

На правах рукописи



ЗВЕРЕВА Анастасия Сергеевна

**ДОБРОТНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА**

Специальность 1.6.9. – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Обнинск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН).

**Научный
руководитель:**

Собисевич Алексей Леонидович - член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий VII отделением, заведующий «Лабораторией фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии» Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН).

**Официальные
оппоненты:**

Богомолв 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)

Добрынина Анна Александровна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН)

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, г. Москва

Защита диссертации состоится **3 октября 2024 г. в 14:00** часов на заседании диссертационного совета 24.1.132.01 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 1 экземпляре, просьба направлять по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета кандидату физико-математических наук Жосткову Руслану Александровичу.

Автореферат разослан « » августа 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Устойчивое экономическое развитие южных регионов Российской Федерации неразрывно связано с решением вопросов обеспечения безопасности жизнедеятельности в случае реализации вероятных сценариев возникновения и развития природно-техногенных катастроф, обусловленных опасными эндогенными процессами. Понимание причин их возникновения, глубинных механизмов, территориального распространения и повторяемости во многом зависит от уровня организации междисциплинарных систем геофизических инструментальных наблюдений, развернутых на исследуемой территории с целью контроля состояния геологической среды и его возможных изменений.

Кавказский регион – один из наиболее уязвимых в отношении сейсмической опасности регионов нашей страны. Географически он расположен между Черным и Каспийским морями, и подразделяется на Северный Кавказ, известный также как Предкавказье (т.е. район к северу от Большого Кавказа), собственно Большой Кавказ и Южный Кавказ, известный также как Закавказье (т.е. район к югу от Большого Кавказа). В качестве объекта исследования в настоящей работе будут рассмотрены Северный Кавказ и Большой Кавказ в границах Российской Федерации и сопредельных территорий. Для удобства здесь и далее в тексте вся область исследования будет называться «Северный Кавказ».

Весь Кавказский регион характеризуется высоким уровнем сейсмической активности – наибольшим в европейской части России. В соответствии с картой «Общего сейсмического районирования Северной Евразии» (ОСР-2015 А и В) оценка сейсмического потенциала большей части территории Северного Кавказа соответствует в основном 8 – 9 балльным зонам интенсивности сотрясений (на средних грунтах в баллах шкалы MSK-64) [СП 14.13330.2018, 2018; Завьялов и др., 2018]. Большая часть территории имеет достаточно высокую плотность населения в многочисленных городах, что может привести к возникновению разномасштабных природно-техногенных катастроф с сопутствующими проблемами социально-экономического характера. Проведение геолого-геофизических исследований и мониторинга сейсмической активности позволяет уточнить современные представления о тектонике и геодинамике исследуемого региона, особенностях сейсмического режима и, как следствие, содействовать оценке сейсмической опасности и прогнозированию возможных мест и силы землетрясений, а также сопутствующих рисков.

Постоянное развитие и поддержка отечественных сетей инструментальных сейсмологических наблюдений в районах сейсмической и вулканической опасности закономерно способствовали снижению энергетического уровня уверенно регистрируемых землетрясений [Маловичко и др., 2020]. Это позволило накопить достаточный объем экспериментальных данных для проведения систематических исследований процессов затухания сейсмических волн в литосфере Северного Кавказа посредством оценки частотно-зависимого отношения добротности Q . Изучение пространственного распределения данного параметра позволяет не только выявить и уточнить особенности глубинного строения геофизической среды исследуемого

региона, но и отслеживать значимые изменения ее состояния по результатам длительных сейсмологических наблюдений.

Цель и основные задачи исследования. Целью работы являлось теоретическое и экспериментальное изучение особенностей затухания сейсмических волн в литосфере Северного Кавказа с последующим расчетом спектральных параметров очагов землетрясений умеренных магнитуд в регионе. Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. подготовить наиболее полную базу исходных данных региональных землетрясений, включая волновые формы и результаты рутинной обработки с выделением сейсмических фаз и основных параметров землетрясений [База данных «Землетрясения России»; Землетрясения Северной Евразии];
2. обосновать выбор программного обеспечения и методики расчета, определить значения определяющих параметров для расчета добротности методом огибающих кода-волн;
3. провести расчет значений частотно-зависимой добротности для каждой исследуемой станции сети Северного Кавказа, получить средние значения добротности для тектонических зон различного масштаба;
4. провести сравнительное исследование полученных зависимостей добротности с мировыми данными и результатами предыдущих исследований в регионе;
5. выполнить картирование станционных определений добротности с последующим их зонированием;
6. проанализировать региональные вариации сейсмической добротности в свете ранее полученных результатов геолого-геофизических исследований;
7. рассчитать очаговые спектры землетрясений Северного Кавказа ($9.0 < K_R < 13$) с использованием частотно-зависимой добротности. Проведение последующей оценки скалярного сейсмического момента и моментной магнитуды M_w ;
8. проанализировать взаимосвязь моментной магнитуды M_w , локальной магнитуды M_L и энергетического класса K_R ;
9. изучить свойства масштабирования очаговых спектров землетрясений Северного Кавказа.

Исходный материал. В работе использованы цифровые записи землетрясений, полученные региональной сетью сейсмических станций Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН). Основные параметры, используемых каталогов землетрясений были определены по данным региональных сетей сейсмологических наблюдений Северо-Осетинского (NOGSR) и Дагестанского (DAGSR) филиалов, а также Центрального отделения (OBGSR) ФИЦ ЕГС РАН в Обнинске за 2008-2022 гг. [База данных «Землетрясения России»].

Научная новизна. Для всей территории Северного Кавказа получена количественная оценка затухания поперечных волн в виде частотно-зависимой добротности среды и коэффициента затухания по записям локальных землетрясений сети сейсмических станций методом огибающих кода-волн. При этом впервые выполнена калибровка станций всей сети Северного Кавказа по добротности

поперечных волн, необходимая для расчета спектральных и динамических параметров очагов Северного Кавказа. Исследованы вариации затухания S-волн в литосфере Северного Кавказа и их районирование для последующего применения в задачах оценки сейсмической опасности.

По данным действующей сети сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН впервые выполнен расширенный анализ очаговых спектров, скалярных сейсмических моментов и моментной магнитуды M_w для очагов региональных сейсмических событий умеренной энергии ($9 < K_p < 13$). Изучено масштабирование очаговых спектров землетрясений магнитудного диапазона $M_w = 3 - 5$.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Аналитические выражения, полученные по данным инструментальных наблюдений локальных землетрясений с использованием метода огибающих кода-волн, позволяющие рассчитывать значения сейсмической добротности литосферы с учетом различных эффектов геометрического расхождения.

2. Модель объемного распределения значений затухания кода-волн, позволившая получить представление о пространственном распределении неоднородных структур в земной коре и верхней мантии Северного Кавказа.

3. Корреляционные связи между моментной магнитудой, локальной магнитудой и энергетическим классом для землетрясений Северного Кавказа.

Теоретическая и практическая значимость. В сейсмологических исследованиях добротность является одним из основных физических параметров среды, в которой распространяются сейсмические волны. Знания связанных с ней оценок затухания энергии сейсмических волн необходимы для многих задач прикладной и фундаментальной сейсмологии:

- исследование региональных особенностей строения среды, поскольку затухание напрямую связано с физико-химическим состоянием горных пород (распределение трещин, флюидонасыщенность, перепады температуры и давления в недрах Земли);
- расчет очаговых спектров землетрясений путем введения поправки за неупругое затухание волны в литосфере в наблюдаемый стационарный спектр;
- оценка сейсмического риска. Согласно исследованию [Шебалин и др., 2022], одним из факторов корректной оценки сейсмической опасности и составления карт ОСР является необходимость совершенствования региональных моделей затухания на разных расстояниях от эпицентров, в том числе отдельно для ближней зоны.

В этой связи, важными и актуальными представляются вопросы изучения региональных особенностей затухания сейсмических волн и свойств геофизической среды в целом.

Достоверность полученных в работе результатов достигается путем использования на сейсмических станциях метрологически поверенного оборудования, обеспечивающего качественные записи землетрясений, статистически представительной выборки рассматриваемых землетрясений, оптимального метода, широко применяемого в России и других странах, широко апробированного программного обеспечения SEISAN [Havskov et al., 2020], применяемого в различных

регионах мира и России более 30 лет и одновременно развиваемого авторами под потребности региональных задач. Для всех полученных результатов проведено сравнение с данными других исследований:

- добротность Q_c численно сравнивалась с результатами предыдущих исследований в регионе и с общемировыми значениями, рассчитанными по аналогичной методике;
- на качественном уровне проводилось сравнение полученных в настоящей работе пространственных закономерностей затухания с данными различных геолого-геофизических исследований;
- сопоставление результатов расчета сейсмического момента M_0 и моментной магнитуды M_w с данными GCMT, ISC и Крымского центра.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах исследования:

1. обзор ранее выполненных исследований по теме диссертации и выбор оптимального метода для исследования;
2. подготовка исходных данных: обработка сейсмограмм землетрясений, создание базы данных, подготовка входных данных для программы расчета;
3. проведение расчетов добротности Q_c методом огибающих кода-волн [Aki, Chouet, 1975] и спектральных параметров очагов землетрясений в рамках модели Дж. Брюна [Brune, 1970] в программе SEISAN;
4. графическое представление и анализ полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты исследований были представлены на семинарах ФИЦ ЕГС РАН и в Институте Физике Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, а также на международных и всероссийских конференциях, в том числе: 36th ESC General Assembly (г. Валетта, Мальта, 2018); Международные сейсмологические школы (г. Алматы, Казахстан, 2017; г. Кишинев, Молдавия, 2019; г. Минск, Беларусь, 2022; г. Ташкент, Узбекистан, 2023); Уральские молодежные научные школы по геофизике (г. Пермь, 2019, 2023); XV Международная конференция молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях» (г. Бишкек, Киргизия, 2023); XIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа» (г. Владикавказ, 2023); Восьмая молодежная тектонофизическая школа-семинар (г. Москва, 2023). Результаты работ были представлены в научных отчетах по теме НИР проводимых ФИЦ ЕГС РАН в рамках пункта № 136 «Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий»

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 24 работах, 6 из которых в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК («Доклады Академии Наук» Сер. Науки о Земле, 2019, 2023; «Известия РАН. Серия физическая», 2020; «Journal of Seismology», 2023; «Физика Земли», 2024; «Российский сейсмологический журнал», 2024).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 4 глав, введения и заключения. Общий объем работы составляет 138 страниц, включает 10 таблиц, 33 рисунка, 2 приложения, библиографический список из 182 наименований.

Благодарности. Автор благодарна своему научному руководителю чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. А. Л. Собисевичу за внимание и интерес к работе, и содействие в подготовке публикаций и текста диссертации. Искреннюю признательность автор выражает к.ф.-м.н. И.П. Габсатаровой за обучение теоретическим аспектам сейсмологии, совместную работу над публикациями и помощь в подготовке диссертации на всех этапах. Автор благодарит д.ф.м.н. Соколову Инну Николаевну за ценные консультации и помощь в подготовке диссертации к защите. За помощь в подготовке исходных данных, лежащих в основе диссертации, автор благодарна сотрудникам ФИЦ ЕГС РАН: Бабковой Е.А., Королецки Л.Н., Саяпиной А.А., Багаевой С.С., Клянчину А.И, Будеевой Н.В., Борисову П.А. Автор выражает признательность за совместную работу Prof. J. Havskov, к.ф.-м.н. Лиходееву Д.В. и к.ф.-м.н. Скоркиной А.А. За ценные замечания и консультации, которые помогли улучшить качество диссертации, автор благодарит: д.ф.-м.н. А.Д. Завьялова, д.ф.-м.н. Салтыкова В.А., к.ф.-м.н. Р.А. Дягилева, к.т.н. Шулакова Д.Ю., к.ф.-м.н. Петрову Н.В.

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.

Глава 1. Теоретический обзор современных представлений о затухании сейсмических волн в среде. Первая часть главы посвящена краткому обзору современных представлений о затухании сейсмических волн в литосфере. Приведено описание основных терминов, связанных с понятием затухания: геометрическое расхождение, добротность, рассеяние, внутреннее поглощение. Представлен обзор методов оценки затухания, теорий происхождения кода-волн и описание их свойств. Во второй части главы представлена краткая характеристика района исследования – Северного Кавказа: особенности региональной тектоники, глубинного строения, сейсмичности, описание современной сети сейсмических станций. Дается обзор предыдущих исследований затухания сейсмических волн в регионе.

Раздел 1.1. Основные теоретические аспекты, связанные с затуханием сейсмических волн.

Сейсмическая энергия E – это энергия землетрясения, в более узком смысле представленная суммарной энергией упругих волн, излученных очагом. При рассмотрении волн только с длиной меньшей, чем неоднородности среды (высокочастотное приближение), можно предположить, что сейсмическая энергия распространяется только вдоль лучей. Амплитуда волны по мере ее распространения из-за фокусировки или расфокусировки сейсмических лучей изменяется обратно пропорционально квадратному корню от площади поверхности участка волнового фронта, ограниченного лучевой трубкой. Таким образом, амплитуда увеличивается из-за фокусировки луча и уменьшается при распространении волнового фронта, что называется геометрическим расхождением. Геометрическое расхождение зависит от типа волны и расстояния, которое она проходит, и описывается через функцию $G(\Delta, h)$ (Δ – эпицентральный расстояние, h – глубина землетрясения), которую на локальных расстояниях можно упрощенно представить как:

$$G(\Delta, h) = 1/\sqrt{\Delta^2 + h^2} = 1/r = r^{-\beta} \quad (1)$$

Однако, уменьшение энергии при распространении волн в среде, помимо геометрического расхождения, происходит вследствие неупругости среды (собственно поглощение в материале) и рассеяния энергии на разномасштабных локальных неоднородностях, обладающих резонансными свойствами [Ризниченко, 1985; Раутиан, 1960]. Рассеяние перераспределяет энергию волны внутри среды, но не убирает энергию из общего волнового поля и, наоборот, внутреннее поглощение относится к различным механизмам, которые преобразуют энергию колебаний в тепло посредством процессов трения, вязкости и термической релаксации.

В настоящей работе под термином «затухание» рассматриваются суммарные потери энергии волны на поглощение и на рассеяние, не учитывая убывание амплитуд

за счет геометрического расхождения. Затухание волн обычно выражается через безразмерный параметр, который называется «добротность среды Q » [Ризниченко, 1985; Раутиан, 1960; Vormann et al., 2013a]:

$$Q = 2\pi E / \Delta E, \quad (2)$$

где E – пиковое значение упругой энергии в некотором объеме, ΔE – энергия, потерянная в каждом цикле вследствие неидеальной упругости материала. В практике сейсмологических исследований [Vormann et al., 2013a], выражение 2 обычно не используется непосредственно в таком виде, поскольку подвергать материал воздействию волн постоянной амплитуды и периода возможно только в специальных экспериментах, наиболее типична ситуация, в которой происходит затухание сигнала, образованного набором частот некоторого диапазона. В среде с линейным соотношением между напряжением и деформацией амплитуда волны A пропорциональна $E^{1/2}$. В упрощенном виде выражение для описания уменьшения амплитуды с расстоянием согласно [Navskov et al., 2010] представляется следующим образом:

$$A(f, t) = A_0 e^{\frac{-\pi f t}{Q(f)}}, \quad (3)$$

где A_0 – это первоначальная амплитуда колебаний, $A(t)$ – амплитуда через промежуток времени t , f – частота колебаний, а $Q(f)$ – частотно-зависимый параметр добротности.

Для количественной оценки затухания сейсмических волн наиболее распространены два подхода, предложенные Гусевым А.А. и Гусевой Е.М. [Гусев, Гусева, 2016]. В первом изучается уменьшение амплитуд сейсмических волн или амплитудных спектров с расстоянием за счет суммарного эффекта собственного поглощения и рассеяния на трассе, при этом делаются предположения относительно геометрического расхождения β для исключения его влияния на амплитуды. Влияния грунтовых условий площадки размещения сейсмической станции не учитываются. Наиболее распространенные методы в данном подходе: «Метод огибающих кода-волн» [Aki, Chouet, 1975], «Метод нормализации по коду» [Aki, 1980; Sato et al., 2012], «Метод сложенного спектрального отношения с использованием одной трассы» [Xie, Nuttli, 1988]. В другом подходе сравнивается форма спектров в зависимости от расстояния относительно формы предполагаемых очаговых спектров. Здесь влиянием геометрического расхождения можно пренебречь, поскольку предполагается, что оно постоянно во всей изучаемой частотной области. В рамках такого подхода существуют методы, позволяющие отделить потери энергии на рассеяние и поглощение, например, «Множественный анализ временных окон» (MLTWA), [Fehler et al., 1992; Абубакиров, 2005; Heller et al., 2022].

В настоящем исследовании изучение добротности проводилось «Методом огибающих кода-волн» [Aki, Chouet, 1975], основанном на оценке спада амплитуды, огибающей кода-волн. Кода-волны представляют собой окончание сейсмического сигнала локального или регионального события и находятся в «хвосте» сейсмограммы после прихода основных типов волн, таких, как P , S и поверхностных волн,

зарегистрированных на малых расстояниях от землетрясения. Данный метод является одним из наиболее широко применяемым в мировой практике из-за математической простоты модели и стабильности результатов.

Раздел 1.2. Затухание сейсмических волн в литосфере Северного Кавказа.

Современный сейсмический мониторинг на Северном Кавказе производится в непрерывном режиме наблюдений сетью сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН. Возможности сети [Маловичко и др., 2020, Габсатарова, Зверева, 2023] позволяют проводить детальные исследования. Ранее расчеты частотно-зависимой добротности земной коры и верхней мантии на Кавказе проводились с использованием данных одиночных сейсмостанций и записей наиболее сильных землетрясений [Павленко, 2008, 2010, 2016, 2020; Павленко, Павленко, 2016; Харазова и др., 2016; Кромский и др., 2018; Кирсанов, Павленко, 2019; Собисевич и др., 2019; Лиходеев, Зверева, 2020; Зверева, Бутырин, 2018]. В этих работах использовались данные 8 сейсмических станций: «Сочи» (SOC), «Анапа» (ANN), «Кисловодск» (KIV) и «Махачкала» (MAK), «Гузерибль» (GUZR), «Домбай» (DOM) и «Нейтрино» (NEY), «Красная Поляна» (RPOR).

Выводы по главе 1. Материалы исследований условий распространения, затухания и рассеяния сейсмических волн демонстрируют неразрывную связь основных физических характеристик и геодинамической активности глубинных структур литосферы с понятием сейсмической добротности, определяющей волновые свойства разномасштабных объемов разломно-блоковой геологической среды.

Среди известных в России и за её пределами методов оценки сейсмической добротности наиболее перспективным, благодаря простоте математической модели и стабильности результатов, для исследования особенностей затухания сейсмических волн в литосфере Северного Кавказа представляется метод огибающих кода-волн.

Северный Кавказ – один из наиболее уязвимых в отношении сейсмической опасности южных регионов нашей страны. Благодаря техническому и организационному совершенствованию сети сейсмологических наблюдений ФИЦ ЕГС РАН на Северном Кавказе и накоплением к настоящему времени значительного объема данных стало возможным проведение оценки частотно-зависимой добротности земной коры в региональном масштабе.

Глава 2. Расчет добротности литосферы Северного Кавказа. Данная глава посвящена описанию метода и непосредственным расчетам сейсмической добротности литосферы Северного Кавказа методом огибающих кода-волн по записям кавказских землетрясений. Приводятся описание исходных данных, метод, алгоритм расчета в программном комплексе SEISAN, основные результаты, а также сравнение с общемировыми данными и предыдущими исследованиями в регионе.

Раздел 2.1. Метод огибающих кода-волн.

В основе метода огибающих кода-волн [Aki, Chouet, 1975; Раутиан и др., 1981] лежит принцип подавления эффектов источника излучения и локальных эффектов в спектрах поперечных волн с помощью кода-волн, измеренных на фиксированном интервале времени с момента первого вступления. Используется модель однократного рассеяния, где кода-волны представляются в виде суперпозиции объемных волн, отраженных от случайно распределенных неоднородностей, а для устранения эффектов

направленности излучения проводится усреднение по множеству событий с очагами, расположенными в широком диапазоне азимутов относительно точки приема. Кода-волны на разных частотах рассеиваются от неоднородностей разного размера [Aki and Chouet, 1975; Раутиан и др., 1981]. Потеря энергии волны на многих таких неоднородностях объясняется явлением рассеяния.

Амплитуды кода-волн в модели однократного рассеяния могут быть представлены в следующем виде [Aki, Chouet, 1975]:

$$A(f, r) = t^{-\beta} A_0 e^{\frac{-\pi f r}{Q_c(f)}}, \quad (4)$$

где A_0 – начальная амплитуда, β – коэффициент геометрического расхождения. Логарифмирование соотношения (4) дает:

$$\ln(A(f, t)) + \beta \ln(t) = \ln(A_0) - \frac{\pi f t}{Q_c(f)}. \quad (5)$$

Здесь огибающая $\ln(A(f, t)) + \beta \ln(t)$ как функция времени от заданной частоты f (в соответствии с полосой пропускания фильтра) является прямой линией с наклоном $-\pi f / Q_c(f)$, по которому и определяется добротность $Q_c(f)$. Согласно [Раутиан и др., 1981] время начала окна коды должно превосходить, как минимум вдвое время пробега для S -волны. Установлено [Aki, Chouet, 1975; Sato et al., 2012], что поскольку в коде преобладают S -волны, то и добротность Q_c , рассчитанная по коде, включает в себя компоненты рассеяния (Q_{sc}) и поглощения (Q_i) S -волн и имеет частотную зависимость, с частотным параметром α :

$$Q_c = Q_0 f^\alpha, \quad (6)$$

Раздел 2.2. Исходные данные. Всего в расчетах были использованы данные о 800 землетрясениях с глубинами $h=1-45$ км в земной коре, произошедших в период 2013 – 2022 гг., с магнитудами $M=1.8 - 5.5$.

Раздел 2.3. Выбор параметров для проведения расчета. Расчет добротности проводился в программном комплексе SEISAN [Havskov et al., 2016, 2020]. Для поверхностных волн было установлено значение коэффициента геометрического расхождения $\beta=0.5$, а для объемных волн $\beta=1.0$. Время начала окна коды (LT, рис. 1а) относительно времени в очаге (T_0) составляет 30 с, длительность окна коды (CW, рис. 1б) также 30 с. Полученные фрагменты волновых форм коды были обработаны двухоктавным фильтром Баттерворта с использованием предустановленных полос пропускания: 0.5–2.0, 1–4, 2–8, 4–16 и 8–32 Гц с центральными частотами $f_0=1, 2, 4, 8$ и 16 Гц (рис. 1б). В обработке участвовали записи с отношением сигнал/шум $SNR>3$. Для каждой полосы частот путем вычисления среднеквадратичных значений в скользящем окне длительностью пять циклов строилась огибающая коды, а также распределение значений логарифма амплитуд кода-волн с последующей линейной аппроксимацией по методу наименьших квадратов и определением коэффициента корреляции $Corr>-0.6$ (рис. 1в). Значения Q_c , рассчитывались с использованием частотно-зависимой степенной аппроксимации (6) (рис. 1г).

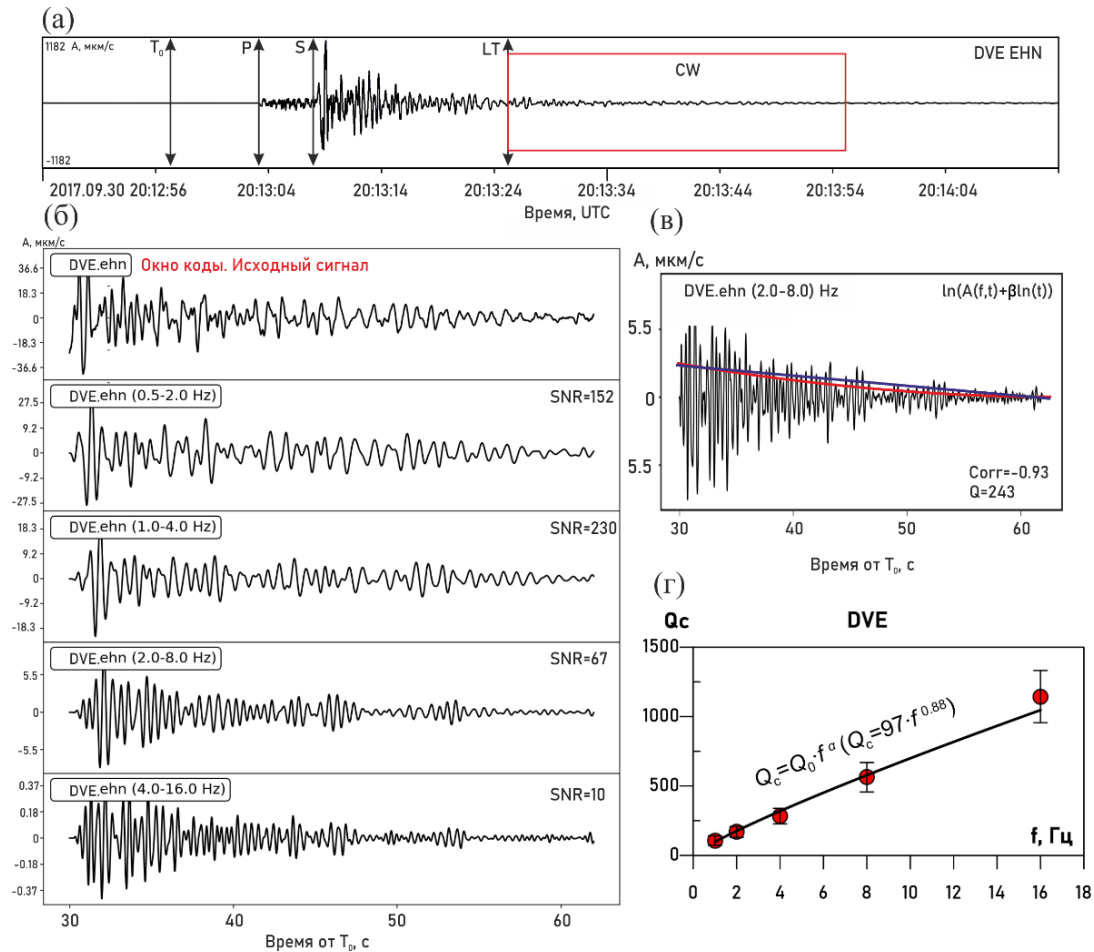


Рис. 1. Процесс обработки данных модулем «Coda Q» программного комплекса SEISAN для оценки частотно-зависимых значений добротности Q_c . (а) – исходная сейсмограмма землетрясения 12 декабря 2016 г. в 23:36:15 (UTC) в пункте наблюдения Дышне-Ведено (DVE) с отметками времен вступления P и S волн, времени в очаге (T_0), времени начала окна коды (LT), а также длительности окна коды (CW); (б) – окно коды (CW) исходного сигнала и результатов полосовой фильтрации; (в) – огибающая кода-волн в полосе частот 2.0 – 8.0 Гц, $\text{Corr} = -0.93$ – коэффициент корреляции с линейной аппроксимацией; (г) – среднее значение Q_c на каждой центральной частоте со стандартными отклонениями и аппроксимирующей степенной функцией.

Раздел 2.4. Результаты расчетов. Средние значения добротности Q_c на каждой частоте рассчитывались на основе всех полученных записей. В общей сложности, получено 9876 и 9083 значений Q_c (при $\beta=0.5$ и 1.0 соответственно). Значения Q_c рассчитывались для каждой сеймостанции (53) и центральной частоты по формуле б (рис. 1г). Получены средние значения Q_c в виде следующих соотношений:

$$Q_c = 74 \pm 16 \cdot f^{0.95 \pm 0.11} \quad \text{при } \beta = 0.5 \quad (7)$$

$$Q_c = 94 \pm 23 \cdot f^{0.95 \pm 0.13} \quad \text{при } \beta = 1.0 \quad (8)$$

Также на каждой центральной частоте для геометрического расхождения $\beta=1.0$ был проведен расчет коэффициента затухания по формуле:

$$\delta = \frac{\pi f}{V Q_c}, \quad (9)$$

где f – частота, Q_c – добротность на этой частоте f , V – скорость объемной S-волны (средняя скорость S-волн составляет 3.4 км/с). Расчет проводился отдельно для каждой сейсмической станции и центральной частоты (рис. 2), затем определялось среднее значение для всего Кавказа. Установлено, что, начиная с частоты 4 Гц, наблюдаются близкие значения коэффициента затухания для всей территории Кавказа, стандартные отклонения не превышают 17%.

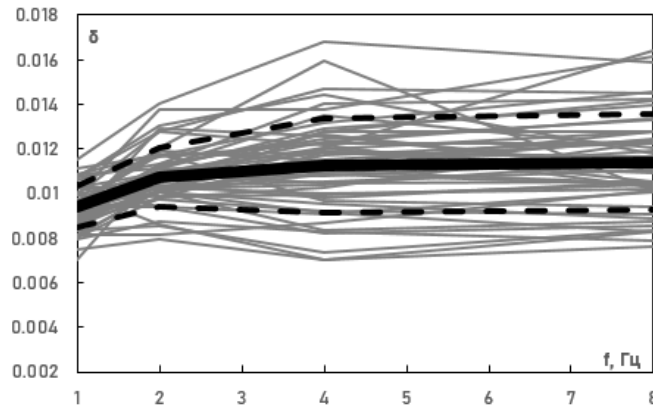


Рис. 2. Значение коэффициента затухания δ на каждой центральной частоте для отдельных сейсмических станций (серые линии) и среднее значение (черная толстая линия) со стандартным отклонением (черные пунктирные линии).

Раздел 2.5. Сравнение результатов расчетов с аналогичными результатами, полученными для других регионов мира, а также с данными предыдущих исследований. Проведено сравнение результатов настоящей работы, проведенной автором, с исследованиями, полученными в различных геотектонических обстановках по всему миру [Навсков et al., 2016, Добрынина и др., 2011]. Как и ожидалось, полученные значения добротности $Q_c=94$, коэффициента затухания $\delta=0.0094-0.0118$ и частотного параметра $\alpha=0.95$ соответствуют тектонически активным регионам мира, что также подтверждает его принадлежность к тектоническим структурам с высоким уровнем активности.

Сравнение с данными предыдущих исследований по Северному Кавказу [Павленко, 2008, 2016; Кромский и др., 2018] показало, что значения частотно-зависимой добротности $Q_c(f)$ для сейсмостанции «Анапа» (ANN) $Q(f)=90 \cdot f^{0.7}$, оказались близкими к настоящей работе $Q_c=(94 \pm 23) \cdot f^{0.95 \pm 0.13}$. Также проведено сравнение с результатами исследований [Собисевич и др., 2019; Лиходеев, Зверева, 2020; Зверева, Бутырин, 2018] для трех сейсмических станций «Домбай» (DOMR), «Гузерибль» (GUZR) и «Красная Поляна» (RPOR).

Выводы по главе 2.

1. Подготовлена база данных землетрясений Северного Кавказа, выбран программный комплекс для получения численных оценок значений частотно-зависимой добротности литосферы методом огибающих кода-волн, автором разработана технология расчёта, включая и процедуру выбора оптимальных параметров.

2. По результатам анализа сейсмограмм 800 локальных землетрясений на 53 сейсмических станциях сети Северного Кавказа ФИЦ ЕГС РАН с использованием метода огибающих кода-волн, автором работы получены аналитические выражения,

позволяющие рассчитывать значения сейсмической добротности литосферы с учетом различных эффектов геометрического расхождения $\beta=0.5$ (поверхностные волны) и $\beta=1.0$ (объемные волны).

3. Показано, что характерные для Северного Кавказа значения частотно-зависимой добротности $Q_c(f)$ в целом соответствуют тектонически высокоактивным регионам нашей планеты.

Глава 3. Региональные вариации затухания. В данной главе рассмотрены региональные особенности затухания сейсмических волн на Северном Кавказе путем проведения районирования расчетных значений добротности Q_c , полученных в главе 2. Также проведен анализ зависимости значений добротности от времени начала окна коды. Данные исследования необходимы для лучшего понимания взаимосвязи между пространственными вариациями сейсмического затухания с особенностями геолого-тектонического строения и физическими свойствами среды во всем регионе. Построены карты пространственного распределения значений сейсмической добротности литосферы Q_c .

Раздел 3.1. Пространственное распределение значений добротности Q_c и коэффициента затухания δ . Многочисленные исследования [Добрынина и др., 2019; Харазова и др., 2016; Giampiccolo, Tuve, 2018; Dasovic et al., 2013] показывают связь вариаций добротности в регионе с особенностями его геолого-геофизического строения. Для изучения региональных вариаций добротности Q_c на Северном Кавказе проведено районирование [Zvereva et al., 2023; Зверева и др., 2023а, 2024]. Рассматриваемая модель однократного рассеяния предполагает, что кода-волны рассеиваются в эллипсоидальном объеме среды, в фокусах которого расположены очаг землетрясения и сейсмостанция, а расчётные значения Q_c соотносятся со «средними точками», представляющими собой проекции на поверхности центра эллипсоида [Pulli, 1984]. На основании пространственного группирования средних точек и учитывая границы тектонических зон по Хаину [Хаин, 1973] были выделены 7 основных зон (рис 3): (БК1) – Сочинско-Краснополянская зона Большого Кавказа; (БК2) – Чхалтинско-Рачинская зона Большого Кавказа; (БК3) – Закавказская зона Большого Кавказа; (ДК) – Дагестанский клин; (ЗК) – Западный Кавказ; (ЛМЗ) – Лабино-Малкинская зона и (ТКП) – Терско-Каспийский прогиб. Для всех рассматриваемых зон были рассчитаны значения частотно-зависимой добротности $Q_c(f)$ и коэффициента затухания δ (рис. 4).

Раздел 3.2. Вариации добротности Q_c и коэффициента затухания δ при различных значениях времени начала окна коды. Q_c и частотный параметр α зависят от заданного значения времени начала окна коды (LT) [Havskov et al., 1989; Ibanez et al., 1990; Gupta et al., 1998; Calvet, Margerin, 2013 и др.]. Для анализа были рассчитаны значения Q_c и α для диапазона LT=20-150 с.

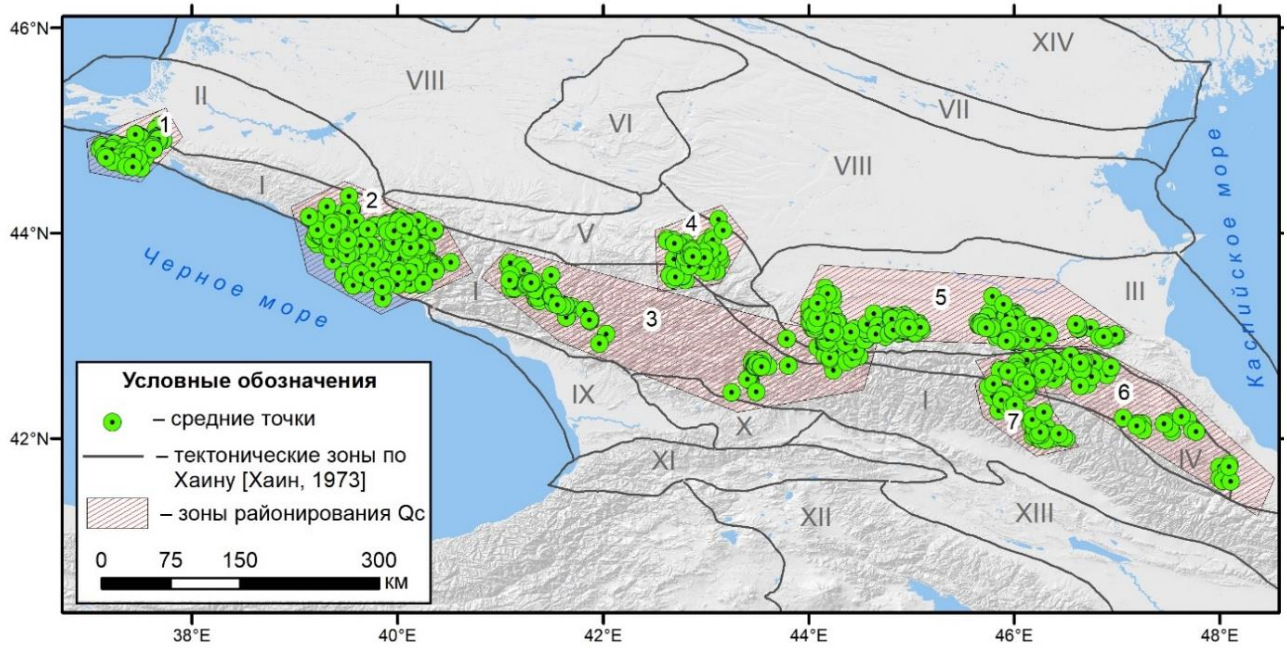


Рис. 3. Карта распределения средних точек и зон районирования Q_c . Границы зон: 1 – Западный Кавказ (ЗК), 2 – Большой Кавказ 1 (БК1), 3 – Большой Кавказ 2 (БК2), 4 – Лабино-Малкинская зона (ЛМЗ), 5 – Терско-Каспийский прогиб (ТКП), 6 – Дагестанский клин (ДК), 7 – Большой Кавказ 3 (БК3). Тектонические зоны [Хаин, 1973]: I – Большой Кавказ, II – Западно-Кубанский передовой прогиб, III – Терско-Каспийский передовой прогиб, IV – Дагестанский клин, V – моноклираль Предкавказья, VI – Ставропольский свод, VII – Кумо-Маньчский прогиб, VIII – структуры Скифской платформы, IX – Рионский межгорный прогиб, X – Джавахетское нагорье, XI – Аджаро-Триалетская складчатая область, XII – мегантиклинорий Малого Кавказа, XIII – Куринский и Нижнеараксинский прогибы, XIV – Донецко-Каспийская погребенная складчатая область.

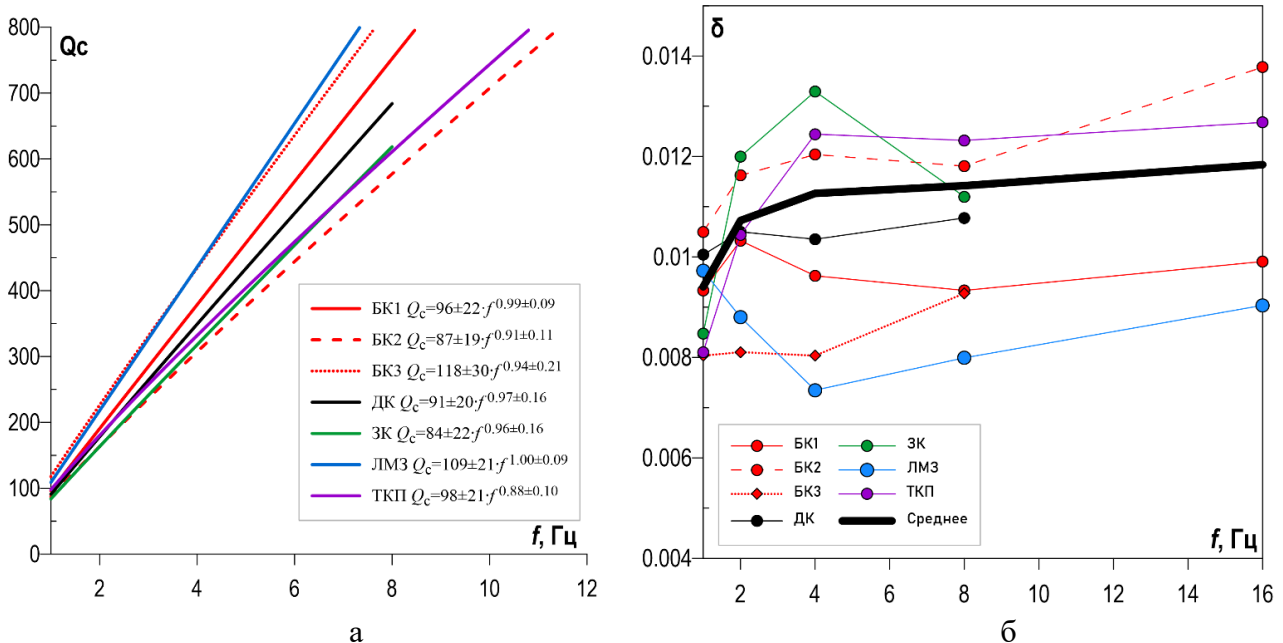


Рис. 4. Частотно-зависимые степенные функции $Q_c(f)$ (а) и графики зависимости коэффициента затухания δ от частоты (б) для исследуемых зон.

Проведено сравнение полученных результатов с теоретической моделью А.А. Гусева [Gusev, 1995], где представлено сопоставление экспериментальных значений Q_c по мировым данным и его теоретическим предсказанием Q_c (при геометрическом расхождении $\beta=0.5$). Результаты настоящего исследования (красная линия рис. 5а) в целом сопоставимы, значения Q_c также приближаются к Q_i при больших значениях LT . Однако, начиная с $LT=60$ с, не наблюдается непрерывного увеличения Q_c с течением времени, Q_c перестаёт непрерывно увеличиваться и достигает плато или достигает «насыщения». На рис. 5б показана зависимость частотного параметра α от LT , которая также сопоставима с предсказанной А.А. Гусевым. Исследования [Fehler, Sato, 2003; Sato et al., 2012; Shapiro et al., 2000; Xie, Mitchell, 1990 и др.] показывают, что при малых значениях LT затухание волн происходит, в первую очередь, в земной коре и вклад в добротность Q_c в основном оказывает рассеяния, а при больших значениях LT – внутренние поглощение Q_i .

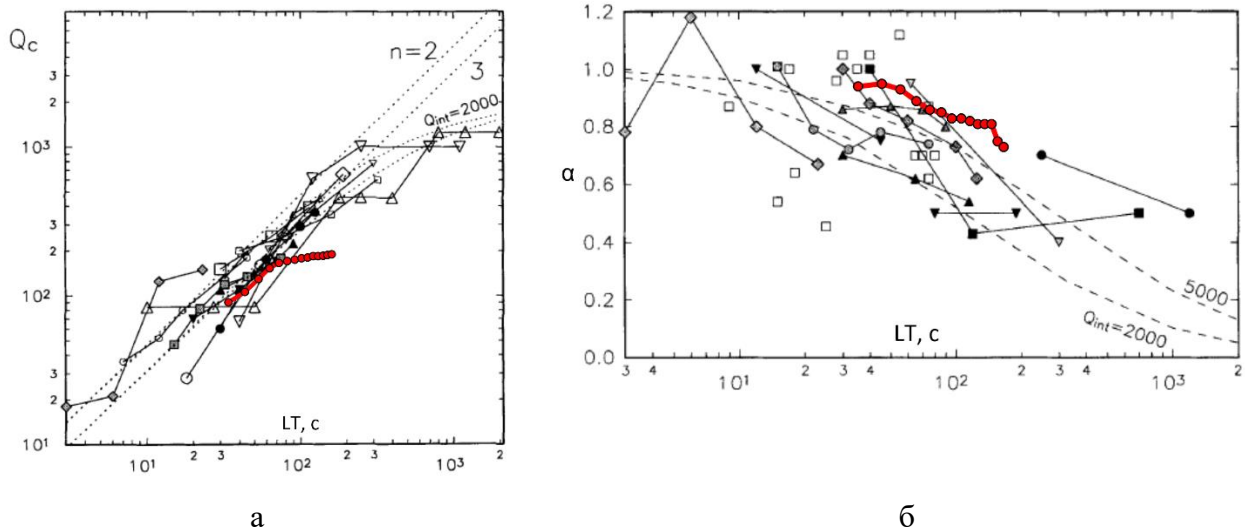


Рис. 5. Наблюдаемые значения Q_c (а) и частотный параметр α (б) в разных тектонических регионах в зависимости от времени начала окна коды (LT) для $f=1.5$ Гц. Рисунок изменен из [Gusev, 1995]. Диапазон результатов Северного Кавказа обозначен красными кривыми.

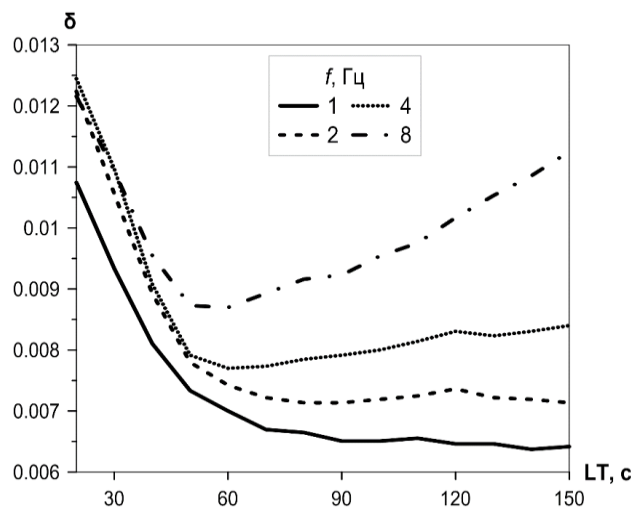


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента затухания δ от LT на каждой центральной частоте f

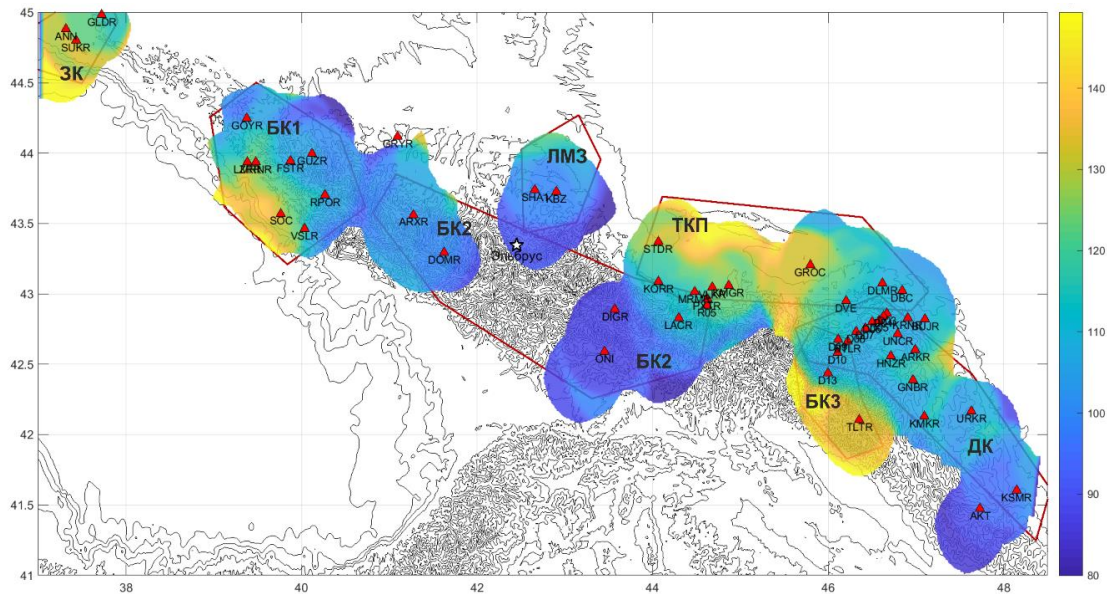
При LT 60-150 эллипсоидальный объем среды имеет нижнюю границу приблизительно равную 138-192 км, при которой значительная часть кода-волн проходит через мантию. Из рис. 6 видно, что на частотах 1-4 Гц, начиная с $LT=60$ с, значение коэффициента затухания постоянно, результаты расчёта добротности также показывают, что Q_c меньше зависит от частоты, что отражается в уменьшении значения α с увеличением LT , $\alpha=0$ указывает на отсутствие частотной зависимости. Можно сделать вывод, что при $LT>60$ за счет однородной структуры мантии в целом будут иметь место меньшие потери на рассеяние, чем в земной коре, что приведет к более высоким значениям Q_c , приближающимся к Q_i , и, следовательно, к насыщению.

Раздел 3.3. Карты региональных вариаций добротности Q_c . Кода-волны на разных частотах рассеиваются от неоднородностей разного размера [Aki and Chouet, 1975; Раутиан и др., 1981]. Потеря энергии волны на многих таких неоднородностях объясняется явлением рассеяния. Если размер неоднородного включения сопоставим с длиной движущейся волны или больше ее, то такая неоднородность повлияет на амплитуду волны, так как часть энергии будет затрачена на образование отраженных волн. Волны, длины которых значительно больше встречаемых неоднородностей, проходят их без потери энергии. Таким образом, зная скорость S волны ($V_s=3.4$ км/с) и частоту f (Гц), можно оценить длину волны и примерный размер неоднородности, где происходит рассеяние. На центральной частоте 1 Гц кода-волны рассеиваются на относительно крупномасштабных неоднородностях с размерами порядка 1.7-6.8 км, а в более высоком частотном диапазоне – на неоднородностях меньшего размера порядка 0.8-3.2, 0.4-1.6 и 0.2-0.8 км для центральных частот 2, 4 и 8 Гц соответственно.

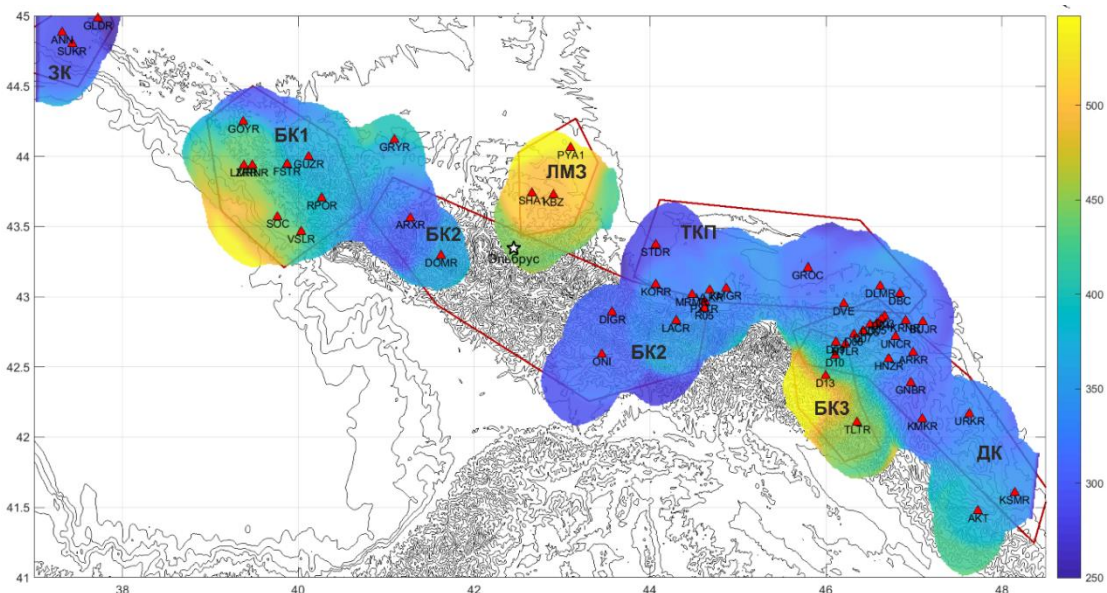
Для территории Северного Кавказа автором были созданы карты пространственных вариаций добротности, алгоритм построения реализован с использованием инструментария пакета MATLAB [Лиходеев, 2019]. Для анализа были выбраны карты, построенные для центральных частот 1 Гц и 4 Гц, в расчете которых участвовали наиболее представительные по числу анализируемых землетрясений выборки. На каждой карте выделяются отдельные зоны повышенных и пониженных значений добротности (рис. 7а и 7б).

Область наименьших значений добротности наблюдается в Чхалтинско-Рачинской зоне Большого Кавказа (БК2) (рис. 7). Повышенные значения добротности наблюдаются в шельфовой части Черного моря в пределах Западного Кавказа (ЗК) и Сочинско-Краснополянской зоны Большого Кавказа (БК1), а также Закатальской зоне (БК3) (рис. 7а). Промежуточные оценки добротности получены в пределах Сочинско-Краснополянской сейсмогенерирующей зоны (БК1) на Западном Кавказе и Дагестанского клина (ДК) на Восточном Кавказе (рис. 4а, 7). Области перехода от структур Большого Кавказа к передовым прогибам – Индоло-Кубанскому (ЗК) и Терско-Каспийскому (ТКП) имеют сложное строение в разных своих частях, что находит отражение в пространственном распределении добротности на различных частотах. Особого внимания заслуживает Лабино-Малкинская зона (ЛМЗ) – ей соответствуют наибольшие значения добротности на Северном Кавказе (рис. 4, 7б), что свидетельствует о более однородном строении литосферы в пределах данной зоны. Исключение составляет частота 1 Гц, на которой наблюдаются низкие значения

добротности, что сопоставляется с наличием в ее пределах Эльбрусской вулканической области.



а



б

Рис. 7 Карты распределения добротности на частоте 1 Гц (а) и 4 Гц. (б), рассчитанные при времени начала окна коды $LT=30$ с и окне коды 30 с

Выводы по главе 3. В рамках настоящей работы построена модель объемного распределения значений затухания кода-волн в литосфере Северного Кавказа, позволившая получить представление о пространственном распределении неоднородных структур в земной коре и верхней мантии Северного Кавказа.

Выявлено, что при временах начала окна коды $LT > 60$ с в общих потерях энергии вследствие затухания преобладает внутреннее поглощение, имеющее постоянное значение, а вклад рассеяния минимален за счет того, что большая часть кода-волн рассеивается в мантии с более вязкой и однородной структурой. Различия в значениях LT , при котором наступает насыщение для разных частот, могут быть связаны с размером неоднородных структур в исследуемом объеме.

На основании созданных карт распределения Q_c на Северном Кавказе выявлено, что области минимальных значений добротности соответствуют тектонически неоднородным областям, характеризующимся повышенными значениями трещиноватости и флюидонасыщенности. Повышенные значения добротности в основном соответствуют локальным зонам растяжения литосферы в шельфовой части Черного моря, в Терско-Сунженской структуре Терско-Каспийского прогиба и Закатальской зоне.

Глава 4. Спектральные параметры очагов землетрясений Северного Кавказа. В данной главе представлены результаты анализа спектральных параметров очагов региональных сейсмических событий. Определены сейсмические моменты и моментные магнитуды M_w для кавказских землетрясений. Проведено сравнение значений полученных параметров с результатами из других источников. По рекомендации IASPEI [Bormann et al., 2013b]) наиболее предпочтительной магнитудой в каталогах землетрясений является моментная магнитуда M_w [Kanamori, 1977], напрямую связанная с сейсмическим моментом очага, M_0 . Установлены корреляционные связи между M_w , M_L и K_R для Северного Кавказа. Полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для дальнейшего применения развиваемого подхода в практически значимых оценках спектральных параметров очагов землетрясений Северного Кавказа для сопоставимых магнитуд. Проведено исследование масштабирования очаговых спектров землетрясений Северного Кавказа, что является важным практическим результатом, поскольку позволяет оценить вероятностный диапазон для сильных движений, наблюдаемых на исследуемой территории, что является одной из базовых характеристик при выполнении работ по оценке сейсмической опасности.

4.1. Метод расчета спектральных параметров очагов землетрясений.

В теории очаговый спектр смещения описывается уровнем плоского участка спектра и его точками излома – характерными (угловыми) частотами. Для решения различных задач сейсмологии в качестве модели сейсмического очага наиболее распространена модель «омега-квадрат» (ω^{-2}) Дж. Брюна [Brune, 1970], включающая плоский ($\sim f^0$) участок на низких частотах и убывание по f^2 на высоких частотах.

В качестве исходных данных были отобраны 127 землетрясений ($K_R=8.7-14.5$) на территории Северного Кавказа, за период 2008–2021 гг., с $h=1-85$ км. Процедура обработки [Зверева и др., 2023 б,в; Зверева, 2023] основана на вычислении спектра смещений объёмной S -волны (рис. 8) путем выполнения быстрого преобразования Фурье, с внесенными поправками за АЧХ сейсмологической аппаратуры и затухание на пути станция-источник.

Для расчёта использовались сейсмограммы только с соотношением сигнал/шум (SNR) больше 2. Потери за неупругое затухание задавались в виде частотно-зависимой добротности (формула 8) и приповерхностного затухания $\kappa=0.02$. Поправка за геометрическое расхождение $G(\Delta, h)$ рассчитывалась в зависимости от эпицентрального расстояния Δ и глубины h . Далее определялся уровень плоского участка спектра Ω_0 как полный вектор смещения S -волны (м·с), приведённый к условиям

однородного упругого полупространства. Расчёт сейсмического момента M_0 проводился по формуле:

$$M_0 = \frac{\Omega_0 4\pi\rho V^3}{0.6 \times 2.0 \times G(\Delta, h)}, \quad (10)$$

где ρ – плотность (кг/м^3), V – скорости S волн (м/с), 0.6 коэффициент, учитывающий средний эффект радиального расхождения лучей, 2.0 – коэффициент, учитывающий влияние эффекта свободной поверхности. Значения скорости V и плотности ρ соответствуют скоростному разрезу [Атлас..., 2013] в соответствии с глубиной конкретного землетрясения. Моментная магнитуда M_w рассчитывалась по формуле:

$$M_w = 2/3(\lg M_0[\text{Н}\cdot\text{м}]) - 6.06. \quad (11)$$

Таким образом, для каждого землетрясения были получены соответствующие значения спектральных параметров по данным каждой сейсмической станции и общее среднее.

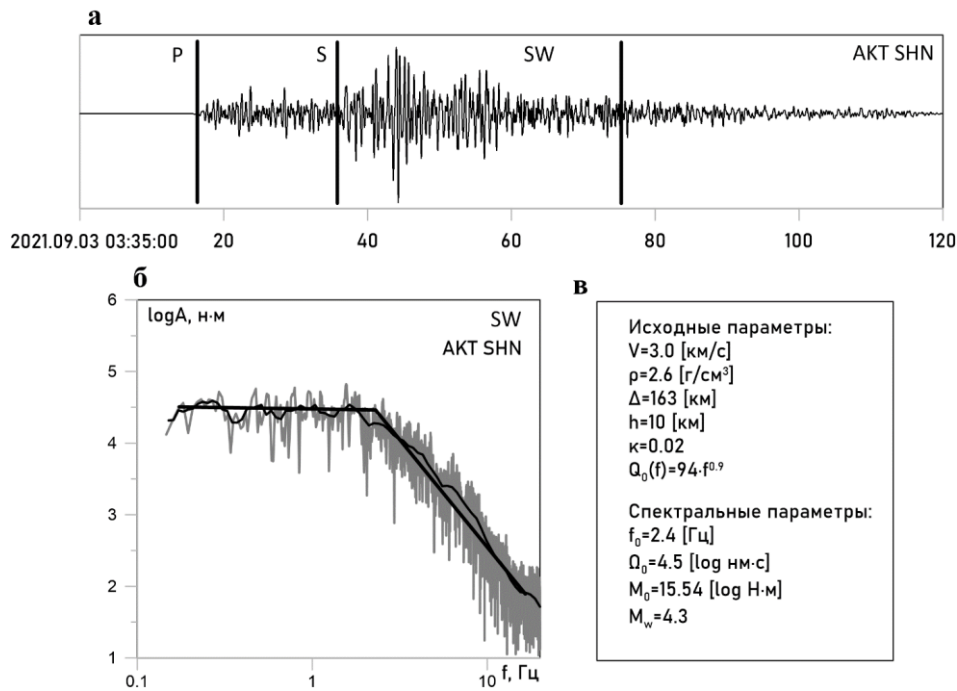


Рис. 8. Пример расчёта спектральных параметров очага землетрясения 3.09.2021 г на записи горизонтальной N компоненты сейсмической станции «Ахты» (АКТ) в соответствии с моделью Брюна: а – фрагмент сейсмограммы и временной интервал для расчета спектра смещений S-волны. б – спектр смещений с поправками за затухание и геометрическое расхождение (серым цветом показан исходный спектр сейсмического сигнала, тонкой чёрной линией – сглаженный спектр, чёрными прямыми линиями – асимптоты по модели Брюна); в – исходные параметры для расчета очагового спектра и сейсмического момента: V – скорость распространения S волн, ρ – плотность, Δ – эпицентрального расстояние, h – глубина, κ – приповерхностное затухание, $Q_0(f)$ – частотно-зависимая добротность; рассчитанные спектральные параметры: f_c – угловая частота, Ω_0 – уровень площадки спектра, M_0 – сейсмический момент, M_w – моментная магнитуда.

4.2. Сопоставление полученных результатов M_w и M_0 с данными из других источников. Эталонном для сравнения полученных оценок сейсмического момента M_0 и моментной магнитуды M_w были традиционно приняты оценки из глобального каталога тензора сейсмического момента (СМТ) [The Global Centroid..., 2022]. Среднее значение разностей между «эталонными» и настоящими оценками, полученными в данной работе, составило 0.04, в то время как для значений магнитуд $M_w > 5.0$ наблюдается полное соответствие. Проведено сравнение полученных результатов с долговременными зависимостями разных зон Кавказа, установленными в [Пустовитенко, Пантелеева, 1990] и выявлено, что в целом средняя зависимость в настоящем исследовании занимает промежуточное положение между Крымом и средней зависимостью по всему Кавказу.

4.3. Энергетический класс K_p и локальная магнитуда M_L на Северном Кавказе. В настоящей работе были сопоставлены значения магнитуды M , полученные пересчетом из K_p по формуле $M=(K-4)/1.8$, с другими магнитудными шкалами M^* : mb^{ISC} и mb^{GSRAS} – телесеизмические магнитуды по объемной P -волне, рассчитанные в «Международном сейсмологическом центре» [International Seismological Centre] и «Службе срочных донесений» [Сейсмологический бюллетень] ФИЦ ЕГС РАН, соответственно, M_w – моментной магнитудой и локальной магнитудой M_L .

В предположении линейной связи между различными типами магнитуд аналогично исследованию [Абубакиров и др., 2018] был выполнен регрессионный анализ зависимостей вида $M = b \cdot M^* + a$ с помощью простой линейной (методом наименьших квадратов) и ортогональной регрессий методом наименьших квадратов. Выявлено (табл. 1, рис. 9), что для связи магнитуды M с M_w получается минимальное среднеквадратическое отклонение σ для всех анализируемых событий, а также наблюдается линейная зависимость с углом наклона близким к единице. Региональная шкала локальных магнитуд M_L также как и M_w дает меньшие значения индивидуальной ошибки σ и представляет собой общий линейный тренд с наклоном близким к единице.

Таблица 1. Регрессионный анализ магнитудных зависимостей вида $M = b \cdot M^ + a$ с помощью линейной регрессии в стандартном виде и с фиксацией наклона $b = 1.0$.*

Магнитуда	Простая регрессия, с фиксированным наклоном			Простая регрессия				
	a	Δa	Σ	a	Δa	b	Δb	σ
mb^{ISC}	0.17	0.25	0.32	0.69	0.25	0.86	0.07	0.31
mb^{GSRAS}	0.55	0.16	0.24	1.4	0.13	0.76	0.04	0.2
M_w	0.19	0.13	0.2	0.65	0.12	0.87	0.03	0.2
M_L	0.15	0.14	0.2	-0.21	0.14	1.1	0.04	0.2

Обозначения: Δa , Δb – стандартные отклонения для оценок a и b ; σ – остаточная среднеквадратичная невязка.

Из рисунка 9 наблюдается сопоставимая общая линейная зависимость между M_w и m_b^{ISC} . Однако, таблица 1 показывает, что ошибка определения σ для индивидуальных событий у магнитуды m_b^{ISC} выше чем у других магнитудных шкал для всех видов регрессии. Такая ошибка может быть связана с особенностями расчета магнитуды m_b^{ISC} , где используются амплитуды Р-волн на телесеismicких расстояниях. Наибольшие расхождения как индивидуальных определений, так и общей линейной зависимости наблюдаются для магнитуды $m_b^{GS RAS}$, которая также определяется на телесеismicких расстояниях.

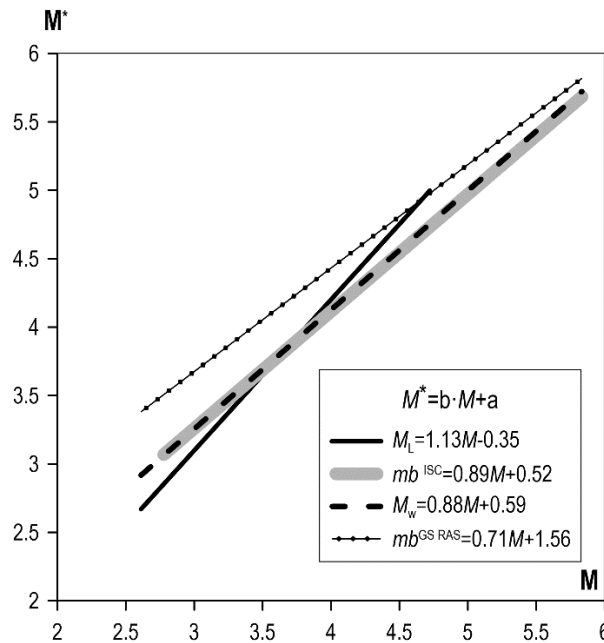


Рис. 9. Линейная зависимость между различными магнитудными шкалами, полученная в результате простой регрессии. В правом нижнем углу представлены зависимости вида $M = b \cdot M^* + a$, где M^* соответствующий тип магнитуды.

4.4. Взаимосвязь между M_w и M_L , и M_w и K_P . Большой практический интерес имеет сопоставление оценок M_w с локальной магнитудой M_L и энергетическим классом K_P [Абубакиров и др., 2018]. На рисунке 10 показана зависимость M_w от M_L в изученном диапазоне $M_w = 3.0 \div 5.1$ ($M_L = 2.6 \div 5.6$) [Зверева и др., 2023в]. Линейная зависимость, полученная в результате линейной регрессии методом наименьших квадратов, имеет вид:

$$M_w = 0.77M_L + 0.89. \quad (12)$$

Черная линия представляет отношение 1:1 между M_w и M_L (что предполагает $M_w = M_L$), красная линия представляет собой линейную зависимость наилучшего соответствия между магнитудами в предположении, что угол наклона $b = 1$ или, что-то же самое, что разность этих магнитуд близка к постоянной:

$$M_w = M_L + 0.05. \quad (13)$$

Видно, что линейная зависимость с углом наклона $b = 1$ также неплохо описывает события диапазона магнитуд $M_w = 3.0 \div 4.5$ ($M_L = 2.6 \div 4.5$), что позволяет предположить, что шкала локальных магнитуд, может быть использована как «квази M_w » для землетрясений Северного Кавказа, где прямое определение моментной магнитуды невозможно в связи с особенностями регистрации, по аналогии с [Gvishiani et al., 2022].

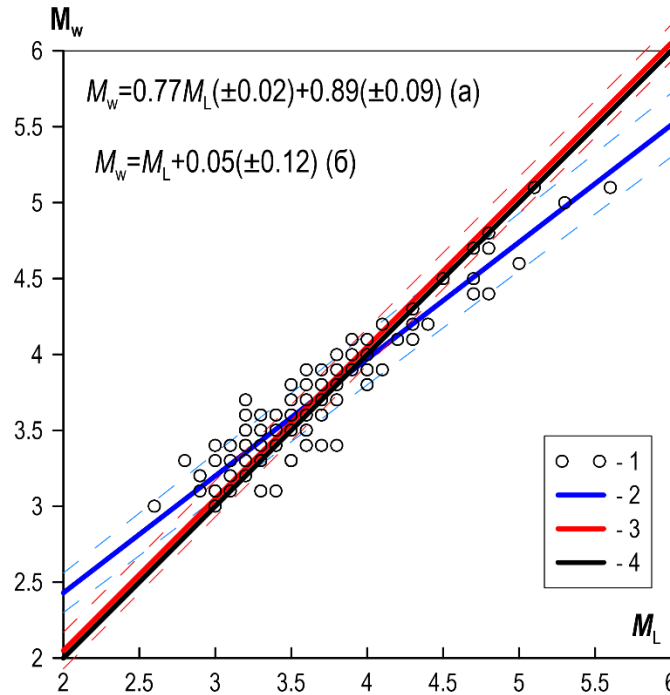


Рис. 10. Сравнение магнитуд M_w и M_L для всех событий. 1 – оценки индивидуальных землетрясений; 2 – аппроксимация данных обычной линейной регрессией без фиксации наклона (уравнение а); 3 – средняя связь в предположении линейной связи с наклоном $b = 1$ (уравнение б); 4 – линия при соотношении 1:1 ($M_w = M_L$); пунктирной линией показан диапазон стандартных отклонений.

Регрессии типа 12 и 13 следует использовать с осторожностью в диапазонах магнитуд, не рассмотренных в данном исследовании, поскольку такие оценки могут привести к завышению оценок при $M < 3.0$ и занижению при $M > 5.0$, соответственно.

В качестве одного из практически значимых результатов представлена зависимость локальных магнитуд M_L и энергетических классов K_p сейсмических событий:

$$M_L = 0.61K_p - 2.66. \quad (14)$$

На основании полученных значений моментных магнитуд M_w также была получена средняя связь между моментной магнитудой M_w и энергетическим классом K_p [Зверева и др., 2023в]:

$$M_w = 0.48K_p - 1.29. \quad (15)$$

Соотношения 14 и 15 могут быть рекомендованы для пересчёта полученных параметров K_p и M_L в результате рутинной обработки первичных инструментальных

данных в M_w для составления итоговых региональных каталогов в диапазоне магнитуд $M_w = 3.0 \div 5.0$.

4.4. Масштабирование очаговых спектров землетрясений Северного Кавказа. При изучении свойств очагов землетрясений важным объектом исследования является изучение масштабирования или обобщенного подобия наблюдаемых очаговых спектров [Гусев, Гусева, 2014; Гусев, 2014; Скоркина, Гусев, 2017]. Для 44 землетрясений Северного Кавказа были рассчитаны среднестанционные очаговые спектры в частотном диапазоне с максимально высоким отношением уровня сигнала к уровню шума (чаще всего не менее 3). Перед усреднением в каждом магнитудном диапазоне выполнялось нормирование (рис. 11а).

Видно, что наблюдаемая зависимость угловой частоты f_c от сейсмического момента M_0 согласуется с гипотезой простого подобия ($f_c \sim M_0^{-1/3}$). Для очаговых спектров магнитудного диапазона, начиная с $M_w = 4.0$, видно (рис. 11а), что начинается некоторое «выполаживание» высокочастотной части спектра. Данная особенность может быть связана с двумя факторами: первый – это недостаточный учет приповерхностного затухания k , второй – вероятность очагового вклада. Возможность очагового вклада также подтверждается отдельным рассмотрением средних спектров магнитудного диапазона $M_w = 4.0-4.5$ (рис. 11б). Для отдельных землетрясений наблюдаются разные степени наклона высокочастотной части спектров, что не укладывается в гипотезу подобия (рис. 11а), и согласно [Aki et al., 1967; Скоркина, Гусев, 2017 и др.] является стандартной практикой для более сильной сейсмичности.

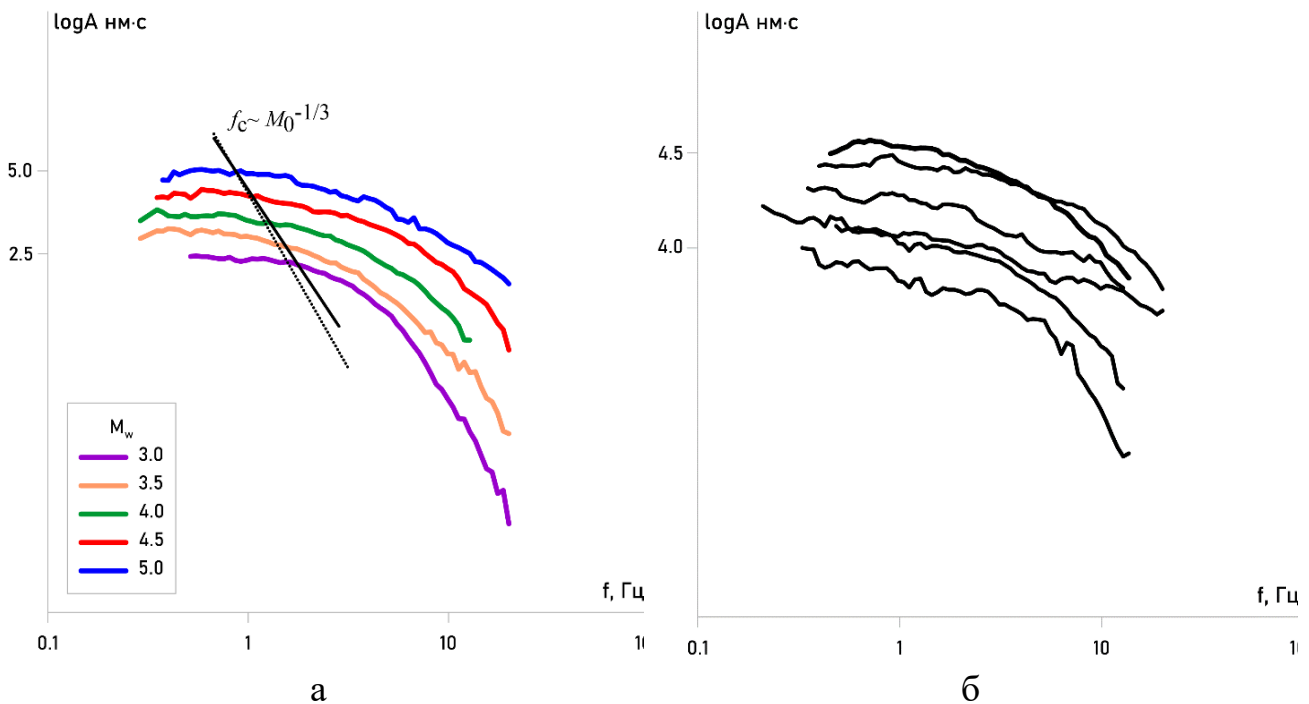


Рис. 11. Спектры землетрясений Северного Кавказа. а – Средний спектр для каждого уровня моментной магнитуды M_w ; б – индивидуальные спектры магнитудного диапазона 4.0-4.5

Выводы по главе 4. Автором выполнены оценки спектральных параметров очаговых спектров 127 локальных и региональных землетрясений Северного Кавказа с использованием модели очага по Брюну, для каждого из этих землетрясений получены общие средние значения сейсмического момента M_0 и моментной магнитуды M_w .

Для землетрясений малой и средней силы территории Северного Кавказа установлены корреляционные связи между моментной M_w и локальной магнитудами M_L и энергетическим классом по Раутиан K_p . Между магнитудами M_w и M_L рекомендуется к применению линейные зависимости вида $M_w = M_L + 0.05$ и $M_w = 0.77M_L + 0.89$ с наклонами 1 и 0.77 соответственно в диапазоне магнитуд $M_w = 3.0-4.5$, которые можно использовать для конкретных задач. Зависимость между значениями K_p и двумя региональными магнитудами имеет вид: $M_L = 0.61K_p - 2.66$ и $M_w = 0.48K_p - 1.29$.

Масштабирование очагов 44 землетрясений Северного Кавказа показало, что для средних спектров магнитудных интервалов: 3-3.5, 3.5-4, 4-4.5, 4.5-5, и >5 наблюдаемая зависимость угловой частоты f_c от сейсмического момента M_0 соответствует гипотезе простого подобия ($f_c \sim M_0^{-1/3}$). Выявленные особенности очагов региональных землетрясений призваны содействовать дальнейшим исследованиям сейсмической опасности на Северном Кавказе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы автором решена значимая научная задача, связанная с изучением пространственного распределения значений сейсмической добротности и особенностей затухания сейсмических волн в литосфере Северного Кавказа.

В процессе решения этой задачи получены следующие качественно новые научные результаты и выводы:

1. Метод огибающих кода-волн позволяет эффективно исследовать процессы затухания сейсмических волн в литосфере Северного Кавказа, а его успешному применению на сегодня в значительной степени содействует программный комплекс SEISAN.

4. Полученные в работе аналитические представления частотно-зависимой добротности для каждой из региональных сеймостанций ФИЦ ЕГС РАН и средние оценки значений добротности для всего Северного Кавказа свидетельствуют в пользу соответствия исследуемой территории высокоактивным в тектоническом отношении регионам нашей планеты.

5. Исследованиями Q_c и частотного параметра α по данным землетрясений Северного Кавказа для разных значений окна начала коды ($LT \leq 60$ с) подтверждено наличие закономерности увеличения Q_c по мере увеличения LT , также как для других тектонических районов Земли. Выявлен «эффект насыщения» для LT больше 60 с, обусловленный распространением сейсмических волн в мантии, где в общих потерях энергии вследствие затухания вклад рассеяния минимален за счет вязкой и однородной структуры мантии, а доминирует внутреннее поглощение, которое имеет постоянное значение. Различия в значениях LT , при котором наступает насыщение для разных частот, могут быть связаны с распределением неоднородных структур в исследуемом объеме.

6. Картирование распределения значений сейсмической добротности на Северном Кавказе выявило соответствие значений наименьшей добротности и эпицентральных зон сильных землетрясений ($M_w \geq 6$), а также тектонически неоднородных областей, характеризующихся повышенными значениями трещиноватости и флюидонасыщенности. Повышенные же значения добротности в основном соответствуют зонам растяжения литосферы, которые выделяются в шельфовой части Черного моря в пределах прогибов Сорокина и Туапсинского и в Терско-Сунженской структуре ТКП.

7. Выполнены оценки спектральных и динамических параметров очагов 127 землетрясений Северного Кавказа с использованием модели очага по Брюну. Показано, что, несмотря на имеющиеся ограничения расчетной модели, не учитывающей вертикальной неоднородности коэффициента рассеяния, оценки затухания сейсмических волн с использованием частотно-зависимых значений добротности позволяют преобразовывать стационарные спектры смещений в очаговые и, в соответствии с моделью Брюна, определять скалярный сейсмический момент и другие динамические параметры очага. Результаты исследований спектральных параметров

очагов и оценок моментных магнитуд региональных землетрясений призваны содействовать прогрессу дальнейших исследований сейсмической опасности на Северном Кавказе.

8. Для землетрясений малой и средней силы для территории Северного Кавказа установлены зависимости между локальными и моментными магнитудами, а также для всего Кавказа установлены зависимости между значениями энергетических классов и моментных магнитуд, которые представляются практически значимыми и могут быть рекомендованы к внедрению.

9. Исследованиями масштабного подобия очаговых спектров для 44 землетрясений Северного Кавказа установлено, что наблюдаемая зависимость угловой частоты f_c от сейсмического момента M_0 соответствует гипотезе простого подобия ($f_c \sim M_0^{-1/3}$), что позволяет оценить вероятностный диапазон сильных движений для исследуемой территории, который, в свою очередь, является одной из базовых характеристик в практике оценки сейсмической опасности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ
(статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК):

1. Собисевич А.Л., **Зверева А.С.**, Лиходеев Д.В. К вопросу о затухании объёмных волн в Эльбрусской вулканической области / Доклады Академии Наук. 2019. Т. 486 № 4. С. 480-484.
2. Лиходеев Д.В., **Зверева А.С.** Оценка особенностей распространения и затухания объёмных волн на территории Северного Кавказа // Известия РАН. Серия физическая, 2020, том 84, № 1, с. 119–123.
3. **Zvereva A.S.**, Navskov J., Gabsatarova I.P. Regional variation of coda Q in Northwest Caucasus. J Seismol 27, 363–384 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10950-023-10154-8>
4. **Зверева А. С.**, Собисевич А. Л., Лиходеев Д.В. к вопросу о взаимосвязи моментных и локальных магнитуд землетрясений Северо-Западного Кавказа // Докл. РАН. Сер. Науки о Земле. 2023. Т. 508. № 1. С. 98–107.
5. **Зверева А.С.**, Собисевич А.Л., Габсатарова И.П. Добротность геофизической среды восточной зоны Северного Кавказа // Физика Земли, 2024, №1 – С. 1-17.
6. **Зверева А.С.** Вариации добротности в литосфере Северного Кавказа в широком диапазоне временных интервалов кода-волн // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 1. С. 80–92. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.1.05>. – EDN: NINHPB

Подписано в печать 23 июля 2024 г.

Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.

Тираж 100 шт. Заказ №__

Отпечатано в рекламно-производственной фирме «Интер-YES»

614068, г. Пермь, ул. Плеханова, д. 39

Тел./факс: (342) 2-150-170