

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ЧАСТОТ ОЧАГОВЫХ СПЕКТРОВ МЕСТНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ЗАПИСЯМ СТ. ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ

Гусев А.А.^{1,2}, Гусева Е.М.²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, gusev@emsd.ru

²Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г.Петропавловск-Камчатский,

Введение.

Аки [6] и Брун [8] предложили модель очагового спектра землетрясения ω^{-2} («омега-квадрат»), которая стала фактическим стандартом современной сейсмологии. В этой модели очаговый спектр смещения – плоский, с единственной характерной граничной частотой - корнер-частотой f_c . Однако в той же работе [8] Брун также ввел модель очагового спектра с двумя корнер-частотами (ε -модель), и с ветвью типа ω^{-1} в промежутке между ними. Далее ее корнер-частоты обозначаются f_{c1} и f_{c2} . Гусев [3] показал реальность f_{c2} на материале наблюдений; там же был выявлен удивительный характер скейлинга для f_{c2} . Если $f_{c1} \sim M_0^{-1/3}$ (M_0 – сейсмический момент) в согласии с идеей подобия спектров, то для f_{c2} вообще не было обнаружено явной зависимости от магнитуды M или M_0 . Позднее был выявлен медленный рост f_{c2} с M_0 . Таким образом, обнаружилось, что грубо нарушается подобие очаговых спектров (а, значит, и самих очагов). Однако модель спектра с двумя корнер-частотами не стала общепринятой.

Хэнкс [10] отметил наличие верхнего среза наблюдаемого спектра ускорений при некоторой частоте f , обозначенной им f -max. Гусев [9] и Пападжорджиу и Аки [11] предположили, что f -max – это очаговый эффект, то есть третья характерная или корнер-частота. Но Андерсон и Хок [7] показали, что наблюдаемая f -max формируется иначе – как эффект фильтрации слоем высокого затухания непосредственно под приемником. Повидимому, в формирование f -max делают вклад оба фактора. Вопрос мало изучен. Далее обозначим предполагаемую верхнюю частоту среза *очагового* спектра - f_{c3} . «Станционную» f -max, отражающую эффект поглощения под станцией, обозначим $f_{\text{max-погл}}$. Соотношение обсуждаемых характерных частот иллюстрируется на рис.1.

В работе решается задача: для землетрясений Камчатки с $M=4-6.5$: (1) выявить наличие f_{c2} и проверить реальность аномального скейлинга $f_{c2}(M)$; (2) выявить наличие f_{c3} и при удаче проверить наличие скейлинга $f_{c3}(M)$. Для этого определяли очаговые спектры по волнам P и S . При этом следовало предварительно исправить наблюдаемые спектры за затухание.

Предварительный этап – установление модели затухания P и S волн.

Чтобы создать возможность оценки формы очаговых спектров на основе спектров записей, нужно скомпенсировать частотно-зависимое затухание на трассе распространения волн и под станцией. Возникает задача: оценить параметры затухания для условий станции РЕТ, данные которой обрабатывали. Принята следующая модель затухания для амплитудного спектра Фурье объемных волн:

$$-\ln(\Phi(f)/\Phi_0(f)) = \pi f \kappa = \pi f \kappa_0 + \pi f r_{\text{eff}} / c Q(f) = \pi f \kappa_0 + \pi f (r_{\text{eff}}/100) \kappa_{100}(f)$$

где $\Phi(f)$ – наблюдаемый спектр; $\Phi_0(f)$ – такой же спектр для гипотетического случая отсутствия потерь; r_{eff} - гипоцентральное расстояние (эффективное); κ_0 – постоянный эффект слоя под станцией ($\kappa_0 = \ln 2/\pi f_{\text{max-погл}}$); $\kappa_{100}(f) = \kappa_{100}$ – потери на трассе при $r=100$ км; $Q(f)$ – добротность на трассе; c - скорость волн. Второй член в сумме обычно записывают как линейную функцию от гипоцентрального расстояния r . В нашем случае явно учитывали фактическую нелинейную зависимость потерь $\kappa(r)$ от расстояния, поэтому аргумент записан как r_{eff} . Модель применялась для P и S волн. Получили следующие оценки основных параметров поглощения: $\kappa_{0S}=0.016$ с, $\kappa_{0P}=-0.025$ с; $Q_S(f)=165f^{0.42}$ (см. рис. 2); $Q_P(f)=83f^{0.42}$. Модель $Q_S(f)$ построена: в полосе 1-6 Гц в основном по [1], в полосе 5-25 Гц – на основе [4]. $Q_P(f)$ оценили на основе выявленной эмпирической связи $\kappa_{100P}=1.15 \kappa_{100S}$. Кривая зависимости $\kappa(r)$ принята согласно рис. 7 из [4]. Отрицательное значение κ_{0P} - аномалия, связанная, вероятно, с необычной структурой верхних слоев скоростного разреза под ст. РЕТ; для целей внесения эмпирических поправок эта аномалия несущественна.



Рис. 1. Схема соотношения верхних граничных частот f_{max} : очаговой (или f_{c3}) и станционной $f_{\text{max-полг}}$ в сопоставлении с наблюдаемой f_{max} .

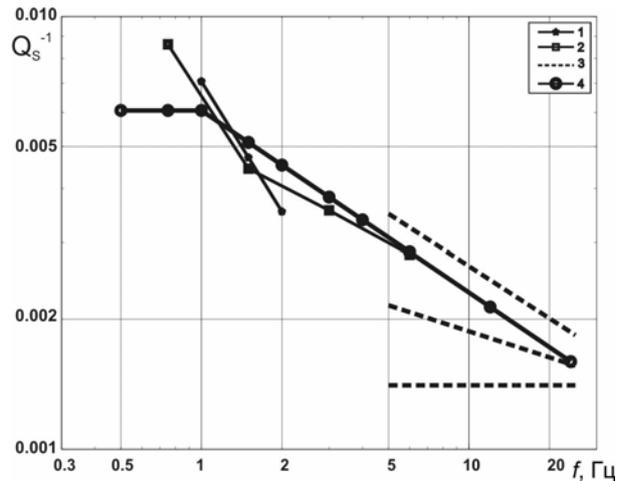


Рис. 2. Зависимости $Q_s(f)$ – опубликованные и принятая. 1 - по [5]; 2 - по [1]; 3 - неразличимые варианты $Q_s(f)$, выведенные на основе оценок из [4]; 4 – принятая модель.

Исходные данные и пример обработки.

Использованы записи акселерографа FBA цифровой станции PET (каналы LG), за 1993-2005 гг. с частотой опроса 80 Гц; для P -волн - канал HNZ; для S волн – среднее квадратическое значение по каналам HNE и HNN. Всего отобрано 439 записей. Гипоцентральные расстояния: 80-220 км; глубины 0-200 км; магнитуда $M_L=4-6.5$ ($K^{\Phi 68}=9.5-14$). На рис. 3 приведен пример обработки исходные (нормированные к пику) компоненты ускорения и три пары (для P -и S - волн) сглаженных спектров Фурье исправленных за геометрическое расхождение, для смещений ($D(f)$), скоростей ($V(f)$), и ускорений ($A(f)$), - исходные и приведенные к очагу путем коррекции за поглощение; а также соответствующие спектры шума (микросейсм). Каждая фигура из двух или трех сцепленных прямолинейных сегментов – это идеализированная аппроксимация формы спектра, которая строится путем визуального анализа в диалоговом окне, и позволяет оценить его корнер-частоты f_{c1} , f_{c2} и f_{c3} .

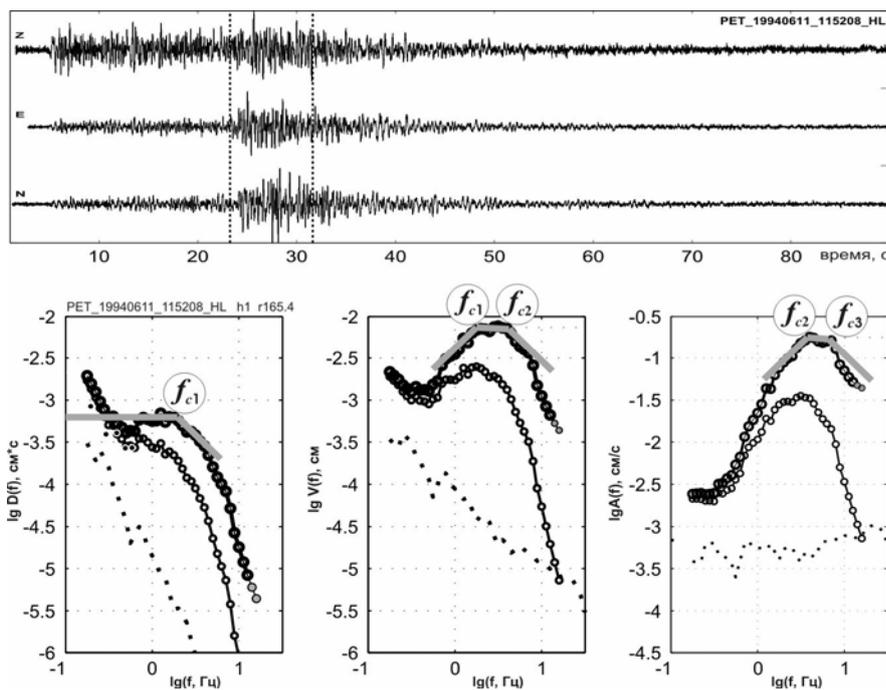


Рис. 3 Иллюстрация процедуры обработки S волн для события 1994.06.11 в 11:52, глубина $h=1$ км. Вверху: три компоненты записи и окно для расчета спектра. Внизу: исходные и скорректированные за поглощение спектры смещения $D(f)$, скорости $V(f)$ и ускорения $A(f)$. Мелкие значки - наблюдаемый спектр; крупные значки – скорректированный спектр, пунктир - спектр шума. Серые фигуры построены на основе визуального выбора частот f_{c1} , f_{c2} и f_{c3} .

Проверка корректности поправок за поглощение; вопрос реальности f_{c3} .

Среди индивидуальных скорректированных спектров S -волн $A_S(f)$ имеется заметное число случаев, когда форма $A_S(f)$ в области максимума приблизительно плоская до 25 Гц и выше, см. рис. 4. Именно такой картины следует ожидать, если, следуя [2], пользоваться обычной моделью очаговых спектров ω^{-2} , то есть считать, что истинный очаговый спектр плоский (а очаговая f -max или f_{c3} не существует, либо ненаблюдаема). В рамках этой модели приблизительно плоская форма скорректированного спектра говорит, что проведенная корректировка искажений спектра за счет распространения в среднем верна. В случаях типа рис 4в и 4д, когда очаговый спектр ускорения в области своего максимума медленно растет или падает, можно предполагать избыточную или недостаточную коррекцию. Вероятная причина - разброс параметров фактического затухания (функции $Q(f)$) между трассами. Однако в большинстве случаев скорректированный спектр $A_S(f)$ явно неплюский – в нем присутствует выраженная верхняя граничная частота f_{c3} .

Картина для P -волн менее определенная. Скорректированный спектр $A_P(f)$ почти всегда имеет выраженную верхнюю граничную частоту $f_{c3}(P)$, но она обычно существенно ниже, чем $f_{c3}(S)$ для той записи. Повидимому, поправка за поглощение для P -волн здесь ненадежна и, в основном, занижена. Поэтому далее оценки $f_{c3}(P)$ рассматривали только в тех случаях, когда $f_{c3}(P) < 13$ Гц. В целом, большинство очаговых спектров $A(f)$ имеет верхнюю частоту среза ниже 25 Гц для S -волн, и часто ниже 13 Гц для P -волн. Таким образом, данные четко указывают на реальное присутствие в большой части данных верхнего среза спектра $A(f)$ (очаговой f -max).

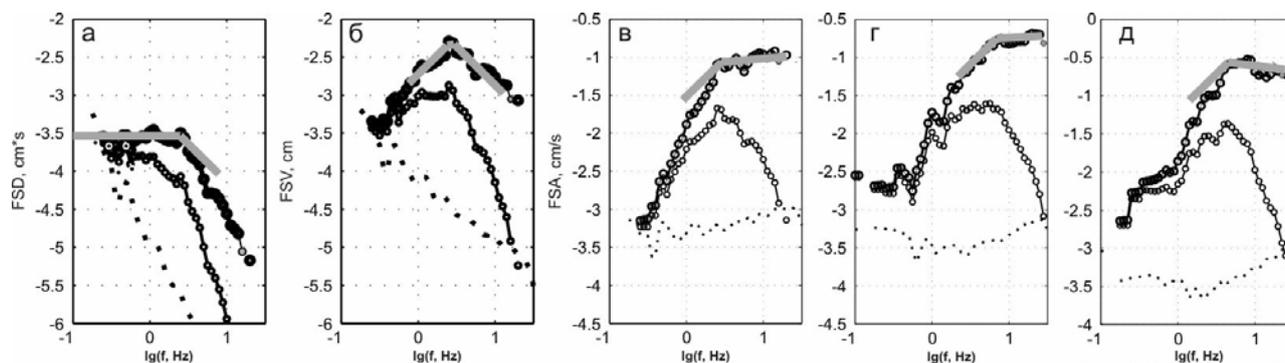


Рис 4. Примеры приблизительно плоского спектра ускорения S -волн $A_S(f)$ – иллюстрация эффективности поправок за поглощение для S -волн. (а, б, в) – спектры $D(f)$, $V(f)$ и $A(f)$ для события 1994.03.22 в 19:59, $h=8$ км. (г, д) - спектры $A(f)$ для событий 1995.09.07 в 10:57, $h=41$ км, $r=118$ км; 2005.01.02 в 11:0139, $h=168$ км. Одновременно серия графиков а,б, в показывает случай классического спектра типа ω^{-2} .

Проверка реальности корнер-частоты f_{c2} .

Среди изученных спектров $V(f)$ многие не имеют выраженного плоского участка максимума. Так что f_{c1} и f_{c2} , в сущности, неразличимы; это - случай поведения спектра типа ω^{-2} , см. рис 4б. Но имеется не менее заметное число случаев, когда присутствует выраженный широкий плоский максимум $V(f)$; в таких случаях наличие двух отдельных изломов спектра при $f=f_{c1}$ и при $f=f_{c2}$ несомненно, см. рис. 5. Имеется также много промежуточных случаев, один из них на рис 3.

Разнообразие очаговых спектров; спектры типа ω^{-3} .

В спектре $A_S(f)$ на частотах ниже f_{c3} часто виден приблизительно плоский участок, но столь же часто этот спектр имеет выраженный пик, в котором совмещаются f_{c2} и f_{c3} , см. рис. 5 внизу. Этот случай, когда плоский участок спектра $A_S(f)$ отсутствует, не предсказывается ни одной известной моделью очагового спектра. В других нередких случаях совмещаются f_{c1} и f_{c2} , как на рис 4б. Это - случаи, когда стандартная модель спектра ω^{-2} верна. Наконец, иногда совмещаются все три корнер-частоты f_{c1} , f_{c2} и f_{c3} . Это – случай очагового спектра типа ω^{-3} , обсуждавшегося в 1970е годы, а затем забытого. Оказалось, что и такие спектры присутствуют в наших данных, см. рис. 6.

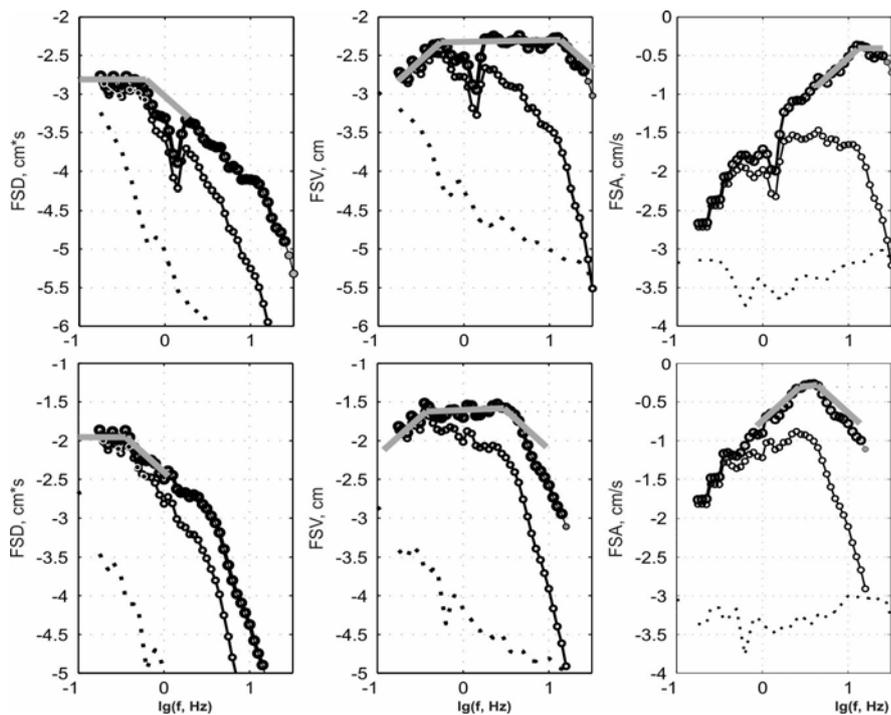


Рис. 5. Примеры спектра скорости S-волн $V_S(f)$ с широким максимумом – иллюстрация реальности характерной частоты f_{c2} . Вверху – спектры $D(f)$, $V(f)$ и $A(f)$ для события 1993.11.15 в 18:49, $h=40$ км. Внизу – то же для события 1994.10.24 в 04:04 с $h=11$ км. Нижняя серия графиков одновременно показывает случай выраженного верхнего среза спектра $A(f)$ и четкой характерной частоты f_{c3} .

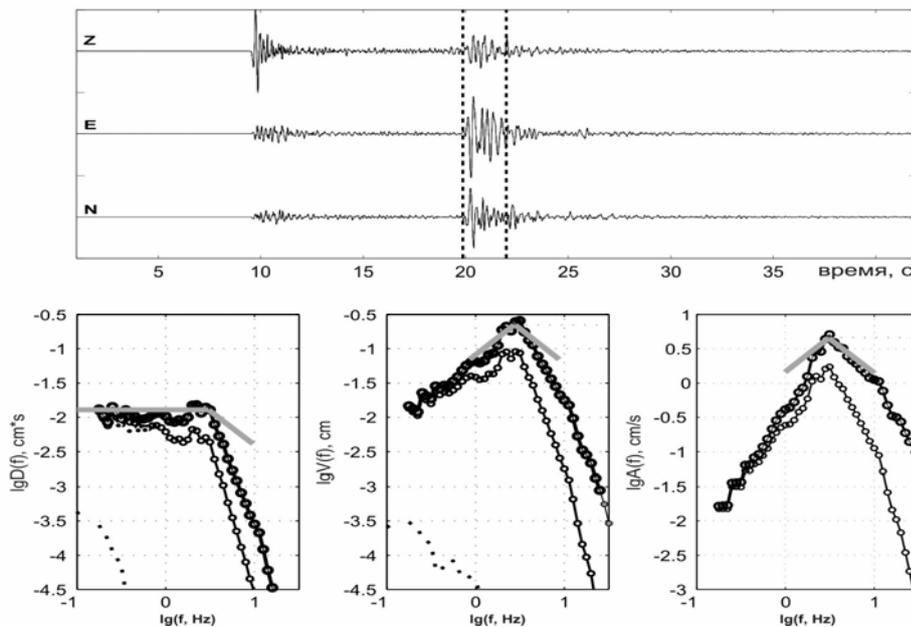


Рис. 6. Случай очагового спектра типа ω^{-3} . Вверху – запись ускорения; внизу – спектры $D(f)$, $V(f)$ и $A(f)$ для события 2000.08.27 в 01:45 с $h=88$ км

Зависимости f_{c2} и f_{c3} от магнитуды.

На рис 7аб показана зависимость f_{c3} от магнитуды. Данные, где оценки $f_{c3}(P)$ выше 13 Гц, указаны треугольником на этой границе, аналогично для $f_{c3}(S)$ использована граница 18 Гц. Такое цензурирование (ограничение, клипирование) данных введено, чтобы с гарантией отсечь и ненадежные, и даже не вполне уверенные оценки. Несмотря на цензурирование, заметна тенденция к падению f_{c3} с магнитудой, особенно ясная для данных S-волн. На рис. 7вг приведена зависимость f_{c2} от магнитуды. Видна выраженная тенденция к падению f_{c2} с магнитудой. Однако темп спада намного слабее, чем ожидаемый для случая подобия спектров. Поскольку в случае подобия f_{c2} пропорционально f_{c1} , можно ожидать связи типа $f_{c2} \sim M_0^{-1/3}$. Фактическая же зависимость примерно соответствует скейлингу $f_{c2} \sim M_0^{-0.16-0.25}$, так что предположение о подобии определенно не выполняется. В то же время связь f_{c1} с M_0 для наших данных (график не приведен) следует обычному скейлингу $f_{c1} \sim M_0^{-1/3}$, говорящему о подобии наших очагов в этом аспекте.

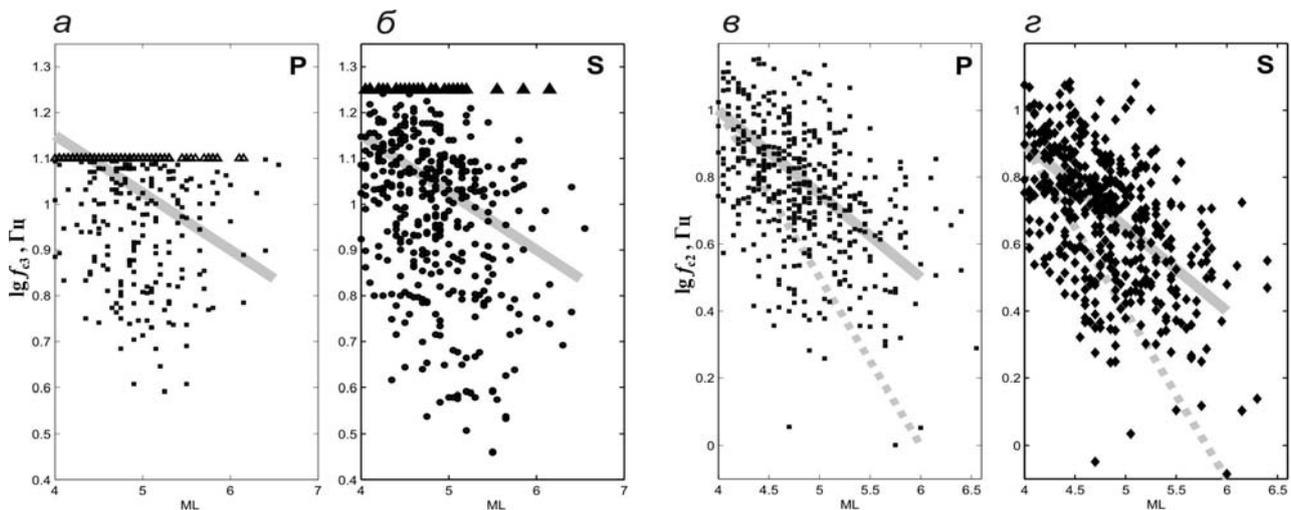


Рис. 7. Зависимости характерных частот от магнитуды M_L . а - $\lg f_{c3}$ для P -волн как функция M_L ; треугольники обозначают значения $\lg f_{c3} > 1.1$. Серая линия примерно соответствует скейлингу $f_{c3} \sim M_0^{-0.083}$. б - то же для S -волн, порог отвечает $\lg f_{c3} > 1.25$. в - $\lg f_{c2}$ для P -волн как функция M_L ; сплошная серая линия соответствует скейлингу $f_{c3} \sim M_0^{-0.1667}$; серый пунктир - аналогичная линия для скейлинга $f_{c3} \sim M_0^{-0.3333}$, ожидаемого в случае подобия спектров. г - то же для S -волн.

Выводы и заключение.

- Скомпилированы модели затухания S и P волн для среды под ст. РЕТ. Модель для S -волн успешно протестирована в диапазоне 0.5-25 Гц с использованием пересчитанных к очагу спектров с площадкой в спектре ускорения. Для P -волн аналогичное тестирование относительно надежно лишь для диапазона 0.5-13 Гц.
- Определены характерные (корнер-) частоты очаговых спектров f_{c1} , f_{c2} и f_{c3} для 420 землетрясений в радиусе 220 км от станции.
- Большая часть очаговых спектров S -волн имеет выраженную верхнюю граничную частоту f_{c3} («очаговую f -max») ниже 18 Гц. Выявлен медленный рост f_{c3} с магнитудой M_L .
- Заметная доля очаговых спектров имеет выраженную f_{c2} , заметно превышающую f_{c1} ; иначе говоря, имеется площадка в спектре скорости. Выявлен рост f_{c2} с M_L , примерно согласно скейлингу $f_{c2} \sim M_0^{-0.16-0.25}$, что говорит о заметном отклонении спектров от поведения, ожидаемого в предположении подобия.

Литература

1. Абубакиров И.Р. Оценка характеристик затухания поперечных волн в литосфере Камчатки по наблюдениям цифровой широкополосной станции «Петропавловск». //Физика Земли. 2005. № 10. С. 46-58
2. Гордеев Е.И., Рыкунов Л.П. Спектры P -волн от удалённых землетрясений в областях частот 1-10 Гц. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1976. № 7. С. 90-92.
3. Гусев А.А. Описательная статистическая модель излучения очага землетрясения и ее применение к оценке короткопериодного сильного движения. // Вулканол.и Сейсмол. 1984, №1, 3-22
4. Гусев А.А., Гусева Е.М. Проверка применимости параметра затухания «каппа» для быстрой грубой оценки гипоцентрального расстояния (по данным ст. Петропавловск). // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений. Под ред. Е.И. Гордеева, В.Н. Чеброва, Петропавловск-Камчатский, «Новая книга»,...2012, Глава 15. С. 397-411.
5. Гусев А.А. и Шумилина Л.С. Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге. // Вулканол. Сейсмол. 1999 №4-5, 29-40
6. Aki, K. Scaling law of seismic spectrum. J. Geophys. Res, 1967, 72, 1217-1231
7. Anderson, J. G., and Hough, S. E. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. Bull Seismol Soc Amer, 1984, 74, 1969-1993
8. Brune, J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J Geophys Res, 1970, 75, 4997-5009
9. Gusev, A. A. Descriptive statistical model of earthquake source radiation and its application to an estimation of short-period strong motion, Geophys J R Astr Soc, 1983, 74, 787-808.
10. Hanks, T. C. fmax. Bull. Seismol. Soc Amer, 1982, 72, 1867-1879.
11. Papageorgiou, A. S., and Aki, K., A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of the strong ground motion. I: Description of the model. Bull. Seismol. Soc Amer., 1983, 73, 693-722