

## IV Методические аспекты сейсмологических и геофизических исследований

УДК 550.34

### ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРА ФУРЬЕ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ ГРУНТА НА КАМЧАТКЕ ОТ МАГНИТУДЫ И РАССТОЯНИЯ

А. Г. Петухин<sup>1,3</sup>, А. А. Гусев<sup>1,2</sup>, Е. М. Гусева<sup>1</sup>, Е. И. Гордеев<sup>1,2</sup>, В. Н. Чебров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН

<sup>2</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

<sup>3</sup> Геологический исследовательский Институт, Осака, Япония

*Аннотация.* Для определения средней зависимости между уровнем спектра Фурье ускорений  $FSA(f)$ , моментной магнитудой  $M_w$  и гипоцентральной расстоянием  $R$  для землетрясений Камчатки, мы проанализировали 44 аналоговых записи сильных движений за 1969-1993 гг. Записи ускорений и скоростей получены на 11 станциях Камчатки, главным образом, на скальном грунте, от 36 землетрясений с  $M_w=4.5-7.8$ , на расстояниях  $R=30-250$  км и глубинах 0-80 км. Уровни спектров  $FSA(f)$  для набора частот рассчитаны по оцифрованным, откорректированным за характеристику прибора записям и 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 за 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.

### THE DEPENDENCE OF FOURIER SPECTRA OF STRONG GROUND MOTION ON KAMCHATKA ON MAGNITUDE AND DISTANCE.

A. G. Petukhin<sup>1,3</sup>, A. A. Gusev<sup>1,2</sup>, Ye. M. Guseva<sup>1</sup>, Ye. I. Gordeev<sup>1,2</sup>, V. N. Chebrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kamchatkan Experimental Methodical Seismological Department., Geophysical Service, RAS

<sup>2</sup> Institute of Volcanology and Seismology Russ. Ac. Sci. Petropavlovsk-Kamchatsky

<sup>3</sup> Geo-Research Institute, Osaka, Japan

*Abstract.* To determine the average relationship between Fourier spectrum of acceleration  $FSA(f)$ , moment magnitude  $M_w$  and hypocentral distance  $R$  for Kamchatka earthquakes, we analyzed 44 analog strong motion records for 1969-1993. The records of acceleration

and velocity meters were obtained at 11 rock to medium-ground Kamchatkan sites from 36 earthquakes with  $M_w=4.5-7.8$ , at distances  $R=30-250$  km and depths 0-80 km. Amplitude spectra  $FSA(f)$  were calculated from digitized, zero-line corrected records of horizontal components, corrected for the instrument and smoothed; then the values were picked for a set of fixed frequencies. With the scarce data set at hand, it was impossible to determine reliably the whole  $FSA(M_w, R|f)$  average trend surface. Hence we first performed distance equalization, with corrections calculated on a theoretical basis, thus reducing the observed data to the reference distance  $R_0=100$  km. The theoretical model of distance attenuation included point source attenuation (as  $1/R$  plus attenuation specified by  $Q(f)=250 f^{0.8}$ ) and finite source correction (using formula for a disc-shaped incoherent source, its size depending on  $M_w$ ). After reduction, we fitted the  $FSA(M_w, R_0|f)$  vs.  $M_w$  trends. To do this we employed a multiple regression procedure with ground type and station dummy variables. The  $M_w$  dependence was assumed to be piecewise linear, of two branches intersecting at  $M_w=6.5$ . The result of multiple regression presents the first systematic description of spectral properties of destructive ground motion for Kamchatka earthquakes.

## Введение

Полуостров Камчатка и акватория к востоку от нее являются зоной 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 [19, 22, 15, 16, 8, 12, 3]. Систематическая обработка записей и их анализ (в терминах максимальных ускорений) начаты авторами в работах [4, 32]. В настоящей работе мы продолжим изучение параметров сильных движений Камчатки и построим среднюю региональную зависимость амплитудных спектров Фурье ускорений  $FSA(f)$  от магнитуды и расстояния для землетрясений с глубиной 0-80 км.

Спектр Фурье отражает амплитудно-частотный состав колебаний. В инженерной практике, чаще в комбинации с огибающей/длительностью, он используется для моделирования акселерограмм [17, 13, 28]. Он также широко используется при теоретическом моделировании параметров сильных движений с помощью метода случайных колебаний [1, 28, 39]. Самостоятельный интерес имеет получаемый на основе спектра Фурье очаговый спектр в диапазоне частот 0,5-20 Гц и его сравнение с теоретическими моделями.

Было сделано несколько попыток прогнозной оценки спектров Фурье колебаний грунта в Петропавловске-Камчатском при ожидаемом сильном землетрясении. Штейнберг В.В. и Федотов С.А. [21] оценили спектры и пиковые скорости колебаний для ожидаемого землетрясения с  $M=8.25$  в Авачинском заливе, путем экстраполяции данных землетрясений с  $M=4-6$ . Гусев А.А. [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.

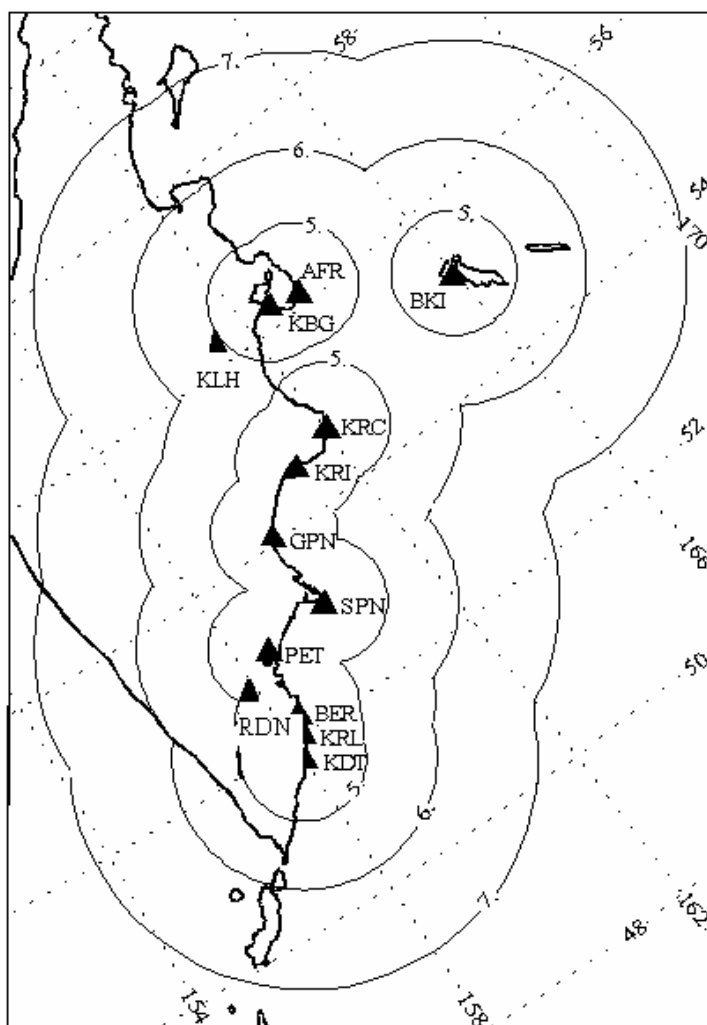
Одним из первых спектры Фурье по данным сильных движений систематически исследовал Трифунак для Зап.США [36, 37]. В [34] проведен эмпирический анализ спектров 228 записей сильных движений Японии. Особенностью этой работы является то, что одновременно методом множественной регрессии определены спектральные стационарные поправки для 10 наиболее представительных станций.

Исходными наблюдательными данными работы является набор оцифрованных и обработанных записей сильных движений Камчатки, использованный ранее в [4, 32]. В получение самих записей вложен многолетний труд организаторов и исполнителей наблюдений за сильными движениями в период 1962-1993 гг.; их вели: Институт физики Земли АН СССР (ИФЗАН) (В.В. Штейнберг); Тихоокеанская сейсмическая

**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», KLN – сейсмостанция «Ключи». Окружностями показаны зоны срабатывания хотя бы одного акселерометра сети для землетрясений с  $M_w=5, 6, 7$ .

**Fig. 1.** Strong-motion instrument network on Kamchatka. Triangles: instruments.



экспедиция ИФЗАН (С.А. Федотов); сейсмическая станция Петропавловск (ИФЗАН) (Л.Г. Синельникова); Институт вулканологии ДВО АН (В.Д. Феофилактов) и Опытно-методическая сейсмологическая партия (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 акселерографов УАР на сейсмостанции Петропавловск; затем УАР установили на с/ст Беринг в 1964 г. и на с/ст Крутоберегово в 1968 г. Параллельно начала создаваться сеть приборов С5С-ИСО-II. В 1974-1975 гг. были проведены работы по расширению и переоснащению сети за счет модернизации существующих установок УАР и размещения дополнительных новых приборов ССРЗ, С5С-ИСО-II и SMAC-Q на пяти сейсмостанциях вдоль восточного побережья Камчатки и на пяти станциях на территории г. Петропавловска-Камчатского. Большая часть записей этого периода получена велосиграфами С5С-ИСО-II. В 1981-1982 гг. дополнительно к пяти действующим станциям, на территории области установлены еще три станции: Паратунка, Жупаново и Маяк Петропавловский. Сеть станций на территории Петропавловска-Камчатского расширена до 11 станций. В это же время значительно улучшается качество обслуживания приборов. Хронологию развития сети станций сильных движений на Камчатке можно найти в работе [20].

В 1996 г. сеть действующих станций сильных движений Камчатки насчитывала 22 станции (рис. 1), из них 14 станций расположены вдоль восточного побережья Камчатки и на о. Беринг. Приборы размещены на региональных сейсмостанциях, маяках, метеостанциях и т. п. Восемь станций расположено на территории г. Петропавловска-Камчатского.

*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 22.11.69 г.,  $M_{LH}=7.7$ ; Петропавловское - 24.11.71 г.  $M_W=7.7$ ,  $M_S=7.2$  ( $H=100$ км); Усть-Камчатское - 15.12.71 г.,  $M_{LH}=7.8$ . Несмотря на техническое несовершенство приборов и трудности в обслуживании, были получены одиночные записи каждого из этих трех сильнейших землетрясений [19, 22]. Петропавловское землетрясение 24.11.71 года имело интенсивность 7 баллов в Петропавловске, однако, в пункте установки прибора сотрясения оцениваются в 5-6 баллов. Усть-Камчатское землетрясение 15.12.71 года имело интенсивность 7 баллов в Усть-Камчатке, включая пункт установки прибора.

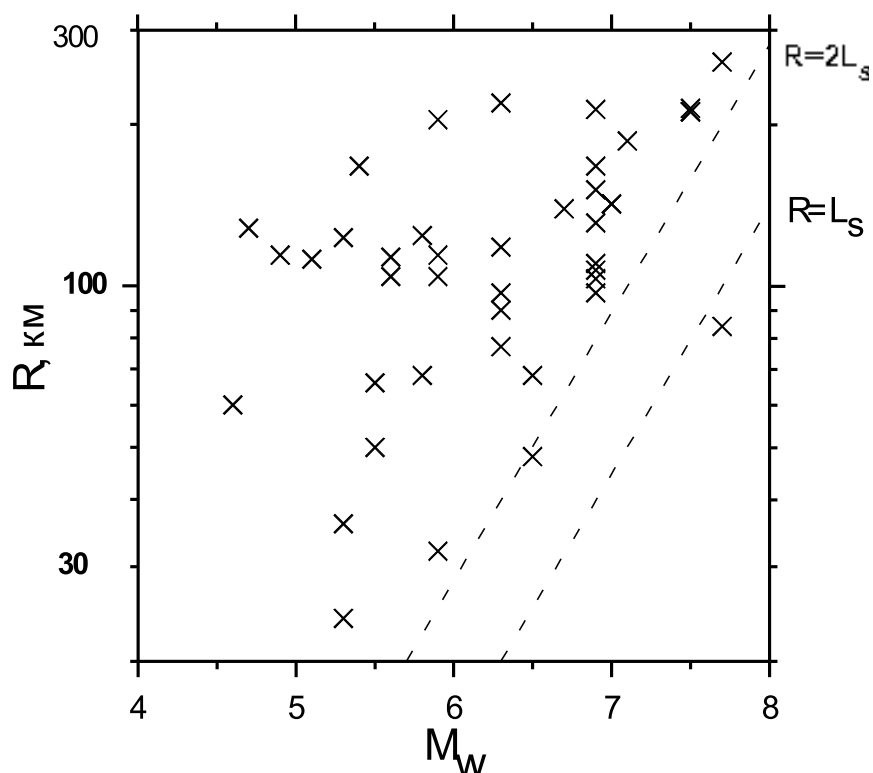
В период 1972-91 гг. сильнейшими на Камчатке были три землетрясения с магнитудой около 7: 17.08.1983 г., записанное двумя станциями Крутоберегово и Кроники; 28.12.1984 г., записанное станциями Африка и Кроники и 29.02.88 г., записанное на станции Беринг.

В 1992-93 г. в районе Авачинского залива вблизи г. Петропавловска-Камчатского произошло четыре сильных землетрясения с магнитудами  $M_{LH}=6.2-7.4$ : 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.

*Записи и процедура их обработки.* Были обработаны записи землетрясений 1969-1993 гг. Для обработки отбирались качественные записи, полученные на станциях, расположенных на свободном грунте или под небольшими, не более 2-х этажей, зданиями. Последнее сделано для того, чтобы исключить ошибки, связанные с влиянием сооружения на грунт. Список использованных станций приведен в [4, 35]. Часть данных после тщательного анализа сочтена ненадежной и отброшена. Причины вероятных ошибок следующие: 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 09.02.81 от землетрясений с эпицентрами в районе Алеутской гряды, а также запись землетрясения 17.04.82. на с/ст Кроники. Использованы 44 записи, полученные при 33 мелкофокусных (с глубиной  $H < 70$  км) землетрясениях. Данные о землетрясениях (координаты эпицентра  $\phi$  и  $\lambda$ , глубина очага  $H$ , магнитуда  $M_{LH}(M_S)$  и/или энергетический класс  $K^{\Phi 68}$ ) приведены в табл. 2 из статей [4, 35]. Для каждой пары станция-землетрясение определяли гипоцентрально расстояние  $R$ . При возможности, для региональных сейсмостанций его рассчитывали по  $t_s - t_p$  с помощью среднего камчатского годографа Кузина. Для остальных станций гипоцентрально расстояние рассчитывалось по координатам гипоцентра и станции. Эпицентры землетрясений (по региональному каталогу) показаны на рис. 1. Распределение эпицентров в большой мере отражает не реальную картину сейсмичности, а фактическую работу аппаратуры ждущего режима, качество эксплуатации которой в удаленных пунктах часто далеко от идеального. 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 программное обеспечение [8]. Процедура обработки включает в себя следующие основные шаги.

1. Цифровка записей. Шаг цифровки выбирался в зависимости от характера колебаний, 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 секунду. Для цифровки последних записей 1992-1993 гг. создан специальный пакет программ DIG для оцифровки фото-записей с помощью оптического сканера. Работа по созданию программы выполнена Д.В. Дрозным. Программа работает в полуавтоматическом режиме. Ее работа контролируется оператором на экране компьютера. В программе заложено несколько алгоритмов выделения середины линии. В процессе работы оператор имеет возможность



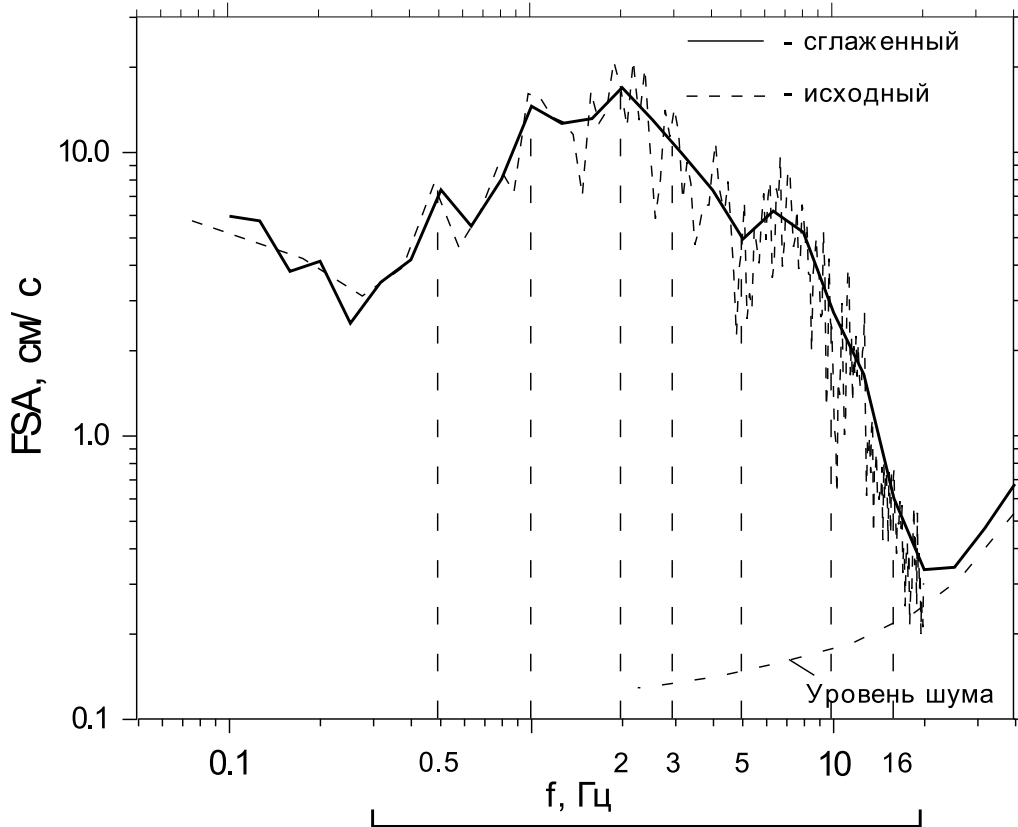
**Рис. 2.** Распределение обработанных записей сильных движений по магнитудам и расстояниям. Пунктиром показаны варианты границы ближней зоны очага,  $L_s$  - размер очага по формуле (6).

**Fig. 2.** Distribution of processed records over magnitude and distance. Dashed lines denote the approximate boundary of the epicentral zone.

выбирать нужный алгоритм в зависимости от качества записи. В трудных случаях имеется возможность перехода на ручной, попиксельный режим цифровки. Использование сканера позволяет проводить цифровку непосредственно с фотопленок. Это значительно уменьшает низкочастотные помехи, связанные с усадкой фотобумаги. В ряде случаев, для надежности цифровки малых амплитуд, цифровка проводилась с избыточной детальностью. В подобных случаях выполнялось прореживание записи в два или четыре раза. Соседние отсчеты при этом осредняются.

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 цифровке с помощью сканера цифровалась также нулевая линия акселерограмм, которая затем вычиталась из цифровок каналов. Это позволило снизить до минимума низкочастотные искажения, связанные с короблением пленки и дрейфом нуля в процессе протяжки пленки в акселерографе.

3. Выделение  $S$ -волн. Все приборы для записей сильных движений грунта работают в ждущем режиме, поэтому без потерь записываются лишь  $S$ -волны. Для обработки на ЭВМ выбирались участки записей землетрясений, содержащие максимальные фазы колебаний  $S$ -волн. Для этого после коррекции нулевой линии проводится выделение и «вырезание» сегмента записи от  $S$ -вступления до момента спада амплитуды колебаний более чем вдвое от  $A_{max}$ . Чтобы в начале и конце выбранного сегмента записи не возникало искусственных ступенек, начальный и конечный участки этого сегмента умножаются на «заглаживающие» функции типа половинок косинусного окна. Практически не влияя на общий уровень спектра, такая процедура позволяет надежнее определять спектр на высоких частотах.



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

**Fig. 3.** Example of Fourier spectrum calculation. The March 02, 1992 event recorded at station GPN, component EW, accelerometer SSRZ-M. The bar in the bottom shows the frequency band with reliable *FSA* estimates.

4. Фильтрация. С помощью фильтрации в частотной области выделяли полосу частот, в которой отношение сигнал/шум больше единицы. В высокочастотной области шумы появляются в процессе цифровки. В процессе обработки, при коррекции приборных искажений и при дифференцировании записей велосиграфов, высокочастотная составляющая шума усиливается пропорционально частоте. В низкочастотной области шумы появляются за счет дрейфа нулевой линии и коробления фотоосновы в процессе проявки. Усиление низкочастотных шумов происходит на стадии интегрирования при расчете скоростей и смещений по акселерограммам. Параметры фильтров подбирались опытным путем. Типичные значения частот среза соответствующих фильтров:  $f_H=0,1$  Гц,  $f_B=25$  Гц.

5. Восстановление “истинного” спектра Фурье. “Истинный” спектр Фурье восстанавливался путем деления спектра Фурье записи на комплексную передаточную функцию прибора по ускорению. При расчете передаточной функции прибора для каждой записи использованы фактические значения параметров этого прибора. Параметры приборов определялись путем калибровки, либо брались паспортные величины.

6. Сглаживание. Для получения среднего уровня спектра Фурье проводилось сглаживание амплитудного спектра с постоянным шагом по логарифму частоты. При сглаживании бралось среднее квадратичное 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 статьи [35]. Часть ком-

понтент 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 скорректированную горизонтальную компоненту записи сильных движений Камчатки за 1969-1993 гг.

### Теоретические основы методика 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 землетрясениям более надежно. Поэтому будем считать, что данные по спектрам Фурье описываются моделью:

$$\lg FSA_i = \lg FSA^T(M_{wi}, R_i) + C^T(M_{wi}) + \varepsilon_i \quad (1)$$

где  $FSA^T$  рассчитывается по некоторой теоретической модели,  $C^T(M_w)$  – поправка, учитывающая отличие реальных спектров от модели.

Теоретический спектр рассчитывали по методике и расчетной схеме, приведенной в [7] и также [4, 32]. Сущность этой методики в следующем. Сейсмические колебания в приемнике (сигнал) определяются тремя основными факторами: очагом землетрясения, трассой распространения сейсмических волн от очага к приемнику, и локальными геологическими и грунтовыми условиями под приемником. При малых амплитудах колебаний обычно считается, что система очаг-среда-станция линейна. Это означает, что спектр Фурье сигнала в приемнике можно представить как произведение спектра очага на передаточные функции остальных звеньев: среды распространения и условий под станцией. В нашем случае, при определении средних спектров Фурье, все компоненты имеют смысл средних по множеству пар “очаг-станция”. Это значительно упрощает задачу, так как позволяет все разнообразие очагов, трасс и локальных грунтово-геологических условий описать простыми моделями с небольшим числом параметров. Так, основным параметром, описывающим очаг землетрясения, является его моментная магнитуда  $M_w$ ; среда характеризуется расстоянием от очага до приемника  $R$ ; грунтовые условия – категорией/типом грунта: скальный, средний или мягкий. На этих упрощающих предположениях основана следующая формула для расчета спектра Фурье ускорения:

$$FSA(f | R, M_w) = C \cdot \dot{M}_0(f | M_w) \cdot K_Q(f) \cdot K_R \cdot K_g(f) \cdot K_H(f) \quad (2)$$

в которой  $\dot{M}_0(f)$  – очаговый спектр (для описания которого использована модель Бруна в варианте Джойнера и Бура [29]),  $K_Q(f)$  и  $K_R$  – поправочные коэффициенты, учитывающие поглощение и геометрическое расхождение в среде,  $K_g(f)$  – коэффициент, учитывающий грунтовые условия,  $(2\pi f)^2$  – коэффициент перехода от спектра Фурье смещений к спектру Фурье ускорений,  $C = 1/(4\pi\rho_s^3)$ ,  $K_H(f)$  – коэффициент, учитывающий высокочастотный спад спектра (используя параметр  $f_{max}$  по Ханксу).

Основные параметры модели Бруна – это сейсмический момент  $M_0$  и среднее сброшенное напряжение  $\Delta\sigma$ . Параметр  $M_0$  пересчитывается из  $M_w$ . Для сброшенного напряжения примем среднюю для коровых землетрясений оценку  $\Delta\sigma=40$  бар. Конкретная величина параметра  $f_{max}$ , принимаемая в расчете в нашем случае имеет

второстепенное значение; мы используем оценку, сделанную ранее при расчете максимальных ускорений Камчатки [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 принимается сферическое расхождение амплитуд для  $S$ -волн ( $n=1$ ).

Схема очаг-среда-грунтовые условия хорошо работает в дальней зоне от очага протяженностью  $L_s$ , когда  $R > L_s$ . В ближней зоне, при  $R < L_s$ , сейсмическое излучение приходит на станцию по разным трассам и под различными углами. В этом случае требуются более сложные подходы, основанные на интегрировании вкладов от разных участков площадки очага. 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. Для описания этого эффекта было предложено несколько формул. Специальное исследование для выбора наилучшей формулы для подгонки калифорнийской базы данных [38] показало явные преимущества формулы, полученной А.А. Гусевым для некогерентного излучения на оси очага в виде диска [1]:

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

где  $R_e$  - “эффективный” радиус очага (см. ниже),  $R_c$  - радиус когерентности источника. При практическом использовании формулы (4) при  $M_w > 6$  можно считать, что  $R_c \ll R_e$ , и полагать  $R_c = 0$ . Следуя [1], значение эффективного (по интенсивности излучения) радиуса очага  $R_e$  оценивали по длине  $L_s$  и ширине  $W_s$  очага:

$$R_e = (L_s W_s)^{0.5} / \pi \approx 0,4 L_s \quad (5)$$

Для расчета размера (длины) очага  $L_s$  использованы 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:

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

В работе [6], в предположении строгого подобия, для протяженных очагов зон субдукции, на основе эмпирических оценок зависимости площади очага от  $M_w$ , получена оценка  $C_L = 1.85$ . Эта оценка не противоречит наблюдениям на Камчатке и принята для расчетов. Результат используется в (5). Поправка  $K_R$  существенна только для двух важных записей, которые попадают в ближнюю зону очага (см. рис. 2).

Потери при распространении волн в среде состоят из собственно поглощения и потерь за счет рассеяния. Эффекты поглощения и рассеяния в общем затухании неразделимы и описываются единым параметром “добротность среды”  $Q = (\gamma_a + \gamma_s)^{-1}$ . Последняя имеет частотно-зависимый характер на высоких частотах [26, 27]. Вклад поглощения в общее затухание 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:

$$Q(f) = f \leq f_0 \begin{cases} Q_0; & f \leq f_0 \\ Q_0 \cdot f^{\gamma_0}; & f > f_0 \end{cases} \quad (8)$$



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

В работах [5, 24] делались оценки параметров  $Q_0$  и  $\gamma_Q$  по материалам записей ЧИСС. Оценка делалась методом кода-волн по данным трех сейсмостанций: Тополово, Петропавловск и Шипунский. Получены оценки  $Q_0=200$ ,  $\gamma_Q=0.8$  при временах запаздывания коды 50-80 сек. В работе [14] определены зависимости  $Q(f)$  по оцифрованным данным региональных сейсмостанций Петропавловск и Шипунский, для района Авачинского залива, тем же методом, на временах запаздывания 60-80 сек., получены, в целом, согласующиеся 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  $Q_0=250$ ,  $\gamma_Q=0.8$ .

При моделировании сильных движений стационарные условия выделяют в отдельный фактор, так как характеристики верхних слоев среды (плотность, скорость, рельеф поверхности) непосредственно под пунктом наблюдения отличаются от внутренних слоев, и значительно влияют на формирование сильного движения. При приближении к поверхности, с уменьшением плотности среды и скорости упругих волн в ней, происходит усиление амплитуд колебаний вследствие уменьшения сейсмической жесткости  $\sqrt{\rho \cdot c}$ . Выделяют несколько типов стационарных условий.

1). Скальное основание. В этом случае можно считать, что станция находится непосредственно на выходе из среды-полупространства и принять, что  $K_g(f)=1$  в формуле (2).

2). Слой мягких осадков, лежащий на жестком полупространстве. Такой слой приводит к резонансным эффектам и усилению колебаний на отдельных частотах.

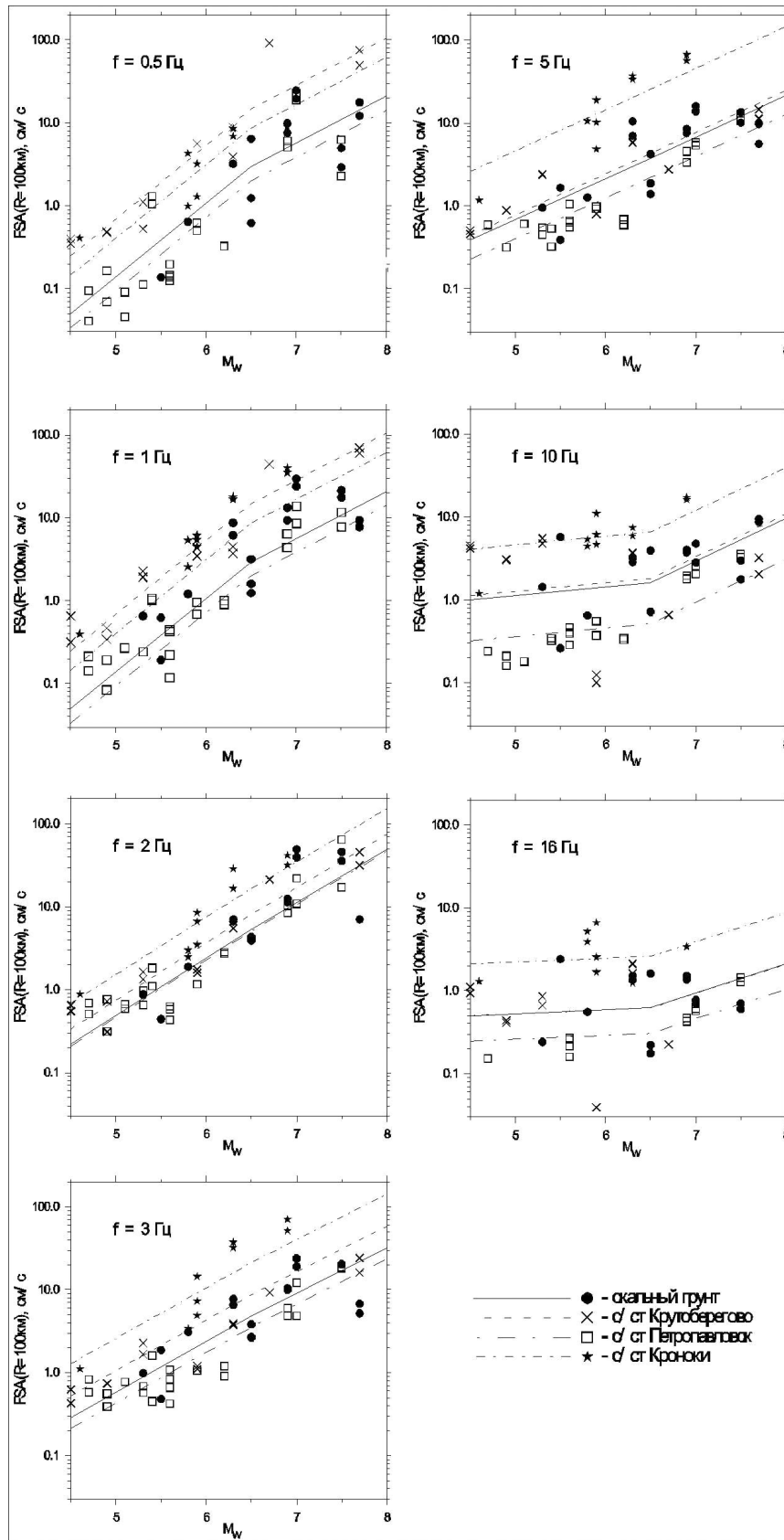
3). Осадочный бассейн. В бассейне, заполненном осадками (межгорная долина), наблюдается целый ряд сложных явлений, заметно искажающих записи сильных движений. Это: резонанс осадочного слоя, эффекты фокусировки на неплоской нижней границе бассейна, возникновение локальных поверхностных волн, их переотражение и фокусировка от замкнутых границ бассейна, эффект "ловушки" - возникновение продолжительных колебаний волн, переотражаемых от замкнутых границ бассейна.

Обычно же, влияние местных стационарных условий выражается в частотно-зависимом усилении амплитуд спектра колебаний, выражаемом множителем  $K_g(f)$  в формуле (2). При расчетах по формуле (2) будем считать что  $K_g(f)=1$ , случай скального основания. Для отдельных, наиболее представительных станций,  $K_g(f)$  будет определена эмпирически методом множественной регрессии.

Сводка значений параметров принятых в расчете приведена в таблице:

Параметры	Значение
$C_L$	1,85
$c_s$	3,5 ?/с
$\rho$	2,7 г/см <sup>3</sup>
$n$	1
$Q_0$	250
$\gamma_Q$	0,8
$\Delta\sigma$	40 бар
$f_{max}$	10 ? ?

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



**Рис. 4.** Результат приведения значений спектров Фурье ускорения  $FSA(f=0.5\text{Гц})$  к единому расстоянию. Ломаными линиями показан результат подгонки магнитудной зависимости  $FSA(M_W, R=100\text{км})$  по формуле (10).

**Fig. 4.**  $FSA(f_k)$  values reduced to the constant  $R_0=100$  km. Segmented lines are estimated trends of the model (10). Symbols denote the four data groups.

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

Затем определяли эмпирическую зависимость от магнитуды, для чего использовали 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, разбили имеющиеся данные на четыре группы: (1) станции на скальном грунте; (2) данные с/ст. Крутоберегово; (3) данные с/ст. Петропавловск и (4) данные с/ст. Кроноки.

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 несколько записей. Чтобы избежать смещения, связанного с большим весом отдельных землетрясений, записанных на нескольких станциях, данные от каждого из этих землетрясений предварительно усредняли.

По приведенным данным для каждой частоты  $f_K = 0.5; 1, 2, 3, 5, 10$  и  $16$  Гц, определяли зависимости 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) для трех других групп данных по отношению к скальному грунту. (Эти поправки также частотно-зависимы.)

Для учета возможной нелинейности зависимости уровня спектра от магнитуды, приняли 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, приняли  $M_w = 6.5$ , что примерно соответствует середине диапазона магнитуд и согласуется с результатами подгонки по аналогичным зависимостям, полученными другими исследователями [33, 34]. Окончательная модель для подгонки выглядит следующим образом:

$$\lg FSA(M_w | f_K, R_{100}) = c_0(f_K) + \sum_{i=1}^3 c_i(f_K) \cdot \delta_i + \varepsilon(f) + \begin{cases} \beta_1(f_K)(M_w - 6,5); & M_w < 6,5 \\ \beta_2(f_K)(M_w - 6,5); & M_w > 6,5 \end{cases} \quad (10)$$

где:  $M_w$  - моментная магнитуда,  $f_K$  -  $K$ -я частота,  $\varepsilon$  - случайная ошибка данных  $j$ -го уравнения с дисперсией  $\sigma_{\varepsilon_K}$ ,  $c_0$  - константа. Символ  $\delta_i$  обозначает "индикаторную" переменную:  $\delta_1=1$ , если данное принадлежит с/ст Крутоберегово, иначе  $\delta_1=0$ ;  $\delta_2=1$ , если данное принадлежит с/ст Петропавловск, иначе  $\delta_2=0$ ;  $\delta_3=1$ , если данное принадлежит с/ст Кроноки, иначе  $\delta_3=0$ . Для скального грунта все  $\delta_i=0$ . Коэффициенты  $b_1, b_2, c_0, c_i$  - 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  $b_1, b_2, c_0$ ). Математические основания метода множественной регрессии приведены в [9].

Надо заметить, что для анализа данных спектров Фурье, приведенных к  $R=100$  км  $FSA(M_w | f=f_K, R=100)$  была сначала использована простая линейная зависимость от  $M_w$ . Разбиения данных на группы не производилось. Использование такой модели дало очень большой разброс данных относительно модели, получены следующие значения  $\sigma(f)$ : 0.50 ( $f=0.5$  Гц), 0.45 ( $f=1$ ), 0.38 ( $f=2$ ), 0.43 ( $f=3$ ), 0.50 ( $f=5$ ), 0.55 ( $f=10$ ) и 0.58 лог.ед. ( $f=16$ ). Для улучшения качества подгонки и уменьшения разброса и была предложена нелинейная зависимость от магнитуды, а ее абсолютный уровень настраивался отдельно для каждой группы данных.

*Результаты регрессионного анализа и построение осредненных зависимостей.* Результат приведения данных к единому гипоцентральному расстоянию  $R_0=100$  км показан

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

$f_k$ , Гц	$\beta_1$	$\beta_2$	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$\sigma_{\text{ЭК}}$
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	0,40±0,08	0,53±0,11	0,28±0,12	-0,41±0,11	-0,34±0,10	0,70±0,11	0,27
16	0,15±0,01	0,39±0,16	-0,19±0,21	-0,45±0,14	-0,27±0,13	0,66±0,13	0,30

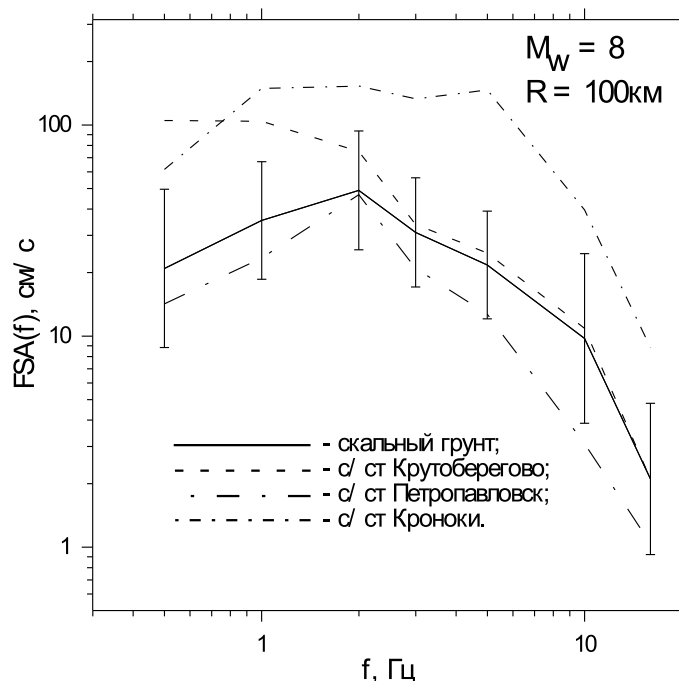
точками по подгруппам данных на рис. 4 (для семи частот  $f_k$ ), в зависимости от  $M_w$ . На рисунке ломаными линиями показан также результат подгонки модели (10) методом наименьших квадратов. Значения коэффициентов модели (10) приведены в табл. 1. По полученной модели рассчитаны спектры Фурье при  $M_w=8$  и  $R=100$  км для станций на скальном грунте, с/ст Крутоберегово, Петропавловск и Кроноки. Результат приведен на рис. 5. На рис. 6 для примера приведен результат расчета спектров Фурье для скального грунта,  $R=100$  км и четырех значений магнитуды  $M_w=5, 6, 7$  и  $8$ . Те же величины для набора расстояний 25, 50, 100 и 200 км приведены в табл. 2. Поясним, как строилась эта таблица. За основу взяли спектральную модель для комбинации  $M_w=8, R_0=100$  км. Для перехода к другим значениям  $M_w$  и  $R$  сначала использовали эмпирическую зависимость  $FSA(M_w|f_k, R=100)$  (10) для перехода к новой магнитуде, а затем использовали теоретическую модель (2) для перехода к новому значению расстояния.

Для сравнения наших результатов с данными других регионов на рис. 7 нанесен спектр Фурье для Японии из [34], спектр из работы [3], рекомендованный для Камчатки ранее, и спектр модели Бруна.

Анализ таблицы и рисунков показывает:

1. Использование множественной регрессии с разбиением данных на четыре группы заметно уменьшило разброс значений  $FSA$ . Значения  $\sigma_{\text{ЭК}}$  из табл.1 в основном близки к 0.30, что соответствует типичному значению для других регионов.

2. Коэффициент  $\beta(f)$  падает с частотой, причем как в диапазоне 0.5-2 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  $\beta$  в диапазоне 2-5 Гц несколько выше чем ожидаемое по Бруну (0.5). Такое поведение коэффициента  $\beta(f)$  может указывать на существование магни-



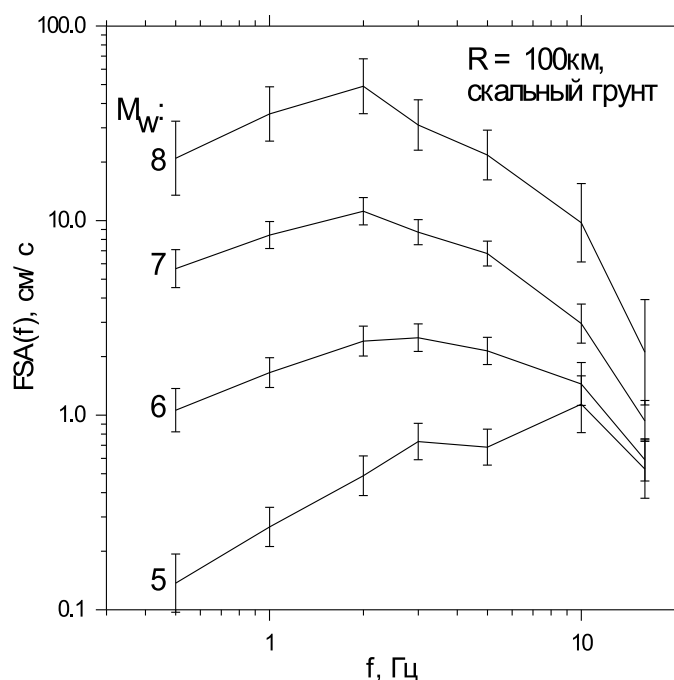
туды, в соответствии с моделью Гусева [2] и в противоречии с моделью Бруна. Значение коэффициента  $\beta$  в диапазоне 2-5 Гц несколько выше чем ожидаемое по Бруну (0.5). Такое поведение коэффициента  $\beta(f)$  может указывать на существование магни-

Рис. 5. Спектры Фурье ускорения по модели (10) с коэффициентами табл. 4 для  $M_w=8$  и  $R=100$  км, для четырех подгрупп данных. Усы - среднеквадратичный разброс данных для заданной частоты (показано только для станций на скальном грунте).

Fig. 5. Estimated average Fourier spectra at  $M_w=8$  and  $R=100$  km for four data groups. Error bars denote standard deviations of data.

**Рис. 6.** Спектры Фурье ускорения, рассчитаны по модели (10) с коэффициентами табл. 4 для четырех значений магнитуды,  $R=100$  км, скальный грунт. Усы - среднеквадратичная ошибка оценки по модели (10) для данного набора параметров.

**Fig. 6.** Estimated average Fourier spectra at  $R=100$  km, on rock, for  $M_w=5, 6, 7$  and 8. Error bars - RMS-errors of the fitted regression model.



тудно-зависимого  $f_{max}$  в соответствии с моделью Гусева.

3. В области 0.5-2 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.

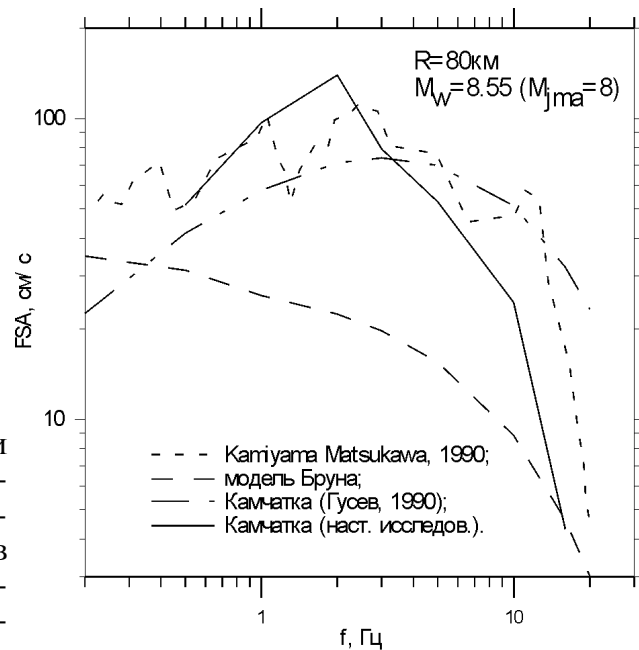
4. Неожиданно большой, не соответствующий макросейсмическим данным и тем более  $A_{max}$ , оказалась спектральная поправка на низких частотах для с/ст. Крутоберегово относительно скального. Расчетная средняя амплитуда спектра для среднего грунта выше, чем для скального - в 5 раз при  $f=0.5-1$  Гц в то время как при  $f \geq 3$  Гц уровни спектров для среднего и скального грунтов близки. Этот результат никак не связан с техникой множественной регрессии, он хорошо виден и на исходных для этой регрессии данных. Тот факт, что поправка близка к нулю в области частот  $\geq 3$  Гц, согласуется с тем что  $A_{max}$  для с/ст. Крутоберегово, расположенной на среднем грунте, и для скального грунтов приблизительно равны. Положение может проясниться, когда удастся привлечь данные других станций. Не исключено, что оценка стационарной поправки на с/ст. Крутоберегово искажена заметными спектральными различиями между толчками на

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	6,97	3,88
	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	171,27	110,77	80,45	38,11	8,61
50	5	0,30	0,64	1,20	1,83	1,75	3,02	1,45
	6	2,32	3,95	5,88	6,25	5,47	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	1,14	0,53
	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	0,06	0,09	0,16	0,23	0,21	0,32	0,14
	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

**Рис. 7.** Спектры Фурье ускорения при  $R=80$  км и  $M_W=8.55$  ( $M_{jma}=8$ ) для Камчатки (по табл. 4) и для Японии из работы [33]. для сравнения приведены также расчетные спектры с опорой на спектр Бруна и спектр для Камчатки из [3].

**Fig. 7.** Average Fourier spectrum at  $R=80$  km and  $M_W=7.15$  ( $M_{jma}=7$ ), rock ground, for Kamchatka (this work) compared to similar spectra calculation from regression formulas for Japan (Kamiyama, Matsukawa).



севере региона, вблизи этой станции, и на юге региона. Другая возможная причина - низкочастотные поверхностные волны, предположительно возбуждаемые в осадочном бассейне в низовьях р. Камчатки. Результаты для сейсмостанций Кроноки и Петропавловск примерно соответствует ожидаемому, исходя из данных по слабым землетрясениям [18, 11] и по  $A_{max}$  [4, 32].

5. В целом, результаты регрессии неплохо описывают наблюдения, а отмеченные аномалии отражают реальные особенности данных. На данном этапе описание данных выполнено, но прогнозные оценки на их основе делать преждевременно. Для получения более надежных выводов целесообразно привлечь данные о спектральных стационарных поправках по данным о слабых толчках.

### Выводы

1. Получен первый вариант региональной (для Камчатки) зависимости уровня спектра Фурье горизонтальных ускорений при мелкофокусных землетрясениях 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 стационарные поправки для сейсмостанций Крутоберегово, Петропавловск и Кроноки. Аномалиям максимальных ускорений, выявленным ранее для сейсмостанций Петропавловск и Кроноки, соответствуют аномалии и в спектрах Фурье.

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

5. Результаты анализа дают компактное описание материала наблюдений, но пока не могут быть рекомендованы для прогноза будущих колебаний грунта. Имеющийся объем данных не позволяет уверенно разделить эффект грунта, индивидуальных станций и субрегиона. Необходимо привлечение новых данных для выявления причин аномально высоких уровней спектра вблизи 1 Гц для ст. Крутоберегово.

### 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., Гордеев Е.И., Чебров В.Н. 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 магнитудами - 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., А.А.Гусев, Л.С.Оскорбин. 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  $M_LH = 7,1$ ) 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. Станционные 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., Гусева Е.М., Митякин В.П. 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*, 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. инж. сейсмол.* 1987. №28. с. 209-222.
17. Раутиан Т.Г. Роль функции очага и отклика среды в модели формирования сейсмических колебаний // *Вопр. инж.сейсмол.* 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., Кондратенко А.М., Чепкунас К.Е. 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., Гаврилов В.А., Чебров В.Н. 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., Фремд 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 V84. N B4. pp. 1561-1568.
24. Abybakirov 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. 64, pp. 52-67.
25. Akamatsu J. Attenuation property of coda parts of seismic waves from local earthquakes // *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 1980 30: pp. 1-16.
26. Aki K. Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere // *J.Geophys. Res.*, 1980. 85, pp. 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. 21, pp. 50-60.
28. Boore D.M. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra // *BSSA*, 1983. 73, pp. 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, Ho.1, pp. 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, pp. 869-887.
31. Fukushima, Y., and Tanaka T.A. New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan // *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 1991. 80, pp. 757-783.
32. Gusev A.A., Gordeev E.I., Guseva E.M., Petukhin A.G. and Chebrov V.N. The first version of the  $A_{max}(M_w, R)$  relationship for Kamchatka // *PAGEOPH*, 1997. 149, pp. 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. pp. 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 pp. 331-342.
35. Petukhin A.G., Gusev A.A., Guseva E.M., Gordeev E.I., Chebrov V.N. Preliminary model for scaling of Fourier spectra of strong ground motion recorded on Kamchatka // *PAGEOPH*, 1999. 156 pp. 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, No. 4, pp. 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, pp. 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 cite conditions. Dept. of Civil End // *Report No CE 85-04*, 1985. Univ. of Southern California, Los Angeles, California.
39. Vanmarke E.H., *Random vibration approach to seismic safety evaluation* // *Random vibration*, Elsevier Science. 1986. pp. 499-509.