А.А. Скоркина<sup>1,2</sup>, А.А. Гусев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, anna@emsd.ru <sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, <sup>3</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

## Введение

Теоретическая модель очагового спектра землетрясений, которая описывается характерными частотами и уровнями отдельных участков спектра, является важной информацией для прогнозирования сильных движений. Стандартной моделью очагового спектра землетрясения является модель « $\omega^{-2}$ » [5, 8], включающая плоский участок при низких частотах  $f(-f_0)$  и убывание по  $f^{-2}$  на высоких частотах. Эти участки разделены изгибом вблизи характерной (корнер) частоты,  $f_{c1} = f_c$ . В [8] отмечено, что упомянутый изгиб спектра может расщепляться на два, с корнер-частотами  $f_{c1}$  и  $f_{c2}$ , между которыми имеется участок спектра с промежуточным трендом, близким к  $f^{-1}$  В наблюдаемых спектрах имеется еще и верхний срез спектра ускорения (« $f_{max}$ ») [10], его обычно приписывают потерям на трассе распространения волны вблизи станции [6]. Но такой срез в ряде случаев обнаруживали и в спектрах, исправленных за потери на трассе. В [9, 12] сделано предположение, что этот срез, далее обозначаемый  $f_{c3}$ , определяется очагом. Вопрос о реальности этого излома является дискуссионным.

## Методика исследований

Система сейсмологических наблюдений, созданная на Камчатке к 2011 г., обеспечивает необходимый материал для изучения очагов землетрясений в области низких и высоких частот [4]. Для определения очаговых спектров были выбраны записи акселерометров, расположенных на скальных грунтах, а именно, на станциях: «Ходутка» (KDT), «Карымшина» (KRM), «Петропавловск» (PET), «Русская» (RUS), и «Шипунский» (SPN), с гипоцентральными расстояниями 50–220 км, диапазоном магнитуд – 4.0–6.8.

Расчеты спектров выполнялись с помощью специализированной диалоговой программы (рис. 1). Она позволяет визуализировать сглаженные спектры Фурье объемных волн в варианте спектра смещения, скорости и ускорения (параллельно), контролировать качество записей и спектров, определять диапазон частот с приемлемым отношением сигнал/шум, вносить поправки за затухание в среде, снимать отсчеты корнер-частот очаговых спектров.

Эмпирические спектры продольных и поперечных волн, полученные БПФ, приведенные к полупространству с помощью учета станционных спектральных поправок (привести все станции к «РЕТ»), затем приводились к очагу путем внесения поправки за затухание, сглаживались с постоянным шагом по логарифму частоты, и с шириной полосы 2/3 октавы. Параметры разреза для расчета поправок за импеданс были взяты из [2]. Используемая модель затухания:  $Q_{s}(f|r = 100 \text{ км}|) = 165 f 0.42$ ,  $k_{0S} = 0.016 \text{ c}$  [1]. Далее в интерактивном режиме с кривых сглаженных спектров снимались, при возможности, оценки корнер-частот. Записи с высоким уровнем шума, наложениями местных землетрясений (особенно характерных для роя), а также спектры событий, записанных менее чем тремя станциями, были исключены из анализа. Таким образом, удалось снять значения корнер-частот для 1538 спектров (845 – для Р волн и 693 – для S волн) для 313 землетрясений.

После получения оценок корнер-частот был проведен первичный анализ внутренней согласованности этих оценок. Сравнивали оценки, полученные несколькими способами.

Для уверенного выявления реальности третьего загиба спектра при  $f_{c3}$  и для демонстрации существенного вклада очага в формирование « $f_{max}$ » использовались отношения спектров пар землетрясений, с использованием записей, полученных одним и тем же прибором. Записи подбирались при сопоставимых гипоцентральных расстояниях (80–220 км), а некоторые искажения в отношениях спектров за счет различия потерь на трассах разной длины компенсировались. При делении спектров автоматически исключаются такие линейные искажения, как станционные спектральные аномалии (резонансы), а также

эффекты типа  $f_{max}$ , связанные с поглощением в среде в близкой окрестности станции, равно как и гипотетические неточности метрологии приборов. На высоких частотах отношение спектров, предсказываемое моделью « $\omega^{-2}$ », близко к постоянной. В реальности, когда значения  $f_{c3}$  для сравниваемых землетрясений не совпадают (типичный случай), отношения наблюденных спектров систематически имеют ожидаемый вид сглаженной ступеньки [11], что прямо указывает на нарушение модели « $\omega^{-2}$ », и в ряде случаем позволяет непосредственно оценить значения  $f_{c3}$  для каждого из сравниваемых очагов. Корректность подобных оценок подтверждается еще и тем фактом, что оценки  $f_{c3}$  для конкретного очага, полученные по разным станциям, обычно согласуются друг с другом.



Рис. 1. Трехкомпонентная запись ускорения на станции РЕТ при землетрясении 2013.05.19 15:58:37 (прямоугольником выделен участок записи, использованный для оценки спектра – компоненты Е и N для случая S волн) и соответствующий спектр S волны, представленный, справа налево, как спектр смещения, скорости и ускорения. На каждом графике светло-серая линия – спектр, приведенный к очагу путем введения коррекции за затухание. Ниже, темно-серая линия – исходный спектр записи (сглаженный). Еще ниже, тонкий пунктир – спектр шума в окне той же длительности. Черные ломаные построены интерактивно, точки излома дают оценки корнер-частоты

## Обсуждение результатов

На первом этапе составляли оценки  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$ , каждая из которых снималась с двух типов графиков (для  $f_{c1}$  – по графикам спектров d(f) и  $v(f) = 2\pi f d(f)$ ; для  $f_{c2}$  – по графикам спектров v(f) и  $a(f) = 2\pi f v(f)$ ). В случае идеальной или простой формы спектров оценки должны совпасть. Во всех четырех изученных случаях ( $f_{c1}$  по спектрам Р либо S волн,  $f_{c2}$  по спектрам Р либо S волн) разброс между оценками двух типов мал (в среднем, менее 0.04 десятичного логарифма или 10%), что в определенной мере подтверждает приемлемость принятой интерактивной методики снятия оценок корнер-частот.

На втором этапе сопоставляли оценки  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$ ,  $f_{c3}$ , определенные по спектрам Р и S волн на одной и той же станции (рис. 2). Надо отметить, что теория и опыт интерпретации не предсказывают близкого совпадения оценок. Для первой корнер-частоты обычное значение для отношения  $f_{c1}(\mathbf{P})/f_{c1}(\mathbf{S})$  – около 1.2-1.5, причем в среднем  $f_{c1}(\mathbf{P})$  и  $f_{c1}(\mathbf{S})$  пропорциональны друг другу. Полученные оценки ( $\langle f_{c1}(\mathbf{P})/f_{c1}(\mathbf{S}) \rangle = 1.20$ ) – в согласии с литературными. Соответствующие соотношения для  $f_{c2}$  и  $f_{c3}$  изучаются впервые, и для них не существует теоретических прогнозов. Проанализированные новые результаты ( $\langle f_{c2}(\mathbf{P})/f_{c2}(\mathbf{S}) \rangle = 1.38$ ) неплохо согласуются с идеей пропорциональности между  $f_{c2}(\mathbf{P})$  и  $f_{c2}(\mathbf{S})$ , но на фоне существенного разброса. Соотношение  $f_{c3}(\mathbf{P})$  и  $f_{c3}(\mathbf{S})$  также изучается впервые. Проанализированные данные указывают на слабую, но значимую пропорциональность данных величин, их отношение – около 1.45, а разброс аналогичен наблюдаемому для  $f_{c1}$ . Выявление пропорциональности между  $f_{c3}(\mathbf{P})$  и  $f_{c3}(\mathbf{S})$  и  $f_{c3}(\mathbf{P})$  и  $f_{c3}(\mathbf{S})$  и  $f_{c3}(\mathbf{S})$  имеет большое научное значение, так как указывает на реальность самого параметра  $f_{c3}$ .



Рис. 2. Сопоставление оценок слева направо первой,  $f_{c1}$ , второй,  $f_{c2}$  и третьей,  $f_{c3}$  корнер-частот, полученных по спектрам Р и S волн. Соотношение составляют 1.20, 1.38 и 1.45, соответственно. Во всех случаях данные указывают на пропорциональность между парами оценок, но на фоне существенного разброса



Рис. 3. Зависимость характерных частот  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$ ,  $f_{c3}$ , определенных по спектрам Р волн, от локальной магнитуды *ML*. На фоне большого разброса можно видеть, что данные  $f_{c1}$  примерно согласуются с гипотезой подобия, в то время как тренды для  $f_{c2}$ , и еще в большей степени для  $f_{c3}$ , этой гипотезе явно противоречат



Рис. 4. Отношение очаговых спектров пары землетрясений, записанных одинаковым набором станций (приборов) для демонстрации реальности природы очаговой  $f_{c3}$ . Левый и центральный рисунки представляют очаговые спектры (жирные линии), ниже наблюденные спектры (тонкий пунктир), еще ниже – уровень шума (точечный пунктир) пары землетрясений, записанных одинаковым набором станций (приборов). Правый рисунок – результат деления теоретических спектров, соответствующих осредненному очаговому спектру для каждого из двух землетрясений (обозначен жирным пунктиром на левом и центральном рисунке). Черная жирная линия соответствует результату деления моделей с тремя характерными частотами, черный пунктир – модели с двумя характерными частотами. Как видно из рисунка, теоретический спектр с тремя корнер частотами описывает точнее наблюденное спектральное отношение

Далее изучали среднесетевые оценки корнер-частот, полученные осреднением оценок по не менее чем трем станциям. (Разброс между станционными оценками – около 0.2 лог. ед.). На рис. 3 построена зависимость  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$ ,  $f_{c3}$  от локальной магнитуды *ML*. Обнаружено наличие приблизительно линейной связи между  $\lg f_{c1}(P)$  и *ML*, а также  $\lg f_{c1}(S)$  и *ML*. Данный результат не нов, но важен для контроля методики. Аналогичные тенденции приблизительно линейной зависимости от *ML* обнаружены также для:  $\lg f_{c2}(P)$ ,  $\lg f_{c2}(S)$ ,  $\lg f_{c3}(P)$  и  $\lg f_{c3}(S)$ .

Большой интерес представляла проверка вывода [2] о различии характера скейлинга для первой, второй и третьей корнер-частот (рис. 3). На фоне большого разброса можно видеть, что данные  $f_{c1}$  примерно согласуются с гипотезой подобия, в то время как тренды для параметра  $f_{c2}$ , и еще в большей степени для  $f_{c3}$ , этой гипотезе явно противоречат. Это предварительное наблюдение согласуется с выводами [2, 8].

Рассчитывались отношения очаговых спектров, которые наглядно демонстрируют реальность очаговой природы  $f_{c3}$ . Модель « $\omega^{-2}$ » предсказывает в этом случае почти постоянное отношение спектров, поскольку и станционные спектральные аномалии, и эффекты типа « $f_{max}$ », связанные с поглощением в среде вблизи станции, при делении сокращаются. В типичных случаях, когда значения  $f_{c3}$  для сравниваемых землетрясений не совпадают, отношения наблюденных спектров систематически имеют ожидаемый вид сглаженной ступеньки, что прямо указывает на нарушение модели « $\omega^{-2}$ », и позволяет непосредственно оценить значения  $f_{c3}$  для каждого из сравниваемых очагов. Одним из наиболее наглядных примеров стало отношение спектров для S волн пары землетрясений: 2012.06.09 12:02:43 (ML = 5.4,  $f_{c3} = 5.6$  Гц) и 2014.04.02 12:33:13 (ML = 4.3,  $f_{c3} = 12.5$  Гц), которые характеризуются ощутимой разницей не только между третьей характерной частотой  $f_{c3}$ , но и в магнитуде (рис. 4).

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. Оценка затухания поперечных волн по спаду спектра вблизи ст. «Петропавловск», Камчатка // Физика Земли. 2015.

2. Гусев А.А., Гусева Е.М., Павлов В.М. Моделирование движения грунта при Петропавловском землетрясении 24.11.1971 (М=7.6) // Физика Земли. №5. 2009. С. 29-38.

3. Гусев А.А., Гусева Е.М. Скейлинговые свойства характерных частот очаговых спектров землетрясений Камчатки // ДАН. 458(1). 2014. С. 88-91.

4. Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. №1. 2013. С. 18-40.

5. Aki, K. Scaling law of seismic spectrum // Journal of Geophysical Research. v. 72. 1967. P. 1217-1231.

6. Anderson, J.G., Hough, S.E. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies // Bulletin of the Seismological Society of America. v. 74. 1984. P. 1969-1993.

7. Boatwright, J. Detailed spectral analysis of two small New York state earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. v. 68. 1978. P. 1117-1131.

8. Brune, J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research. v. 75. 1970. P. 4997-5009.

9. Gusev, A.A. Descriptive statistical model of earthquake source radiation to an estimation of short-period strong motion // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. v. 74. 1983. P. 787-808.

10. Hanks, T.C. fmax // Bulletin of the Seismological Society of America. v. 72. 1982. P. 1867-1879.

11. Irikura, K., Yokoi T. Meaning of source controlled Fmax in the empirical Green's function technique based on  $\omega^{-2}$  scaling law // Annuals. No 34 (B-1). 1991. P. 177-189.

12. Papageorgiou, A.S., Aki, K. A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. 1. Description of the model // Bulletin of the Seismological Society of America. v. 73. 1983. P. 693-722.