

РАЗДЕЛЕНИЕ ВКЛАДОВ ОЧАГА И СТАНЦИИ В ФОРМИРОВАНИЕ ВЕРХНЕГО СРЕЗА СПЕКТРА УСКОРЕНИЯ МЕСТНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ТРЕТЬЯ КОРНЕР-ЧАСТОТА

Гусев А.А.^{1,2} Гусева Е.М.²

¹ Институт Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск- Камчатский, gusev@emsd.ru

² Камчатский филиал Геофизической Службы, РАН, Петропавловск- Камчатский, Россия

Спектр Фурье ускорения местного землетрясения, исправленный за потери при распространении волны, обычно имеет вид плато, с верхним срезом при определенной частоте $f = f_{max}$. Имеются указания на то, что формирование этого среза имеет сложный характер: он образуется за счет комбинации эффекта потерь на поглощение в среде и наличия среза в очаговом спектре.

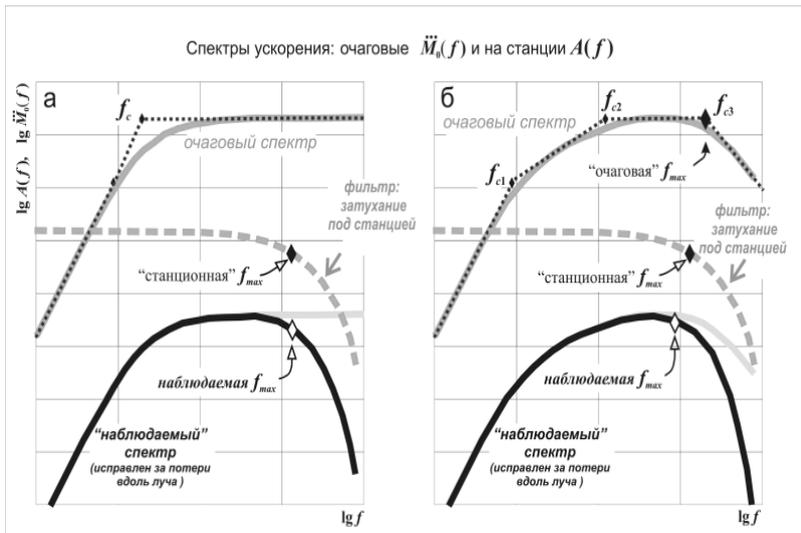


Рис.1 Схема спектра ускорения в очаге и в приемнике для двух вариантов очагового спектра Слева – вариант с двумя совмещенными корнер-частотами f_{c1} и f_{c2} ([6], при этом f_{c3} вне полосы наблюдений или не существует. Справа - с тремя разнесенными корнер-частотами f_{c1} , f_{c2} и f_{c3} ([6, 8, 10]). Во втором случае ясно видна сложность формирования наблюдаемой f_{max} за счет комбинации вкладов очага и среды. Спектр в приемнике скорректирован за потери на основной части трассы, "станционная" f_{max} формируется за счет потерь в низкочастотном слое непосредственно под станцией.

Чтобы разделить вклады очага и среды в формирование f_{max} , проведен анализ данных более 400 спектров S-волн землетрясений Камчатки (см рис 2) с $ML = 4 - 6.5$ за 1993-2005, записанных ст. Петропавловск на удалениях 80-220 км; глубины 0-150 км в основном 0-50 км. Первый вариант такого исследования опубликован [1]. Записи с частотой опроса 80 Гц получены цифровым каналом акселерограф FBA-23 – регистратор Квантерра, каналы HNN/HNE/NHZ.

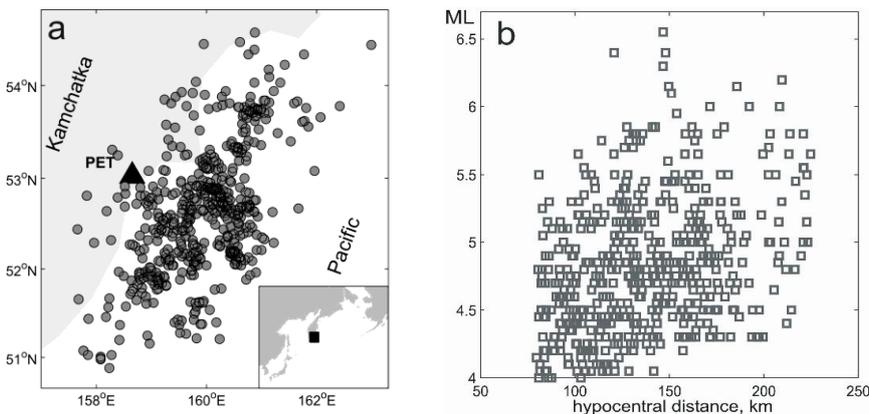


Рис 2. Слева-эпицентры обработанных землетрясений. Справа- распределение обработанных данных на плоскости гипоцентрального расстояния r -магнитуда ML .

На рис 3 приведен пример записи горизонтальных каналов и их суммарные сглаженные спектры, с вариантами логарифмической и натуральной шкалы абсцисс. Приведены спектр записи, спектр шума и спектр, приведенный к очагу, с компенсацией потерь на поглощение.

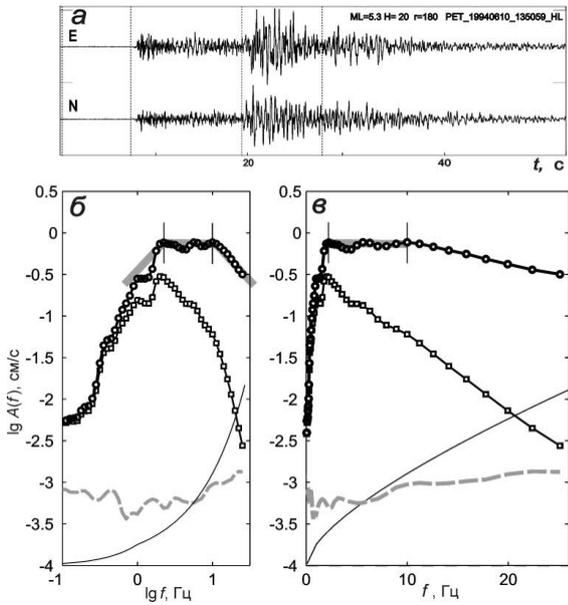


Рис. 3. Пример обработки записи S -волн, землетрясение 1994.06.10 в 13:26, $M_L=5.3$, $H=20$ км, $r=180$ км. a - исходные записи горизонтальных компонент ускорения (масштаб по вертикали условный). Две пары штриховые линии отмечают интервал, по которому находили амплитудные спектры шума и S -волн. b - спектры $A(f)$ (наблюденный, квадраты), $A_1(f)$ (исправленный за поглощение, кружки), и спектр шума (серая штриховая), приведенные к $r=1$ км. Тонкая линия внизу – использованный оператор коррекции потерь, сдвинутый вниз для разборчивости графики. Серая ломаная линия аппроксимирует площадку в исправленном спектре и ее окрестность. Исползованная для дальнейшей обработки аппроксимация площадки в спектре ускорения помечена вертикальными отрезками, они соответствуют частотам f_{c2} и f_{c3} . Масштаб билогарифмический. c - то же, масштаб полулогарифмический. Видно, что в полулогарифмическом масштабе на неисправленном спектре присутствие угловой точки при f_{c3} практически незаметно.

Применив нелинейный алгоритм инверсии (по Нелдеру-Миду), нашли следующие параметры модели потерь вдоль луча: добротность $Q_0=156\pm 33$ на частоте $f=1$ Гц для диапазона расстояний $r=0-100$ км, показатель в степенном законе роста добротности с частотой $\gamma=0.56\pm 0.08$, параметр потерь под станцией $\kappa_0=0.030\pm 0.005$ с. Реальная точность оценок может быть несколько ниже указанной формальной. Обнаружено также (при уровне доверия 10%) снижение потерь с расстоянием. Как видно из рис. 4, качество подгонки при выбранном способе анализа вполне приемлемое. Детальное описание результатов см. [2]

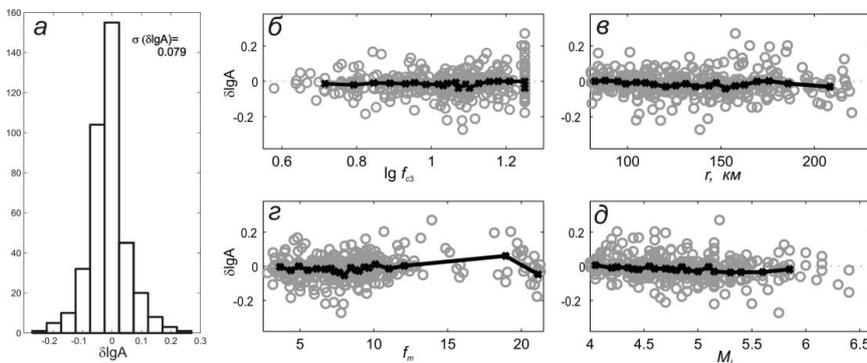


Рис 4. a - гистограмма невязок подгонки наблюдаемых спектров. $b, в, г, д$ - графики зависимости невязок от параметров: f_{c3} , r , f_m (осевая частота полосы спектра) и M_L

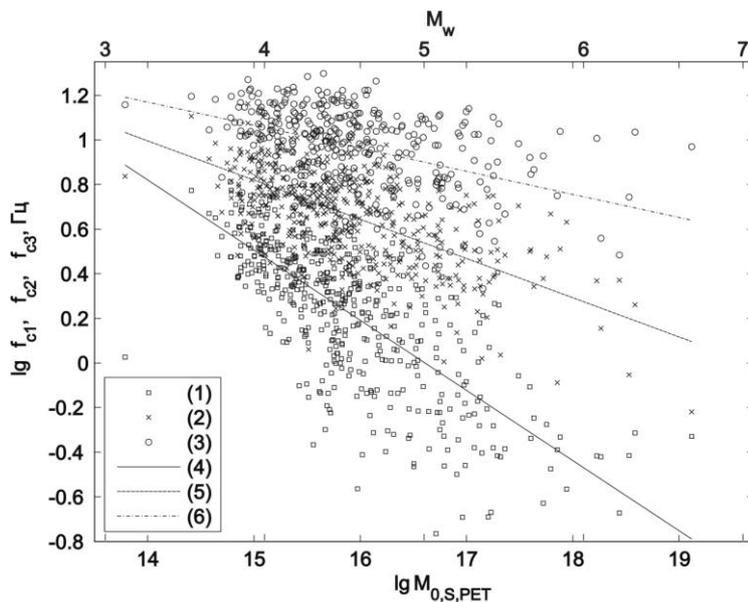


Рис. 5. Значения $f_{c1}(1)$, $f_{c2}(2)$ и $f_{c3}(3)$, снятые с наблюдаемых и исправленных за поглощение спектров ст. РЕТ, как функция M_0 и M_w , и соответствующие линии ортогональной регрессии (4, 5 и 6).

Видно, что линии имеют тенденцию сходиться примерно к одной точке, указывая на важную тенденцию в свойствах скейлинга очаговых спектров землетрясений Камчатки.

На рис 5 приводится совмещенная зависимость корнер-частот f_{c1} , f_{c2} и f_{c3} изученных очагов от сейсмического момента M_0 (нижняя оцифровка) и от моментной магнитуды M_w (верхняя оцифровка). Различие трендов для трех корнер частот весьма выраженное; это различие указывает на неприменимость известной концепции подобия (кинематического, пространственно-временного) к изученной совокупности очагов.

Для большинства изученных спектров удалось определены частоты среза очагового спектра ускорений, имеющие смысл f_{c3} - третьей корнер-частоты очагового спектра. Большой интерес представляет зависимость оценок f_{c3} от магнитуды, см рис 6.

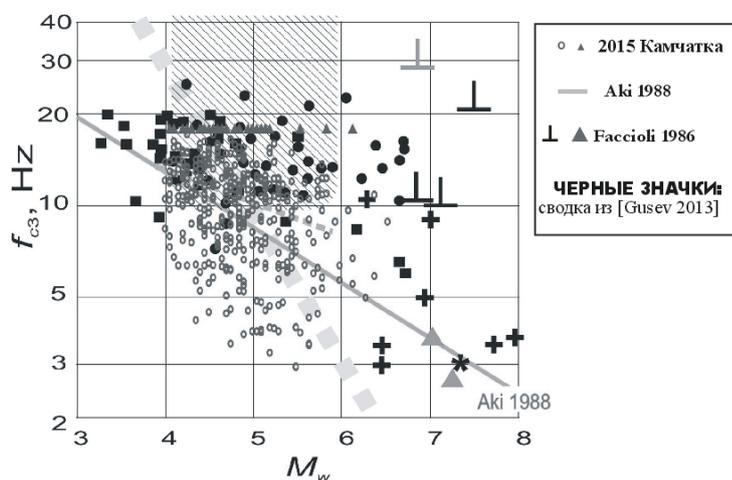


Рис 6. Оценки f_{c3} для изученных камчатских землетрясений в сопоставлении с оценками из более ранних работ. Видно, что оценки для Камчатки не противоречат опубликованным материалам [3,7 и др]. В частности, неплохое согласие имеет место для тренда, полученного в 1988 г Кейити Аки (серая прямая). Светлосерая жирная пунктирная линия – ожидаемый тренд для случая подобия очаговых спектров. Ясно, что гипотеза подобия неприменима.

Полученные характеристики скейлинга параметров очаговых спектров позволяют пролить свет на малоизученные свойства очагов землетрясений. Как предложено в [8, 10, 4], параметр f_{c3} связан с тектонофизическими свойствами сейсмоактивного геологического разлома. Он может являться отражением конечной толщины разлома (точнее, зоны поврежденных пород вокруг него) и одновременно отражением наличия минимальной длины волны для поля прочности (шероховатости) на поверхности разлома. Как видно из выполненной работы, данные размерные параметры для сейсмоактивных разломов Камчатки близки к 300 м. Эта оценка получается перемножением характерного времени, связанного с f_{c3} , а именно $1/f_{c3}$, близкого к 0.1 с, и типичной скорости распространения разрыва, близкой к 3 км/с. Для больших очагов f_{c3} может достигать 3 Гц, а характерный размер - 500-1000 м, но разброс параметров велик и иногда большие очаги характеризуются не малой f_{c3} . Так землетрясение с $M=7.6$ в Фриули (Италия) имело, возможно, $f_{c3}=30$ Гц, а поздняя стадия развития очага события с $M=9$ в Японии (2011.03.11) имела f_{c3} около 8-10 Гц.

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

Список литературы

1. Гусев, А.А., Гусева, Е.М. // ДАН, 2014. Т.458 №1, С.88-91.
2. Гусев, А.А., Гусева, Е.М. // Физика Земли, 2015, в печати.
3. Aki, K. // In: Seismic Hazard in Mediterranean Region, ed. J. Bonin, M. Cara, M. Cisternas, R. Fantechi, Kluwer Academic Publ., 1988, P. 3-34.
4. Aki, K., //1996, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, v. 93, P. 3740-3747.
5. Aki K. // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 1217-1231.
6. Brune J.N. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4997-5009.
7. Faccioli E. 1986. //In S. Das, J. Boatwright, C. Scholz (Eds.): Earthquake source mechanics, Geophys. Monograph 37, M. Ewing Vol. 6, Am. Geophys. Union, Washington, pp. 297-310.
8. Gusev, A. A. // Geophys. J. R. Astr. Soc., 1983 v. 74, p. 787-808.
9. Gusev, A.A. //Pure Appl. Geophys. 2013, v. 170, p. 65-93.
10. Papageorgiou A.S., Aki K. // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1983, Part I: V. 73. P. 693-722; Part II: 73, 953-978.