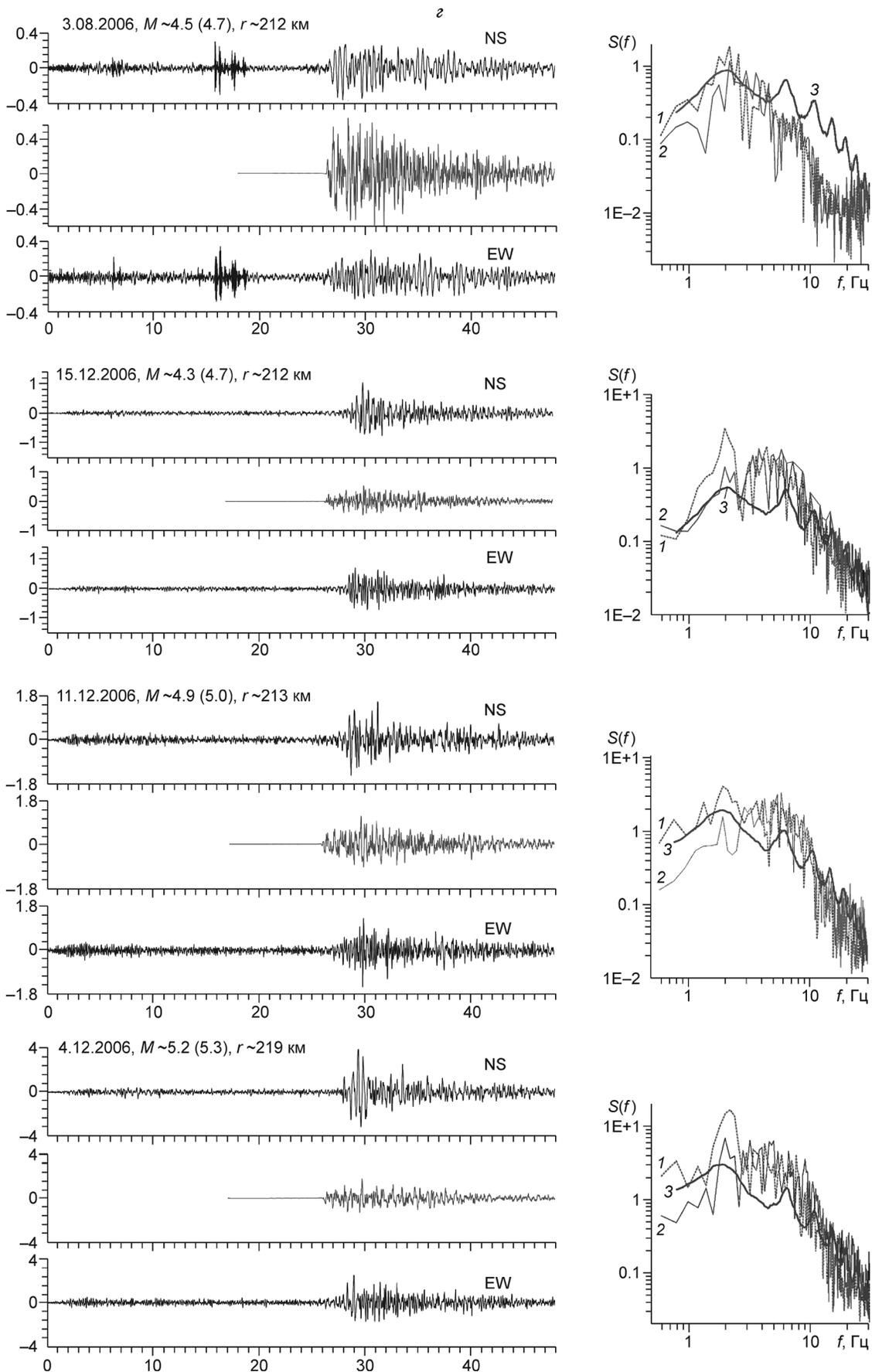


Рис. 4 (окончание).

Таблица 3. Параметры, использованные для моделирования акселерограмм землетрясений, зарегистрированных сейсмостанцией Северомуйск

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
$Q(f)$	$\sim 60 f^{1.05}$ для $r \sim 15-30$ км, $\sim 80 f^{1.0}$ для $r \sim 40-60$ км, $\sim 90 f^{0.9}$ для $r \sim 100-110$ км, $\sim 150 f^{0.7}$ 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
$\kappa$	0.012 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 <sup>3</sup>

щих частот колебаний  $f \sim 1-4$  Гц (см. рис. 4,  $a-c$ ). Предельные сдвиговые напряжения заданы возрастающими с  $\sim 2.5$  бар у поверхности до  $\sim 2.8$  бар на 65 м. Плотный грунт с близкими параметрами дал хорошее согласие расчетов и наблюдений в г. Петропавловск-Камчатский на грунтовых станциях Институт вулканологии (IVS), Дачная (DCH), Аэрологическая (AER): [Pavlenko, 2013], а также на сейсмостанции Махачкала (МАК) в г. Махачкала [Pavlenko, 2020]. Вероятно, такой грунт можно рассматривать как некоторый «типичный» плотный грунт основания. Расчет колебаний на поверхности грунта выполнен по алгоритму нелинейного анализа [Joyner, Chen, 1975]. Рассчитывалось распространение падающих вертикально снизу поперечных сейсмических волн в горизонтально-слоистой толще осадочных пород с вышеописанными характеристиками. Поведение грунта описывалось нормированными зависимостями напряжение—деформация, полученными в лабораторных экспериментах [Hardin, Drnevich, 1972].

Как видно из рис. 4, предположение о грунтовом основании станции позволило в некоторых случаях улучшить согласие расчетов и наблюдений в спектральной области, однако в целом по результатам моделирования трудно сделать выбор в пользу скального или грунтового основания.

При этом для одних землетрясений можно отметить некоторую недооценку интенсивности и пиковых ускорений (как для скального, так и для грунтового основания), а для других — переоценку. На рисунке 1 области очагов этих землетрясений отмечены кругами (сплошные и штриховые линии соответственно). Наиболее вероятной причиной этого представляется различное поглощение  $Q(f)$  для тех и других очагов: для землетрясений, отмеченных сплошными линиями (1-я группа), в нашем моделировании поглощение завышено (предполагается более высоким, чем есть на самом деле), а для землетрясений, отмеченных штриховыми линиями (2-я группа), занижено. Как видно из рисунков 3,  $b$  и 4,  $b$ , для группы землетрясений с близкими очагами: 8.02.2006, 3.08.2006, 4.07.2007, 27.08.2007 (см. рис. 1) дополнительное поглощение наблюдается на частотах  $\sim 10-20$  Гц.

Различия в поглощении, очевидно, связаны с геологической структурой региона (см. рис. 1): очаги землетрясений 2-й группы располагаются под горными хребтами, и поглощение сейсмических волн на

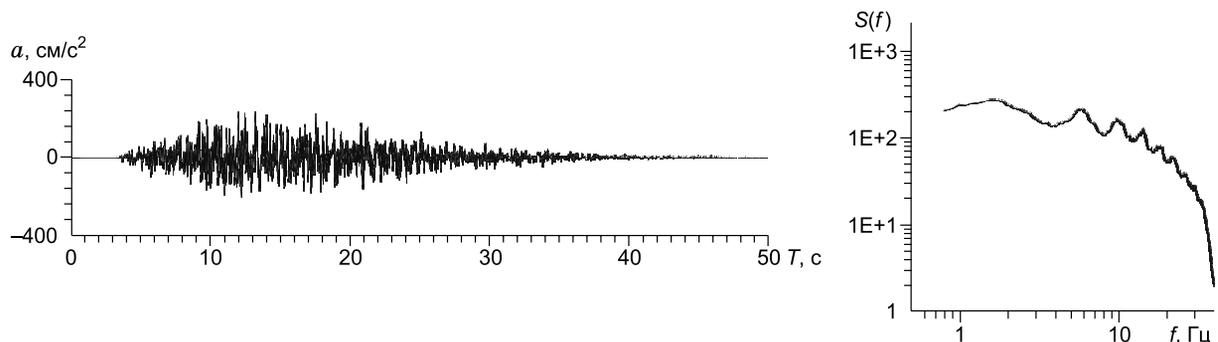


Рис. 5. Акселерограмма (максимальная горизонтальная компонента) сценарного землетрясения (магнитуда  $M_w \sim 7.0$ , эпицентральное расстояние  $\sim 25$  км, глубина очага  $\sim 12$  км) для Северо-Восточной Бурятии и ее амплитудный спектр.

путях их распространения к сейсмостанции выше, чем принято в моделировании (выше оцененного среднего по региону).

Таким образом, получены характеристики излучения и распространения сейсмических волн в Северо-Восточной Бурятии, которые могут быть использованы для прогноза параметров сильных движений в этом регионе; они приведены в табл. 3. В будущем с накоплением записей сильных землетрясений в регионе эти оценки должны быть уточнены.

Полученные оценки сброшенного напряжения  $\Delta\sigma \sim 100$  бар сходны с оценками этого параметра для Восточных США [Boore, Atkinson, 1987] и Камчатки [Павленко, 2011; Pavlenko, 2013]. Оценки добротности коры и верхней мантии невысоки и близки к аналогичным оценкам, полученным для Байкальской рифтовой зоны другими авторами [Добрынина и др., 2011], для Северного Кавказа [Павленко, 2016; Павленко, Павленко, 2016] и Центральной Японии [Aki, Chouet, 1975].

В своей совокупности полученные параметры распространения сейсмических волн — функция добротности, геометрическое расхождение,  $κ$ , длительность сильных движений — близки к аналогичным параметрам коровых землетрясений северного Кавказа и Центральной Японии, но параметры сброшенного в очагах напряжения выше, и, следовательно, интенсивность и пиковые ускорения (при фиксированной магнитуде и расстоянии) также будут выше в Бурятии, чем на Северном Кавказе.

Изучаемый район Северо-Восточной Бурятии характеризуется достаточно большой плотностью сейсмогенных структур — линеаментов, и типичное сценарное землетрясение (создающее нагрузки, на которые рассчитываются сейсмостойкие конструкции) имеет моментную магнитуду  $M_w \sim 7.0$  и эпицентральное расстояние  $\sim 25$  км. На рисунке 5 представлена акселерограмма (максимальная горизонтальная компонента) такого сценарного землетрясения и ее амплитудный спектр, рассчитанные на грунтах, описанных выше как грунтовое основание станции Северомуйск. Пиковые ускорения при таком землетрясении оцениваются в 204—236 см/с<sup>2</sup>, скорости — 17—20 см/с, а преобладающие периоды колебаний — 0.57 с для ускорений и 3.41 с для скоростей.

Автор благодарит Геофизическую службу РАН за записи землетрясений сейсмостанции «Северомуйск».

#### ЛИТЕРАТУРА

**Гусев А.А.** Свойства и природа короткопериодного излучения очага землетрясения: Автореф. дис. д.ф.-м.н., М., ИФЗ РАН, 1993, 45 с.

**Добрынина А.А., Чечельницкий В.В., Саньков В.А.** Сейсмическая добротность литосферы юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (5), с. 712—724.

**Еманов А.Ф., Еманов А.А., Павленко О.В., Фатеев А.В., Куприш О.В., Подкорытова В.Г.** Колыванское землетрясение 09.01.2019 г. 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 В.А., Павленко О.В.** Поглощение сейсмических волн в коре и верхней мантии в окрестностях сейсмостанции «Кисловодск» // Физика Земли, 2016, № 4, с. 24—34.

**Павленко О.В.** Характеристики поглощения сейсмических волн в коре и верхней мантии северо-западной части Кавказа // Физика Земли, 2008, № 6, с. 52—60.

**Павленко О.В.** Изучение региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн на Северном Кавказе посредством моделирования акселерограмм // Физика Земли, 2009, № 10, с. 38—48.

**Павленко О.В.** Различия региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн на Камчатке и Северном Кавказе // ДАН, 2011, т. 438, № 5, с. 687—693.

**Павленко О.В.** Характеристики излучения и распространения сейсмических волн на Северном Кавказе, оцененные по записям сейсмостанций «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.

**Суворов В.Д., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф.** Земная кора и ее изостатическое состояние в Байкальской рифтовой зоне и сопредельных территориях по данным ГСЗ // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (3), с. 304—316.

**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.

**Aki K., Chouet B.** Origin of the coda waves: source, attenuation and scattering effects // J. Geophys. Res. B: Solid Earth, 1975, v. 80, p. 3322—3342.

- Aki K., Irikura K.** Characterization and mapping of earthquake shaking for seismic zonation // Proc. 4th Int. Conf. Seismic Zonation, 1991, August 25—29, Stanford, California, 1991, v. 1, p. 61—110.
- Anderson J.G., Hough S.E.** A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies // Bull. Seismol. Soc. Am., 1984, v. 74, p. 1969—1993.
- Atkinson G.M.** Empirical attenuation of ground-motion spectral amplitudes in southeastern Canada and the northeastern United States // Bull. Seismol. Soc. Am., 2004, v. 94, p. 1979—1995.
- Boore D.M.** Simulation of ground motion using the stochastic method // Pure Appl. Geophys., 2003, v. 160, p. 635—676.
- Boore D.M., Atkinson G.M.** Stochastic prediction of ground motion and spectral response parameters at hard-rock sites in eastern North America // Bull. Seismol. Soc. Am., 1987, v. 77, p. 440—467.
- Boore D.M., Joyner W.B.** Site amplifications for generic rock sites // Bull. Seismol. Soc. Am., 1997, v. 87, p. 327—341.
- Boore D.M., Thompson E.M.** Path durations for use in the stochastic-method simulation of ground motions // Bull. Seismol. Soc. Am., 2014, v. 104 (5), p. 2541—2552.
- Burger R.W., Sommerville P.G., Barker J.S., Herrmann R.B., Helmberger D.V.** The effect of crustal structure on strong ground motion attenuation relations in eastern North America // Bull. Seismol. Soc. Am., 1987, v. 77, p. 420—439.
- Joyner W.B., Chen T.F.** Calculation of nonlinear ground response in earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Am., 1975, v. 65 (5), p. 1315—1336.
- Halldorsson B., Papageorgiou A.S.** Calibration of the specific barrier model to earthquakes of different tectonic regions // Bull. Seismol. Soc. Am., 2005, v. 95 (4), p. 1276—1300.
- Hanks T.C., McGuire R.K.** The character of high frequency strong ground motion // Bull. Seismol. Soc. Am., 1981, v. 71, p. 2071—2095.
- Hardin B.O., Drnevich V.P.** Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves // Proc. Am. Soc. Civil Eng., J. Soil Mech. Found. Div., 1972, v. 98, p. 667—692.
- Herrmann R.B., Kijko A.** Modeling some empirical vertical component Lg relations // Bull. Seismol. Soc. Am., 1983, v. 73, p. 157—171.
- Pavlenko O.V.** Simulation of ground motion from strong earthquakes of Kamchatka Region (1992—1993) at rock and soil sites // Pure Appl. Geophys., 2013, v. 170 (4), p. 571—595.
- Pavlenko O.V.** Regional characteristics of radiation and propagation of seismic waves in the North-Eastern Caucasus // Russ. J. Earth Sci., 2020, v. 20 (3), p. 1—15.
- Pavlenko O., Kozlovskaya E.** Characteristics of radiation and propagation of seismic waves in Northern Finland, estimated based on records of local earthquakes // Pure Appl. Geophys., 2018, v. 175 (12), p. 4197—4223, <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1919-5>.
- Wang C.Y., Herrmann B.B.** A numerical study of  $P$ -,  $SV$ -, and  $SH$ -wave generation in a plane layered medium // Bull. Seismol. Soc. Am., 1980, v. 70, p. 1015—1036.

*Поступила в редакцию 7 мая 2020 г.,  
принята в печать 30 ноября 2020 г.*