

УДК 550.34

## СКЕЙЛИНГОВЫЕ СВОЙСТВА ХАРАКТЕРНЫХ ЧАСТОТ ОЧАГОВЫХ СПЕКТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ

© 2014 г. А. А. Гусев, Е. М. Гусева

Представлено академиком Е.И. Гордеевым 11.03.2014 г.

Поступило 17.03.2014 г.

DOI: 10.7868/S0869565214250185

Сейсмограммы — основной источник информации об очаговом процессе землетрясения. Волновая форма сейсмограммы смещения в объемной волне отражает временную функцию очага (ВФО), но с определенными амплитудно-фазовыми искажениями. Амплитудные искажения из-за потерь на трассе распространения учитываются относительно просто. Фазовые искажения скомпенсировать затруднительно. Поэтому удобно вместо ВФО изучать ее амплитудный спектр — “очаговый спектр” землетрясения (ОСЗ). По опыту исследований эмпирические ОСЗ не содержат выраженных пиков, поэтому амплитудные спектры можно сглаживать, что стабилизирует оценки. Стандартной моделью ОСЗ по [1, 2] является модель “ $\omega^{-2}$ ”, включающая плоский участок при низких частотах  $f$  ( $\sim f^0$ ) и убывание по  $f^{-2}$  на высоких частотах (ВЧ). Эти участки разделены загибом вблизи характерной (корнер) частоты  $f_{c1}$  (рис. 1).

Большой интерес представляет изучение скейлинга (обобщенного подобия) ОСЗ, так как характер скейлинга несет важнейшую информацию о свойствах очагов землетрясений. Скейлинг для  $f_{c1}$  хорошо изучен и часто близок к  $f_{c1} \sim M_0^{-1/3}$ , где  $M_0$  — сейсмический момент землетрясения. Этот род скейлинга соответствует предположению о геометрическом и кинематическом подобии очагов разного размера; при этом  $M_0 \sim L^3 \sim T^3 \sim f_{c1}^{-3}$ , где  $L$  — размер очага, а  $T$  — длительность очагового процесса. Использование именно  $M_0$  как базового масштабного параметра связано с тем, что  $M_0$  и определяемая им моментная магнитуда

$M_w = 2/3 \lg M_0$  [дин · см] – 10.7 — основные в сейсмологии и наиболее устойчиво определяемые параметры очага.

В [2] отмечено, что упомянутый загиб спектра может расщепляться на два с корнер-частотами  $f_{c1}$  и  $f_{c2}$ , между которыми имеется участок ОСЗ с промежуточным трендом, близким к  $f^{-1}$  (рис. 1). В [3] построена эмпирическая модель скейлинга ОСЗ и обнаружено, что для основной массы очагов такой промежуточный участок существует, причем скейлинг для  $f_{c2}$  качественно отличается от такового для  $f_{c1}$ . Согласно [4], по литературным данным разного качества,  $f_{c2} \sim f_{c1}^{0.5-0.7}$ .

От ВФО можно перейти к ее второй производной и к ее спектру — очаговому спектру по ускорению (ОСЗУ). Ход ОСЗУ в модели “ $\omega^{-2}$ ” таков: рост по  $f^2$  ниже  $f_{c1}$  и площадка выше  $f_{c1}$ . В эмпирических спектрах обнаруживается верхний срез спектра ускорения ( $f_{max}$ ), его обычно приписывают потерям на трассе распространения волны. Но такой срез в ряде случаев обнаруживали и в спектрах, исправленных на потери на трассе. В [3, 5] сделано предположение, что этот срез, далее обо-

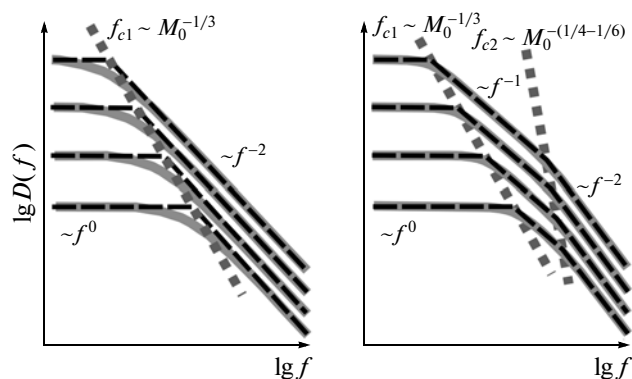
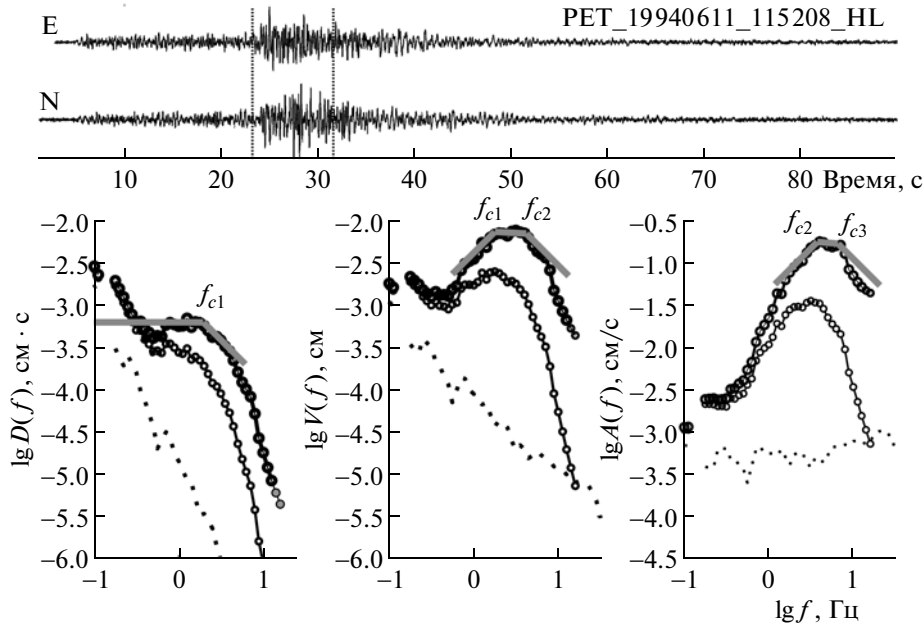


Рис. 1. Схема скейлинга очаговых спектров по общепринятой модели  $\omega^{-2}$  (слева) и по развиваемым представлениям (справа).

Институт вулканологии и сейсмологии  
Дальневосточного отделения  
Российской Академии наук,  
Петропавловск-Камчатский

Камчатский филиал Геофизической службы  
Российской Академии наук,  
Петропавловск-Камчатский



**Рис. 2.** Пример обработки данных. Вверху – исходные записи горизонтальных компонент ускорения (масштаб по вертикали условный); помечен интервал, по которому находили амплитудные спектры  $S$ -волны. Внизу спектры  $D(f)$ ,  $V(f)$  и  $A(f)$ , приведенные к  $r = 1$  км. Спектры даны в двух вариантах: исходные (нижняя кривая) и исправленные за поглощение (верхняя кривая). В нижней части графиков – соответствующие спектры шума (пунктир). Серая ломаная аппроксимирует наблюдаемый спектр.

значаемый  $f_{c3}$ , определяется очагом. При  $f_{c3}$  спад ОСЗ переключается с тренда  $f^{-2}$  на приблизительно  $f^{-3}$ , а ход ОСЗУ –  $cf^0$  на  $f^{-1}$ .

В современной сейсмологической литературе существование  $f_{c2}$  нередко признается, но нередко и замалчивается. Существование  $f_{c3}$  пока в основном не признано. Свойства скейлинга  $f_{c2}$  мало изучены, а относительно  $f_{c3}$  даже само наличие скейлинга четко не установлено. В работе предпринята попытка прояснить данные вопросы, изучая спектры  $S$ -волн местных землетрясений Камчатки.

Основные результаты работы следующие:

в очаговых спектрах обнаруживается несколько характерных (корнер) частот  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$  и  $f_{c3}$ , где спектральный тренд меняется от  $f^0$  к  $f^{-1}$ , от  $f^{-1}$  к  $f^{-2}$  и от  $f^{-2}$  к  $f^{-3}$  соответственно; хотя в ряде случаев  $f_{c1} \approx f_{c2}$ , что согласуется с обычной спектральной моделью “ $\omega^{-2}$ ”, основная часть спектров имеет более сложный характер;

для большей части изученных землетрясений имеется верхний срез очагового спектра ускорений, т.е. наблюдается частота  $f_{c3}$ ; это важный факт, так как само существование  $f_{c3}$  не признается в основной массе сейсмологической литературы;

для  $f_{c1}$  наблюдаемый скейлинг согласуется с обычной гипотезой подобия и близок к  $f_{c1} \sim M_0^{-1/3}$ ; для  $f_{c2}$  скейлинг установлен и близок к  $f_{c2} \sim$

$\sim M_0^{-0.17} \sim f_{c1}^{0.5}$ , что указывает на выраженное нарушение подобия; для  $f_{c3}$  скейлинг также установлен и близок к  $f_{c3} \sim M_0^{0.08} \sim f_{c1}^{0.25}$ , что еще резче нарушает подобие.

Для установления формы, а затем и характерных частот очагового спектра ответственным этапом является компенсация частотно-зависимого затухания на трассе распространения сигнала. В [6] для среды вблизи РЕТ получена следующая оценка параметров затухания  $S$ -волн:  $\kappa_0 = 0.016$  с,  $Q(f) = Q_0 f^{0.42}$  выше 1 Гц;  $Q(f) = Q_0$  ниже 1 Гц. Параметр добротности  $Q_0$  существенно зависит от гипоцентрального расстояния  $r$ ; используемое значение  $Q_0$  вычисляется по эмпирической формуле

$$Q_0(r) = 165 \left( 0.52 + \frac{0.48r}{100} \right).$$

Использовано более 400 записей землетрясений Камчатки с магнитудами  $M_L = 4-6.5$  ( $K^{Ф68} = 9.5-14$ ), при  $r = 80-220$  км. Записи с частотой опроса 80 Гц получены в 1993–2005 гг. на сейсмической станции “Петропавловск” (РЕТ) цифровым каналом: акселерометр ГВА-23 – регистратор “Quanterra”. Амплитудные спектры записей в выбранном интервале  $S$ -волн вычислялись с использованием функции окна, затем осреднялись по двум горизонтальным каналам и по отсчетам спектра в пределах полосы шириной 0.1 декады (1/3 октавы) (рис. 2). По полученным спектрам

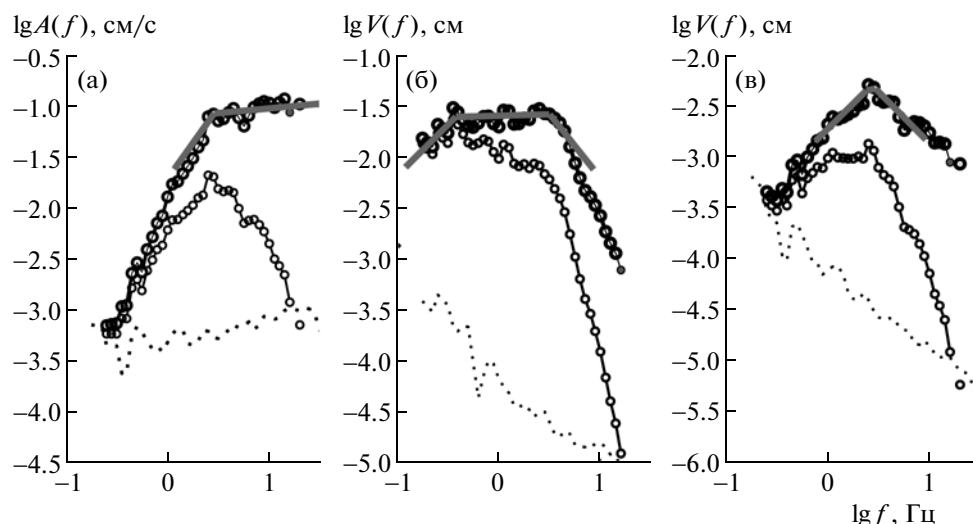


Рис. 3. Примеры спектров  $A(f)$  (а) и  $V(f)$  (б, в), иллюстрирующие характерные случаи поведения спектров.

ускорения  $A(f)$  (отражает ОСЗУ) находили спектры скорости  $V(f)$  и смещения  $D(f)$  (непосредственно отражает ОСЗ). По кривым спектров определяли модельную аппроксимацию в виде кусочно-степенного тренда. Близкая к оптимальной аппроксимация формы спектра подбирается интерактивно и позволяет оценить корнер-частоты спектра. Рабочий диапазон частот ограничен: со стороны низких частот — обычно встречающимся всплеском амплитуды в области 0.2–0.3 Гц, связанным с дополнительным вкладом в сигнал от поверхностных волн, с ВЧ-стороны — зоной с недопустимо низким отношением сигнал/шум (рис. 2).

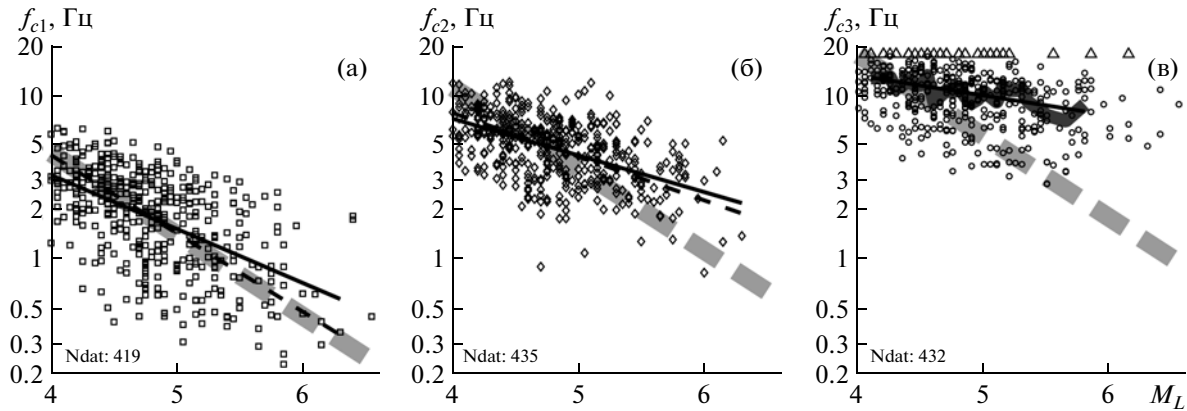
Для контроля корректности поправок на поглощение воспользовались тем фактом, что в заметной части случаев корнер-частота  $f_{c3}$  не наблюдаема даже при достаточно высоком уровне сигнала: либо  $f_{c3}$  локализована правее верхней границы рабочей полосы (30 Гц или ниже), либо, возможно, вовсе не существует. В таких случаях можно полагать, что справедлива стандартная ВЧ-асимптотика спектров по модели “ $\omega^{-2}$ ”: ОСЗ  $\sim f^{-2}$ , ОСЗУ — постоянный (плоский). Тот факт, что после коррекции поглощения нередко обнаруживаются примерно плоские на ВЧ-спектры  $A(f)$  (см. пример на рис. 3а), а случаи с существенным ростом  $A(f)$  на ВЧ не встречаются, подтверждает, что поправки на поглощение приемлемы в первом приближении и не должны вести к систематическим ошибкам в оценках, в первую очередь, в отношении  $f_{c3}$ , когда таковая наблюдается. Далее перейдем к содержательному анализу данных.

Первый вопрос — реальна ли  $f_{c2}$ . В этом случае спектры  $V(f)$  должны иметь плоский участок в области максимума. Оказалось, что среди изучен-

ных спектров имеется немало случаев, когда присутствует выраженный широкий плоский максимум  $V(f)$ ; в таких случаях наличие двух отдельных изгибов спектра при  $f=f_{c1}$  и при  $f=f_{c2}$  несомненно (см. пример на рис. 3б). Однако на многих спектрах виден лишь неширокий пик, так что  $f_{c1}$  и  $f_{c2}$  приблизительно совпадают; в этих случаях спектр следует модели “ $\omega^{-2}$ ” (см. пример на рис. 3в). Имеется также много промежуточных случаев (см. пример на рис. 2).

Второй вопрос — реальна ли  $f_{c3}$ . В этом случае спектры  $A(f)$  должны иметь выраженный верхний срез. Во многих случаях такой срез действительно наблюдается (см. пример на рис. 2). С учетом определенного разброса величины поглощения между трассами от разных очагов оценки  $f_{c3}$ , превышающие 18 Гц, считались ненадежными. Такие данные попадали в категорию  $f_{c3} > 18$  Гц, причем в эту же категорию включали и случаи, когда  $f_{c3}$  выделить не удастся (на спектре  $A(f)$  не обнаруживается ясный загиб вниз).

Скейлинг найденных оценок  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$  и  $f_{c3}$ , выражаемый соотношением  $f_{ci} \sim M_0^{\beta_i}$ ,  $i = 1, 2, 3$ , виден на рис. 4, где оценки  $f_{ci}$  изображены в функции магнитуды  $M_L$ , близкой к  $M_w$ . Видно, что данные по  $f_{c1}$  (рис. 4а) имеют заметный разброс и не противоречат гипотезе подобия ( $\beta_1 \approx 1/3$ ). Аккуратная оценка показателя скейлинга  $\beta_i$  затруднительна из-за неуверенности в точном значении соотношения разброса данных рис. 4а по абсциссе и ординате. Для  $f_{c2}$  (рис. 4б), снова на фоне разброса, спад с магнитудой намного медленнее, чем для  $f_{c1}$ ;  $\beta_2 \approx 0.17$ , что указывает на приблизительное соотношение:  $f_{c2} \sim f_{c1}^{0.5}$ . Подобие явно нарушено.



**Рис. 4.** Найденные оценки корнер-частот  $f_{c1}$  (а),  $f_{c2}$  (б) и  $f_{c3}$  (в) в функции магнитуды. Серые штриховые линии соответствуют скейлингу  $f_{ci} \sim M_0^{-1/3}$ , ожидаемому в случае подобия очагов. Сплошные линии — оценки наблюдаемого скейлинга с помощью обычной регрессии; оценки показателей равны  $\beta_1 = 0.22 \pm 0.016$  (а),  $\beta_2 = 0.15 \pm 0.011$  (б) и  $\beta_3 = 0.081 \pm 0.013$  (в). Для части данных на (в) имелись только оценки снизу (треугольники), поэтому для расчета тренда сначала вычислена скользящая медиана (серая кривая), по точкам которой затем рассчитана регрессия. Полученные оценки  $\beta_i$  занижены, так как исходят из упрощенного предположения, что значения  $M_L$  — точные; реальная точность оценок  $\beta_i$  также завышена. Штриховые линии — аналогичные оценки скейлинга по ортогональной регрессии в предположении  $\sigma^2(M_L) = 0.5\sigma^2(f_{ci})$ ; соответствующие более реалистические оценки показателей равны  $\beta_1 = 0.32$  (а) и  $\beta_2 = 0.17$  (б).

На рис. 4в показана зависимость  $f_{c3}(M_L)$ . Случаи категории  $f_{c3} > 18$  Гц помечены треугольником при  $f = 18$  Гц. Такое “клипирование” или “винзоризация” не мешает заметить тенденцию к падению  $f_{c3}$  с магнитудой. Чтобы выявить ее уверенно, вычислили медианы данных  $f_{c3}(M_L)$  в скользящем окне, на значения которых клипирование не оказывает влияния, пока им затронуто менее 50% данных в пределах окна. Регрессия по медианам дала оценку  $\beta_3 = 0.08$ ; это примерно соответствует связи  $f_{c3} \sim f_{c1}^{0.25}$ , так что для  $f_{c3}$  подобие нарушается еще резче, чем для  $f_{c2}$ .

Итак, на материале сотен спектров удалось выявить наличие мало изученных характерных частот  $f_{c2}$  и  $f_{c3}$  и обнаружить явное отличие их скейлинга от такового для  $f_{c1}$ ; при этом показатели скейлинга для  $f_{c2}$  и  $f_{c3}$  также существенно различаются. Глубинными причинами отличий наблюдаемого скейлинга от ожидаемого в случае полного подобия очагов могут быть: для  $f_{c2}$  — расползание (уширение) фронта распространяющегося разрыва по стохастическому механизму, близкому к случайному блужданию (см. [4]); для  $f_{c3}$  — наличие в спектре неоднородностей на разломе верхней

границы, положение которой зависит от магнитуды. Оценка  $\beta_1 \approx 1/3$  говорит, что для размеров очагов изученной совокупности нет выраженного нарушения подобия. Этот факт указывает на относительную стабильность безразмерного очагового параметра “сброшенная деформация” и также представляет определенный интерес.

Работа частично поддержана Российским научным фондом, грант 14–17–00621.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aki K. // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 1217–1231.
2. Brune J.N. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4997–5009.
3. Gusev A.A. // Geophys J. Roy. Astron. Soc. 1983. V. 74. P. 787–808.
4. Gusev A.A. // Pure and Appl. Geophys. 2013. V. 170. P. 65–93.
5. Papageorgiou A.S., Aki K. // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1983. V. 73. P. 693–722.
6. Гусев А.А., Гусева Е.М. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: Геофизич. служба РАН, Камчат. филиал, 2013. С. 147–151.