

УДК 550.34

СРЕДНИЕ СПЕКТРЫ ФУРЬЕ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ГРУНТА ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ КАМЧАТКИ*

© 2006 г. А. А. Гусев¹, А. Г. Петухин³, Е. М. Гусева², Е. И. Гордеев¹, В. Н. Чебров²¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006²Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683000³Институт "Гео-Рисерч", Осака, Япония

Поступила в редакцию 05.05.2005 г.

Для определения средней зависимости между уровнем спектра Фурье горизонтальных ускорений $FSA(f)$, моментной магнитудой M_W и гипоцентральной расстоянием R для землетрясений Камчатки, мы проанализировали 81 компоненту аналоговых записей сильных движений за 1969–1993 гг. Записи ускорений и скоростей получены на 11 станциях, главным образом, на скальном грунте, от 33 землетрясений с $M_W = 4.5–7.8$, на расстояниях $R = 30–250$ и глубинах $0–80$ км. Спектры $FSA(f)$ для набора частот рассчитаны по оцифрованным, откорректированным на характеристику прибора записям каналов; перед анализом спектры сглажены. Полностью эмпирическое определение зависимости $FSA(M_W, R_f)$ по данным ограниченного объема невозможно. Вместо этого мы сначала выполнили приведение данных к единому расстоянию $R_0 = 100$ км на теоретической основе, а затем определили тренды зависимостей $FSA(M_W, R_0/f)$ от M_W . Для этого использован метод множественной регрессии с поправками на тип грунта и условиями на отдельных станциях. Зависимость от M_W принята в виде кусочно-линейной функции с точкой пересечения при $M_W = 6.5$. Результаты множественной регрессии впервые представляют систематическое описание спектральных особенностей разрушительных колебаний грунта при землетрясениях Камчатки.

ВВЕДЕНИЕ

Полуостров Камчатка и прилегающий к нему район дна Тихого океана – зона высокой сейсмичности, с обилием сильных землетрясений. В течение последних 35 лет здесь работала небольшая сеть станций сильных движений. Некоторые отдельные записи сильных движений и их спектры уже были опубликованы [3, 8, 12, 15, 16, 19, 22]. Систематическая обработка записей и их анализ (в терминах максимальных ускорений) начаты авторами в [4, 32]. В этой работе мы продолжим изучение параметров сильных движений Камчатки и построим среднюю региональную зависимость спектров Фурье горизонтальных ускорений FSA от магнитуды и расстояния для землетрясений с глубиной $0–80$ км.

Параметр FSA отображает амплитудно-частотный состав колебаний. В инженерной практике, чаще в комбинации с огибающей/длительностью, он используется для моделирования акселерограмм [13, 17, 28]. Он также широко используется при теоретическом моделировании параметров сильных движений с помощью метода случайных колебаний [1, 28, 39]. Самостоятельный интерес имеют получаемый на основе спектра Фурье очаговый спектр в диапазоне частот $0.5–20$ Гц и его сравнение с известными теоретическими моделями.

Было сделано несколько попыток прогнозной оценки спектров Фурье колебаний грунта в Петропавловске-Камчатском при ожидаемом сильном землетрясении. В.В. Штейнберг и С.А. Федотов [21] оценили спектры и пиковые скорости колебаний для ожидаемого землетрясения с $M = 8.25$ в Авачинском заливе путем экстраполяции данных землетрясений с $M = 4–6$. А.А. Гусев [3] получил оценки пиковых ускорений и спектров реакции, обобщив данные о спектрах Фурье нескольких землетрясений Камчатки и Японии с $M = 7–8$. Из-за ограниченной надежности полученных оценок и выводов, связанной с малым объемом полученных и обработанных записей сильных движений, эти работы требуют дальнейшего развития. Одним из первых спектров Фурье по данным сильных движений систематически исследовал М.Д. Трифунац для Запада США [36, 37]. В [34] проведен эмпирический анализ спектров 228 записей сильных движений Японии и получены зависимости $FSA(M, R, g)$.

Исходные наблюдательные данные работы – это набор оцифрованных и обработанных записей сильных движений Камчатки, в основном использованный ранее в [4, 32]. В получение самих записей вложен многолетний труд организаторов и исполнителей наблюдений за сильными движениями в 1962–1993 гг. В этот период их вели: Институт физики Земли АН СССР (ИФЗАН, В.В. Штейнберг); Тихоокеанская сейсмическая экспедиция (ИФЗАН, С.А. Федотов); сейсмическая станция

* Статья посвящена 25-летию КОМСП ГС РАН.

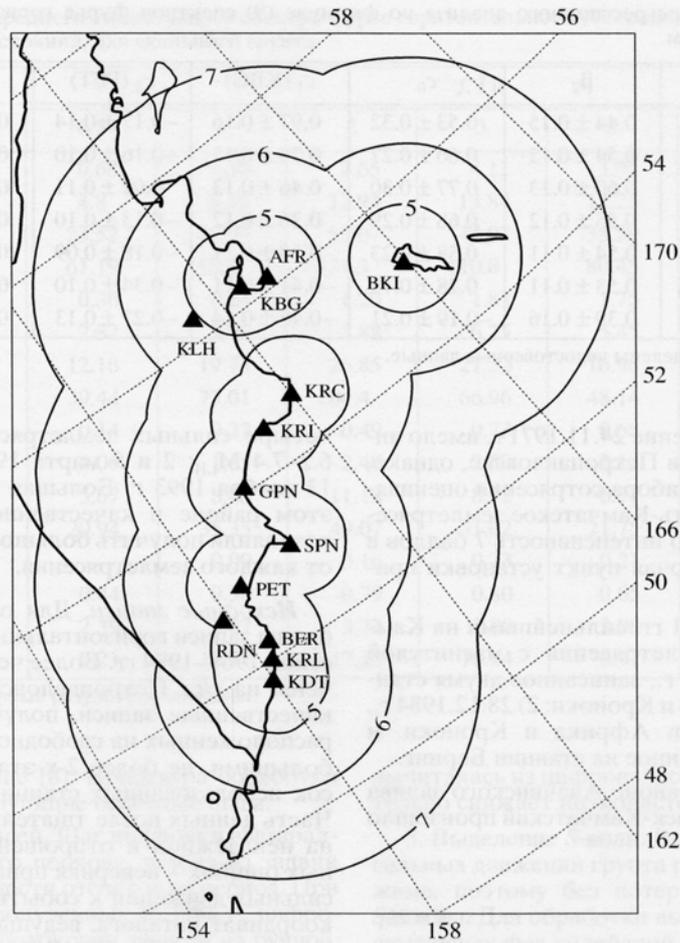


Рис. 1. Сеть станций сильных движений побережья Камчатского полуострова. KDT – ГМС “Водопадная”, KRL – маяк “Круглый”, BER – “Березовая”, RDN – “Родниковая”, PET – маяк “Петропавловский”, SPN – мыс Шипунский, GPN – ГМС “Семячик”, KRI – сейсмостанция “Кроноки”, KRC – маяк “Кроноцкий”, KBG – сейсмостанция “Крутоберегово”, AFR – маяк “Африка”, BKI – сейсмостанция “Беринг”, KLI – сейсмостанция “Ключи”. Окружностями показаны расчетные зоны срабатывания хотя бы одного акселерометра сети для землетрясений с $M_w = 5, 6, 7$.

Петропавловск (ИФЗАН, Л.Г. Синельникова); Институт вулканологии ДВО АН (В.Д. Феофилактов) и Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ИВ ДВО РАН (Е.И. Гордеев, В.П. Митякин).

Исходные данные и их первичная обработка. Сеть станций сильных движений Камчатки. Создание сети станций сильных движений на Камчатке началось в 1962 г. размещением установки УАР на с/ст Петропавловск. Основная часть записей получена после 1970 г. приборами С5С-ИСО-II, СССР и АСЗ.

В 1996 г. сеть станций сильных движений Камчатки насчитывала 25 станций (рис. 1), расположенных вдоль восточного побережья Камчатки и на о. Беринга. Приборы размещены на регио-

нальных сейсмостанциях, маяках, метеостанциях. 11 станций расположены на территории г. Петропавловск-Камчатский. Хронологию развития сети станций сильных движений на Камчатке можно найти в [20].

Сильные землетрясения периода наблюдений. В течение всего периода наблюдений на Камчатке произошло несколько сильных землетрясений, три из которых имели магнитуду 7.5–8. Это Озерновское землетрясение 22.11.1969 г., $M_{LI} = 7.7$; Петропавловское – 24.11.71 г., $M_w = 7.7$, $M_s = 7.2$, ($H = 100$ км); Усть-Камчатское – 15.12.1971 г., $M_{LI} = 7.8$. Несмотря на техническое несовершенство приборов и трудности в обслуживании, были получены одиночные записи каждого из этих трех сильнейших землетрясений [19, 22]. Петро-

Таблица 1. Результаты регрессионного анализа по формуле (9) спектров Фурье горизонтальных ускорений, приведенных к $R = 100$ км

f_k , Гц	β_1	β_2	c_0	c_1 (KBG)	c_2 (PET)	c_3 (KRI)	$\sigma_{\text{ЭК}}$
0.5	0.93 ± 0.12	0.44 ± 0.15	0.53 ± 0.32	0.97 ± 0.16	-0.17 ± 0.14	0.44 ± 0.16	0.38
1	0.86 ± 0.09	0.54 ± 0.12	0.66 ± 0.27	0.78 ± 0.12	-0.16 ± 0.10	0.62 ± 0.12	0.30
2	0.78 ± 0.10	0.60 ± 0.13	0.77 ± 0.30	0.46 ± 0.13	0.02 ± 0.11	0.51 ± 0.13	0.32
3	0.61 ± 0.09	0.55 ± 0.12	0.68 ± 0.29	0.26 ± 0.12	-0.13 ± 0.10	0.65 ± 0.12	0.30
5	0.57 ± 0.08	0.54 ± 0.11	0.58 ± 0.23	0.10 ± 0.11	-0.18 ± 0.09	0.86 ± 0.11	0.27
10	<i>$[0.40 \pm 0.08]$</i>	0.53 ± 0.11	0.28 ± 0.12	-0.41 ± 0.11	-0.34 ± 0.10	0.70 ± 0.11	0.27
16	<i>$[0.15 \pm 0.01]$</i>	0.39 ± 0.16	-0.19 ± 0.21	-0.45 ± 0.14	-0.27 ± 0.13	0.66 ± 0.13	0.30

Примечание. Курсивом выделены недостоверные данные.

павловское землетрясение 24.11.1971 г. имело интенсивность 7 баллов в Петропавловске, однако, в пункте установки прибора сотрясения оцениваются в 5–6 баллов. Усть-Камчатское землетрясение 15.12.1971 г. имело интенсивность 7 баллов в Усть-Камчатске, включая пункт установки прибора.

В период 1972–1991 гг. сильнейшими на Камчатке были три землетрясения с магнитудой около 7: 1) 17.08.1983 г., записанное двумя станциями, Крутоберегово и Кроноки; 2) 28.12.1984 г., записанное станциями Африка и Кроноки, и 3) 29.02.1988 г., записанное на станции Беринг.

В 1992–1993 гг. в районе Авачинского залива вблизи г. Петропавловск-Камчатский произошло

четыре сильных землетрясения с магнитудами 6.2–7.4 $M_{\text{ЛН}}$: 2 и 5 марта 1992 г. [10], 8 июня и 13 ноября 1993 г. Большая плотность станций в этом районе и качественное их обслуживание позволили получить большое количество записей от каждого землетрясения.

Исходные записи. Для обработки были отобраны записи горизонтальных каналов землетрясений 1969–1994 гг. Более четверти записей получены на с/ст Петропавловск (PET). Отбирались качественные записи, полученные на станциях, расположенных на свободном грунте или под небольшими, не более 2-х этажей, зданиями. Список использованных станций приведен в [4, 35]. Часть данных после тщательного анализа сочтена ненадежной и отброшена. Причины вероятных ошибок – неверная привязка записи прибора сильных движений к событию каталога; ошибка координат каталога, ведущая к грубому искажению оценки расстояния. Фактически отброшены: две записи с/ст. Беринг, полученные 09.02.1981 г. от землетрясений с эпицентрами в районе Алеутской гряды, а также запись землетрясения 17.04.1982 г., на с/ст Кроноки. Всего были использованы 54 записи, полученные при 33 мелкофокусных (с глубиной $H < 70$ км) землетрясениях. Данные о землетрясениях (координаты эпицентра ϕ и λ , глубина очага H , магнитуда $M_{\text{ЛН}}$ (M_S) и/или энергетический класс $K^{\text{Ф68}}$) приведены в табл. 2 в [4, 35]. Для каждой пары станция-землетрясение определяли гипоцентральное расстояние. При возможности, для региональных сейсмостанций его рассчитывали по $t_s - t_p$ с помощью среднего камчатского годографа Кузина. Для остальных станций гипоцентральное расстояние рассчитывалось по координатам гипоцентра и станции. Распределение записей по магнитудам и расстояниям приведено на рис. 2. Записи приблизительно равномерно покрывают интервал магнитуд от 4.5 до 7.8 и расстояний от 30 до 250 км.

Процедура обработки записей. Для обработки записей использована имеющаяся методика и про-

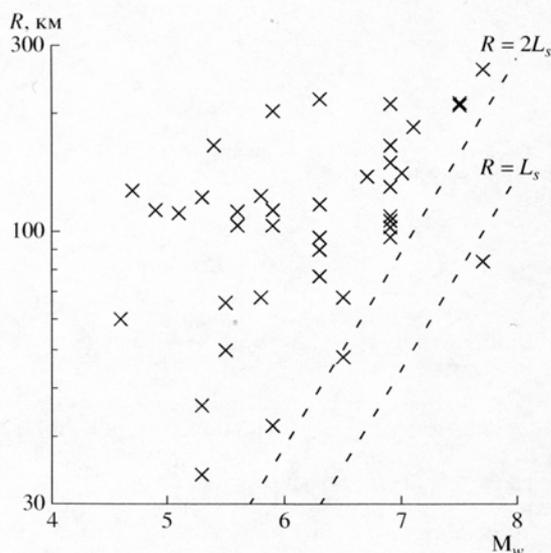


Рис. 2. Распределение обработанных записей сильных движений по магнитудам и расстояниям. Пунктиром показаны варианты границы ближней зоны очага; L_s – размер очага по формуле (6).

Таблица 2. Значения среднего амплитудного спектра Фурье горизонтального ускорения для Камчатки (см/с) для набора магнитуд и расстояний, для скального грунта

R, км	M _w	f, Гц						
		0.5	1	2	3	5	10	16
25	5	0.68	1.39	2.65	4.11	3.95	–	–
	6	4.8	8.55	12.94	13.84	12.25	8.74	3.71
	7	23.52	40.09	55.07	44.07	35.59	16.38	5.40
	8	61.19	118.5	171.3	110.8	80.45	38.11	8.61
50	5	0.30	0.64	1.20	1.83	1.75	–	–
	6	2.32	3.95	5.88	6.25	5.45	3.83	1.60
	7	12.16	19.74	26.85	21.32	16.98	7.67	2.49
	8	39.44	73.01	104.4	66.96	48.14	22.35	4.97
100	5	0.14	0.27	0.49	0.73	0.68	–	–
	6	1.06	1.65	2.40	2.50	2.14	1.45	0.59
	7	5.67	8.43	11.18	8.72	6.77	2.96	0.93
	8	20.94	35.35	49.07	31.02	21.75	9.76	2.10
200	5	–	0.09	0.16	0.23	0.21	–	–
	6	0.44	0.58	0.79	0.80	0.65	0.41	0.16
	7	2.39	2.97	3.72	2.80	2.08	0.84	0.25
	8	9.21	13.01	17.13	10.44	6.97	2.91	0.59

Примечание. Недостоверные результаты опущены.

граммное обеспечение [8]. Процедура обработки включает в себя следующие основные шаги.

1. Цифровка записей. Шаг цифровки выбирается с учетом видимого периода, исходя из задачи получить не менее шести отсчетов на период. При обработке записей, полученных до 1988 г., цифровались контактные фотокопии записей на ручной, оптико-механической цифровальной установке УЦС-Ф004. Разрешение по ординате не хуже 0.1 мм, частота отсчетов по времени – от 50 до 100 отсчетов в сек. Для цифровки записей 1992–1993 гг. применен специальный пакет для оцифровки отсканированных фотозаписей. Программа DIG разработана Д.В. Дрозниным. Программа работает в диалоговом режиме. Реализовано несколько алгоритмов выделения середины линии записи. В трудных случаях можно применить ручной режим цифровки. Использование сканера позволяет проводить цифровку непосредственно с фотопленок; это значительно уменьшает низкочастотные искажения, связанные с усадкой фотобумаги.

2. Корректировка нулевой линии. Путем подбора аппроксимирующей прямой исключали смещение и наклон нулевой линии. В некоторых случаях методом скользящего интегрирования в широком временном окне выделялся и исключался длиннопериодный дрейф нулевой линии записи, возникающий из-за коробления фотоосновы. При использовании сканера цифровалась также нулевая линия акселерограммы, которая затем

вычиталась из цифровальной записи канала. Это дополнительно снижает низкочастотные искажения.

3. Выделение S-волн. Все приборы для записей сильных движений грунта работают в ждущем режиме, поэтому без потерь записываются лишь S-волны. Для обработки выбирались участки максимальных фаз колебаний S-волн. Для этого “вырезали” сегмент записи от S-вступления до момента спада амплитуды колебаний более чем вдвое от A_{max} . Чтобы на концах выбранного сегмента не возникало искусственных “ступенек”, используются “заглаживающие” функции типа половинок косинусного окна.

4. Выбор рабочей полосы. В частотной области выделяли полосу частот, в которой отношение сигнал/шум больше единицы. Высокочастотные шумы появляются в процессе обработки и цифровки, при коррекции приборных искажений и при дифференцировании записей велосигналов. Низкочастотные шумы порождаются дрейфом нулевой линии и короблением фотоосновы. Типичная рабочая полоса частот – от 0.1 до 25 Гц.

5. Восстановление “истинного” спектра Фурье путем деления спектра Фурье записи на комплексную передаточную функцию прибора по ускорению. Параметры приборов определялись путем калибровки, либо брались паспортные величины.

6. Сглаживание. Для получения среднего уровня спектра Фурье проводилось сглаживание спек-

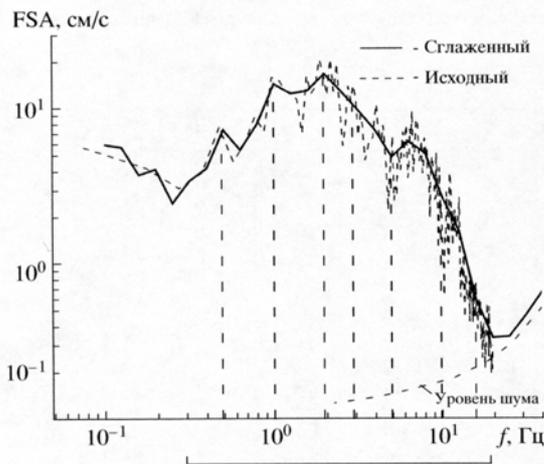


Рис. 3. Пример расчета спектра Фурье. Землетрясение 2 марта 1992 г., записанное на ст. Жупаново (GPN). Чертой снизу обозначен диапазон частот, в котором надежно определяется спектр Фурье.

тра с постоянным шагом по логарифму частоты. При сглаживании брались среднеквадратичное значение по отсчетам в заданном окне. Шаг сглаживания обычно равнялся 0.1 лог. ед. Затем по сглаженному спектру брались отсчеты на фиксированных частотах: 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 и 16 Гц. Примеры исходного и сглаженного спектров приведены на рис. 3.

Результаты измерений спектров Фурье ускорений. Сглаженные величины спектров Фурье ускорений горизонтальных каналов приведены в табл. 3 в [35]. Часть компонент не удалось обработать из-за невозможности оцифровать отдельные каналы низкого качества. Также на некоторых частотах оценки спектров отброшены в силу низкого качества записей. Окончательный набор данных по амплитудам сглаженного спектра Фурье включает 81 скорректированные горизонтальные компоненты записей сильных движений Камчатки за 1969–1993 гг.

Теоретические основы методики анализа данных. Имеющихся данных о спектрах Фурье ускорений недостаточно для полностью эмпирического определения зависимости $FSA(M_w, R)$. Поэтому применим следующую полуэмпирическую методику: сначала приведем данные к единому расстоянию, используя теоретическую модель, и затем определим эмпирическую зависимость спектра от магнитуды, используя метод множественной регрессии. Надежных теоретических моделей для зависимости спектра Фурье от магнитуды на высоких частотах не разработано. Зависимость же от расстояния определяется по слабым землетрясе-

ниям более надежно. Поэтому будем считать, что данные по спектрам Фурье описываются моделью:

$$\begin{aligned} \lg FSA_i(f) &= \\ &= \lg FSA^T(M_w, R_0|f) + C^T(M_w|f, R_0) + \varepsilon_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где $FSA^T(M_w, R_0|f)$ рассчитывается по некоторой теоретической модели, $C(M_w|f, R_0)$ – эмпирическая поправочная функция, и ε_i – остаточная случайная ошибка.

Теоретический спектр рассчитаем по упрощенной расчетной схеме, приведенной в [4, 7, 32]. Эта схема и основания для нее, вкратце, выглядят следующим образом. Сигнал в приемнике определяется тремя факторами: очагом землетрясения, средой (трассой очаг–приемник) и локальными грунтово-геологическими условиями под приемником. При малых амплитудах волн систему очаг–среда–станция считаем линейной. Тогда спектр Фурье сигнала в приемнике представляется как произведение спектра очага на передаточные функции остальных звеньев: среды и условий под станцией. В нашем случае, при определении средних спектров Фурье, все компоненты имеют смысл средних на множестве пар “очаг–станция”. Это значительно упрощает задачу, так как позволяет все разнообразие очагов, трасс и локальных условий описать простыми моделями с небольшим числом параметров. Так, очаг землетрясения характеризуем его моментной магнитудой M_w ; средой – расстоянием очаг–приемник R , а грунтовые условия – категорией/типом грунта: скальный, средний или мягкий. При таких упрощениях формула для расчета модельного спектра Фурье ускорения выглядит так:

$$\begin{aligned} FSA(f|R, M_w) &= (2\pi f)^2 C M_0(f|M_w) \times \\ &\times K_Q(f) K_R K_g(f) K_H(f), \end{aligned} \quad (2)$$

где $M_0(f)$ – очаговый спектр (использована модель Бруна в варианте Джойнера и Бура [29]), $C = 1/(4\pi r \rho_s^3)$, $K_Q(f)$ и K_R – множители, описывающие поглощение и геометрическое расхождение в среде, $K_g(f)$ – коэффициент грунтовых условий, $(2\pi f)^2$ – коэффициент перехода от спектра смещений к спектру ускорений, $K_H(f)$ – коэффициент, описывающий высокочастотный спад спектра (параметр f_{\max} по Ханксу).

Основные параметры очагового спектра по Бруну – это сейсмический момент M_0 и среднее сброшенное напряжение $\Delta\sigma$. Параметр M_0 рассчитывается из M_w . Для сброшенного напряжения примем среднюю для коровых землетрясений оценку $\Delta\sigma = 40$ бар. Конкретный выбор параметра f_{\max} для наших целей мало существенен, и мы используем оценку, сделанную ранее в [4, 32]: $f_{\max} = 10$ Гц.

Геометрическое расхождение в простейшем виде описывают как:

$$K_R = 1/R^n, \quad (3)$$

где n зависит от типа волны. Обычно принимает сферическое расхождение амплитуд для S -волн ($n = 1$).

Схема очаг–среда–грунтовые условия хорошо работает в дальней зоне, при $R > L_s$, где L_s – протяженность очага. В ближней зоне, при $R < L_s$, нужно интегрировать вклады от разных участков площадки очага. При этом уровень спектра Фурье вблизи протяженного очага будет ниже, чем в предположении точечного источника, из-за уменьшения эффективной площади излучателя при приближении точки приема к очагу. С целью оптимальной подгонки калифорнийской базы данных запада США было предпринято специальное исследование [38] для выбора наилучшей формулы для описания данного эффекта. Наилучшей оказалась формула, полученная А.А. Гусевым для некогерентного излучения на оси очага в виде диска [1]:

$$K_R = \sqrt{\frac{1}{R_{eff}^2} \ln \left(\frac{R_{eff}^2 + R^2}{R_c^2 + R^2} \right)}, \quad (4)$$

(здесь R_{eff} – “эффективный” радиус очага, R_c – радиус когерентности источника) При использовании формулы (4) обычно можно считать $R_c \approx 0$.

Для эффективного (по интенсивности излучения) радиуса очага R_{eff} , следуя [1], использована оценочная зависимость:

$$R_{eff} = 0.5(L_s W_s)^{0.5} \approx 0.4L_s. \quad (5)$$

Для расчета размера (длины) очага L_s используются полуэмпирические зависимости L_s от M_w . При расчете длины очага L_s в предположении о строгом подобии, т.е. предполагая что $L_s \sim (S_s)^{0.5}$ и $S_s \sim M_w$, где S_s – площадь разрыва имеющего прямоугольную форму, принимали:

$$\lg L_s = 0.5M_w - C_L. \quad (6)$$

Здесь константа C_L описывает связь размер–магнитуда, в [6] приведено ее осредненное значение $C_L = 1.85$. Эта оценка не противоречит данным об очагах землетрясений Камчатки и принята для расчетов. Результат используется в (5).

Надо заметить, что для описания относительного положения станции и протяженного очага удобно было бы использовать “расстояние до центра излучения”, R_{rad} . Такое определение расстояния лучше всего отвечает модельным построениям [30] и способствует уменьшению разброса приведенных данных, но сложно на практике. В нашем случае только две записи попадают в ближнюю зону очага (рис. 2), и поэтому для про-

стоты можно смело использовать гипоцентрально-расстояние R , считая, что $R \approx R_{rad}$.

Потери в среде, в общем случае, состоят из неупругого поглощения и потерь на рассеянии. Эти эффекты поглощения и рассеяния практически неразделимы и описываются единым параметром “добротность среды” Q . В области частот выше 1 Гц Q зависит от частоты [26, 27]. Вклад потерь в общий спад амплитуд описывается с помощью множителя:

$$K_Q(f) = e^{-\frac{\pi f R}{Q(f)C_s}}. \quad (7)$$

Зависимость Q от частоты принято аппроксимировать формулой:

$$Q(f) = f \leq f_0 \begin{cases} Q_0; & f \leq f_0 \\ Q_0 f^{\gamma_Q}; & f > f_0 \end{cases}, \quad (8)$$

где обычно $f_0 = 1$ Гц, а параметры Q_0 и γ_Q зависят от района исследований и, в принципе, могут быть определены по слабым местным землетрясениям.

В [5, 24] делались оценки параметров Q_0 и γ_Q для Камчатки по материалам записей ЧИСС методом кода-волн. Получены оценки $Q_0 = 200$, $\gamma_Q = 0.8$ при временах запаздывания коды 50–80 с. В [14] определены зависимости $Q(f)$ по оцифрованным данным региональных сейсмостанций для района Авачинского залива тем же методом, получены близкие оценки. Для регионов-аналогов Японии и Южных Курил, на обширном материале, получены величины: $Q_0 = 180$ –200, $\gamma_Q = 0.7$ –0.8 [25]. В описанных ниже расчетах принято $Q_0 = 250$, $\gamma_Q = 0.8$.

Влияние геологических условий вблизи станции – важный фактор формирования сильного движения. При расчетах по формуле (2) будем считать, что $K_g(f) = 1$, случай скального основания. Для отдельных станций $K_g(f)$ будет определена эмпирически методом множественной регрессии.

Методика регрессионного анализа. Используя модель спектра Фурье по формуле (1), имеющиеся значения $FSA(f|M_w, R_i)$ для i -го землетрясения можно привести к единому расстоянию $R_0 = 100$ км по формуле:

$$FSA(f_K|M_w, R_0 = 100) = FSA(f_K|M_w, R_i) \frac{FSA^T(f_K|M_w, R_0 = 100)}{FSA^T(f_K|M_w, R_i)}. \quad (9)$$

Затем, для определения эмпирической зависимости от магнитуды, используем метод множественной регрессии с параметрами: M_w , тип станционных/грунтовых условий. Для этого, с учетом результатов анализа максимальных ускорений [4, 32] и предварительного анализа спектров Фурье,

разобьем имеющиеся данные на четыре группы: (1) станции на скальном грунте; (2) данные с/ст Крутоберегово (КВГ); (3) данные с/ст Петропавловск (РЕТ) и (4) данные с/ст Кроноки (КРИ). Кроме КВГ и КРИ, все использованные станции – со скальным грунтом.

В основном, каждое землетрясение представлено только одной записью. Для землетрясений 19.05.1985, 02.03.1992, 05.03.1992, 08.06.1993 и 13.11.1993 имеется по несколько записей. Чтобы избежать смещения, связанного с большим весом отдельных землетрясений, записанных на нескольких станциях, данные от каждого из этих землетрясений предварительно усредним.

По приведенным данным, для каждой частоты $f_K = 0.5, 1, 2, 3, 5, 10$ и 16 Гц, определим зависимость логарифма спектра Фурье от магнитуды для скального грунта: $\lg FSA(M_W|f = f_K, R = 100)$, а также постоянные поправки (приращения логарифма спектра Фурье) на каждой из частот f_K для трех других групп данных по отношению к скальному грунту.

Построим спектральную модель для $M_W = 8$, $R_0 = 100$ км. Для перехода к другим магнитудам и расстояниям используем эмпирическую зависимость $FSA(M_W|f_K, R = 100)$ для перехода к новой магнитуде и затем вновь используем теоретическую модель (2) для перехода к новому расстоянию.

Для учета возможной нелинейности зависимости уровня спектра от магнитуды, примем зависимость $FSA(M_W|f = f_K, R = 100)$ в виде ломаной из двух звеньев. Такое представление оптимально соответствует имеющемуся объему данных и учитывает отсутствие разработанных теоретических представлений о характере роста уровня спектра Фурье короткопериодных колебаний с магнитудой. Значение магнитуды, при которой пересекаются звенья, примем $M_W = 6.5$, что примерно соответствует середине диапазона магнитуд и согласуется выбором других исследователей [33, 34]. Окончательная модель для подгонки выглядит следующим образом:

$$\lg FSA(M_W|f_K, R_{100}) = c_0(f_K) + \sum_{i=1}^3 c_i(f_K)\delta_i + \varepsilon(f) + \begin{cases} \beta_1(f_K)(M_W - 6.5); & M_W < 6.5 \\ \beta_2(f_K)(M_W - 6.5); & M_W > 6.5 \end{cases} \quad (10)$$

где: M_W – моментная магнитуда, f_K – K -я частота, ε_K – случайная ошибка данных с дисперсией $\sigma_{\varepsilon K}$, c_0 – константа. Символ δ_i обозначает “индикаторную” переменную: $\delta_1 = 1$, если данное принадлежит с/ст КВГ, иначе $\delta_1 = 0$; $\delta_2 = 1$, если данное принадлежит с/ст РЕТ, иначе $\delta_2 = 0$; $\delta_3 = 1$, если данное

принадлежит с/ст КРИ, иначе $\delta_3 = 0$. Для скального грунта все $\delta_i = 0$. Коэффициенты $\beta_1, \beta_2, c_0, c_i$ – искомые неизвестные параметры модели. Поясним, что использование индикаторных переменных – стандартный прием множественной регрессии. Его идея в том, что одновременно, в единой процедуре, оцениваются и поправки c_1, c_2, c_3 , и сам тренд (параметры β_1, β_2, c_0). Математические основания метода множественной регрессии приведены в [9].

Надо заметить, что первоначально для анализа данных спектров Фурье, приведенных к $R = 100$ км $FSA(M_W|f = f_K, R = 100)$, была использована простая линейная зависимость от M_W , а разбиения данных на группы не производилось. Использование такой модели дало очень большой остаточный разброс ($\beta_1, \beta_2, (f)$ в диапазоне 0.40–0.50). Использование нелинейной зависимости от магнитуды и индикаторных переменных существенно улучшило качество регрессии.

Результаты регрессионного анализа и построение осредненных зависимостей. Результат приведения данных к единому гипоцентральному расстоянию $R_0 = 100$ км показан точками по подгруппам данных на рис. 4 (для семи частот f_K), в зависимости от M_W . На рисунке ломаными линиями показан также результат подгонки модели (10) методом наименьших квадратов. Значения коэффициентов модели (10) приведены в табл. 1. По полученной модели рассчитаны спектры Фурье при $M_W = 8$ и $R = 100$ км для станций на скальном грунте, с/ст Крутоберегово, Петропавловск и Кроноки. Результат приведен на рис. 5. В табл. 2 приведены результаты расчета спектров Фурье горизонтального ускорения для скального грунта, для четырех значений магнитуды $M_W = 5, 6, 7$ и 8 и набора расстояний 25, 50, 100 и 200 км. На рис. 6 приведен сглаженный вариант аналогичных зависимостей. Для сравнения наших результатов с данными других регионов на рис. 7 нанесен спектр Фурье для Японии из [23, 31, 34], спектр из [3], рекомендованный для Камчатки ранее, и спектр модели Бруна.

Анализ таблицы и рисунков показывает следующее:

1. Использование при регрессии модели со структурой (5) привело к приемлемому разбросу значений FSA: значения σ_{ε} в табл. 1 близки к 0.30, что соответствует типичному значению для других регионов.

2. Для малых магнитуд не все результаты достоверны. Анализ рис. 5 показывает, что для частот выше 5 Гц и малых магнитуд тренд выполаживается до горизонтального. Этот результат физически невероятен, и его, безусловно, следует отбросить. Его причина понятна – это низкое отношение сигнал/шум при малых амплитудах запи-

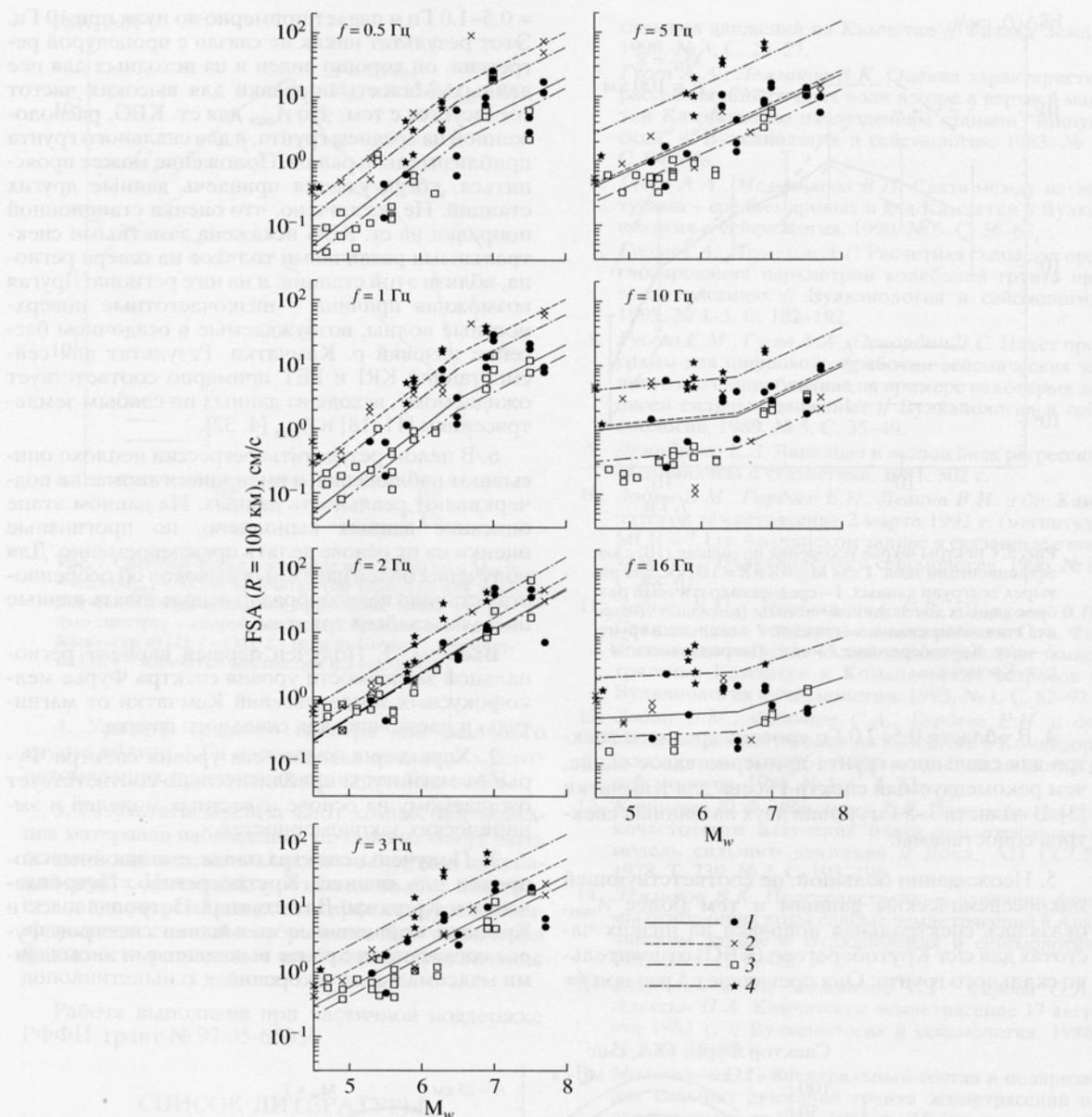


Рис. 4. Результат приведения индивидуальных значений спектров Фурье ускорения FSA(0.5 Гц) к единому расстоянию. Ломаными линиями показан результат подгонки магнитудной зависимости FSA(M_w , $R = 100$ км) по формуле (10). 1 – скальный грунт; 2 – с/ст. Крутоберегово; 3 – с/ст. Петропавловск; 4 – с/ст. Кроноки.

си и на высоких частотах. (По тем же причинам ненадежен результат при $M_w = 5$ и $f = 0.5$ Гц).

3. Тем не менее, по данным для магнитуд интервала 6–8 можно сделать вывод, что коэффициент $\beta(f)$ падает с частотой, причем как в диапазоне 0.5–2.0 Гц, где этого можно ожидать по модели Бруна или Аки-Папагеоргиу, так и на более

высоких частотах, в согласии с моделью Гусева [2] и в противоречии с моделью Бруна. Значение коэффициента β в диапазоне 2–5 Гц несколько выше, чем ожидаемое по Бруну (0.5). Такое поведение коэффициента $\beta(f)$ может указывать на существование магнитудно-зависимого f_{\max} в соответствии с моделью Гусева.

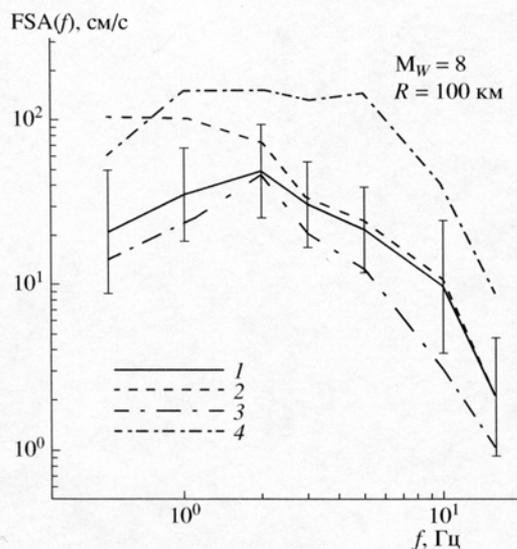


Рис. 5. Спектры Фурье ускорения по модели (10) с коэффициентами табл. 1 для $M_w = 8$ и $R = 100$ км, для четырех подгрупп данных. 1 – среднеквадратичный разброс данных для заданной частоты (показано только для станций на скальном грунте); 2 – с/ст. Крутоберегово; 3 – с/ст. Петропавловск; 4 – с/ст. Кроноки.

4. В области 0.5–2.0 Гц уровень среднего спектра для скального грунта примерно вдвое выше, чем рекомендуемый спектр Гусева для Камчатки [3]. В области 3–5 Гц уровни двух названных спектров сопоставимы.

5. Неожиданно большой, не соответствующей макросейсмическим данным и тем более A_{max} , оказалась спектральная поправка на низких частотах для с/ст Крутоберегово (КВГ) относительно скального грунта. Она превышает 5 раз при $f =$

$= 0.5$ – 1.0 Гц и падает примерно до нуля при 10 Гц. Этот результат никак не связан с процедурой регрессии, он хорошо виден и на исходных для нее данных. Малость поправки для высоких частот согласуется с тем, что A_{max} для ст. КВГ, расположенной на среднем грунте, и для скального грунта приблизительно равны. Положение может проясниться, когда удастся привлечь данные других станций. Не исключено, что оценка станционной поправки на ст. КВГ искажена заметными спектральными различиями толчков на севере региона, вблизи этой станции, и на юге региона. Другая возможная причина – низкочастотные поверхностные волны, возбуждаемые в осадочном бассейне низовий р. Камчатки. Результат для сейсмостанций KRI и PET примерно соответствует ожидаемому, исходя из данных по слабым землетрясениям [11, 18] и A_{max} [4, 32].

6. В целом результаты регрессии неплохо описывают наблюдения, и имеющиеся аномалии подчеркивают реальность данных. На данном этапе описание данных выполнено, но прогнозные оценки на их основе делать преждевременно. Для получения более надежных выводов об особенностях станций целесообразно использовать данные по более слабым толчкам.

Выводы. 1. Получен первый вариант региональной зависимости уровня спектра Фурье мелкофокусных землетрясений Камчатки от магнитуды и расстояния для скального грунта.

2. Характер зависимости уровня спектра Фурье от магнитуды приблизительно соответствует ожидаемому на основе известных моделей и эмпирических закономерностей.

3. Получены спектральные станционные поправки для станций Крутоберегово, Петропавловск и Кроноки. Для станций Петропавловск и Кроноки станционные аномалии спектров Фурье согласуются с ранее выявленными аномалиями максимальных ускорений.

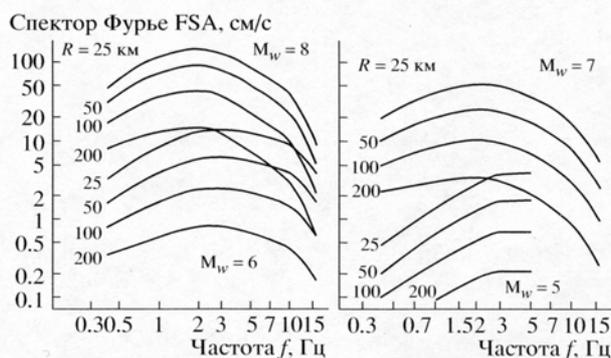


Рис. 6. Средние спектры Фурье ускорения (скальный грунт, горизонтальная компонента), рассчитанные по модели (10) с коэффициентами по табл. 1 и сглаженные.

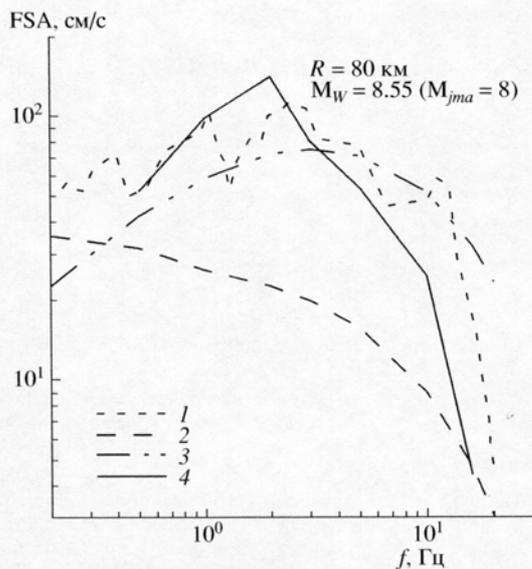


Рис. 7. Спектры Фурье ускорения при $R = 80$ км и $M_W = 8.55$ ($M_{jma} = 8$) для Камчатки (по табл. 2) и для Японии из [33]. Для сравнения приведены также расчетные спектры с опорой на спектр Бруна и спектр для Камчатки из [3]: 1 – [34]; 2 – модель Бруна; 3 – Камчатка [3]; 4 – Камчатка (настоящее исследование).

4. Уровень среднего спектра для скального грунта вблизи 1 Гц несколько выше, чем у соответствующих прогнозных спектров Гусева [3].

5. Результаты анализа дают компактное описание материала наблюдений, но пока не могут быть основой для надежного прогноза будущих колебаний грунта. Имеющийся объем данных не позволяет вполне уверенно разделить эффект грунта, индивидуальности станций и субрегиона. Для увеличения надежности результатов необходимо привлечение дополнительных данных.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 97-05-65056.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.А. Описательная статистическая модель изучения очага землетрясения и ее применение к оценке короткопериодного сильного движения // Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С. 3–22.
2. Гусев А.А. Модель очага со множеством неровностей // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 41–55.
3. Гусев А.А. Предварительный вариант расчетных сейсмических нагрузок для Петропавловска-Камчатского // Вопр. инженер. сейсмологии. 1990. № 31. С. 67–84.
4. Гусев А.А., Гусева Е.М., Петухин А.Г. и др. Максимальные ускорения грунта по данным приборов

сильных движений на Камчатке // Физика Земли. 1998. № 4. С. 20–27.

5. Гусев А.А., Лемзиков В.К. Оценка характеристик рассеяния поперечных волн в коре и верхней мантии Камчатки по наблюдениям станции “Шипунский” // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 94–108.
6. Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудой – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.
7. Гусев А.А., Петухин А.Г. Расчетная схема для прогнозирования параметров колебаний грунта при землетрясениях // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 182–192.
8. Гусева Е.М., Гусев А.А., Оскорбин Л.С. Пакет программ для цифровой обработки сейсмических записей и его опробование на примере некоторых записей сильных движений // Вулканология и сейсмология. 1989. № 5. С. 35–49.
9. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. М.: Финансы и статистика, 1981. 302 с.
10. Зобин В.М., Гордеев Е.И., Левина В.И. и др. Камчатское землетрясение 2 марта 1992 г. (магнитуда $M_LN = 7.1$) в Авачинском заливе и связанные с ним явления // Вулканология и сейсмология. 1996. № 6. С. 48–61.
11. Зобин В.М., Митюшкина С.В., Чиркова В.Н. Стационарные поправки к номограммам С.А. Федотова для энергетической классификации землетрясений Камчатки и Командорских островов // Вулканология и сейсмология. 1993. № 1. С. 82–92.
12. Зобин В.М., Федотов С.А., Гордеев Е.И. и др. Сильные землетрясения на Камчатке и Командорских островах в 1961–1986 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 3–23.
13. Копничев Ю.Ф., Шпилькер Г.Л. Параметры высокочастотного излучения очага землетрясения и модель сильного движения // Докл. АН СССР. 1978. Т. 239. № 2. С. 193–196.
14. Лемзиков В.К. Пространственные вариации формы огибающих коды слабых землетрясений в Авачинском заливе // Вулканология и сейсмология. 1993. № 5. С. 77–78.
15. Митякин В.П., Молотков С.Г., Серова О.А., Алексин П.А. Камчатское землетрясение 17 августа 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1986. № 5. С. 75–89.
16. Молотков С.Г. Спектральный состав и поляризация сильных движений грунта землетрясений п-ова Камчатка за 1983–1985 гг. // Вопр. инженерной сейсмологии. 1987. № 28. С. 209–222.
17. Раутиан Т.Г. Роль функции очага и отклика среды в модели формирования сейсмических колебаний // Вопр. инженерной сейсмологии. 1976. № 18. С. 3–14.
18. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
19. Федотов С.А., Гусев А.А., Зобин В.М. и др. Озерновское землетрясение и цунами 22 ноября 1969 года // Землетрясения в СССР в 1969 г. М.: Наука, 1973. С. 195–208.
20. Федотов С.А., Феофилактов В.Д., Гордеев Е.И. и др. Развитие сейсмометрических наблюдений на

- Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 11–28.
21. Штейнберг В.В., Федотов С.А. Оценка параметров колебаний почвы в Петропавловске-Камчатском при возможном сильном землетрясении // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом. Новосибирск, 1974. С. 90–100.
 22. Штейнберг В.В., Фрейд В.М., Феофилактов В.Д. Колебания грунта при сильных землетрясениях на Камчатке в 1971 г. // Сильные Камчатские землетрясения 1971 года. Владивосток: 1975. С. 7–14.
 23. Abe K. Size of great earthquakes of 1837–1974 inferred from tsunami data // J. Geoph. Res. 1979. V. 84. P. 1561–1568.
 24. 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.
 25. Akamatsu J. Attenuation property of coda parts of seismic waves from local earthquakes // Bull. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ. 1980. V. 30. P. 1–16.
 26. Aki K. Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. P. 6496–6504.
 27. Aki K. Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz // Phys. Earth Planet Interiors. 1980. V. 21. P. 50–60.
 28. Boore D.M. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra // BSSA. 1983. V. 73. P. 1865–1894.
 29. Boore D.M. Short-period P- and S-wave Radiation from Large Earthquakes: Applications for Spectral Scaling Relations // BSSA. 1986. V. 76. № 1. P. 43–64.
 30. Donovan N.C., Bornstein A.E. Uncertainties in seismic risk procedures // Proc. Amer. Soc. Civil Eng. J. Geotech. Eng. Div. 1978. V. 104. P. 869–887.
 31. Fukushima Y., Tanaka T. A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1991. V. 80. P. 757–783.
 32. Gusev A.A., Gordeev E.I., Guseva E.M. et al. The first version of the $A_{\max}(M_W, R)$ relationship for Kamchatka // PAGEOPH. 1997. V. 149. P. 299–312.
 33. Joyner W.B., Boore D.M. Measurement, characterization and prediction of strong ground motion. Proceedings of Earthquake Engineering S. Soil Dynamics, Park City, 27–30, June 1988 // Am. Soc. Civil Engineers. 1988. P. 43–102.
 34. Kamiyama M., Matsukawa T. An empirical scaling of strong-motion spectra with application to estimate of source spectra. Structural Engineering and Earthquake Engineering // Proc. of Japan Soc. Civil Engineering. 1990. V. 76. P. 331–342.
 35. Petukhin A.G., Gusev A.A., Guseva E.M. et al. Preliminary model for scaling of Fourier spectra of strong ground motion recorded on Kamchatka // PAGEOPH. 1999. V. 156. P. 445–468.
 36. Trifunac M.D. Preliminary empirical model for scaling Fourier amplitude spectra of strong acceleration in terms of Earthquake magnitude, source-to-station distance, and recording site conditions // BSSA. 1976. V. 66. № 4. P. 1343–1373.
 37. Trifunac M.D. Empirical scaling of Fourier spectrum amplitudes of recorded strong earthquake accelerations in terms of magnitude and local soil and geologic conditions // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 1989. V. 9. № 2. P. 23–44.
 38. Trifunac M.D., Lee V.W. Preliminary empirical model for scaling pseudo relative velocity spectra of strong earthquake acceleration in terms of magnitude, distance, Site Intensity and recording site conditions. Dept. of Civil Eng. Report No CE 85-04, 1985. Univ. of Southern California, Los Angeles, California. P. 86.
 39. Vanmarke E.H. Random vibration approach to seismic safety evaluation // Random vibration, Elsevier Science. 1986. P. 499–509.

Average Fourier Spectra of Strong Ground Motion Due to Large Kamchatka Earthquakes

A. A. Gusev¹, A. G. Petukhin³, E. M. Guseva², E. I. Gordeev¹, V. N. Chebrov²

¹ Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia

² Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683000, Russia

³ Georesearch Institute, Osaka, Japan

We examined 81 components of analog strong motion records for the period 1969–1993 to determine an average relation connecting the level of horizontal-acceleration Fourier Spectrum FSA (f), moment magnitude M_W , and the hypocentral distance R for Kamchatka earthquakes. The records of ground acceleration and velocity were made at 11 stations, mostly on bedrock, due to 33 earthquakes of $M_W = 4.5–7.8$ at distances of $R = 30–250$ km and depths of 0–80 km. The spectra FSA(f) for selected frequencies were calculated from digitized records corrected for instrument response, the spectra being smoothed before the analysis. An empirical determination of the relation FSA (M_W, R, f) based on limited amounts of data is impracticable as fully as desired. Instead we began by reducing the data to a single distance ($R_0 = 100$ km) on a theoretical basis, and then found trends in FSA (M_W, R_0, f) as a function of M_W . To do this we used the method of multiple regression with corrections for soil type and station geology. The function of M_W is assumed to be piecewise linear with an intersection point at $M_W = 6.5$. The multiple regression results are a first systematic description of spectral features in the damaging ground motion due to Kamchatka earthquakes.