

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института динамики геосфер
Российской академии наук,
доктор физ.-мат. наук С.Б. Турунтаев

«25» декабря 2017 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук о диссертационной работе **Скоркиной Анны Александровны «Изучение спектральных свойств камчатских землетрясений магнитудного диапазона 3–6»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертационная работа А.А. Скоркиной 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.

Актуальность исследований. Объект и предмет исследований.

Актуальность рассматриваемых в работе проблем определяется уже самим районом исследования – полуостров Камчатка, который вместе с Курильскими островами, является наиболее сейсмически активным регионом на территории России. Здесь ежегодно происходят сотни землетрясений различной магнитуды – почти треть всех землетрясений нашей страны. Территория Камчатки ввиду своей сейсмической активности является предметом постоянного исследования различными геофизическими методами. Сейсмические – занимают здесь лидирующую позицию. Развитие сети сейсмических станций в течение 2005–2010 гг. позволило значительно снизить порог регистрируемых событий и по-новому подойти к анализу сейсмического процесса в регионе на основе большого объема данных о событиях умеренных магнитуд.

Предметом исследования настоящей работы являются параметры очаговых спектров в диапазоне средних и высоких частот (0.2–30 Гц) камчатских землетрясений умеренных магнитуд, что представляет значительный интерес для изучения физики очага землетрясения и позволяет получить дополнительную информацию о пространственно-временной структуре развития очагового процесса, что также важно для решения ряда инженерно-сейсмологических задач.

Целью исследований 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}, f_{c3}) по записям поперечных волн и кода-волн, на основе данных сети цифровых акселерометров. Для решения поставленной цели автором предложено решить ряд **задач**, включающих в себя: формирование «коллекции» волновых форм (акселерограмм) сотен землетрясений, расчет спектров записей поперечных волн и кода-волн, определение эмпирических амплитудных стационарных поправок методом эталонной станции, восстановление очаговых спектров, определение спектральных параметров индивидуальных очагов – оценки трех корнер-частот (f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}) и сейсмического момента M_0 , который пересчитывается в моментную магнитуду M_w , установление параметров скейлинга для каждой их трех корнер-частот, уточнение типовой зависимости $M_w - K^{\phi_{68}}$ (или $M_w - M_L$), а также выполнение внутреннего контроля качества оценок на каждом этапе работ – сопоставление

оценок, полученных по разному типу волн, по разным станциям, а также, по возможности, сопоставление с уже имеющимися независимыми оценками (например, для полученных оценок моментных магнитуд).

Задачи, сформулированные автором для достижения цели исследования достаточно обширны, но обоснованы и делают исследование фундаментальным. Следует отметить, что все сформулированные задачи в ходе исследования выполнены.

Научная новизна рецензируемой работы состоит в том, что на основе большого объема новых данных и применения современных методов обработки впервые в России проведено исследование очаговых спектров землетрясений, полученных сетью акселерометров. Разработка и использование автоматического метода анализа спектров, применительно к данным поперечных и кода-волн позволило получить статистически значимый (на нескольких сотнях событий) общий характер скейлинга для камчатских землетрясений в диапазоне $M_w = 3-6$. Использование спектральных методов, рассмотренных в диссертации, позволило опустить нижний порог определения моментной магнитуды для региональных землетрясений.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Наиболее важным результатом этой работы является установление факта непригодности "модели Бруна" с единственной корнер-частотой для большинства изученных землетрясений Камчатки и то, что характер скейлинга для двух других выделенных характерных частот не согласуется с гипотезой простого подобия, предсказывающей пропорциональность $f_c \sim M_0^{-1/3}$.

Важный практический результат работы – установление регионального типового соотношения $M_w - K^{0.68}$ (или $M_w - M_L$), т.е. связи между моментной магнитудой и классом "по Федотову" (или камчатской локальной магнитудой). Наличие такого соотношения позволяет формировать каталоги региональной сейсмичности, содержащие оценки магнитуды в единицах, принятых в международной практике.

Также работа содержит ряд результатов, имеющих приложения в инженерной сейсмологии: определение спектральных стационарных аномалий для десятков станций Камчатского полуострова, расположенных на различных грунтах. Показано, что имеется группа станций, имеющих поправку на максимуме возрастающую с частотой, и что широко используемый в работах по микрорайонированию метод Накамура имеет ограниченное применение в условиях Камчатки.

Результаты работы А.А. Скоркиной могут быть рекомендованы для практического использования в организациях РАН, МЧС и других ведомств, ведущих исследования в области сейсмологических исследований, микрорайонирования и прогноза землетрясений.

Первая глава – обзорная, состоит из двух разделов.

1. Рассматривается современное состояние представлений о моделях очаговых зон землетрясений и их спектрах, выраженные через параметры разлома. Вводятся понятия "корнер-частота", " f_{max} ", сейсмический момент M_0 , "скейлинг", "простое подобие". Подробно описано традиционное представление протяженного очага как плоский сдвиговый разрыв, который на расстояниях больших, чем его размер может быть заменен на эквивалентный точечный дипольный силовой источник, характеризуемый тензором сейсмического момента. Рассматривая далее временную функцию эквивалентного точечного источника, вводится понятие очаговой функции, а ее спектр называется «очаговым спектром смещений». Подробно рассматриваются модели Хаскела-Аки для случая движущегося точечного источника и модель Бруна-Аки, учитывающая скачок тангенциального напряжения. Приведены ссылки на

исследования, в которых показано, что "модель Бруна" не в состоянии объяснить всех особенностей очаговых спектров, а именно присутствие в очаговом спектре двух дополнительных "корнер-частот".

Критический анализ публикаций о гипотезе подобия спектральных параметров показывает, что к настоящему времени этот вопрос остается открытым и спорным.

По этой части первой главы следует отметить, что автором проанализировано большое количество литературных источников и во многих случаях сделаны критические оценки о применимости того или иного подхода, что несомненно подтверждает эрудицию соискателя.

2. Приводится информация о состоянии сейсмической сети п-ва Камчатка, истории ее развития, регистрационных возможностях в настоящее время, а также об уровне изученности сейсмических событий и их спектров. Приводится схема размещения современных приборов сильных движений и результаты предварительных расчетов корреляционной связи "магнитуда-сейсмический момент" на основе оцифрованных аналоговых записей сильных движений.

В результате проведенного анализа в первой главе сформулирован предмет исследования и основные задачи, которые необходимо было решить для выполнения поставленной цели.

Во второй главе описана методика восстановления очаговых спектров и исходные данные.

Изложена достаточно известная методика восстановления очаговых спектров поперечных волн, а также кода-волн. Рассмотрено формирование спектра группы поперечных волн в цепочке "очаг-среда-грунт", а также описан алгоритм восстановления и анализа очаговых спектров, разработанный А.А. Гусевым и реализованный в виде компьютерных программ в Matlab.

В качестве модели используется описание очага через эквивалентный точечный источник – двойной диполь, скалярный сейсмический момент которого растет по закону $M_0(t)$. Подробно рассмотрен учет искажений сигнала при распространении от источника к станции, что принципиальнейшим образом влияет на корректность определения очагового спектра по наблюдаемому-станционному.

Отдельно описан набор экспериментальных данных использованных в работе. Отмечено, что исследования проводились в четыре этапа, что сопровождалось наращиванием, как пишет автор, «коллекции» исходных данных. Автор достаточно убедительно обосновывает содержание каждой «коллекции» для решения конкретных задач и поставленной цели исследований. Несомненным достоинством работы является большой объем использованных экспериментальных данных.

В третьей главе диссертационной работы подробно рассмотрена методика построения очаговых спектров и определения их параметров для камчатских землетрясений. К основным определяемым параметрам отнесены три корнер-частоты и сейсмический момент. Скалярный сейсмический момент является наиболее физически понятной величиной, количественно характеризующей источник колебаний при землетрясении. В отличие от магнитуды события (M_s , m_b , M_L) он менее зависим от деталей развития процесса в очаге, поскольку определяется асимптотикой спектра смещений в области низких частот, пропорционален амплитуде низкочастотной области спектра и, при условии использования современной аппаратуры и методов обработки, определяется достаточно надежно.

Автор проводит определение корнер-частот в двух режимах: диалоговом и автоматическом. В первом случае дополнительно проводилась проверка внутренней

согласованности полученных оценок корнер-частот, снятых по спектрам смещений, скорости и ускорений, сравнение оценок по одному событию на нескольких станциях, а также рассматривалось отношение спектров двух землетрясений, записанных одной и той же станцией. Особое внимание диссертант уделяет проверке реальности параметра третьей корнер-частоты, поскольку ее существование является дискуссионным вопросом и не признается в основной массе сейсмологической литературы. В автоматическом режиме параметры спектров определялись параллельно по S -волнам и по коду S -волн. В большинстве случаев показано наличие третьей корнер-частоты.

Достаточное внимание автор уделяет изучению скейлинга, поскольку характер подобия несет важную информацию о физике очага землетрясения. Для первой корнер-частоты получены значения, согласующиеся со стандартной гипотезой подобия очагов, для которой $\beta_1 = 1/3$. Для второй и третьей корнер-частот отмечено нарушение подобия, с соответствующими показателями скейлинга: $\beta_2 = 0.17-0.20$ и $\beta_3 = 0.11-0.17$.

Таким образом, в третьей главе обосновываются первое и второе защищаемые положения.

В четвертой главе рецензируемой работы описаны методы определения сейсмического момента и моментной магнитуды для большого количества землетрясений с помощью разных подходов. В первом методе расчет параметров спектра для группы S -волн выполнялся в диалоговом режиме, для остальных методов – в автоматическом режиме для S -волн и кода-волн соответственно.

Проверка согласия полученных оценок проводилась по региональным оценкам моментной магнитуды, определенной по компонентам тензора сейсмического момента (RSMT, авторы: В.М. Павлов и И.Р. Абубакиров), и глобальным оценкам из каталога GCMT. Интересным результатом является тот факт, что для рассчитанных региональных значений моментных магнитуд наблюдается недооценка по сравнению с магнитудами, полученных по более низкочастотным данным, из каталогов RSMT и GCMT. При этом удалось понизить порог определения моментной магнитуды для региональных методов по сравнению с глобальным каталогом. На основе анализа большого числа записей землетрясений автору удалось провести уточнение связи между моментной и локальной магнитудой для камчатского региона в диапазоне магнитуд 3–6.

Переход от локальной магнитуды к моментной обоснован, поскольку все шкалы магнитуд, за исключением моментной магнитуды, определяются по результатам измерений параметров сейсмических колебаний. Начиная с некоторого масштаба, это может приводить к эффекту насыщения магнитуд. Поскольку моментная магнитуда определяется по низкочастотной части спектра, то на этом параметре эффект насыщения магнитуд не сказывается. Оценки моментных магнитуд для сильных землетрясений традиционно рассчитываются GCMT и другими агентствами, а благодаря установленному соотношению для умеренных магнитуд появляется возможность получить однородный по магнитуде каталог камчатских землетрясений для широкого диапазона магнитуд – от сильнейших до умеренных.

Результаты этой главы обосновывают третье защищаемое положение.

Результаты исследований, приведенные **в пятой главе** в значительной мере можно отнести к прикладным, связанным с задачами сейсмомикрорайонирования. Подробно рассматривается частотно-зависимое усиление амплитуды колебаний сейсмического сигнала на ряде станций Камчатской сети. В основном, использовались горизонтальные компоненты датчиков сильных движений из «коллекции № 4» (кроме метода Накамура, где дополнительно привлекалась вертикальная компонента). Станционные аномалии традиционно

рассчитывались относительно эталонной станции «Петропавловск», где ранее были выполнены работы по оценке сейсмобезопасности. Расчеты, выполненные по спектрам поперечных волн и по коде, показали большое разнообразие спектральных станционных аномалий. Также было установлено, что для различных станций наблюдаются как согласованность значений, так и значительные различия – в отдельных случаях оценки по коде превышают оценки по поперечным волнам до двух раз. Важным практическим выводом является недопустимость в Камчатском регионе оценок спектральных станционных аномалий, полученных только по коде волн.

Сравнение результатов выделения резонансных частот методом эталонной станции и метода Накамура показало значительные расхождения. При этом метод эталонной станции оказался более чувствительным, особенно в области высоких частот. Этот результат имеет принципиальное значение для практического применения, т.к. метод Накамура является классическим в работах по сейсмомикрорайонированию.

Результаты пятой главы обосновывают четвертое защищаемое положение.

Имеется ряд незначительных замечаний:

1. В главе 3 в разделе 3.3.2 параметр $\beta_k = -\text{d}lg f_{ck}/\text{d}lg M_0$, полученный на основе оценок корнер-частот в автоматическом режиме, принимает отрицательные значения, например, $\beta_1 = -0.26 \pm 0.01$, хотя согласно его определению, графику на рис. 3.14 и значений этого параметра, полученном в диалоговом режиме, значения параметра должны быть положительными.

2. Некоторые рисунки требуют доработки, например, рис. 3.8 на стр. 70 затрудняет восприятие материала из-за отсутствия подписей на осях ординат (рис. 3.8а, б). Подписи на рис. 3.8в даны на английском.

3. Не указано как рассчитывался коэффициент корреляции в гл. 3 (по Пирсону, Стьюденту, Спирмену).

4. В разделе 3.2.1, по нашему мнению, лучше проводить построение регрессионной функции, а не коэффициента корреляции, поскольку присутствие корреляционной связи означает, что увеличение одной случайной величины приводит к увеличению другой случайной величины и наоборот.

5. В главе 4 на стр. 89 появляется обозначение $M_0^{RSMТ}$, а его расшифровка дается только на стр. 92. На стр. 94 упоминается неизвестный подход «1Б», который, вероятно, соответствует подходу определения $M_W^{RSMТ}$.

Указанные замечания не снижают общий высокий научный уровень работы, автора отличает высокий профессионализм и глубокое знание темы.

Автореферат диссертации отражает ее основное содержание и структуру.

Работа А.А. Скоркиной является законченным научным исследованием, содержащим важные фундаментальные и прикладные результаты. Следует отметить хорошую структуру диссертации, ясность изложения материала, а также четкость изложения выводов к каждому разделу.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 22 публикациях, две из них – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Еще одна публикация принята к печати и запланирована в № 1 за 2018 г. в журнале «Физика Земли» – одном из ведущих журналов отделения наук о Земле.

Диссертация соответствует критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским

диссертациям, а ее автор А.А. Скоркина заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Диссертация А.А. Скоркиной рассмотрена на научном семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук.

Авторы отзыва –

Заведующая лабораторией

«Сейсмологические методы исследования литосферы»,

доктор физ.-мат. наук

и

Старший научный сотрудник лаборатории

«Деформационные процессы в земной коре»,

канд. физ.-мат. наук

Санина Ирина Альфатовна

Беседина Алина Николаевна

Отзыв о диссертации А.А. Скоркиной заслушан и обсужден на заседании объединенного семинара лабораторий «Деформационные процессы в земной коре» и «Сейсмологические методы исследования литосферы» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук, одним из основных направлений научно-исследовательской деятельности которых являются изучение процессов в очагах землетрясений и сейсмического режима регионов с различными тектоническими условиями (протокол № 12 от 25 декабря 2017 г.) и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Председатель заседания –

Заведующий лабораторией

«Деформационные процессы в земной коре»

доктор физ.-мат. наук, профессор

Кочарян Геворг Грантович

Секретарь заседания –

Старший научный сотрудник лаборатории

«Деформационные процессы в земной коре»,

канд. физ.-мат. наук

Беседина Алина Николаевна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук,

119334, г. Москва, Ленинский проспект, 38, корпус 1,

тел.: +7 (499) 1376611,

e-mail: geospheres@idg.chph.ras.ru

Подписавшие отзыв сотрудники согласны на обработку персональных данных и включение их в материалы, связанные с работой диссертационного совета.

Подписи сотрудников И.А. Саниной, А.Н. Бесединой и Г.Г. Кочаряна заверяю: