

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Зверевой Анастасии Сергеевны по теме: «ДОБРОТНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА», представленную в диссертационный совет Д24.1.132.01 на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 -
Геофизика

1. Актуальность темы диссертации

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью развития современного сейсмического мониторинга для снижения последствий сильных землетрясений на территории Северного Кавказа, где достаточно высокая плотность населения и расположены объекты критической инфраструктуры. В этом районе до 1900 г. происходили сильные землетрясения, а в настоящее время отмечен признак подготовки нового землетрясения - наличие крупной зоны сейсмической брешки между 38° и 40° в.д., где не регистрируются сильные события. Изучение пространственного распределения добротности Q_c позволяет получить информацию о глубинном строении коры и верхней мантии Северного Кавказа, геодинамических процессах и зонах подготовки сильных землетрясений.

Другой актуальной задачей, на решение которой направлена диссертационная работа, является совершенствование методики оценки моментной магнитуды M_w (магнитуды Канамори) и унификация сейсмических каталогов, составленных в разное время и содержащих различные магнитуды: M_{LN} , M_s , m_{prv} , или энергетический класс K_p . Оценки затухания сейсмических волн с использованием частотно-зависимых значений Q_c также важны для проблемы сейсмического распознавания ядерных, химических взрывов и землетрясений, поскольку они позволяют провести коррекцию очаговых спектров и амплитуд S- и P-волн. Результаты диссертации вносят существенный вклад в решение этих задач.

2. Степень достоверности результатов

Достоверность результатов и выводов диссертации обеспечивается большим объемом экспериментального материала, использованием надежных данных по амплитудно-частотным характеристикам и чувствительности станций Северного Кавказа, корректным статистическим анализом данных. Достоверность результатов

подтверждена при сопоставлении с данными, полученными другими методами, а также в работах других авторов. Результаты расчетов скалярного сейсмического момента M_0 и моментной магнитуды M_w согласуются с данными Международных сейсмологических Центров, GCMT и регионального Крымского центра. Выводы и защищаемые положения сформулированы автором на основе тщательного анализа результатов выполненных расчетов.

3. Научная новизна и значимость работы

Научная новизна результатов исследований, представленных в диссертации, определяется тем, что детально исследованы пространственные вариации затухания S-волн в литосфере Северного Кавказа и проведено районирование по добротности Q_c для последующего использования при оценках сейсмической опасности. Ранее не проводилось столь детального картирования Q_c на этой территории.

В диссертации **впервые**:

- для всей территории Северного Кавказа получена количественная оценка затухания поперечных волн в виде частотно-зависимой добротности среды и коэффициента затухания с использованием метода огибающих кода-волн;
- выполнена калибровка станций всей сети Северного Кавказа по добротности поперечных волн, необходимая для исследования спектральных и динамических параметров очагов землетрясений;
- обнаружено, что зоны низких значений добротности совпадают с районом вулканической постройки Эльбруса и очаговыми зонами сильных землетрясений;
- выявлен новый эффект: насыщение добротности для глубин, соответствующих мантии, что обусловлено строением среды и распространением S-волн в верхней мантии;
- получены среднесетевые значения скалярных сейсмических моментов и магнитуды Канамори для очагов региональных сейсмических событий умеренной энергии на Северном Кавказе;

Диссертация имеет важное методическое значение для дальнейших исследований в области сейсмологии, так как в ней, на примере землетрясений Северного Кавказа, разработаны основы современной технологии анализа очаговых спектров

4. Публикации по теме диссертационной работы

По теме диссертации соискателем опубликовано 6 статей в рецензируемых научных журналах по специальности 1.6.9 «Геофизика», входящих в перечень ВАК, в том числе «Физика Земли», 2024; «Российский сейсмологический журнал», 2024; «Journal of Seismology» 2023 и др.

5. Структура и содержание диссертации

Структура и оформление диссертации соответствуют рекомендованного ВАКом ГОСТа 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Диссертация Зверевой А.С. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 182 наименований и двух приложений. Работа содержит 138 страниц текста, 33 рисунка и 10 таблиц.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, а также защищаемые положения. Раскрыты научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также личный вклад диссертанта.

В **первой главе** приведен обзор состояния исследований затухания сейсмических волн, включая основные результаты предыдущих исследований по Северному Кавказу. В обзор включено описание основных терминов, связанных с понятием затухания, характеристика методов оценки параметров затухания, описание природы и свойств кода-волн. Представлена краткая характеристика исследуемого региона: особенности региональной тектоники, глубинного строения и сейсмичности, а также сведения о современной сети сейсмических станций.

Вторая глава посвящена описанию метода и результатов расчетов сейсмической добротности литосферы Северного Кавказа по записям кавказских землетрясений на эпицентральных расстояниях до 50 км. Методом огибающих кода – волн обработано, в общей сложности, более 800 сейсмограмм коровых землетрясений по данным 53 сейсмических станций. Проведено сравнение результатов расчетов с общемировыми данными и предыдущими исследованиями в регионе и сделан вывод о соответствии расчетных значений добротности для Северного Кавказа с оценками для других сейсмически активных регионов. Приведенные в главе 2 результаты расчетов Q_c и аппроксимирующие их зависимости от частоты (скейлинги Q_c в диапазоне 1–10 Гц) полностью обосновывают первое защищаемое положение диссертации.

В третьей главе изложены материалы о региональных особенностях затухания сейсмических волн, построены распределения Q_c по территории Северного Кавказа. Результаты расчетов представлены в виде наглядных карт. Проведен анализ значений добротности в зависимости от времени начала окна коды. Установлена взаимосвязь между пространственными вариациями сейсмического затухания с особенностями геолого-тектонического строения и физическими свойствами среды во всем регионе. В частности, области с наименьшими значениями добротности расположены по месту эпицентральных зон сильных землетрясений или тектонических неоднородностей. Повышенные значения добротности примерно соответствуют локализации растяжения в литосфере Северного Кавказа. Обобщением результатов, полученных и описанных в главе 3, стало второе защищаемое положение диссертации.

В четвертой главе представлены результаты расчетов спектральных и динамических параметров очагов землетрясений на территории Северного Кавказа. Определены значения скалярных сейсмических моментов и моментных магнитуд, M_w . Установлены корреляционные связи между M_w , M_L и K_p , и, тем самым, обосновано третье защищаемое положение диссертации. Проведено масштабирование параметров очаговых спектров землетрясений Северного Кавказа, аргументировано, что для средних спектров в различных магнитудных интервалах (от $M_w = 3-3.5$ до $M_w > 5$) угловая частота f_c соответствует общему подобию.

В разделе «**Заключение**» приведены наиболее важные научные результаты работы, полученные лично соискателем.

В **Приложении** представлена сводка результатов расчетов добротности для поверхностных и объемных волн по записям всех сейсмостанций, а также банк данных по параметрам гипоцентров, динамическим (M_0) и спектральным (f_c) параметрам очагов. Публикация этого материала (диссертация выставлена на сайте Диссертационного совета) значительно увеличила научную ценность работы для дальнейших исследований в области сейсмологии.

6. Наиболее важные результаты диссертации, имеющими научную значимость и/или оригинальный характер

Получены оценки значений частотно-зависимой добротности $Q_c(f)$ для Северного Кавказа, показано, что они соответствуют данным для других тектонически активных континентальных районов.

Выведены аналитические выражения для расчетов значений сейсмической добротности литосферы с учетом различных эффектов геометрического расхождения $\beta=0.5$ (поверхностные волны) и $\beta=1.0$ (объемные волны).

Развита модель пространственного распределения сейсмической добротности и коэффициента затухания сейсмических волн в литосфере Северного Кавказа. Построены детальные карты распределения Q_s , с помощью которых исследованы неоднородности структуры поля поглощения в земной коре и верхней мантии Северного Кавказа.

Для землетрясений малой и средней силы на территории Северного Кавказа установлены корреляционные связи между моментной M_w и локальной M_L магнитудами, и энергетическим классом по Раутиан K_p .

При выполнении методических работ для устойчивости расчета очаговых спектров землетрясений (по существу - технологии) учтены поправки за неупругое затухание сейсмических волн в литосфере. Выявлено, что при временах начала окна коды $LT > 60$ с в общих потерях энергии преобладает внутреннее поглощение, имеющее постоянное значение. При этом вклад рассеяния минимален, поскольку большая часть кода-волн рассеивается в мантии с более вязкой и однородной структурой. Обнаружено, что значения LT , при которых наступает насыщение для разных частот, связаны с размером неоднородных структур в исследуемом объеме.

Полученные результаты позволяют считать, что цель диссертации и показатели новизны, указанные соискателем, полностью достигнуты.

7. Соответствие автореферата диссертации.

В автореферате кратко, но с достаточной полнотой изложено содержание диссертационной работы. Текст автореферата написан ясным научным языком, хорошо иллюстрирован графиками.

8. Практическая ценность результатов

Технология анализа очаговых спектров, разработанная диссертантом в ходе выполнения работы, внедрена в ФИЦ ЕГС РАН для расчетов сейсмического момента, M_0 , моментной, M_w , и других магнитуд на регулярной основе, что расширило результативность сейсмического мониторинга Северного Кавказа. Полученные в диссертации аналитические зависимости для пересчета магнитуд M_w , M_L и энергетического класса K_p востребованы для унификации каталогов Северного

Кавказа для уточнения оценок сейсмического режима. Разработанная технология анализа очаговых спектров может использоваться, пусть с некоторой адаптацией, для исследований других сейсмически опасных регионов России и окружающих территорий Северной Евразии. Перспективны, к примеру, следующие НИР в других регионах с использованием тех или иных элементов разработанной технологии:

- изучение строения литосферы для понимания процессов современной геодинамики Северной Евразии;
- поиск зон подготовки сильных землетрясений с комплексированием признака малых значений добротности Q_c с другими надежными индикаторами;
- совершенствование методик распознавания взрывов и землетрясений.

9. Апробация работы и публикации.

Материалы диссертации прошли апробацию на 6 международных и всероссийских конференциях, а также на молодежных конференциях. Полученные результаты обсуждались на семинарах ФГБУН ИФЗ РАН и ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН.

10. Замечания по диссертации.

1) Для полученных аналитических выражений для частотной зависимости добротности $Q_c(f)$ не оговорены пределы применимости по частоте. Совпадают ли они с границами диапазона 1-9 Гц, как на графиках на рис.2.3, 2.4 ? Или справедливы с какой-то точностью в более широком частотном диапазоне?

2) Продолжение замечания 1, касательно интерпретации $Q_c(f)$. Хотя для сейсмологов уже привычны нарастающие степенные зависимости добротности $Q_c(f)$ и слабые зависимости от частоты коэффициента затухания $\delta(f)$, это очень нетривиальный результат, его непросто согласовать с представлениями геоакустики и механики сплошных сред. Для заданного элемента сплошной среды $\delta(f)$ с необходимостью увеличивается с частотой. В диссертации не рассматривается, к каким объемам или зонам среды относятся значения δ и Q_c на разных частотах. Этот момент затронут лишь косвенно при описании условий рассеяния кода-волн в мантии и роли начала окна LT. Рекомендация на дальнейшие исследования – шире привлекать результаты смежных отраслей наук. Ведь из общефизических соображений можно предположить, что значения δ и Q_c для разных частот соответствуют разным эффективным объемам V_{ef} , а сами эти объемы убывают с ростом частоты как $V_{ef} \sim 1/f^a$, $a > 1$. Тогда приведенный к одному и тому же объему коэффициент поглощения δ/V_{ef} будет растущей функцией

частоты. Соответственно, изменится и зависимость добротности «физического объема» от частоты.

3) Вызывает удивление, что рассмотрены только площадные распределения добротности, но не зависимость Q_c от глубины. Хотя распределения Q_c охарактеризованы как «пространственные». Состояние и свойства пород существенно меняется с глубиной, из-за чего можно ожидать и изменение добротности. Если проанализировать этот вопрос невозможно из-за методических ограничений или недостаточного объема данных, следовало дать пояснения в главе (3).

4) Ввиду важности результата о корреляциях в расположении областей с минимумом добротности и эпицентральных зон сильных землетрясений и/или зон с повышенными значениями трещиноватости и флюидонасыщенности необходима авторская интерпретация, пусть предварительная. Эта корреляция отражает процесс подготовки очага землетрясения (в частности, приток флюидов), или является постсейсмическим эффектом из-за увеличенной трещиноватости, или суммарным эффектом? Ответ на вопрос предопределяет, как можно применять данный результат для оценок сейсмической опасности.

5) Сформулированное в разделе 4.5 положение о соответствии частоты среза f_c общему подобию очагов (при котором снятие напряжений $\Delta\sigma$ статистически независимо от M_w) является скорее гипотезой, чем выводом. Основания: относительно небольшая статистика (44 события), отсутствие оценок доверительного интервала (погрешности) при определении f_c (изгиб на графиках спектров на рис. 4.13 плавный, и визуальная оценка f_c весьма приближительна). Кроме того, в разделе 4.5 приведены примеры спектров для событий в диапазоне магнитуд 4-4.5, для которых подобие не выполняется.

6) В формулах (4.1), (4.2), (4.4), (4.7) много неточностей, которые бросаются в глаза из-за несоблюдения размерности и несовместимости с правильной формулой (4.5). При этом запись в (4.7) с $\Delta\sigma \sim M_0/R^2$ не согласуется, в принципе, с последующим утверждением о подобию очагов по спектральному параметру f_c , а фактически по радиусу очага (радиусу Брюна). Если опечатки получились при переносе формул из электронных копий книг Хавшова и др., то заметим, что добросовестное цитирование не препятствует исправлению явных опечаток.

7) Мелкое замечание: в формулах (2.6), (2.7) сомножители со знаком “±” следовало брать в скобки, по математической традиции. В формуле (2.3) не раскрыто обозначение в левой части Q_t . Или индекс t - опечатка, правильно Q_c ?

Замечания не влияют на положительную и высокую оценку работы в целом и не затрагивают защищаемые положения.

11. Заключение

Диссертация Зверевой А.С. «Добротность литосферы и спектральные параметры очагов землетрясений Северного Кавказа» является законченным научно-квалификационным исследованием закономерностей затухания сейсмических волн в литосфере Северного Кавказа и распределений спектральных и динамических параметров очагов землетрясений в этом регионе. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования направлены на решение актуальных вопросов снижения опасных последствий сейсмических катастроф. Полученные результаты обладают новизной и являются значимыми для практических приложений, так как они способствуют пониманию геодинамических процессов в очагах сильных землетрясений и развитию новых методов оценки сейсмической опасности. Научные результаты диссертации соответствуют пунктам 4, 7, 8 Паспорта специальности 1.6.9 - «Геофизика». Структура диссертации логична, материал изложен хорошим языком, содержит необходимые иллюстрации. Все это обеспечивает внутреннее единство, т.е. целостность работы и свидетельствует о ее высоком научном уровне.

Таким образом диссертация «Добротность литосферы и спектральные параметры очагов землетрясений Северного Кавказа» **соответствует критериям** «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842), «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 г. № 335), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Соискатель Зверева Анастасия Сергеевна **заслуживает присуждения** ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 - «Геофизика».

Богомоллов Леонид Михайлович



доктор физико-математических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН).

Адрес места работы: 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б

Телефон: +7 (4242) 791-517. nauka@imgg.ru, bleom@mail.ru

Я, **Богомолов Леонид Михайлович**, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, а также их дальнейшую обработку.

Подпись Богомолова Л.М. заверена

Ученый секретарь ИМГи ДВО РАН,

Кандидат технических наук



А.А. Верхотуров