

На правах рукописи



СКОРКИНА Анна Александровна

**ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КАМЧАТСКИХ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ МАГНИТУДНОГО ДИАПАЗОНА 3–6**

Специальность 25.00.10 – Геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Петропавловск-Камчатский – 2017

Работа выполнена в Камчатском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», во время обучения в заочной аспирантуре Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Научный
руководитель:

Гусев Александр Александрович,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт вулканологии и сейсмологии
Дальневосточного отделения РАН, заведующий
лабораторией сейсмологии и
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
старший научный сотрудник лаборатории методов
прогноза землетрясений

Официальные
оппоненты:

Шебалин Петр Николаевич,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт теории прогноза землетрясений и
математической геофизики РАН, главный научный
сотрудник лаборатории теории прогноза землетрясений

Ивашенко Алексей Илларионович,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
ведущий научный сотрудник лаборатории цунами
им. С.Л. Соловьева

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт динамики геосфер РАН**

Защита состоится 25 января 2018 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 при ИФЗ РАН по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте института www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, с подписью, заверенной печатью, в 2-х экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета кандидату геолого-минералогических наук Камзолкину Владимиру Анатольевичу.

Автореферат разослан

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Полуостров Камчатка, вместе с Курильскими островами – наиболее сейсмичный регион России. Здесь в 2005–2010 гг. была установлена современная сеть цифровых сейсмометрических приборов (акселерометров и велосиметров). Наличие массива материалов регистрации за несколько лет впервые позволило проводить систематические исследования очагов часто происходящих здесь слабых и умеренной силы землетрясений, из диапазона $M_w = 3–6$.

Предметом исследования настоящей работы являются параметры очаговых спектров (в диапазоне 0.2–30 Гц) камчатских землетрясений диапазона $M_w = 3–6$, что представляет интерес для изучения физики очага землетрясения, а также важно для решения ряда инженерно-сейсмологических задач. В частности, знание характеристик «скейлинга» (обобщенного подобия), для совокупностей очагов землетрясений дает важную информацию о пространственно-временной структуре очагового процесса.

При изучении спектральных параметров землетрясений обычно предпочтение отдается модели очагового спектра, известной как «модель Бруна», с единственной частотой излома, или «корнер-частотой», f_0 . Изучение спектров в предположении их более сложной структуры выполнялось отдельными сейсмологами (Гусев, Раутиан и др.), однако полученные в этом направлении результаты имеют предварительный характер. Так, если в наблюдательной сейсмологии при анализе сейсмограмм иногда исходят из наличия в очаговых спектрах, вместо f_0 , двух разнесенных изломов при f_{c1} и f_{c2} , то в теории механики очага землетрясения f_{c2} – не является общепризнанным параметром, хотя и находит отражение в ряде гипотез (Аки, Гусев, Дас).

Особый интерес представляет вопрос о частоте излома в высокочастотной части спектра ускорений, известной как f_{\max} . Несмотря на десятилетия изучения данного вопроса, он остается дискуссионным. Наиболее распространенным подходом к f_{\max} является ее определение как «самой высокой из наблюдаемых частот» в спектре записи ускорений. Отдельные сейсмологи пробуют расщепить вклады в формирование f_{\max} , выделяя: « f_{\max} очаговой природы» (или

третью корнер-частоту очагового спектра f_{c3}), и «станционную f_{\max} » (влияние грунтово-геологических условий вблизи приемника, или «вклад площадки», site effect). Однако, исследований, направленных на изучение « f_{\max} очаговой природы», или f_{c3} , с массовым определением f_{c3} недостаточно. С точки зрения теории механики очагов землетрясений вопрос также остается открытым.

Целью данной работы является установление свойств очаговых спектров камчатских землетрясений в диапазоне $M_w = 3-6$, изучаемых в рамках спектральной модели с тремя корнер-частотами (f_{c1} , f_{c2} и f_{c3}) по записям поперечных волн и кода-волн, полученных сетью цифровых приборов сильных движений (акселерометров).

В процессе выполнения диссертации для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести выборку акселерограмм и выполнить расчет спектров записей поперечных волн и кода-волн для сотен землетрясений диапазона $M_w = 3-6$. По спектрам записей восстановить очаговые спектры. Сопоставить очаговые спектры, найденные с использованием поперечных волн и кода-волн; путем сравнения оценок, полученных по данным двух родов, выполнить внутренний контроль оценок.

2. Для корректного сопоставления спектров, найденных по данным станций, установленных в пунктах с разными грунтово-геологическими условиями, определить эмпирические амплитудные стационарные поправки методом эталонной станции. Применить такие поправки для расчета очаговых спектров. Убедиться в согласии оценок очаговых спектров по разным станциям.

3. По очаговым спектрам определить спектральные параметры индивидуальных очагов: оценки трех корнер-частот (f_{c1} , f_{c2} , f_{c3}) и сейсмического момента M_0 ; значение M_0 пересчитать в моментную магнитуду M_w .

4. Для исследуемой совокупности очагов землетрясений установить параметры скейлинга для каждой их трех корнер-частот: $f_{c1}(M_0)$, $f_{c2}(M_0)$ и $f_{c3}(M_0)$.

5. Сравнить массовые оценки M_w камчатских землетрясений с независимыми оценками; установить для энергетического класса $K_{S1.2}^{\Phi 68}$ (или локальной магнитуды M_L) камчатских очагов типовую зависимость от M_w .

Научная новизна. Впервые для одного из регионов России проведено массовое исследование очаговых спектров землетрясений, с использованием цифровых записей, полученных сетью акселерометров. При этом впервые применен автоматический метод анализа спектров с определением трех корнер-частот (f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}) и сейсмического момента M_0 , с использованием, параллельно, поперечных волн и кода-волн. Используя набор спектральных оценок, полученных для сотен землетрясений по сети станций и двум типам исходных данных, установлен общий характер скейлинга $\{f_{c1}(M_0), f_{c2}(M_0), f_{c3}(M_0)\}$ для камчатских землетрясений в диапазоне $M_w = 3-6$.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. В подавляющей части очаговых спектров выявлено обычное присутствие « f_{\max} очаговой природы», или «третьей корнер частоты» f_{c3} , реальность которой многие годы подвергалась сомнению в мировой сейсмологии.

2. Для изученных очаговых спектров обнаружено, что тренды второй и третьей корнер-частот как функций сейсмического момента, $f_{c2}(M_0)$ и $f_{c3}(M_0)$, показывают, для каждой из них, противоречие между наблюдаемым относительно медленным трендом и более крутым трендом вида $f_c \sim M_0^{-1/3}$, который следовало бы ожидать, исходя из гипотезы простого подобия.

3. Для камчатских землетрясений диапазона $M_w = 3-6$ реализована методика определения моментных магнитуд с использованием очаговых спектров, что позволило провести уточнение регионального среднего соотношения между моментной магнитудой M_w , с одной стороны, и энергетическим классом $K_{S1.2}^{\Phi 68}$ (или локальной магнитудой M_L), с другой.

4. Обнаружено большое и ранее не отмечавшееся разнообразие спектральных стационарных аномалий для десятков камчатских сейсмических станций, причем сопоставимые оценки получены в широком диапазоне частот по трем различным методикам.

Научная и практическая значимость. Стандартной моделью очагового спектра является «модель Бруна» с единственной корнер-частотой f_0 . После изучения сотен очаговых спектров землетрясений Камчатки в частотном диапазоне 0.2–30 Гц обнаружено, что для подавляющей части землетрясений такая модель является непригодной. Ее расхождения с наблюдениями имеют следующий характер: во-первых, часто вместо одиночного излома при $f = f_0$ выделяются два излома при f_{c1} и f_{c2} ; во-вторых, очаговые спектры ускорений для основной массы очагов ограничены с высокочастотной стороны, и при этом можно определить соответствующие частоты излома, f_{c3} . При этом характер скейлинга для обеих частот (f_{c2} и f_{c3}) не согласуется с гипотезой простого подобия, предсказывающей, что $f_c \sim M_0^{-1/3}$. Данные факты уточняют наши представления о свойствах очаговых спектров, и должны в перспективе найти объяснение в систематической теории широкополосного очагового излучения.

Существенный практический результат работы – установление регионального типового соотношения $M_w - K_{S1.2}^{\Phi 68}$ (или $M_w - M_L$). Такое соотношение необходимо для формирования современных вариантов регионального каталога землетрясений, а составление методически выверенных каталогов – важная часть работ по оценке сейсмической опасности.

С точки зрения приложений к инженерной сейсмологии важно, что определены спектральные станционные аномалии для десятков станций Камчатки. Таким путем подтверждено представление о разнообразии фактических грунтовых свойств региона на широком диапазоне частот (0.2–30 Гц). Обычно нескальные станции дают в поправках максимум, со спадом на частотах выше 5–10 Гц. Поэтому практически важно выявление группы станций с поправкой, возрастающей с частотой. Другой полезный факт – обнаружение ограниченной применимости в условиях Камчатки метода Накамура («отношение H/V »), который в некоторых регионах успешно применяется при работах по сейсмическому микрорайонированию.

Достоверность полученных научных результатов определяется в первую очередь средствами внутреннего контроля, заложенными в методику анализа данных. К средствам перекрестной проверки относятся:

- проверка согласия между оценками спектральных параметров M_0 , f_{c1} , f_{c2} , f_{c3} , полученных в диалоговом режиме (спектры определены с помощью дискретного преобразования Фурье) и в автоматическом режиме (спектры определены с помощью многополосной фильтрации);
- проверка согласия между названными оценками, полученными из спектров записей поперечных волн, с одной стороны, и кода-волн, с другой;
- проверка согласия между названными оценками, полученными из спектров записей, зарегистрированных на разных станциях.

В отношении таких результатов, как сейсмические моменты M_0 и моментные магнитуды M_w , их достоверность подтверждается результатами сопоставления с аналогичными оценками, определенными с помощью других независимых методик.

Исходный материал. В работе использовались цифровые записи, полученные сетью приборов сильных движений Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, а также параметры землетрясений и магнитуда M_L (или $K_{S1.2}^{\phi 68}$) из Каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов за 2010–2016 гг.

Личный вклад. В основу диссертации положены исследования, проведенные автором. Основные результаты, полученные соискателем лично, включают: составление литературного обзора по тематике диссертации; создание коллекций акселерограмм; участие в тестировании новых программных средств; анализ спектров в диалоговом режиме; проведение массовых расчетов спектров в автоматическом режиме, систематическая проверка отсутствия существенных расхождений между оценками спектральных параметров, полученных разными подходами; создание или адаптация программ для статистического анализа результатов, получение характеристик точности оценок, проверка согласия оценок сейсмических моментов с независимыми оценками; проведение регрессионного анализа для изучения скейлинга корнер-частот и для уточнения регионального типового соотношения M_w – M_L (или M_w – $K_{S1.2}^{\phi 68}$); а также графическое представление окончательных результатов.

Апробация работы. Основные результаты исследования были представлены на семинарах ФИЦ ЕГС РАН (в Камчатском филиале, г. Петропавловск-Камчатский, и в Центральном отделении, г. Обнинск), а также на международных и всероссийских конференциях. В их числе: 26th IUGG General Assembly (г. Прага, Чехия, 2015); 9th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes (г. Фэрбанк, США, 2016); 35th ESC General Assembly (г. Триест, Италия, 2016); 11th ASC General Assembly (г. Мельбурн, Австралия, 2016); Научные конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН (г. Москва, 2015, 2016, 2017); Четвертая молодежная тектонофизическая школа-семинар (г. Москва, 2015); Пятая и шестая научно-технические конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (г. Петропавловск-Камчатский, 2015, 2017) и Уральские молодежные научные школы по геофизике (Пермь, 2015, 2017).

Работа была частично поддержана грантом РФФИ № 14-17-00621.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 22 публикациях; из которых две – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК (журналы «Геология и геофизика» и «Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле»). Еще одна публикация принята к печати и запланирована в №1 (январь) за 2018 г. в журнале «Физика Земли».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (179 наименований). Общий объем работы составляет 130 страниц машинописного текста, включая 36 рисунков и 8 таблиц.

Благодарности. Автор искренне благодарна научному руководителю д.ф.-м.н. А.А. Гусеву за обучение, внимание и неоценимую помощь на всех этапах выполнения работы. Также автор выражает признательность к.ф.-м.н. В.М. Павлову, к.ф.-м.н. И.Р. Абубакирову, Е.М. Гусевой, к.ф.-м.н. Д.В. Чеброву, д.ф.-м.н. О.В. Павленко, д.ф.-м.н. Ф.Ф. Аптикаеву, д.ф.-м.н. А.Д. Завьялову, к.ф.-м.н. И.П. Габсатаровой, к.ф.-м.н. Н.В. Петровой, д.ф.-м.н. В.А. Салтыкову, к.ф.-м.н. Р.А. Дягилеву, к.т.н. В.А. Рашидову, к.ф.-м.н. В.В. Погорелову.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, основные научные положения, выносимые на защиту, а также вопросы научной и практической значимости исследования.

В первом разделе **первой главы** приведен обзор современных представлений об очаговых моделях землетрясений и их спектрах, а также описаны важные объекты исследования, а именно: «корнер-частота», « f_{\max} », сейсмический момент M_0 , «скейлинг», «простое подобие». Во втором разделе первой главы собрана необходимая информация об уровне изученности землетрясений района исследования и о состоянии камчатской сети цифровых приборов, в первую очередь, акселерометров.

Параметризация очага землетрясения и очагового спектра. Для протяженного очага традиционной моделью является плоский сдвиговый разрыв (Аки, Ричардс). Кинематически он описывается вектором подвижки, или дислокации, $D(t)$. Этот протяженный очаг на расстояниях, существенно превышающих его размер, может быть описан через эквивалентный точечный дипольный силовой источник, характеризуемый тензором сейсмического момента.

Эквивалентный точечный источник имеет временную функцию:

$$\dot{M}_0(t) = \mu \int_{\Sigma} \dot{D}(t) dS, \quad (1)$$

которую будем называть временной функцией источника или очаговой функцией, где μ – модуль сдвига, S – площадь очага, а точка обозначает дифференцирование по времени t . Ее спектр Фурье,

$$\Omega(\omega) = \int_0^{\infty} e^{-i\omega t} \dot{M}_0(t) dt, \quad (2)$$

будем называть очаговым спектром смещений (ОСС), часто подразумевая его абсолютную величину (модуль); $\omega = 2\pi f$. Из формул (1) и (2) следует, что

$$\int_0^{\infty} \dot{M}_0(t) dt = M_0, \quad (3)$$

$$\Omega(\omega) \Big|_{\omega=0} = M_0, \quad (4)$$

где Ω – спектральная амплитуда, а M_0 – скалярный сейсмический момент.

Канамори предложил использовать M_0 для определения моментной магнитуды M_w (первая шкала магнитуд, связанная с физическими параметрами, т.е. с параметрами «разлома»):

$$M_w = 2/3 (\lg M_0 [\text{Н}\cdot\text{м}] - 9.1). \quad (5)$$

Непосредственную информацию об очаговых спектрах дают поверхностные и объемные, в частности, поперечные волны (Аки, Брун). В идеальном случае форма импульса объемной волны просто воспроизводит временную функцию источника (1); в реальном случае пропорциональность наблюдается для спектров: между спектрами объемных волн и очаговыми спектрами (2). Несколько позднее было показано, что для оценки очагового спектра можно использовать спектры кода-волн (Аки, Чуэ, Раутиан, Халтурин).

В теории, функция очагового спектра смещений (ОСС) в двойном логарифмическом масштабе может быть охарактеризована с использованием параметров плоского низкочастотного (НЧ) участка спектра, с уровнем Ω_0 (4), и параметров наклонной прямой в области частот выше точки излома. Так, например, в «модели Бруна» плоский ($\sim f^0$) НЧ участок спектра и область убывания по f^{-2} на высоких частотах (ВЧ) разделены изломом вблизи корнер-частоты $f = f_0$.

Фундаментальным ограничением применения «модели Бруна» является неспособность описать наблюдаемые спектры на всем диапазоне частот (Аки, Гусев, Ирикура, Раутиан). Во-первых, часто вместо одиночного излома при $f = f_0$ выделяются два излома при f_{c1} и f_{c2} ; во-вторых, очаговые спектры ускорений (ОСУ), получаемые из ОСС умножением на ω^2 , всегда ограничены с высокочастотной стороны, и при этом можно определить соответствующие частоты излома, f_{\max} .

В рамках «модели Бруна» f_{\max} объясняют ростом с частотой потерь на трассе луча (Андерсон, Хох), тем самым, описывая f_{\max} через «станционную f_{\max} ». После учета потерь, восстановленный из наблюдений ОСУ должен оказаться плоским, на частотах $f > f_0$ (или $f > f_{c2}$). Тем не менее, систематически наблюдаются случаи, когда f_{\max} обнаруживается на очаговых спектрах ускорений, потери в которых уже учтены. В таких случаях появляется возможность в спектрах выделить третью корнер-частоту очагового спектра f_{c3} , или « f_{\max} очаговой природы». Наличие вклада очага в формирование f_{\max} обычно признается, однако вопрос изучен недостаточно.

При анализе наблюдаемых очаговых спектров важным объектом исследования является изучение их скейлинга (обобщенного подобия), или зависимостей каждой из корнер-частот от сейсмического момента: $f_{c1}(M_0)$, $f_{c2}(M_0)$, $f_{c3}(M_0)$. Если все очаги являются подобными, то амплитуда, измеренная на любой единичной частоте, характеризует весь спектр (Аки). При этом, в случае простого подобия, $f_0 \sim M_0^{1/3}$, как

и $f_{c1} \sim f_{c2} \sim f_{c3} \sim M_0^{1/3}$. К настоящему времени, несмотря на накопившийся наблюдательный материал, вопрос о применимости гипотезы подобия к сейсмологическим данным остается открытым, поскольку известны как случаи, согласующиеся с гипотезой подобия, так и случаи, ей противоречащие.

Обзор работ по изучению спектров землетрясений Камчатки. Ранее, в 1970–1980 гг. Штейнбергом, Зобиним и Гусевым был проведен ряд исследований спектров субдукционных и вулканических землетрясений Камчатки, рассчитанных по ограниченному объему оцифрованных аналоговых записей. Систематическая обработка записей и их анализ (в терминах максимальных ускорений) начаты в работах Гусева и Петухина в 90–е годы. В рамках этих работ была произведена обработка нескольких десятков оцифрованных аналоговых записей сильных движений 1969–1993 гг. с $M_{LH} = 4.0–7.8$.

Постановка задачи исследования. С появлением сети цифровых акселерометров на Камчатке впервые возникла возможность систематически изучить свойства местных землетрясений, умеренных и слабых, на материале достаточного объема и качества. Поэтому был сформулирован предмет исследования – установление типичных для региона спектральных параметров землетрясений (f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}) как функций сейсмического момента M_0 . Далее необходимо провести анализ полученных оценок f_{c3} (« f_{\max} очаговой природы»), поскольку этот параметр не определяется рутинно (общепринятый подход к анализу наблюдений – в рамках «модели Бруна» с f_0). И одновременно с этим, отработать методику массового определения значений M_0 и M_w по уровню низкочастотной ветви очагового спектра смещений Ω_0 .

Во **второй главе** описана известная методика восстановления очаговых спектров, полученных по записям поперечных волн и кода-волн; и описание наборов исходных данных, использованных при счете. Сейсмические колебания в приемнике определяются тремя факторами: излучателем – очагом землетрясения, средой распространения, и локальными грунтово-геологическими условиями в месте установки сейсмической станции. В разделах 2.1 рассмотрено поэтапно формирование спектра группы поперечных волн в цепочке «очаг–среда–грунт». На каждом из этих этапов формируется определенный спектральный множитель; выбор их значений описан в разделе 2.2. Набор этих множителей позволяет выразить спектр в приемнике через спектр источника (прямая задача), а обращение этого выражения позволяет оценить спектр источника через спектр зарегистрированного сигнала (обратная задача).

Методика восстановления и анализа очаговых спектров, реализованная в виде компьютерных программ в Matlab, алгоритм которых разработан Гусевым, во многом, следует традициям Аптекман, Раутиан и др.

Сейсмический сигнал: случай однородной среды без потерь. Смещения в объемной волне в этом случае можно записать как

$$D(t) = \mathbf{A} \dot{M}_0(t - r/c), \quad (6)$$

где \mathbf{A} – амплитуда; r – (гипоцентрально) расстояние; c – скорость волны; функция $\dot{M}_0(t)$ определена формулой (1) – это скорость изменения функции сейсмического момента точечного источника (seismic moment rate). Приведем выражение для амплитуды \mathbf{A} в дальней зоне для случая поперечных (S) волн в однородной изотропной безграничной среде (Аки, Ричардс):

$$\mathbf{A} = \frac{\mathbf{R}_{\theta\varphi}(S)}{4\pi\rho c_s^3 r}, \quad (7)$$

где c_s – скорость S -волн; ρ – плотность среды; $\mathbf{R}_{\theta\varphi}$ – диаграмма направленности S -волн.

И излучаемая временная функция источника (1), и соответствующие спектры (2) зависят от положения луча к приемнику на фокальной сфере. В настоящей работе этой зависимостью пренебрегали, и, в сущности, изучали параметры, осредненные по фокальной сфере. Это упрощение почти неизбежно при плохо известных механизмах региональных очагов; однако, как было показано в ряде других работ, в случаях, когда механизмы были известны, их учет не снижал разброса результатов.

Переход от стационарного спектра к очаговому спектру. В реальных условиях имеет место несколько дополнительных к формуле (7) эффектов, которые будем описывать через дополнительные множители к (7). Рассмотрим их.

I-1. Эффект свободной поверхности, множитель $C_{11} \approx 2.0$.

I-2. Проектирование вектора смещения в S -волне на направление компоненты приемника; принимали $C_{12}^2 = 0.5$.

I-3. Геометрическое расхождение учтено как множитель $C_{13} = G(r)/r$, причем $G(r) = 1$, $C_{13} = 1/r$, что уже предусмотрено в (7). Дополнительное искривление лучей в данной работе не учитывалось.

II-1. Влияние разницы импедансных характеристик (акустических жесткостей) среды вблизи источника («0») и приемника («1») $C_{21}(f) = (c_s^{(0)}\rho^{(0)} / c_s^{(1)}\rho^{(1)})^{0.5}$. В данной работе вклад фактора $C_{21}(f)$ учитывается с помощью «четверть-волнового» приближения.

II-2. Частотно-зависимые условия регистрации вблизи приемника, которые могут формироваться, например, за счет вклада от верхней части разреза, локальной геологии, топографического эффекта. Этот фактор, $C_{22}(f)$, еще называют «спектральный отклик станции», и он детально обсуждается в пятой главе. Этот фактор оценивали эмпирически, принимая $C_{22} = 1$ для «эталонной» станции с жестким скальным грунтом – «Петропавловск» (PET).

Поглощение в среде (неупругие потери), потери на рассеяние (на большие углы), эффекты многолучевого распространения и обмена на границах были учтены совместно, в рамках модели затухания, полученной для района исследования ранее Гусевым и Гусевой. А именно, суммарные потери охарактеризованы параметром $\kappa = t/Q = r/cQ$. Для реальной среды считали, что κ имеет две компоненты

$$\kappa = \kappa_0 + \kappa_v = \kappa_0 + \frac{r}{cQ(f, r)}, \quad (8)$$

где $Q(f, r)$ характеризует потери на пути распространения волны, за исключением тонкого слоя непосредственно под станцией, а κ_0 описывает потери в этом слое. Принимали, что функция добротности в формуле (8) имеет вид

$$Q^{-1}(f, r) = Q_0^{-1} \left(\frac{f}{f_{bas}} \right)^{-\gamma} \left(1 + \frac{q(r - r_{bas})}{r_{bas}} \right), \quad (9)$$

причем при $f < f_{bas}$, $Q^{-1}(f, r) = Q^{-1}(f_{bas}, r)$. Рабочие параметры: $f_{bas} = 1$ Гц, $r_{bas} = 100$ км, $Q_0 = 156$, $\gamma = 0.56$, $q = -0.08$ и $\kappa_0 = 0.03$ с. Таким образом, в принятой модели формирования спектра сигнала коэффициент \mathbf{A} в формуле (6) заменяется на спектральную функцию $\mathbf{A}_2(f) = C_t(f) \mathbf{A}$, где

$$C_t(f) = C_{11} \cdot C_{12} \cdot C_{13} \cdot C_{21}(f) \cdot C_{22}(f) \cdot \kappa. \quad (10)$$

В практических расчетах наблюдаемый спектр умножен на коэффициент приведения $C_r(f) = r / C_t(f)$, в результате полученные спектры были приведены к стандартному гипоцентральному расстоянию $r_0 = 1$ км.

Далее в работе учет фактора $C_r(f)$ по описанной выше схеме назовем «**первой схемой учета потерь**». Также использовали более аккуратный подход к учету фактора $C_r(f)$, а именно – двухшаговую процедуру или «**вторую схему учета потерь**». Во «второй схеме учета потерь» спектр записи, который оценен для набора частотных полос, пересчитывается в очаговый спектр в два этапа. Сначала спектр S -волн в источнике пересчитывается в спектр S -волн на фиксированном расстоянии приведения $r_{пр} = 50$ км; для чего используются заранее найденные для каждой полосы эмпирические функции затухания:

$$S_{ij(cb), 50} = (B_{S(cb)}(50) / B_{S(cb)}(r_{ij})) \cdot S_{ij(cb)}(r_{ij}), \quad (11)$$

где $S_{ij(cb)}$ – уровень спектра в полосе с осевой частотой f_{cb} , записанный на станции номер j при землетрясении номер i , r_{ij} – гипоцентральное расстояние для станции j при землетрясении i ; $B_{S(cb)}(r_{ij})$ – нормированная функция затухания спектра для полосы f_{cb} ; и $S_{ij(cb),50}$ – приведенный спектр. Дальнейший пересчет от принятого $r_{np} = 50$ км к окрестности приемника и далее к очагу выполняется согласно первой схеме учета потерь. Отметим, что r_{np} должен находиться в пределах уверенного определения эмпирической калибровочной кривой, что в нашем случае возможно только на расстояниях более 50 км из-за свойств пространственного распределения сейсмичности района исследования.

Третья глава посвящена методике определения параметров очаговых спектров (три корнер-частоты $\{f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}\}$ и сейсмический момент M_0) и анализу их свойств, для камчатских землетрясений. Были применены два режима работы – диалоговый (на начальном этапе работы, раздел 3.1) и автоматический (на втором этапе, раздел 3.3). Оба режима работы осуществлялись с помощью комплекса программ, реализованных в Matlab.

Диалоговый режим определения трех корнер-частот. Целью первого этапа работ являлась по возможности аккуратная характеристика наблюдаемых спектров небольшого количества умеренных землетрясений. В этом режиме оценки корнер-частот были сняты с очаговых спектров с помощью специализированной диалоговой программы (рис. 1). Суммарно, обработаны >1200 спектров S -волн от >350 землетрясений с $M_L = 4$ –6. Используются участки спектров при отношении сигнал-шум (С/Ш) более 2.5 (по амплитуде). В отношении f_{c3} были исключены случаи, когда спектр нельзя было уверенно восстановить в достаточно широкой полосе частот, или когда выше возможной частоты среза спектр ускорений (ОСУ) спадает недостаточно четко. Ясное суждение о f_{c3} сформировано для 89% спектров; среди этого массива данных, в 92% случаев можно было получить численную оценку f_{c3} , а в оставшихся 8% случаев в пределах полосы до 25 Гц наблюдался плоский участок ОСУ.

Снятие оценки f_{c1} нередко также вызывало затруднения. Вероятная причина проблем – наличие на низких частотах заметного вклада поверхностных волн. Сомнительные случаи (около 35%) были исключены. Значение f_{c2} удалось снять всегда. Нередки случаи, когда $f_{c1} = f_{c2}$ или $f_{c2} = f_{c3}$.

Определив значения корнер-частот очаговых спектров, для каждой из 1252 пар землетрясение–станция был сформирован (не всегда полный) комплект $\{f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}\}$, с суммарным числом оценок 839, 1252 и 1028, соответственно: от 183 до 248 комплектов на каждой из шести станций. После получения оценок корнер-частот была проведена проверка их внутренней согласованности (раздел 3.1.3), поскольку

важным является вопрос о том, насколько полученные оценки f_{c1} , f_{c2} и f_{c3} отражают именно свойства очага; не являются ли они фиктивным результатом, отражающим случайный шум (флуктуации) данных. Особенно важен данный вопрос в отношении параметра f_{c3} , для которого сама его реальность долгие годы не являлась признанной в широких кругах сейсмологов.

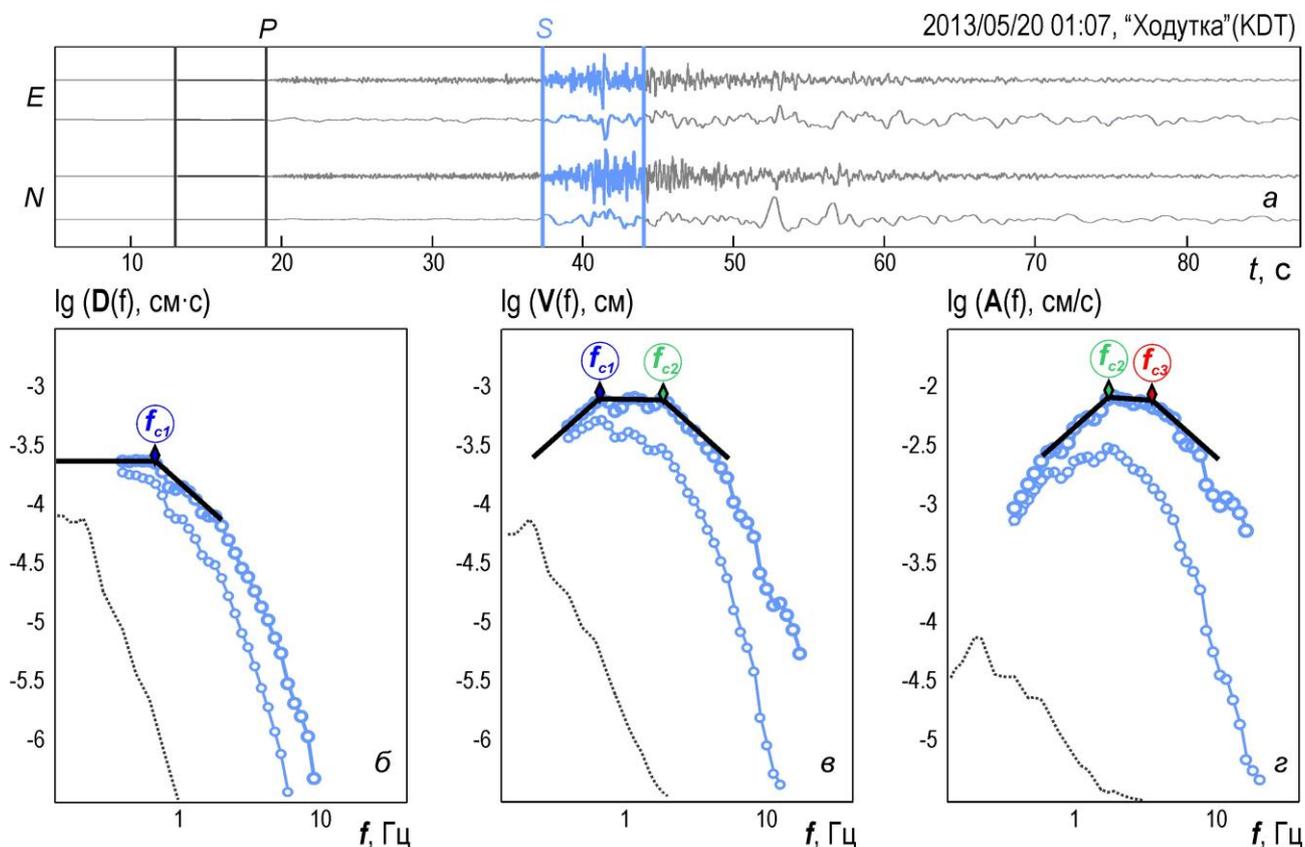


Рис. 1. Пример обработки спектра S -волны в диалоговом режиме (событие 2013/05/20 в 01:07 с $M_L = 5.8$ и $H = 55$ км): a – записи ускорений и смещений на горизонтальных компонентах станции KDT, $r = 160$ км; участки цифровки группы S -волн и шума выделены парами вертикальных линий. Ниже графики спектров: b – смещений, v – скоростей и z – ускорений. Кривые в b , снизу вверх: спектр шума; смещений, приведенное к $r_0 = 1$ км без поправки на потери; $rD_0(f)$; и то же, с поправкой, $(D(f))$. Черная ломаная, приближающая $D(f)$, построена интерактивно. В v и z – аналогичные кривые и ломаные для $V(f) = (2\pi f)D(f)$ и $A(f) = (2\pi f)^2 D(f)$. Изломы соответствующих ломаных дают оценки: корнер-частоты f_{c1} на графике $D(f)$; f_{c1} (повторно) и f_{c2} на графике $V(f)$; и f_{c2} (повторно) и f_{c3} на графике $A(f)$

Проверка реальности параметра f_{c3} или « f_{\max} очаговой природы». Такая проверка осуществлялась с помощью двух подходов – изучением межстанционной корреляции оценок f_{c3} и методом отношений спектров двух землетрясений, записанных одной и той же станцией. Выявлено, что для каждой из пяти изученных пар станций, отклонение коэффициента корреляции от нуля высоко значимо, что подтверждает наличие линейной связи.

В качестве дополнительного аргумента в пользу реальности f_{c3} применен метод отношения спектров двух землетрясений с сопоставимыми гипоцентрными расстояниями, но при этом ощутимо различными значениями f_{c3} . Важно, что в произведении множителей (10) сократится множитель, содержащий «станционную f_{max} ». Вклад именно этого фактора – главный потенциальный источник искажений при оценке f_{c3} . Удалось показать, что теоретическое отношение спектров, полученное для моделей, включающих параметр f_{c3} , явно лучше описывает найденные эмпирические отношения спектров, в сравнении с аналогичным теоретическим отношением, полученным в рамках спектральной «модели Бруна» (без f_{c3}).

Автоматическое определение спектральных параметров. В этом режиме для определения логарифма сейсмического момента $\lg M_0$ и трех корнер-частот (f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}) было применено прямое определение корнер-частоты через частоту среза соответствующего спектра относительно избранного опорного уровня (рис. 2).

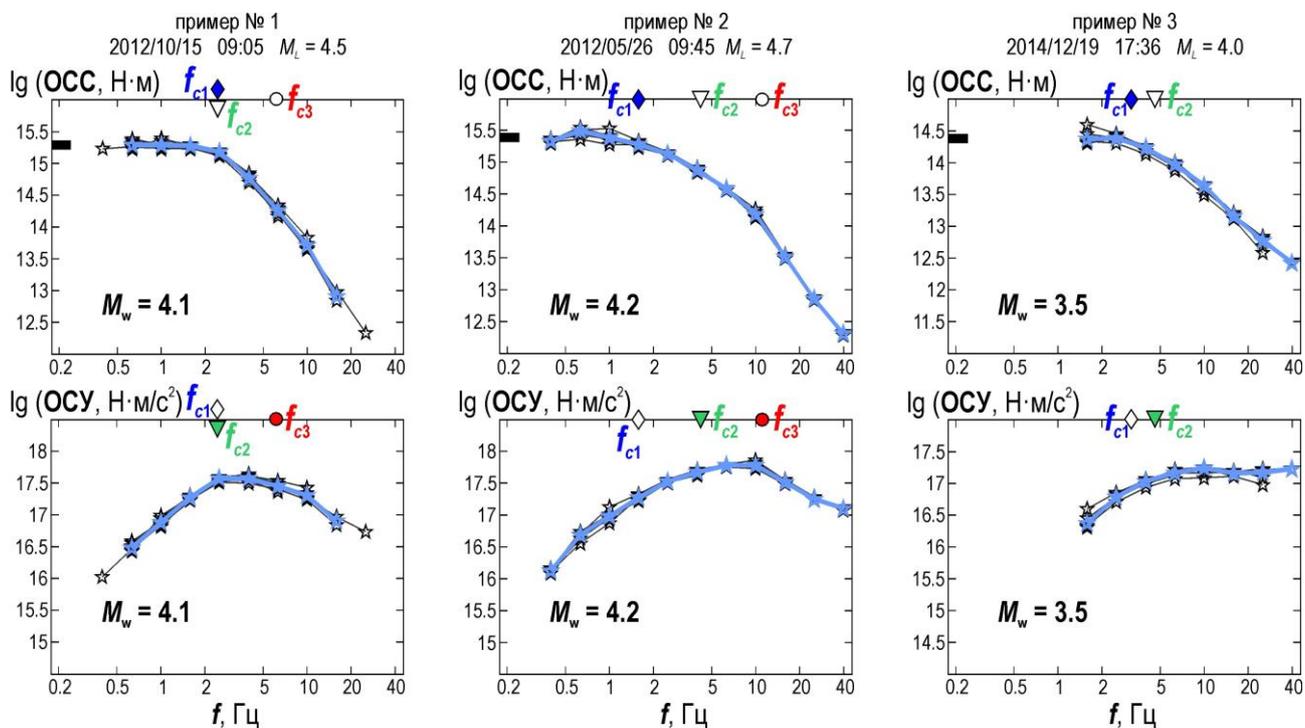


Рис. 2. Примеры пар восстановленных очаговых спектров смещений (ОСС) и ускорений (ОСУ) и результатов автоматического определения логарифма сейсмического момента $\lg M_0$ и трех корнер-частот (f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}). Символ корнер-частоты выделен заливкой там, где он определялся: f_{c1} – на ОСС, f_{c2} и f_{c3} – на ОСУ. Жирная черточка у оси ординат – оценка M_0 по данному спектру. В примере № 1 – автоматически сняты значения M_0 и всех трех корнер-частот, однако $f_{c1} = f_{c2}$. В № 2 – все три корнер-частоты различны. В № 3 – f_{c3} не выявляется (спектр ускорений имеет площадку типа «модели Бруна»)

Было обработано >4000 спектров от >600 землетрясений с $M_w = 3-6$ по записям восьми станций. В качестве входных данных автоматического режима используется очаговый спектр в виде набора уровней амплитудного спектра в пределах каждой из

12 частотных полос, с осевыми частотами от 0.25 до 40 Гц, расположенных с шагом 0.2 по логарифму частоты, и шириной каждой полосы, составляющей 0.2 логарифмической единицы (аналог технологии Запольского). Для снятия f_{c1} , в качестве опорного уровня был выбран уровень площадки обычного очагового спектра (смещений), а верхний срез снимается на определенном уровне (-3дБ по мощности, или 70.7% по амплитуде относительно опорного уровня). Для снятия f_{c2} и f_{c3} был использован очаговый спектр ускорений. В качестве опорного был принят уровень его максимума в этом спектре, а f_{c2} и f_{c3} определены аналогичным образом, соответственно, как частоты среза со стороны низких и высоких частот. В результате был сформирован (не всегда полный) комплект (f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}) , с суммарным числом оценок 477, 467 и 397, что составило 75%, 74% и 63% случаев, соответственно (рис. 3). Таким образом, в автоматическом режиме также в большинстве случаев подтверждено наличие f_{c3} , или « f_{\max} очаговой природы».

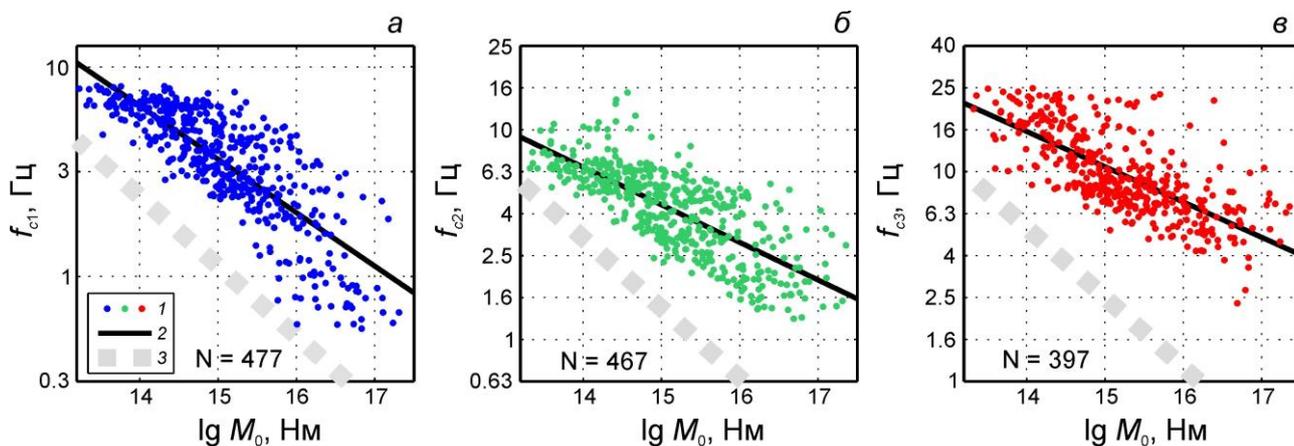


Рис. 3. Зависимости от сейсмического момента $\lg M_0$ для характерных частот $\lg f_{c1}$ (а), $\lg f_{c2}$ (б) и $\lg f_{c3}$ (в), определенных по спектрам S -волн (1). Черные линии (2) получены ортогональной регрессией. Линии (3) с наклоном $-1/3$ (уровень произвольный) показывают ожидаемый вид тренда согласно гипотезе подобия. Видно, что данные по f_{c1} примерно следуют такому тренду, в то время как тренды для f_{c2} , и еще в большей степени для f_{c3} , противоречат гипотезе подобия

Изучение скейлинговых свойств трех corner-частот как функций от сейсмического момента. Обычная гипотеза подобия очагов разного размера (магнитуды), предсказывает значение $\beta_k = 1/3$. Для f_{c1} наблюдаемый скейлинг находится в приблизительном согласии с этой гипотезой (см. рис. 3а). Для f_{c2} получены оценки показателя скейлинга $\beta_2 \approx 0.18$, что указывает на выраженное нарушение подобия. Для f_{c3} , $\beta_3 = 0.11-0.17$, что также нарушает подобие, и, по-видимому, в еще большей степени. На графиках рассеяния $f_{ck}-M_0$ (см. рис. 3) точки расположены не как однородные облака, а как комбинация нескольких групп, что позволяет предположить неоднородность данных. Детальное изучение тонкой

структуры скейлинга корнер-частот в условиях Камчатки – дело будущего. Однако можно считать доказанными основные выводы изучения скейлинга – об отсутствующем или ограниченном отклонении β_1 от предсказаний гипотезы подобия, и одновременно о четко выраженном отклонении такого рода для β_2 и β_3 .

В четвертой главе описана процедура массового определения сейсмических моментов M_0 и моментных магнитуд M_w для камчатских землетрясений, выполнение проверки качества полученных оценок путем их сравнения между собой и с независимыми оценками, а также установление корреляционной связи между M_w и $K_{S1.2}^{\phi 68}$ (или M_L).

Для определения сейсмического момента M_0 по сейсмическим данным существует два основных подхода: оценить компоненты тензора момента путем решения обратной задачи, для чего провести инверсию широкополосных волновых форм с использованием синтетических сейсмограмм и использовать уровень площадки очагового спектра смещений Ω_0 (4) по данным объемных волн. Выполненный автором массовый расчет очаговых спектров смещений позволил применить второй подход.

Были опробованы три методики, которые отличаются способом расчета спектра или типом используемых волн (S или кода). В первой из методик, код «А», использован расчет спектра для группы S -волн, использующий дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и «первую схему учета потерь»; снятие параметров выполнялось в диалоговом режиме (см. рис. 1). Обозначим полученные оценки M_w как M_w^{SF} , где « S » соответствует исходному типу данных (S -волны), а « F » – методу расчета спектра (ДПФ, *Fourier*). В методике «Б» при расчете спектра применены многополосная фильтрация группы S -волн и «вторую схему учета потерь»; снятие параметров было выполнено в автоматическом режиме. Такие оценки обозначим M_w^{SB} , где « B » – полосовая фильтрация (*Band*). Поясним, что различие между методиками «А» и «Б» в основном техническое: для идеальных условий теория (равенство Парсевалея) гарантирует идентичность спектров записей, полученных с помощью преобразования Фурье и с помощью анализа выходных сигналов гребенки частотных полосовых фильтров. В методике «В» исходным для оценки очагового спектра является спектр мощности кода-волн (CS) на фиксированном запаздывании от времени в очаге. Причем спектр получен на основе многополосной фильтрации кода-волн (см. рис. 2); а для пересчета наблюдаемого спектра в очаговый использовали, как и в «Б», «вторую схему учета потерь». Далее в автоматическом режиме выполнено снятие параметров очаговых спектров, и в частности их НЧ уровня, Ω_0 . Такие оценки обозначим M_w^{CB} , где « C » – кода-волны (*Coda*). Важное

преимущество методик «Б» и «В», в сравнении с методикой «А» – возможность автоматизации.

В методике «А» оценка уровня Ω_0 выполнена в диалоговом режиме для данных каждой станции; затем стационарные оценки осреднялись. В автоматических методиках «БВ» стационарные оценки очаговых спектров сначала осредняли, а затем анализировали среднесетевой очаговый спектр, по которому и были определены среднесетевые оценки Ω_0 . Такие среднесетевые оценки получены в 86%, 57% и 61% случаев методиками «А» (M_w^{SF}), «Б» (M_w^{SB}) и «В» (M_w^{CB}), соответственно, для 890, 589 и 636 землетрясений. В среднем, только в двух из трех случаев автоматическая процедура («БВ») сочла надежной площадку в НЧ части очагового спектра смещений; и лишь в таких случаях был определен ее уровень (см. рис. 2).

Далее из уровня Ω_0 была найдена оценку логарифма сейсмического момента $\lg M_0$ (Н·м), по формуле:

$$M_0 = \frac{\Omega_0 4\pi\rho r_0 c_s^3}{0.63 \times 2.0}, \quad (12)$$

где Ω_0 – уровень площадки спектра полного вектора смещения S -волны (м·с), приведенного к условиям однородного упругого полупространства, ρ – плотность среды (кг/м^3), r_0 – стандартное r (м), c_s – скорость S -волн (м/с), 0.63 – среднеквадратическая по фокальной сфере диаграмма направленности для полного вектора S -волны, и 2.0 – коэффициент, учитывающий эффект свободной поверхности.

Проверка согласия полученных оценок M_0 и M_w . Проведены парные сравнения двух среднесетевых оценок для двух методик, для чего оценивали параметры μ и σ , где μ – средняя разность оценок магнитуд, σ – стандартное отклонение этой разности. В качестве эталонной магнитудной оценки выбраны M_w^{RSMT} (полученные применением первого подхода, по данным сети цифровых велосиметров, Павловым и Абубакировым в 2016 г.). Все региональные оценки M_w (средние по станциям) оказались сопоставимы между собой: для 139 / 76 / 97 пересечений $M_w^{SF} / M_w^{SB} / M_w^{CB}$ с M_w^{RSMT} , $\mu = -0.09 / -0.02 / -0.01$, $\sigma = 0.28 / 0.22 / 0.23$ (рис. 4а).

Также был изучен межстанционный разброс для каждой из методик; находили σ' – оценку среднеквадратичной точности стационарных оценок M_w . Для 425 / 589 / 636 оценок $M_w^{SF} / M_w^{SB} / M_w^{CB}$ (полученных осреднением не менее чем по трем станциям), были получены $\sigma' = 0.09 / 0.18 / 0.08$.

Установление связи M_w , с одной стороны, и $K_{S1.2}^{\Phi 68}(M_L)$, с другой. Большой практический интерес имеет сопоставление оценок M_w с локальной магнитудой M_L ($K_{S1.2}^{\Phi 68}$). Теория и многие эмпирические исследования позволяют ожидать, во-первых,

отклонения данной связи от линейности, а, во-вторых, в случае линейности или слабой нелинейности, отклонения углового коэффициента полученной прямой связи от 1.0. Однако оказалось (рис. 4б, в), что оба эти предположения не выполняются. Во-первых, предположение о линейной связи M_L и M_w , в изученном диапазоне $M_w = 3-6$ является приемлемым. Во-вторых, наклон полученной прямой связи близок к 1.0. Полученные рекомендованные связи (см. рис. 4в) для диапазона $M_w = 3-6$: $M_w = M_L - 0.40$ и $M_w = 0.5(K_{S1,2}^{\Phi 68}) - 1.15$.

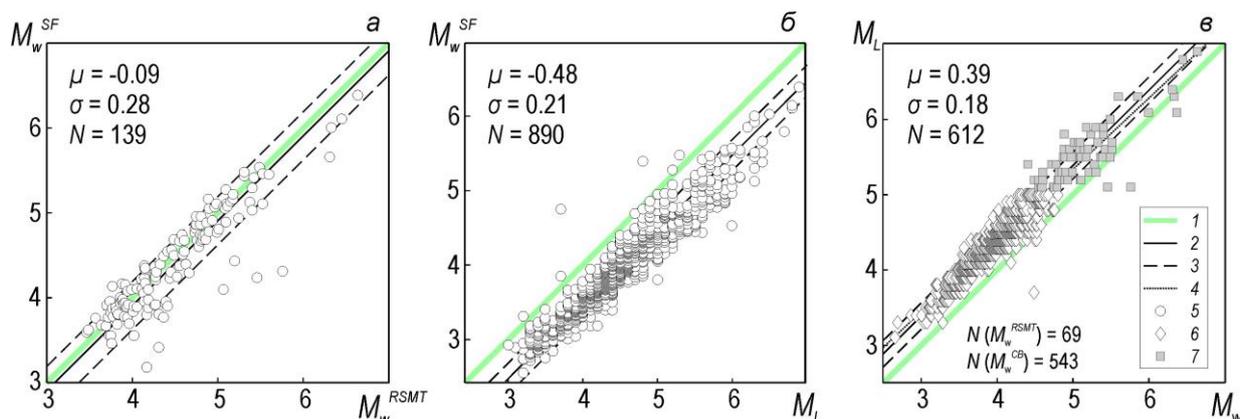


Рис. 4. Связи между магнитудами: *а* – M_w^{SF} , определенная в работе по спектрам *S*-волн в диалоговом режиме (ордината), сопоставлена с оценкой M_w^{RSMT} , полученной Абубакировым и Павловым путем инверсии тензора момента по региональным записям (абсцисса); *б* – M_w^{SF} (ордината) сопоставлена с M_L (абсцисса); *в* – M_L (ордината) сопоставлена с M_w (абсцисса). В «*в*» оптимальное значение M_w выбрано следующим образом: для $M_L > 5$ – это M_w^{RSMT} , для $M_L \leq 5$ – это M_w^{CB} . 1 – соответствуют типу связи 1:1 (когда $M_1 = M_2$). 2 – средняя связь $y = x + const$ ($const = \mu$). 3 – графики $\mu \pm \sigma$, где σ – стандартное отклонение. 4 – средняя связь $y = bx + const$, полученная для «*в*» без фиксации наклона ($b = 0.95$, $const = 0.61$). 5 – M_w^{SF} . 6 – M_w^{CB} . 7 – M_w^{RSMT} . В верхних левых углах приведены значения μ , σ , N , полученные при аппроксимации данных линейной регрессией с фиксацией наклона $b = 1.0$

В пятой главе анализируются спектральные отклики камчатских станций, определенные эмпирическим методом межстанционного отношения спектров с использованием эталонной станции (« H/H_{ref} »). Попутно была проверена применимость в условиях Камчатки метода оценки спектральных характеристик с помощью отношения спектров, полученных по горизонтальной и вертикальной компонентам (метод Накамура, параметр « H/V » или HVR).

Схема расчета спектральных станционных аномалий. Обычно при изучении спектральных свойств грунтов в работах по СМР предполагается, что целевая и эталонная станция находятся вблизи друг от друга, а очаг-источник намного дальше. Для сильно разнесенных станций Камчатки такой подход неприменим, однако можно скомпенсировать эффект различий в гипоцентральной расстоянии двух станций, используя ранее определенные эмпирические функции затухания – формула (11) –

«калибровочные». При делении приведенного спектра станции j на такой же спектр эталонной станции (РЕТ – «Петропавловск»), с принятым номером ноль, для того же события i , получаем

$$S_{ij(cb), 50} / S_{i0(cb), 50} = (B_{S(cb)}(r_{i0}) / B_{S(cb)}(r_{ij})) \cdot (S_{ij(cb)}(r_{ij}) / S_{i0(cb)}(r_{i0})), \quad (13)$$

где правый множитель – отношение фактических спектров записей, а левый множитель – поправка за различие гипоцентральных расстояний. Таким образом, опорное расстояние выпадает. Для уровней коды, приведенных к 100 с, нормировка не нужна.

Для изучения свойств грунтов осредняли логарифмы отношений спектров:

$$\Delta \lg S_{j(cb)} = (1 / n_{j(cb)}) \sum_i \Delta \lg S_{ij(cb)}, \quad (14)$$

где $\Delta \lg S_{ij(cb)} = \lg (S_{ij(cb), 50} / S_{i0(cb), 50})$, и $n_{j(cb)}$ – число наблюдений. Фактически вместо средних использовали медианы, менее чувствительные к иногда возникающим выбросам. Разброс значений $\Delta \lg S_{ij(cb)}$ характеризовали значением (условного) стандартного отклонения $\sigma(\Delta \lg S_{ij(cb)})$, которое оценивали по робастному алгоритму через межквартильный размах. Аналогично рассчитывали параметры

$$\Delta \lg A_{j(cb)} = (1 / n_{j(cb)}) \sum_i \lg (A_{ij(cb), 50} / A_{i0(cb), 50}), \quad (15)$$

$$\Delta \lg C_{j(cb)} = (1 / n_{j(cb)}) \sum_i \lg (A_{c100, ij(cb)} / A_{c100, i0(cb)}), \quad (16)$$

и соответствующие оценки разброса.

Выявленные стационарные аномалии. Для определения спектральных характеристик использовались записи с 23 станций для >7000 записей для >300 землетрясений с $M_L = 4.7-6.4$ за 2011–2016 гг. Оказалось (рис. 5), что спектральные характеристики по трем методам (AS , ES , CS) в целом приблизительно согласуются, но часто наблюдаются определенные систематические различия. Наиболее выражены стационарные аномалии в спектрах коды (CS); далее следуют спектры Фурье S -волн (ES), затем оценка по пиковым амплитудам (AS). Оценку по коде почти всегда можно считать оценкой сверху для оценки по S -волнам. Часто такая оценка дает ограниченное завышение амплитуд, порядка 10–20%. Но в ряде случаев такая оценка дает большое завышение, до 2 раз. Использование коды (и, вероятно, также микросейсм) для СМР без контроля по S -волнам в условиях Камчатки может привести к заметным ошибкам.

Проверка работоспособности метода H/V . В качестве попутного исследования провели сравнение результатов метода H/H_{ref} и метода отношения H/V по Накамура. Выполненное сравнение показало выраженные расхождения между результатами по двум методам. Например, метод H/V не выделяет необычный и весьма существенный (до 10 раз) рост аномалий на высоких частотах для некоторых станций (RUS – «Русская», KDT – «Ходутка», SKR – «Северо-Курильск»). С

помощью метода Накамура иногда, но не всегда, видны эффекты резонансного усиления амплитуд. В целом, сравнение результатов метода H/H_{ref} и метода H/V по Накамура полного согласия не выявило, так что использование только метода Накамура при проведении СМР в условиях Камчатки не может быть рекомендовано.

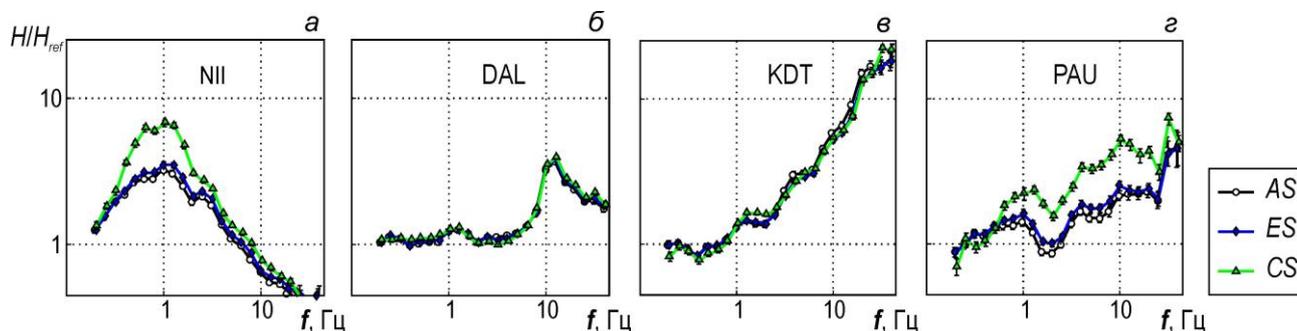


Рис. 5. Примеры стационарных спектральных аномалий, полученные методом эталонной станции. NII (а) – станция на среднем грунте, показан типичный спад аномалии на высоких частотах. DAL (б) – станция на скальном грунте, покрытом тонким слоем коллювия, виден резонанс в области 12 Гц. KDT (в) – станция на малоизученном грунте, выраженная положительная аномалия на высоких частотах. PAU (з) – аналогичная, но менее резкая аномалия. Для DAL и KDT аномалии по спектрам S-волн (ES), по коде (CS) и по пиковым амплитудам (AS) находятся в хорошем согласии. Для NII и PAU в области высоких значений аномалии уровень аномалии по коду существенно выше, чем по спектрам Фурье, что говорит о реальной возможности несогласия оценок этих видов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, представленные в диссертационной работе:

1. С использованием записей сети цифровых приборов сильных движений (акселерометров) в сейсмоопасном регионе – Камчатка – проведен массовый расчет очаговых спектров местных землетрясений в абсолютной шкале (в [Н·м]) по данным S-волн и кода-волн, в диалоговом и автоматическом режимах. Спектры проанализированы в рамках спектральной модели с тремя корнер-частотами (f_{c1} , f_{c2} и f_{c3}). Получен массовый материал оценок этих частот для камчатских землетрясений диапазона $M_w = 3-6$.

2. С использованием сети станций установлено, что для обширной совокупности землетрясений диапазона $M_w = 3-6$ в очаговых спектрах, как правило, присутствует верхняя граничная частота среза очагового спектра ускорений – f_{c3} , или « f_{max} очаговой природы». Продемонстрирована межстанционная корреляция оценок f_{c3} для пар станций. Реальность f_{c3} также подтверждена методом отношений очаговых спектров пар землетрясений с различными магнитудами на одной и той же станции.

3. Изучен скейлинг трех корнер-частот в функции от сейсмического момента M_0 ; обнаружено, что характер скейлинга трех корнер-частот различен. Зависимость $f_{c1}(M_0)$ примерно согласуется с концепцией подобия:

$$\lg f_{c1} \approx (1/3) \lg M_0 + \text{const},$$

в то время как зависимости для f_{c2} и f_{c3} не согласуются с гипотезой подобия:

$$\lg f_{c2} = (0.17 \div 0.20) \lg M_0 + \text{const},$$

$$\lg f_{c3} = (0.11 \div 0.17) \lg M_0 + \text{const}.$$

4. Оценки очаговых спектров использованы для отработки методики массового определения M_0 для диапазона $M_w = 3-6$; впервые для Дальнего Востока России получен набор сотен региональных оценок M_w . Порог определения M_w в части регионального каталога опущен в настоящей работе с $M_w \approx 5.0$ до $M_w \approx 3.0$. Обнаружено наличие небольшого (порядка -0.1) систематического занижения среднечастотных оценок M_w по региональным S - и кода-волнам в сравнении с низкочастотными оценками; аналогичное небольшое занижение систематически отмечалось ранее и в других регионах.

5. Для диапазона $M_w = 3-6$ рекомендована формула связи для пересчета значений $K_{S1,2}^{\phi 68}$ (или M_L) камчатского регионального каталога прошлых лет в ориентировочные оценки M_w («ргоху- M_w »).

6. Для расчета эмпирических спектральных характеристик грунтов применена многополосная методика с использованием пиковых амплитуд (AS), спектров Фурье S -волн (ES) и среднеквадратичных амплитуд кода-волн (CS). За счет использования эмпирических региональных функций затухания методика позволяет использовать записи целевой и эталонной станций с заметно различающимися гипоцентрными расстояниями. Обнаружено большое разнообразие спектральных характеристик станций. Изучена степень согласованности спектральных характеристик по трем методам (AS , ES , CS).

7. Сравнение результатов оценки спектральных характеристик грунтов по методу эталонной станции и методу отношения H/V по Накамура показало выраженные расхождения.

Полученные результаты подсказывают перспективные направления возможных дальнейших исследований, включая

- изучение скейлинга очагов землетрясений Камчатки для таких параметров как спектральное сброшенное напряжение (оценка $\Delta\sigma$, определенная через спектральные параметры M_0 и f_{c1}), сейсмическая энергия и кажущееся напряжение, уровень спектра ускорений;

- исследование спектральных свойств очагов землетрясений Камчатки по данным продольных волн с использованием подходов, развитых для S -волн;

- расширение рабочего диапазона многополосного исследования очаговых спектров на более низкие частоты (0.02–0.2 Гц, периоды 5–50 с) и, с использованием специализированных приборов, на более высокие частоты, 40–80 Гц.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

(статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК):

1. Скоркина А.А., Гусев А.А. Определение набора характерных частот очаговых спектров для субдукционных землетрясений Авачинского залива (Камчатка) // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 7. – С. 1057–1068.

2. Гусев А.А., Скоркина А.А., Чебров Д.В. Очаговые спектральные параметры землетрясений Восточной Камчатки диапазона $M_w = 3-6$ по данным поперечных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2017. – № 3. – Вып. 35. – С. 36–49.

3. Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Гусева Е.М., Павлов В.М., Скоркина А.А. Массовое определение моментных магнитуд M_w и установление связи между M_w и M_L для умеренных и слабых камчатских землетрясений // Физика Земли. – 2018. – № 1. – С. 158–172.

Подписано в печать 22.11.2017
Формат 64x90/16. Усл. печ. лист 1,75. Заказ
Тираж: 150 экз.

Отпечатано в типографии «ФОН»
683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9. Тел.: 490-337.