

УДК 550.34

## ХАРАКТЕР МАСШТАБИРОВАНИЯ ОЧАГОВЫХ СПЕКТРОВ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ В ДИАПАЗОНЕ МАГНИТУД 3.5–6.5

© 2017 г. А. А. Гусев<sup>1,2,\*</sup>, Е. М. Гусева<sup>2</sup>Представлено академиком РАН Е.И. Гордеевым 14.03.2016 г.  
Поступило 21.03.2016 г.

Свойства очаговых спектров местных мелкофокусных землетрясений Камчатки из диапазона магнитуд  $M_w = 3.5–6.5$  изучались по 460 записям  $S$ -волн, полученным на ст. РЕТ. Построено семейство средних очаговых спектров; по спектрам изучена зависимость от  $M_w$  важнейших квазибезразмерных очаговых параметров очага: сброшенного напряжения  $\Delta\sigma$  и кажущегося напряжения  $\sigma_a$ . Обнаружено, что параметр  $\Delta\sigma$  почти стабилен, в то время как  $\sigma_a$  устойчиво растет с ростом магнитуды  $M_w$ , свидетельствуя о нарушении подобия. Как известно, при достаточно больших  $M_w$  гипотеза подобия примерно верна: оба параметра  $\Delta\sigma$  и  $\sigma_a$  не проявляют заметной зависимости от магнитуды. Определено пороговое значение магнитуды  $M_w \approx 5.7$ , при котором происходит описанная смена режимов для условий Камчатки.

DOI: 10.7868/S0869565217050164

Важный источник наших представлений о природе очага землетрясения – его временная функция. Обычно в этом качестве рассматривают скорость изменения сейсмического момента  $\dot{M}_0(t)$ ; ее амплитудный спектр  $\dot{M}_0(f)$  называют очаговым спектром землетрясения (ОСЗ). Важные параметры очага: сейсмический момент  $M_0 = M_0(t)|_{t \rightarrow \infty} = \dot{M}_0(f)|_{f=0}$  и связанная с  $M_0$  моментная магнитуда  $M_w = 2/3 \times (\lg M_0[\text{Н} \cdot \text{м}] - 9.05)$ . Функции  $\dot{M}_0(t)$  и  $\dot{M}_0(f)$  в идеале прямо связаны со смещением в  $P$ - или  $S$ -волне и с его спектром. Интересны скейлинговые свойства совокупностей ОСЗ, в частности, средняя зависимость ОСЗ от  $M_0$  или  $M_w$  (закон скейлинга). Идеализированный закон скейлинга ОСЗ можно рассматривать в трех эквивалентных вариантах: как  $\dot{M}_0(f)$ ,  $\ddot{M}_0(f) = 2\pi f \dot{M}_0(f)$  и  $\ddot{M}_0(f) = (2\pi f)^2 \dot{M}_0(f)$ . Важнейший элемент такого закона – связь характерной (корнер-) частоты ОСЗ,  $f_c$ , с  $M_0$ . Для больших  $M_w$  ( $M_w = 6–9$ ) обычно  $f_c \sim M_0^{-1/3}$ . Этот род скейлинга соответствует предположению о геометрическом и кинематическом подобии очагов разного размера [1, 2]. В

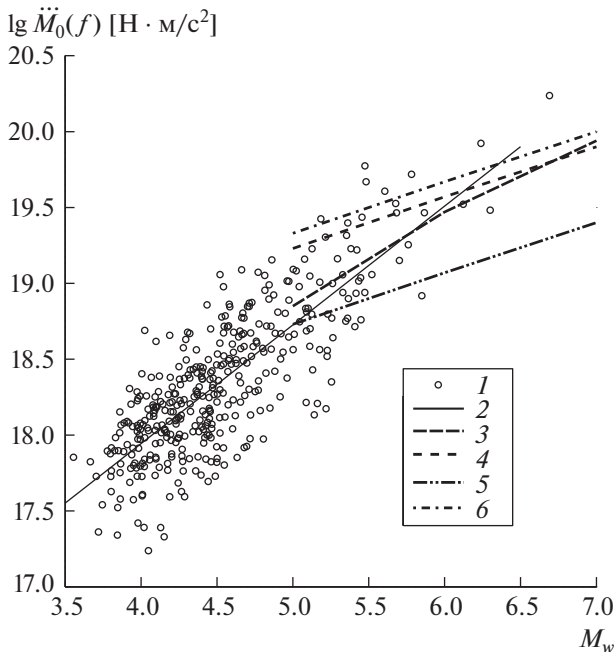
этом случае  $M_0 \sim E_s \sim L^3 \sim B^3 \sim T^3 \sim f_c^{-3}$ , где  $E_s$  – сейсмическая энергия,  $L$  – размер очага,  $B$  – средняя подвижка, а  $T$  – длительность. При этом такие важнейшие квазибезразмерные параметры очага, как сброшенное напряжение  $\Delta\sigma \approx 2\mu B/L$  ( $\mu$  – модуль сдвига) и кажущееся напряжение  $\sigma_a = \mu E_s/M_0$ , не проявляют систематической зависимости от  $M_0$ . При более низких  $M_w$  положение иное. Ряд исследователей (см. [3] и др.) считает, что  $\Delta\sigma$  и  $\sigma_a$  здесь также стабильны, так что подобие существует. Другая группа [4] полагает, что параметры  $\Delta\sigma$  и  $\sigma_a$  здесь снижаются вместе с  $M_0$ , и подобие нарушено. Дискуссия продолжается уже десятилетия, но вопрос не разрешен, хотя он важен и для физики очаговых процессов, и для приложений.

Данный вопрос изучался на материале спектров  $S$ -волн землетрясений Камчатки, приведенном к очагу с использованием специально изученной модели затухания  $S$ -волн. Построено семейство средних ОСЗ для  $M_w = 3.5–6.5$  и изучена зависимость от  $M_w$  параметров  $\Delta\sigma$  и  $\sigma_a$ . Обнаружено, что параметр  $\Delta\sigma$  почти стабилен, в то время как  $\sigma_a$  устойчиво растет с ростом магнитуды  $M_w$ . Таким образом, выявлены качественные различия в поведении данных параметров, и на вопрос о реальности подобия камчатских очагов нет простого ответа. При достаточно больших  $M_w$  обнаруженное различие исчезает: при  $M_w > 5.7$  оба параметра,  $\Delta\sigma$  и  $\sigma_a$ , не проявляют заметной зависимости от магнитуды.

<sup>1</sup> Институт вулканологии и сейсмологии  
Дальневосточного отделения Российской Академии наук,  
Петропавловск-Камчатский

<sup>2</sup> Камчатский филиал Геофизической службы  
Российской Академии наук,  
Петропавловск-Камчатский

\*E-mail: gusev@emsd.ru



**Рис. 1.** Зависимости уровня спектра ускорения  $\lg \ddot{M}_0(f)_{\max}$  от  $M_w$ . 1 – данные; 2 – линейная аппроксимация вида  $\lg \ddot{M}_0(f)_{\max} \sim M_0^{0.38} \sim 10^{0.58M_w}$ ; 3 – тренд для диапазона  $M_w = 5-7$  для Камчатки на основе [9]; 4–6 – аналогичные тренды для мантийных очагов вблизи Хоккайдо (4), коровых очагов вблизи Хонсю (5) и мантийных очагов вблизи Хонсю (6).

В работе использовано 460 записей землетрясений Камчатки с магнитудами  $M_L = 4-6.5$  ( $M_w = 3.5-6.5$ ) и глубинами очагов 0–70 км при гипоцентральных расстояниях  $r = 80-220$  км. Записи ускорения с частотой опроса 80 или 100 Гц получены в 1993–2012 гг. сейсмостанцией “Петропавловск” (PET). Амплитудные спектры  $S$ -волн вычисляли с использованием функции окна, затем осредняли по каналам NS, EW и по точкам дискретного спектра в пределах полосы шириной  $1/3$  октавы. Сглаженные спектры приводили к  $r = 1$  км путем компенсации геометрического расхождения и потерь на трассе луча. Если принять параметры затухания по [5] (расхождение по  $1/r$ ), то параметры потерь следующие:  $\kappa_0 = 0.034$  с, добротность  $Q(f, r) = 164f^{0.59}(1 - 0.0017(r - 100))^{-1}$ . Найденные приведенные спектры ускорения  $A(f)$  преобразовывали в спектры скорости  $V(f)$ , и смещения  $\Omega(f)$ . По спектру  $\Omega(f)$  вычисляли ОСЗ как  $\dot{M}_0(f) = C_1\Omega(f)$  и аналогично  $\ddot{M}_0(f)$  и  $\ddot{M}_0(f)$  по  $V(f)$  и  $A(f)$ ; здесь константа  $C_1 = 3.24 \cdot 10^{18}$ . Численные значения  $\lg \dot{M}_0(f)|_{f=0} = \lg M_0$  близки к  $\lg M_0(\text{GCMT})$ ; в среднем  $M_w - M_w(\text{GCMT}) = -0.17$ . К каждой найденной спектральной кривой под-

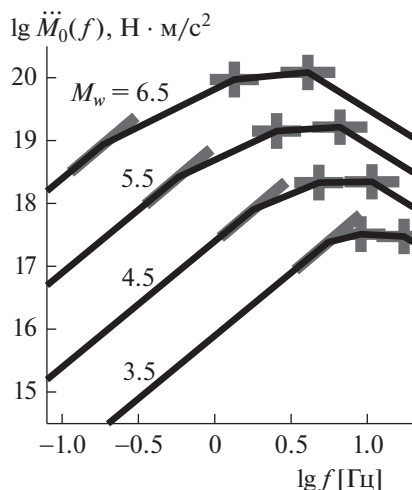
бирали кусочно-линейную (в билогарифмическом масштабе) аппроксимацию. Так, для индивидуальных спектров оценили уровни площадок максимумов спектров  $\lg \dot{M}_0(f)|_{f=0}$ ,  $\lg \dot{M}_0(f)_{\max}$  и  $\lg \ddot{M}_0(f)_{\max}$ , а также корнер-частоты  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$  и  $f_{c3}$ . Примеры процедуры обработки см. в [6].

Подобно стандартным  $\omega^{-2}$ -моделям  $\dot{M}_0(f)$  по [1, 2] принятая модель включает плоский участок ( $\sim f^0$ ) при низких частотах (ниже  $f_{c1}$ ) и сегмент с поведением  $f^{-2}$  на высоких частотах. Однако в отличие от модели  $\omega^{-2}$  участки с поведением  $\sim f^0$  и  $\sim f^{-2}$  не сопрягаются непосредственно при  $f = f_{c1}$ : есть промежуточный участок типа  $f^{-(1-1.5)}$ , ограниченный с двух сторон изломами при  $f_{c1}$  и  $f_{c2}$  [2]. Выше  $f_{c2}$  имеется обычный сегмент типа  $f^{-2}$  между  $f_{c2}$  и  $f_{c3}$ . Выше  $f_{c3}$   $\dot{M}_0(f)$  падает по  $f^{-(3-4)}$ . При этом каждая из частот  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$  и  $f_{c3}$  следует своему тренду. Данная модель скейлинга была предложена на концептуальном уровне в [7]; обширный материал наблюдений, поддерживающий идею скейлинга с тремя корнер-частотами, обобщен в [8]. Данные для камчатских спектров см. в [6, 9]. Важная особенность варианта скейлинга по рис. 1 – зависимость от магнитуды характера скейлинга для уровня площадки  $\lg \ddot{M}_0(f)$ . Темп роста этого уровня с  $M_w$  переключается с быстрого при  $M_w = 3-5.5$  на более медленный при  $M_w = 5.5-7.5$ . Однако в отношении важнейшего параметра очага  $f_{c1}$  предполагается, что соотношение  $f_{c1} \sim M_0^{-1/3} \sim 10^{-0.5M_w}$  выполняется при любых  $M_w$ .

Чтобы проверить справедливость принятой концепции скейлинга спектров, изучали эмпирические зависимости от  $M_w$  для ее параметров. Для частот  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$  и  $f_{c3}$  данная зависимость изучалась в [6, 10]. Зависимость для уровней  $\lg \ddot{M}_0(f)_{\max}$  приведена на рис. 1. Эту зависимость аппроксимировали линейной функцией. Для  $f_{c1}$  регрессия по материалам [6,10] дала закон  $f_{c1} \sim M_0^{0.33 \pm 0.02}$ ; показатель в этом случае близок к  $1/3$  – значению, ожидаемому для случая подобия. Для  $f_{c2}$  и особенно для  $f_{c3}$  наклон трендов более пологий, что не согласуется с идеей подобия.

По описанным зависимостям построили семейство средних спектров (рис. 2). Здесь важнейший численный параметр – темп роста с  $\lg M_0$  уровня площадки  $\lg \ddot{M}_0(f)_{\max}$ , который находится из наклона прямой 2 рис. 1. Это дает  $\lg \ddot{M}_0(f)_{\max} \sim M_0^{0.52}$ ; показатель здесь превышает значение  $1/3$ , ожидаемое по гипотезе подобия, в 1.55 раза.

На рис. 1 видно, что наблюдаемый тренд для диапазона магнитуд 3.5–6 вступает в явное про-



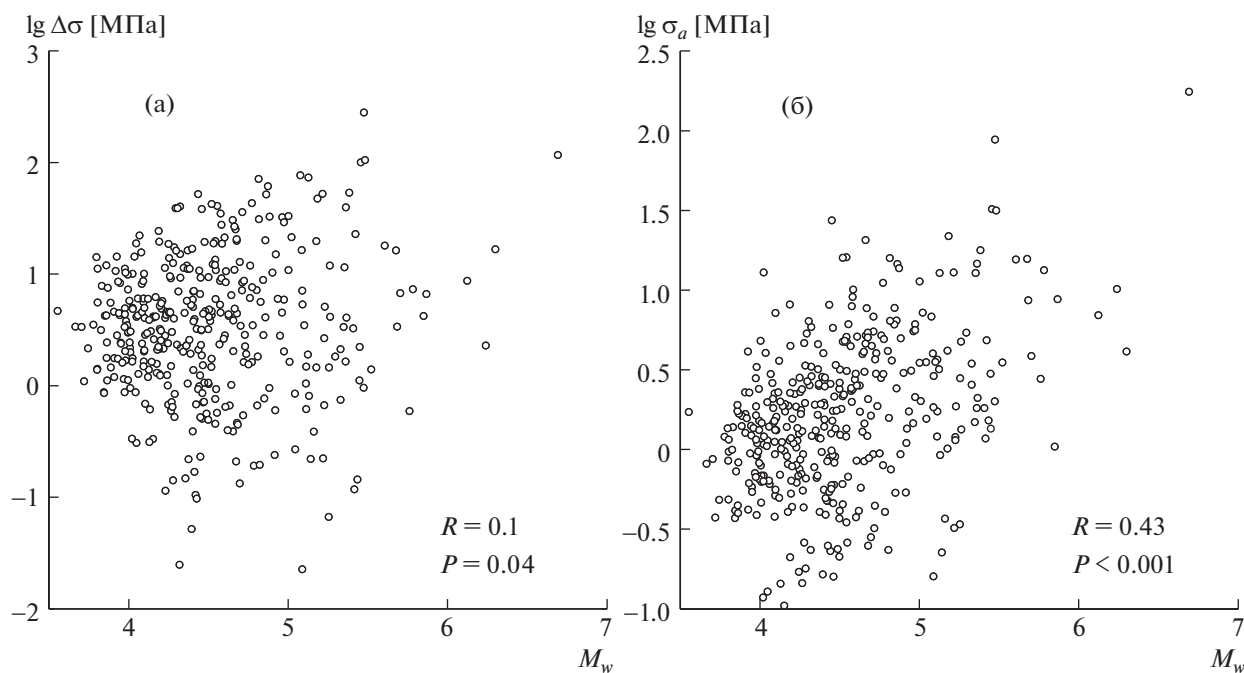
**Рис. 2.** Семейство средних ОСЗ  $\ddot{M}_0(f)$  для землетрясений Камчатки. Серые сегменты – диапазоны среднеквадратического разброса индивидуальных спектров по уровню и по положению точки излома.

тиворечие с трендом для диапазона  $M = 6-7$ , который можно оценить для землетрясений Камчатки по средним спектрам ускорения из [9]. Однако в области  $M = 5.5-6$  эти тренды согласуются. Можно сделать вывод, что при  $M_w \approx 5.7$  имеется “кроссовер”: быстрый рост уровня высокочастотного излучения прекращается, и возникает “режим сильных землетрясений”, когда свойства подобия примерно выполняются.

Чтобы прояснить вопрос о подобии, полезно изучить поведение  $\Delta\sigma$  и  $\sigma_a$ . Для оценки  $\Delta\sigma$  использовали спектральный метод (по Бруну) и применяли формулу  $\Delta\sigma = 8.47 M_0 (f_{c1}/c_S)^3$  [11], где  $c_S$  – скорость S-волн (принято  $c_S = 3.8$  км/с. Зависимость  $\Delta\sigma(M_w)$  (рис. 3а) выражена слабо; даже наличие корреляции сомнительно (уровень значимости 4%); так что если связь и существует, то слабая. Отметим, однако, что при расчете  $\Delta\sigma$  обычно используют не  $f_{c1}$ , а оценку  $f_c$ , близкую к  $(f_{c1}, f_{c2})^{0.5}$  [12] и не имеющую вполне четкого смысла. При таком подходе примерное согласие поведения оценок  $\Delta\sigma$  с гипотезой подобия не имеет места.

Чтобы найти  $\sigma_a$ , определяемое как  $\mu E_s/M_0$ , мы задали  $\mu = 70$  ГПа и вычисляли энергию по формуле  $E_s(\text{Дж}) = 1.04 \cdot 10^{18} \Delta f V_{\max}^2$ , где  $\Delta f$  [Гц] =  $f_{c2} - f_{c1}$  и  $V_{\max}$  [м] – ширина полосы спектра  $V(f)$  и его пиковая амплитуда соответственно. Зависимость  $\sigma_a(M_w)$  приведена на рис. 3б. Видно, что связь между  $\sigma_a$  и  $M_w$  выражена весьма четко, соответствующий уровень значимости ниже 0.1%, и ее реальность несомненна.

Эти факты подсказывают новый взгляд на старый спор. По крайней мере, в части случаев вопрос о справедливости гипотезы подобия очагов для слабых ( $M_w < 5.5-6$ ) землетрясений может иметь простой и неожиданный ответ: отклонения от этой гипотезы невелики для параметра “сбро-



**Рис. 3.** Зависимость от  $M_w$  для  $\Delta\sigma$  (а) и  $\sigma_a$  (б).

шенное напряжение” и, одновременно, четко выражены для параметра “кажущееся напряжение”.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14–17–00621) в Камчатском филиале Геофизической службы РАН.

#### 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. *Baltay A., Prieto G., Beroza G.C.* // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. B08314 doi 10.1029/2009JB006736
4. *Izutani Y., Kanamori H.* // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 4007–4010.
5. *Гусев А.А., Гусева Е.М.* // *Физика Земли.* 2016. № 3.
6. *Гусев А.А., Гусева Е.М.* // *ДАН.* 2014. Т. 458. № 1. С. 88–91.
7. *Gusev A.A.* // *Geophys J. Roy. Astron. Soc.* 1983. V. 74. С. 787–808.
8. *Gusev A.A.* // *Pure and Appl. Geophys.* 2013. V. 170. P. 65–93.
9. *Petukhin A.G., Gusev A.A., Guseva E.M., Gordeev E.I., Chebrov V.N.* // *Pure and Appl. Geophys.* 1999. V. 156. P. 445–468.
10. *Gusev A.A., Guseva E.M.* // *Pure and Appl. Geophys.* 2016. V. 173. P. 1539–1557.
11. *Boore D.* // *Pure and Appl. Geophys.* 2003. V. 160. P. 635–676.
12. *Savage J.C.* // *J. Geophys. Res.* 1972. V. 77. P. 3788–3795.