

*На правах рукописи*



**Преденн Петр Алексеевич**

**ЗАТУХАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ  
БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы  
поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Улан-Удэ – Иркутск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Геологический институт им. Н. Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ) и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН, г. Иркутск)

**Научный руководитель:**

**Добрынина Анна Александровна**, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь, ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии ИЗК СО РАН

**Официальные оппоненты:**

**Копничев Юрий Федорович**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник (ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва)

**Пупатенко Виктор Викторович**, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе (ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук (г. Владивосток)

Защита состоится «23» сентября 2022 года в 09-00 часов на заседании диссертационного совета Д.003.022.03 при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН ИЗК СО РАН и на сайте: <http://crust.irk.ru/images/upload/newsfull218/3326.pdf>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять учёному секретарю совета, кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или e-mail: [dobrynina@crust.irk.ru](mailto:dobrynina@crust.irk.ru). Тел: 8(3952)426900.

Автореферат разослан «15» июня 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 003.022.03  
кандидат физико-математических наук



А.А. Добрынина

## ВВЕДЕНИЕ

**Объектом исследования** данной работы является центральная часть Байкальской рифтовой системы (БРС) – Южнобайкальская впадина и прилегающие к ней территории, поглощающие свойства литосферы региона и параметры затухания сейсмических волн.

### **Актуальность работы.**

Центральная часть Байкальской рифтовой системы находится в одном из наиболее сейсмоопасных регионов Российской Федерации. Согласно картам общего сейсмического районирования [Комплект карт..., 2016], на прилегающих к ней территориях южной окраины Сибирской платформы и Забайкалья возможны сотрясения с интенсивностью до 9 баллов по шкале ШСИ-17. Высокий уровень сейсмической активности исследуемого региона подтверждается данными о палеоземлетрясениях, макросейсмическими сведениями о сильных сотрясениях прошлого и информацией о современных землетрясениях с магнитудами до 6.8 [Солоненко, 1960; Мельникова и др., 2008; Гилева и др., 2020; Тубанов и др., 2021].

В силу неоднородности строения литосферы параметры затухания варьируют в зависимости от региона [Yoshimoto et al., 1993; Kumar et al., 2005; Tuvè et al., 2006; Koulakov et al., 2010; Wu et al., 2016; Banerjee, Kumar, 2017]. Именно региональные характеристики распространения сейсмических волн важны для оценки прогнозного движения грунта при возможных сильных землетрясениях и расчета синтетических акселерограмм [Павленко, 2008, 2009]. Особое значение при этом имеет оценка затухания на близких расстояниях (до 50 км), из местных зон возникновения очагов землетрясений [Чернов, 1989; Джурик и др., 2015; Atkinson, Voore, 2014]. Однако, в региональных, и тем более, локальных масштабах, затухание как явление изучено недостаточно [Павленко, 2011; Гусев, Гусева, 2016].

Карты общего сейсмического районирования ОСР-97, ОСР-97\*, ОСР-2015 и ОСР-2016 не учитывают региональных параметров излучения и распространения сейсмических волн. В частности, для построения карт используется единое значение эффективной сейсмической добротности  $Q \approx 150$  на частоте  $f=1.0$  Гц для всей материковой части Северной Евразии (кроме Курило-Камчатского региона и полуострова Крым). Кроме того, в расчетах используются соотношения связи сейсмической интенсивности с пиковым ускорением, полученные по данным наблюдений в Калифорнии (США), что приводит к существенным ошибкам [Павленко, 2012].

За период цифровых инструментальных сейсмических наблюдений в центральной части БРС Бурятским и Байкальским филиалами Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) накоплен большой объем записей землетрясений. Эти сейсмограммы позволяют получить, помимо максимальных амплитуд и времен прихода сейсмических волн, информацию о среде, в которой распространяется энергия землетрясений. В данной работе используются данные цифровых сейсмических станций центральной части Байкальского рифта для детального изучения характеристик затухания сейсмических волн в регионе.

**Целью работы** является выявление общих закономерностей и особенностей распространения, а также пространственных вариаций затухания сейсмических волн в центральной части БРС. Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Количественно оценить затухание сейсмических волн (продольных, поперечных, кода-волн) по записям локальных и региональных землетрясений, произошедших в районе Южнобайкальской впадины, определить зависимость добротности от частоты и величину коэффициента затухания.
2. Оценить вклад рассеяния на неоднородностях среды и внутреннего поглощения в общее затухание сейсмических волн.
3. Проанализировать закономерности пространственных вариаций затухания сейсмических волн и их возможную связь с геолого-геофизическими характеристиками

среды: глубинным строением, плотностью разломов, тепловым потоком и степенью современной сейсмической активности структур.

#### **Фактический материал.**

В работе использованы цифровые записи землетрясений, полученные региональной сетью сейсмических станций Бурятского и Байкальского филиалов Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), сводная база данных обработки данных Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН за 2001–2021 гг., каталоги и бюллетени землетрясений Прибайкалья и Забайкалья за 2001–2016 гг.

#### **Методы исследования.**

Для оценки затухания сейсмических волн в центральной части Байкальской рифтовой системы использовался комплекс методов, основанных на анализе кода-волн. Выполнялась оценка затухания по сейсмической коде с использованием модели однократного рассеяния [Aki, Chouet, 1975; Sato, 1977]; использовался метод нормализации коды для расчета затухания по прямым *P*- и *S*-волнам [Aki, Chouet, 1980], реализованный в программном пакете CodaNorm [Predein et al., 2017]; оценивался вклад рассеяния на неоднородностях среды и внутреннего поглощения в общее затухание. Для этого использовался метод инверсии огибающей коды [Sens-Schönfelder, Wegler, 2006], реализованный в пакете Qorep [Eulendorf, Wegler, 2016]; оценка объема и глубины формирования коды выполнялась согласно подходу [Pulli, 1984]; двумерное картирование параметров затуханий сейсмических волн проводилось по методу перекрывающихся эллипсов [Mitchell, 1981].

#### **Основные научные результаты:**

1. Установлены региональные закономерности затухания амплитуд объемных продольных и поперечных волн и сейсмической коды в литосфере Южнобайкальской впадины, учитывающие особенности среды распространения, которые могут использоваться для районирования территории по степени тектонической активности.

2. Методом инверсии огибающей коды с использованием разделения затухания сейсмических волн на компоненты в литосфере Южнобайкальской впадины доказана доминирующая роль внутреннего поглощения в общем затухании, вклад рассеянной компоненты затухания зависит от размеров неоднородностей среды.

3. Пространственное распределение областей повышенного и пониженного затухания в Южнобайкальской впадине соответствует положению неоднородностей земной коры и верхней мантии – области пониженного затухания сейсмических волн согласуются с областями повышенной плотности верхней коры, а области высокого затухания согласуются с положением выступа аномальной мантии и областями высокой плотности эпицентров землетрясений, выделившейся сейсмической энергии и теплового потока.

#### **Научная новизна.**

Впервые определены параметры затухания (добротность, частотный параметр, коэффициент затухания) прямых *P*- и *S*-волн и сейсмической коды для центральной части Байкальской рифтовой системы с помощью комплекса методов, показана зависимость затухания от степени сейсмической активности, плотности разломов и теплового потока. Получены количественные оценки вклада внутреннего поглощения и рассеяния сейсмических волн в общее затухание.

#### **Личный вклад автора.**

Автор принимал непосредственное участие на всех этапах исследования, включая сбор и подготовку исходных сейсмологических данных для обработки, отбор сейсмограмм локальных и региональных землетрясений, адаптацию существующих и разработку оригинальных приложений для конвертации сейсмических данных из различных форматов, разработку приложений для расчета затухания по прямым волнам методом нормализации к коде и для оценки по огибающей коды. Также автором выполнялся расчет добротности различными методами и проводилось двумерное картирование по параметрам затухания для исследуемого региона.

### **Практическое применение.**

Характеристики затухания сейсмических волн, полученные для Южнобайкальской впадины и окружающих ее территорий, могут применяться при сейсмическом районировании различной степени детальности, анализе макросейсмических проявлений при сильных землетрясениях, для расчета синтетических сейсмограмм. Также значения сейсмической добротности необходимы при определении очаговых параметров региональных землетрясений и их магнитудной классификации.

### **Обоснование соответствия паспорту специальности 25.00.10.**

Согласно паспорта научной специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых», диссертация соответствует пункту №3 «Сейсмология (за исключением аппаратурных разработок и ситуаций, когда данные о современной или палеосейсмической активности используются в рамках традиционного геотектонического анализа)», пункту №6 «Математическое моделирование геодинамических процессов любых пространственных и временных масштабов. Изучение земной коры в рамках упругих, упругопластических, упруго-хрупких, вязко-упругих и т.п. моделей», и пункту №9 «Теория распространения сейсмических и электромагнитных волн в Земле. Теория потенциальных полей».

### **Апробация результатов работы.**

Результаты работ лично докладывались автором на 10 научных совещаниях и конференциях: XXVI Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 2015 г.); III, IV и IV Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике (г. Улан-Удэ, 2015 г.; 2017; 2019); III Всероссийское совещание и II всероссийская молодежная школа по современной геодинамике «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе» (г. Иркутск, 2016 г.); V Всероссийская научно-практическая конференция, посвященной 45-летию Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ, 2018 г.); XII и XIII Российско-монгольская международная конференция «Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-монгольского региона» (г. Иркутск, 2018 г.; 2019 г.); Всероссийское совещание «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ» (г. Иркутск, 2021 г.); XV международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» (г. Новосибирск, 2021 г.).

**Публикации.** По теме диссертации самостоятельно и в соавторстве опубликовано 20 работ, из них 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК (Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле, 2016; SoftwareX, 2017; Геодинамика и тектонофизика, 2019, 2022). Также получено 2 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ (CodaNorm, заявка № 2015610149 от 12.01.2015; Genvelope, заявка № 2018610136 от 09.01.2018).

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из 4 глав, введения и заключения. Общий объем работы составляет 153 страницы, включает 9 таблиц, 60 рисунков, 5 приложений, список библиографии из 143 наименования.

**Благодарности.** Автор благодарит своего научного руководителя Добрынину Анну Александровну за постоянную готовность поделиться накопленными знаниями и отвечать на вопросы, и Тубанова Цырена Алексеевича за помощь и мотивацию в подготовке диссертации. Также благодарит Толочко В. В., Минеева А. В., Базарова А. Д. и весь коллектив лаборатории методов сейсмопрогноза Геологического института СО РАН, а также коллективы Бурятского и Байкальского филиалов ФИЦ ЕГС РАН за всестороннюю помощь.

Настоящее исследование проводилось в рамках проекта Минобрнауки РФ № 075-15-2020-787 «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории».

## Основное содержание работы

Во введении определена цель и основные задачи исследования, а также обоснована её актуальность, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

### Глава 1. ТЕКТОНИКА, ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

В разделе 1.1 приводится описание тектонического строения наиболее древнего сегмента Байкальской рифтовой системы (БРС) [Логачев, 2003], его центральной части – Южнобайкальской впадины и прилегающих территорий (рис. 1). БРС в целом, и в частности центральная его часть характеризуется сложной тектонической структурой, высоким уровнем сейсмичности и другими признаками новейшей тектоники. Краткий обзор результатов исследований глубинного строения региона, проводившихся различными геолого-геофизическими методами, приведен в разделе 1.2.

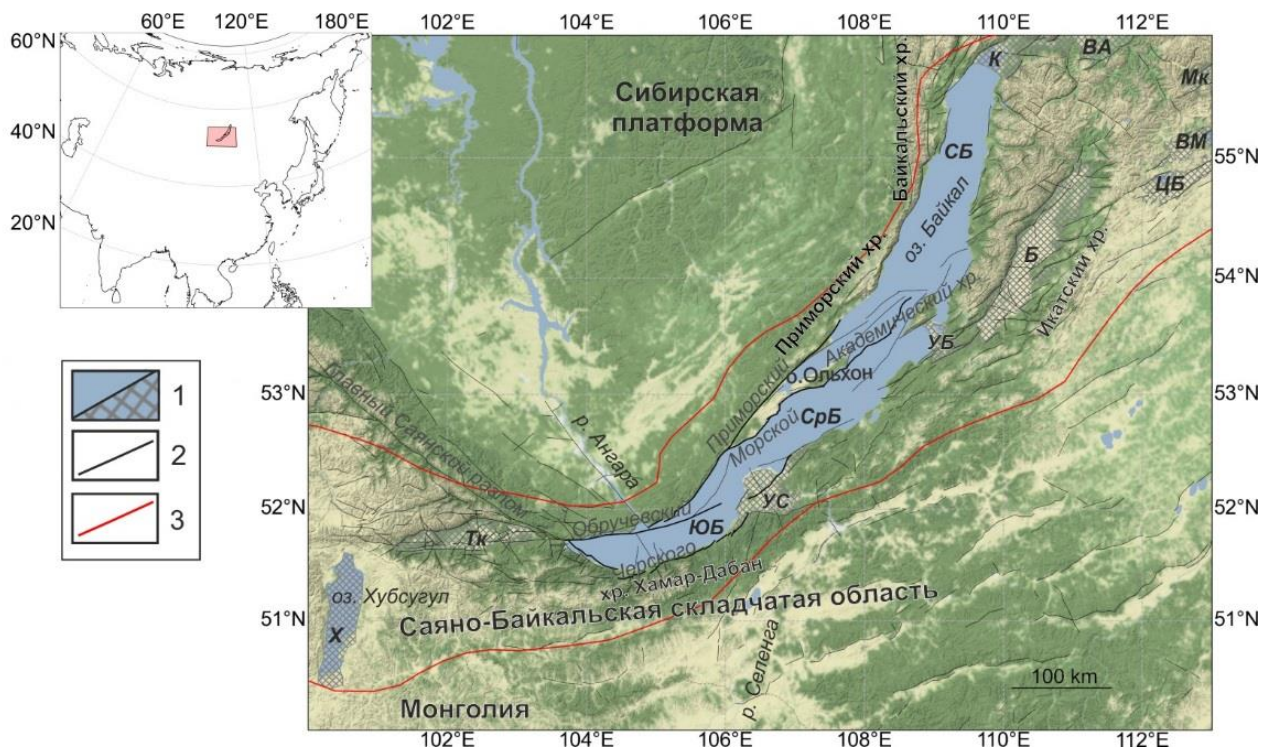


Рисунок 1. Схема неотектонических структур Байкальской рифтовой системы.

1 – Кайнозойские рифтовые впадины: Б – Баргузинская, ВА – Верхнеангарская, ВМ – Верхнемуйская, К – Кичерская, Мк – Муяканская, СБ – Северо-Байкальская, Тк – Тункинская, УБ – Усть-Баргузинская, УС – Усть-Селенгинская, Х – Хубсугульская, ЦБ – Ципа-Баунтовская, ЮБ – Южно-Байкальская; 2 – разломы; 3 – граница рифтовой системы согласно [Логачев, 1999]. На врезке показан прямоугольником регион исследования.

Центральная часть БРС и прилегающие к ней территории находятся в одном из наиболее сейсмоопасных регионов Российской Федерации. Согласно картам общего сейсмического районирования, здесь возможны землетрясения с интенсивностью до 9 баллов. Характерной чертой сейсмичности в регионе является наличие групп, роев землетрясений, и сейсмических брешей – областей отсутствия очагов, сильные толчки зачастую сопровождаются достаточно многочисленными афтершоками. В разделе 1.3 приводится также график повторяемости землетрясений за весь период непрерывных инструментальных наблюдений в целом по БРС, и для территории Центрального Байкала по данным обработки Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН за период 1999–2015 гг.

В разделе 1.4 дан обзор работ, посвященных исследованию затухания сейсмических волн в литосфере региона. Приводятся основные результаты, полученные различными методами: по спаду амплитуд поперечных и продольных волн с расстоянием для Прибайкалья в работах А. В. Солоненко, методом огибающей коды для северо-восточного фланга рифта в работах Т. Г. Раутиан. В работах Ю. Ф. Копничева по отношению логарифма  $S$ - и  $P$ -волн, и по сейсмической коде местных землетрясений оценивалось поле поглощения, характеризующееся значительной неоднородностью. Также исследованием затухания в отдельных областях Байкальского рифта занимались В. В. Жадин, А. А. Дергачев, А. В. Егоркин, А. Ф. Еманов, И. Н. Соколова, В. А. Потапов, А. Ф. Дреннов, В. И. Джурик, О. В. Павленко, В. В. Чечельницкий. В работах А. А. Добрыниной исследовалось затухание сейсмических волн для БРС в целом и отдельных ее блоков [Dobrynina, 2011; Добрынина и др., 2015; Dobrynina et al., 2016]. Методами огибающей сейсмической коды и скользящего окна были получены одномерные модели затухания сейсмических волн в литосфере и верхней мантии северо-восточного фланга БРС [Добрынина и др., 2016]. Сравнивались параметры затухания сейсмических волн в литосфере БРС с крупнейшими рифтовыми системами мира [Добрынина и др., 2017].

## Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЗАТУХАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

В главе представлены методы оценки затухания – потери энергии упругих колебаний, обусловленной явлениями рассеяния, поглощения, и геометрического расхождения при распространении сейсмических волн от очага землетрясения. Для оценки рассеивающих и поглощающих свойств среды в работе применяются методы, основанные на использовании кода-волн. Согласно современным представлениям, сейсмическая кода представляет собой некогерентные волны, рассеянные на случайных неоднородностях среды [Aki, 1969]. На небольших эпицентральных расстояниях кода-волны, сформированные отраженными от субгоризонтальных границ поперечными волнами [Копничев, 1992], содержат информацию в целом о строении литосферы и верхов мантии.

Особенности использования различных методов оценки добротности  $Q$  (величины, обратной затуханию  $Q^{-1}$ ), отмечались ранее [Раутиан и др., 1981]. Так, метод огибающей коды дает хорошие результаты при выявлении высокодобротных слоев, в то время как оценка по прямым волнам эффективна для оценки сильно поглощающих блоков.

Сейсмическая добротность методом огибающей коды ( $Q_C$ ) рассчитывалась с помощью модели однократного рассеяния [Aki, Chouet, 1975; Sato, 1977], рассматривающей кода-волны как суперпозицию объемных волн, однократно отраженных от случайно распределенных в среде неоднородностей. Уменьшение амплитуды коды со временем происходит вследствие поглощения энергии и геометрического расхождения, и не зависит от характеристик очага землетрясения (для времен пробега больших, приблизительно, чем двойное время пробега поперечной волны [Раутиан и др., 1981]), и локальных эффектов усиления на сейсмостанции [Aki, 1969].

Количественная оценки затухания амплитуд объемных  $P$ - и  $S$ -волн проводилась с использованием метод нормализации коды [Aki, 1980]. Нормировкой амплитуды прямой волны к амплитуде коды, взятой в фиксированное время пробега, устраняется влияние как источника – очага землетрясения, так и приемника – станции. Эффекты в очаге (направленность излучения, механизм очага) также нивелируются при достаточно большой выборке анализируемых землетрясений с разных азимутов, углов прихода сейсмического луча к приемнику, и эпицентральных расстояний [Aki, 1975; Aki, 1980]. Таким же образом устраняются эффекты локальных грунтовых условий и влияние регистрирующей аппаратуры, т. к. оно одинаково как для прямых, так и для кода-волн.

Изначально метод нормализации по данным одной станции использовался для расчета затухания по поперечным волнам. Позднее метод был расширен для продольных  $P$ -волн



[Yoshimoto, 1993], исходя из предположения о том, что отношение выделившейся энергии для  $P$ - и  $S$ -волн постоянно для землетрясений в узком диапазоне магнитуд.

Оценка отдельных компонент затухания – внутреннего поглощения и рассеяния на неоднородностях среды, производилась методом инверсии огибающей коды [Sens-Schönfelder, Wegler, 2006]. Метод использует физически обоснованную модель рассеяния сейсмической энергии – теорию переноса излучения, используя предположение об изотропном рассеянии в среде, однородной по поглощению. Оценить вклад внутреннего поглощения и рассеяния на неоднородностях среды в общее затухание можно, учитывая, что внутреннее поглощение приводит к экспоненциальному убыванию амплитуд огибающей сейсмической коды, в то время как основной характеристикой величины рассеяния является соотношение энергии поперечных и кода-волн. [Eulenfeld, Wegler 2016]. Алгоритм инверсии заключается в минимизации невязки между функциями Грина для теоретической и наблюдаемой плотностями потока энергии в фиксированных частотных диапазонах.

Все применяемые методы используют одинаковые параметры обработки. Для получения стабильных огибающих, аппроксимирующих максимальные амплитуды в коде, применялось преобразование Гильберта для каналов скорости, дающих прямую оценку кинетической энергии. Использовалась фильтрация в октавных частотных полосах, результирующий сигнал пропускался через 4-х полюсовой фильтр Баттерворта, вносящий минимальные фазовые искажения. Для анализируемого участка сейсмограммы проверялось соотношение сигнал–шум, и отсутствие наложения сигнала от другого землетрясения или помех.

Основным материалом исследования стали данные, накопленные действующими на территории центральной части БРС сетями наблюдения Байкальского и Бурятского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». Каталог локальных землетрясений включал более 4700 событий с энергетическими классами  $K_p \geq 8.5$  (магнитуда по объемным волнам  $mb \geq 2.5$ ) за 2004–2016 гг. Второй набор данных – записи широкополосных приборов за 2006–2021 гг., состоящий из 603 событий на эпицентральных расстояниях до 500 км в диапазоне магнитуд от 3 ( $K_p \geq 9.5$ ) до  $M_w$  5.5 (Быстринское 21.09.2021 г., и Кударинское землетрясения 09.12.2020 г.) и  $M_w$  6.8 (Хубсугульское землетрясение 11.01.2021 г.) (рис. 2, вкладка).

### Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В главе представлены результаты расчетов добротности по продольным, поперечным, и кода-волнам землетрясений, произошедших в центральной части Байкальского рифта. Отдельно рассматривались записи на близких, с эпицентрами до 70 км от станции, и региональных расстояниях до 500 км. Диапазон эпицентральных расстояний для локальных землетрясений ограничен 70 км по причине преобладания на них прямых волн, приходящих из очага землетрясения. Кроме того, расстояния между соседними станциями в регионе находятся в пределах 50–100 км, что позволяет оценить пространственные вариации затухания. Несмотря на то, что 70-километровое окно вокруг сейсмических станций может вмещать в себя разнородные структуры, использование близких землетрясений дает возможность оценить затухание и степень неоднородности среды для конкретных тектонических структур региона, находящихся в окрестности регистрирующей станции.

Для оценки затухания по кода-волнам с использованием близких землетрясений были рассчитаны значения сейсмической добротности  $Q_c$  в частотном диапазоне от 0.5 до 16–32 Гц (в зависимости от типа регистрирующей аппаратуры) для 14 станций в районе Южнобайкальской впадины. Для времени пробега кода-волн, т. е. длительности участка обработки коды 20, 30, 40 и 60 с были определены эмпирические зависимости  $Q_c$  от частоты [Mitchell, 1981]: величина добротности на частоте 1 Гц и значение частотного параметра  $n$ .

Минимальные значения  $Q_c$  и высокое значение частотного параметра для «ранней» коды [Раутиан и др., 1981] (минимальное окно обработки 20 с) были получены для станций в районе южной оконечности впадины: Большое Голоустное (BGT,  $Q_c(f)=134 \cdot f^{0.82}$ ), Листвянка



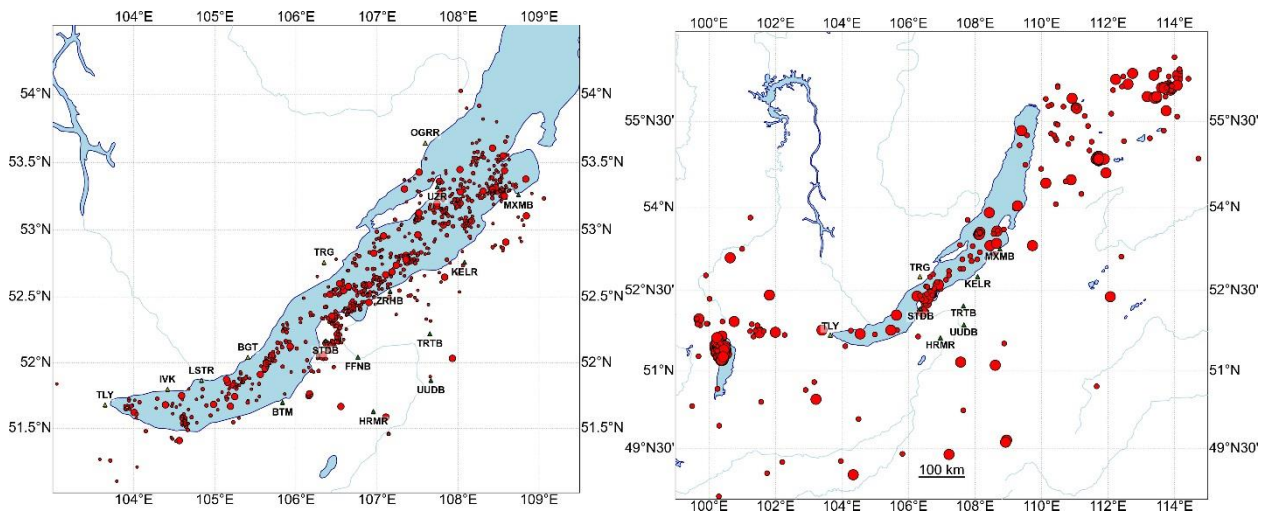


Рисунок 2. Слева – эпицентры локальных землетрясений с  $K_p > 8.5$  за 2001–2016 гг., использованных для обработки; справа – эпицентры землетрясений с  $K_p > 9.5$ , зарегистрированных сейсмическими станциями на расстояниях до 500 км за 2006–2021 гг.

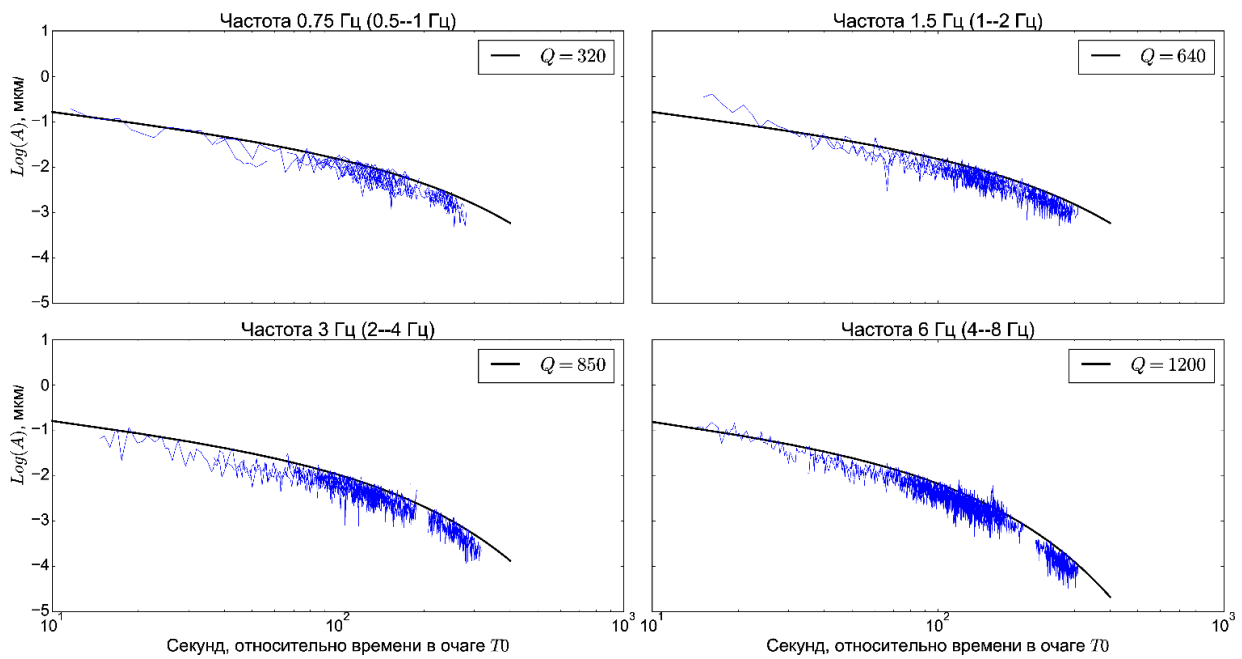


Рисунок 3. Сводные огибающие коды региональных землетрясений по ст. Талая (TLY), аппроксимированные выражением с частотно-зависимым значением добротности

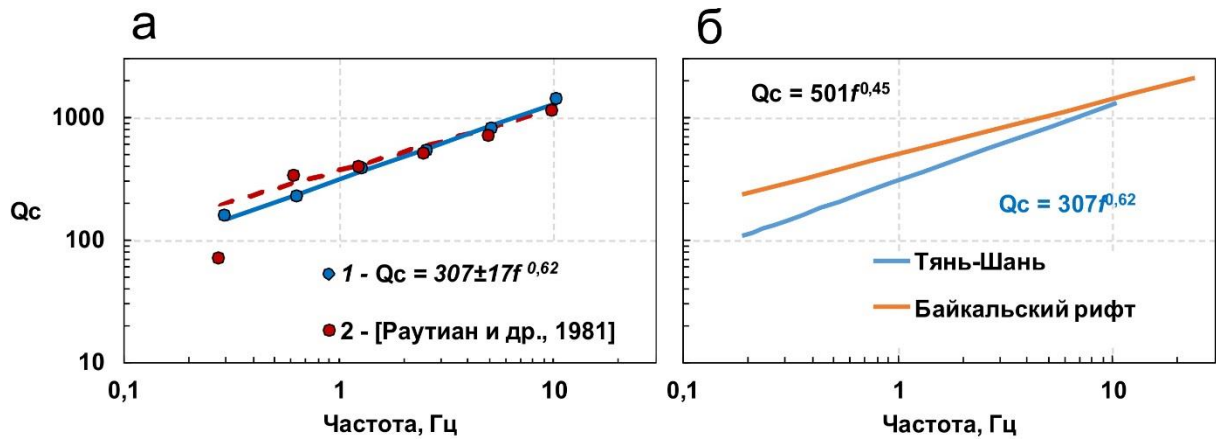


Рисунок 4. Сопоставление значений  $Q_c$  для длины окна 120 секунд и их эмпирических зависимостей от частоты: а – для Тянь-Шаня в настоящей работе (1) и по данным [Раутиан, 1981] (2) и; б – эмпирические зависимости для Тянь-Шаня и Байкальского рифта

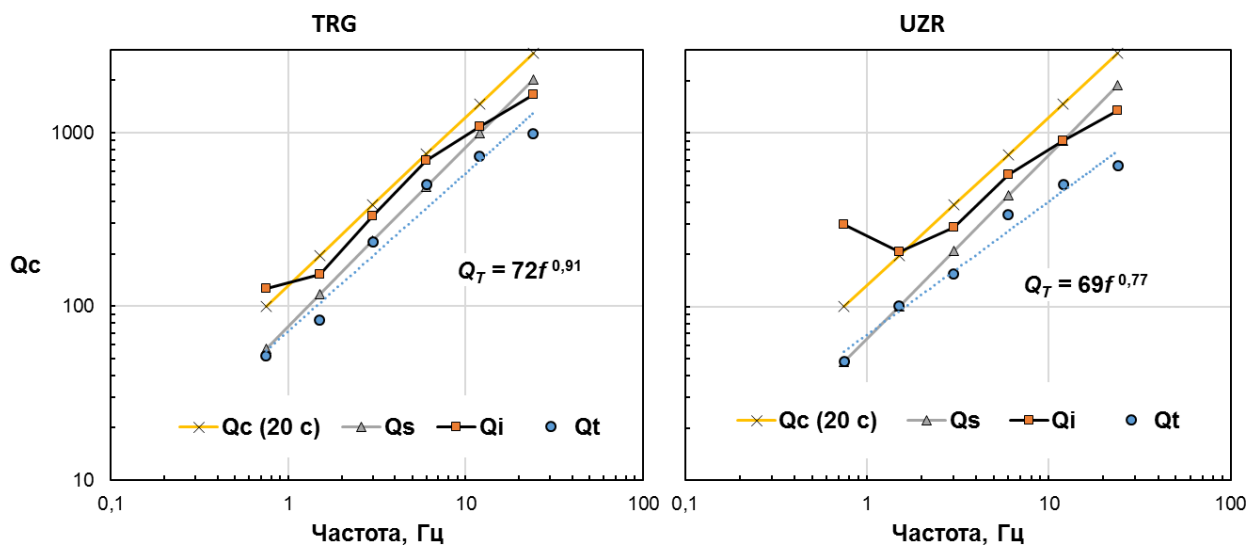


Рисунок 5. Сравнение значения добротности по моде ( $Q_c$ ), по поперечным волнам ( $Q_s$ ), величины поглощения ( $Q_i$ ) и общего затухания ( $Q_T$ ) по станциям Тьрган, TRG (слева) и Узур, UZR (справа)

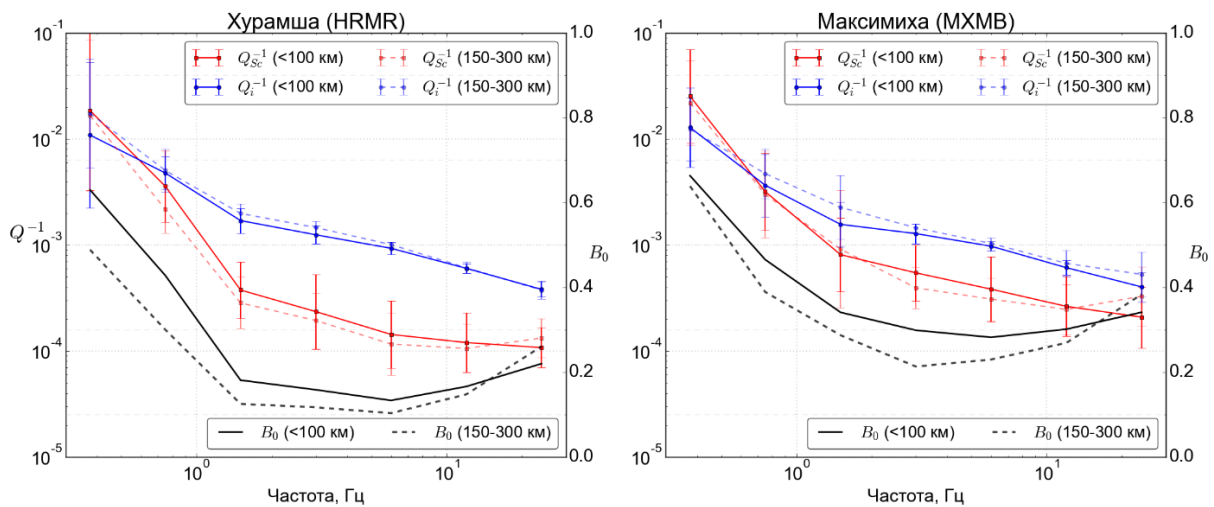


Рисунок 6. Величина отдельных компонент затухания для расстояний до 100 км и диапазона 150–300 км: рассеяния  $Q_{sc}^{-1}$  и поглощения  $Q_i^{-1}$ , и величины сейсмического альбедо  $B_0$  (по правой шкале) для станций Хурамша (слева) и Максимиха (справа)

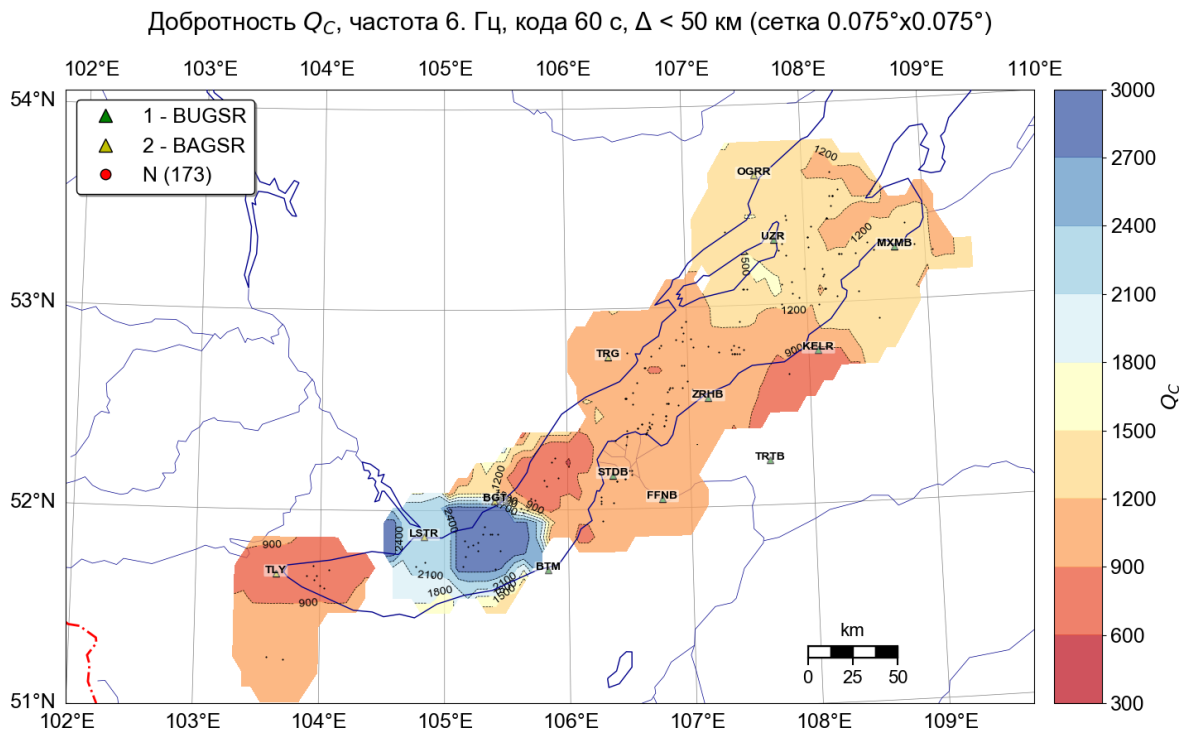


Рисунок 7. Пространственные вариации добротности  $Q_C$  на частоте 6 Гц по записям землетрясений на эпицентральных расстояниях до 50 км

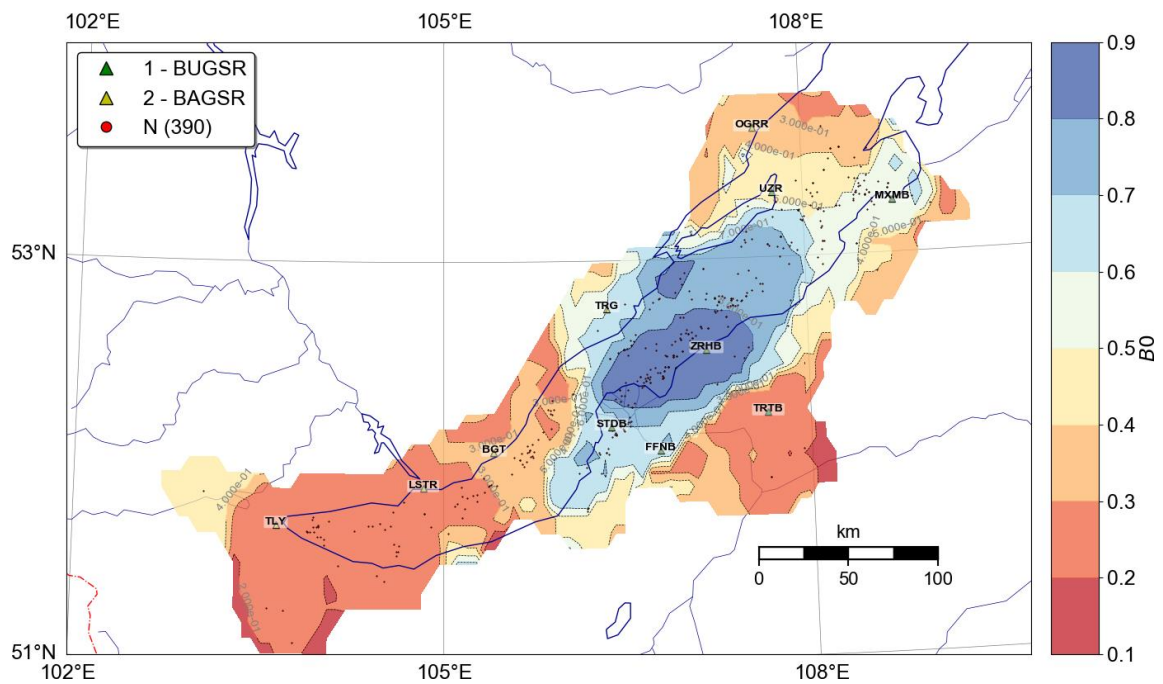


Рисунок 8. Пространственные вариации величины сейсмического альбеда ( $B_0$ ) на частоте 3 Гц по записям землетрясений на эпицентральных расстояниях до 70 км

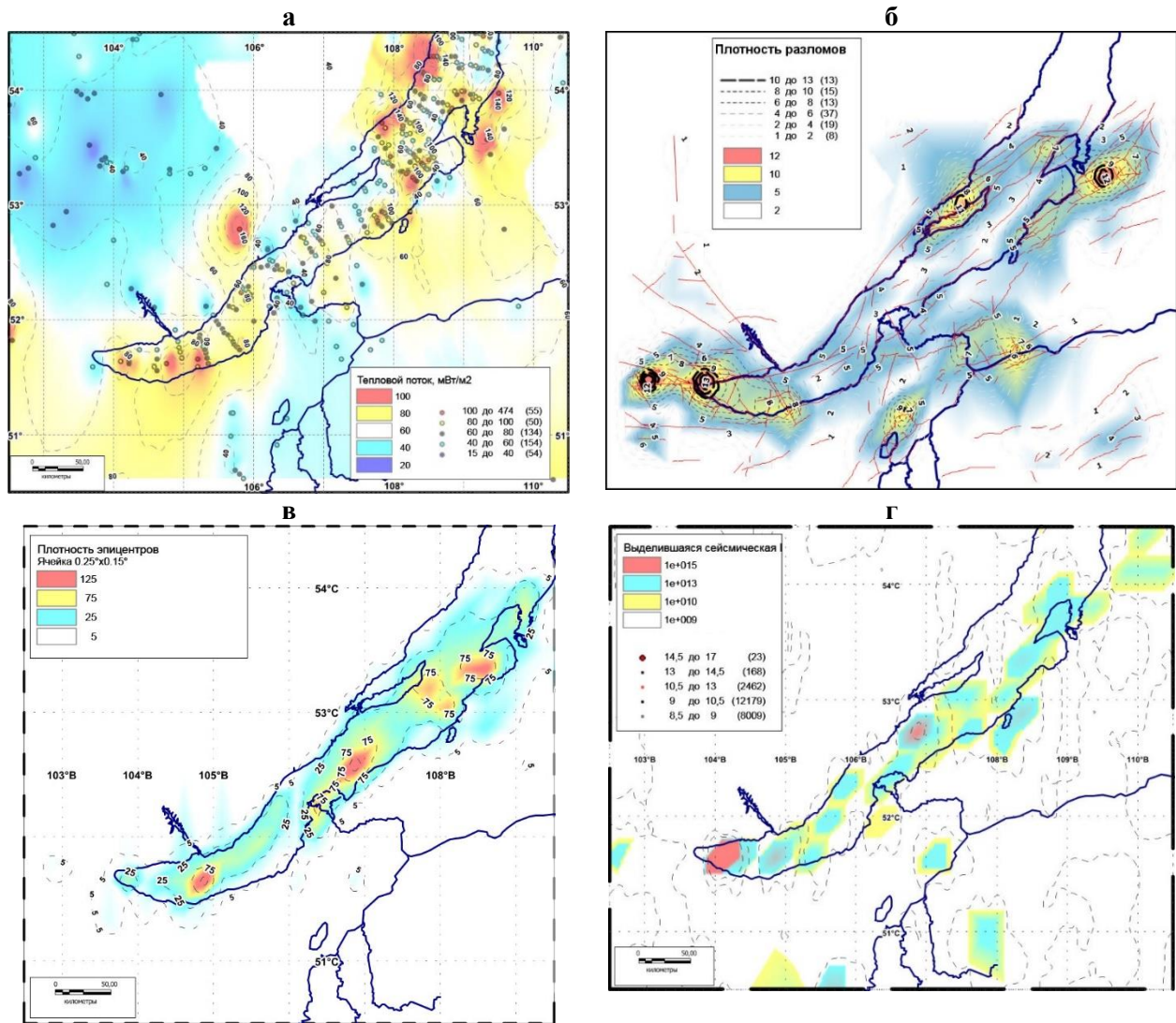


Рисунок 9. Пространственные вариации геофизических параметров на исследуемой территории: (а) – тепловой поток [Лысак, 2002; Голубев, 2007]; (б) – поверхностная плотность разломов по [Лунина и др., 2010], статистическая обработка; (в) – плотность эпицентров землетрясений [Радзиминович и др., 2018]; (г) – суммарная выделившаяся сейсмическая энергия за 1952–2019 гг.

(LSTR,  $Q_c(f)=129 \cdot f^{0.94}$ ). Для «средней» коды (время пробега 60 с) минимальные значения  $Q_c$  (высокое затухание) были получены для станций на Среднем Байкале: Тырган (TRG,  $Q_c(f)=205 \cdot f^{0.94}$ ) и Узур (UZR,  $Q_c(f)=255 \cdot f^{0.8}$ ). Надо отметить, что аппроксимация полученных величин добротности степенной зависимостью не отражает разброс отдельных значений  $Q$  для каждой частоты. Таким образом, полученные зависимости  $Q(f)$  для каждой станции можно характеризовать как средние оценки поглощающих свойств в ее окрестностях [Дреннов и др., 2015]. Стандартное отклонение значений добротности становится меньше с увеличением длительности коды, когда достигается большая стабильность оценок, получаемых по кода-волнам [Mayeda et al., 2003].

Оценка добротности по записям региональных землетрясений проводилась для пяти широкополосных сейсмических станций региона, по которым имелось наибольшее количество данных. Анализировалась длина коды 30, 60, 90 и 120 с, использовалось 6 октавных частотных диапазонов от 0.25 до 16 Гц. Для всех станций наблюдался рост величины  $Q_c$  и уменьшение значения частотного параметра  $n$  с увеличением длины окна обработки коды [Добрынина и др., 2016; 2019]. Сравнение величин частотного параметра, характеризующего степень неоднородности среды и зависящего от тектонической активности региона [Аки, 1981], показало более высокие его значения для Южного Байкала, станция Талая (ТЛЮ). Для окна коды 30 с было получено  $n=0.96$ , для других станций в пределах 0.57–0.9, для коды длительностью 120 с  $n$  составило 0.58, по сравнению с 0.41–0.53 для других станций региона.

Полученные оценки затухания амплитуд кода-волн на региональных расстояниях позволили построить сводные огибающие коды (калибровочные кривые), для разных частотных диапазонов. Была получена устойчивая сходимость амплитуд коды сейсмограмм, отфильтрованных в октавных частотных диапазонах, с теоретическими аппроксимирующими кривыми для значений добротности, рассчитанными согласно диффузной модели рассеяния (рис. 3, вкладка).

Дополнительно проводилось сопоставление поглощения в литосфере регионов с разным тектоническим режимом – Байкальского рифта и Южного Тянь-Шаня [Предеин, Тубанов, 2022]. Анализировались записи по станции Симигандж (SIMI) международной сети IRIS, находящейся в непосредственной близости от Гармской зоны, для которой в работе [Раутиан и др., 1981] приведены оценки добротности для Средней Азии. Сравнивались значения добротности для «средней» коды в частотном диапазоне 0.14–10 Гц, и значение  $Q_c$  для времени пробега кода-волн 120 с. В целом, для литосферы Средней Азии получено хорошее совпадение полученной нами зависимости  $Q_c(f)=307 \pm 17 \cdot f^{0.62}$  и зависимости, установленной в работе [Раутиан и др., 1981],  $Q_c(f)=370 \pm 45 \cdot f^{0.5}$  (рис. 4, вкладка). Наибольший разброс наблюдается в частотном диапазоне до 1 Гц, для которого ввиду преобладания поверхностных волн увеличение поверхности волнового фронта может отличаться от сферического [Sato, 1998].

Сопоставление полученной зависимости добротности от частоты для Тянь-Шаня ( $Q_c(f)=307 \pm 17 \cdot f^{0.62}$ ) и средней для центральной части БРС ( $Q_c(f)=501 \pm 17 \cdot f^{0.45}$ ) показало, что поглощение сейсмических волн в литосфере Тянь-Шаня выше, также, как и неоднородность среды, характеризующаяся частотным параметром  $n$  (рис. 4, вкладка). Только для района Южного Байкала  $n$  величина сопоставима с Тянь-Шанем. Более сильное затухание сейсмических волн в литосфере Тянь-Шаня может объясняться большей раздробленностью и неоднородностью среды.

Также проводилось сопоставление средней величины затухания в литосфере центральной части БРС и регионов с различной тектонической активностью. Результаты определения параметров затухания, полученные в настоящей работе, свидетельствуют о высокой тектонической активности исследуемого региона, что подтверждается как высокой сейсмической активностью, так и высокими скоростями современных горизонтальных тектонических движений по данным GPS-геодезии [Саньков и др., 2009].



Расчет методом нормализации для оценки затухания по прямым волнам проводился для тех же каталогов землетрясений, что и для добротности по кода-волнам. Были оценены значения добротности по прямым продольным ( $Q_P$ ), и поперечным волнам ( $Q_S$ ), получено, что в диапазоне коротких периодов ( $f > 1$  Гц) продольные волны затухают сильнее, чем поперечные  $S$ -волны, т. е.  $Q_S > Q_P$  [Parvez et al., 2012].

Для оценки методом нормализации на региональных расстояниях производился пересчет амплитуды коды из времени двойного времени пробега  $S$ -волны в 100-ю секунду относительно времени в очаге с помощью полученных калибровочных кривых огибающей коды. Геометрическое расхождение учитывалось в виде трехсегментной функции, зависящей от эпицентрального расстояния [Boore, 2003; Павленко, 2008].

С помощью метода инверсии огибающей сейсмической коды [Sens-Schönfelder, Wegler, 2006] была проведена количественная оценка вклада отдельных компонент затухания: внутреннего поглощения ( $Q_i^{-1}$ ) и рассеяния на неоднородностях среды ( $Q_{sc}^{-1}$ ). Были получены абсолютные величины  $Q_i^{-1}$  и  $Q_{sc}^{-1}$ , коэффициенты поглощения и рассеяния, оценено значение сейсмического альбедо  $B_0$ , отражающей вклад рассеянной компоненты в общее затухание.

Для большинства станций для частот выше 1 Гц получено преобладание внутреннего поглощения над рассеянием на неоднородностях среды. При этом соотношение  $Q_i^{-1}$  и  $Q_{sc}^{-1}$  составляет примерно 60% на 40%, величина сейсмического альбедо  $B_0$  около 0.4, что соответствует результатам оценки аналитическим методом в работе [Добрынина и др., 2016]. Однако для отдельных станций были получены высокие значения альбедо  $B_0$ . Наибольший вклад рассеяния на неоднородностях среды в общее затухание (до 98%) был получен для станции Степной Дворец (STDB), расположенной вблизи активного Дельтового разлома в районе дельты р. Селенги, характеризующейся большой мощностью осадочных отложений (более 2 км). Для станций Заречье (ZRHB) и Узур (UZR), расположенных в зонах разломов, также наблюдается преобладание рассеяния над поглощением сейсмических волн в диапазоне частот до 2–4 Гц.

Средняя величина сейсмического альбедо  $B_0$  (вклад рассеяния на неоднородностях среды в общее затухание) для станций в южной части ЮБ впадины – Большое Голоустное (BGT, 0.27), Листвянка (LSTR, 0.24–0.29), и Талая (TLY, 0.2), получена значительно меньшей по сравнению со станциями на Среднем Байкале, где среднее значение  $B_0$  составляет около 0.4.

Кроме того, проводилось сравнение оценок добротности, полученными разными методами: по кода-волнам, методом нормализации  $S$ -волн, и сравнение их с величинами отдельных компонент общего затухания – внутреннего поглощения и рассеяния на неоднородностях среды. Результаты сопоставления значений добротности показали, что абсолютные значения оценок по коде  $Q_C$  для всех станций значительно выше полученных для тех же эпицентральных расстояний методом нормировки амплитуды  $S$ -волны к коде (рис. 5, вкладка). Было получено, что затухание  $Q_C^{-1}$ , оцененное в рамках модели однократного рассеяния, главным образом, отражает поглощение, что согласуется с выводами [Hoshiya, 1991; Tuve et al., 2006]. Анализ изменения величин отдельных компонент затухания с расстоянием показал уменьшение вклада рассеянной компоненты затухания с увеличением расстояния от очага землетрясения, и все большее влияние будет оказывать поглощение, что согласуется с выводами [Abubakirov, Gusev, 1990] (рис. 6, вкладка).

#### **Глава 4. АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ЗАТУХАНИЯ**

В четвертой главе были проанализированы пространственные вариации добротности, коэффициентов поглощения и рассеяния, величины сейсмического альбедо и общего затухания, полученные путем анализа более 2000 волновых форм локальных и региональных землетрясений, зарегистрированных локальной сетью наблюдений в центральной части Байкальской рифтовой системы.

Наиболее детальные оценки пространственных вариаций затухания в районе Южнобайкальской впадины были получены по записям локальных землетрясений.

В целом, анализ пространственных вариаций затухания на разных частотах показывает мозаичное распределение параметра сейсмической добротности и коэффициента затухания в пределах рассматриваемого региона, наблюдается чередование областей с высоким и умеренным затуханием. Размеры областей и блоков варьируют в зависимости от используемой длины окна обработки.

Для района Южного Байкала на центральной частоте 0.75 Гц были получены значения от умеренного поглощения ( $Q_c=180-240$  в районе Култукской депрессии) до низкого затухания (высокие значения добротности, 300–400) в отдалении от основных рифтообразующих разломов. Максимальное поглощение в верхней части литосферы было получено для Селенгино-Бугульдейской перемычки и залива Провал ( $Q_c < 80$ ), и в сравнительно небольших областях северной части Южнобайкальской впадины.

Положение областей низкого и высокого затухания соответствует верхней части литосферы, что показала оценка затухания на эпицентральных расстояниях до 50 км. Пример для центральной частоты 6 Гц (октавный диапазон 4–8 Гц) показан на рисунке 7 (вкладка).

Пространственное положение областей повышенного и пониженного затухания короткопериодных кода-волн в Южнобайкальской впадине может определяться различиями в свойствах земной коры и верхней мантии [Добрынина и др., 2019]. По данным гравиметрии [Мац и др., 2001], плотность верхней коры под южной частью Южнобайкальской впадины существенно ниже, чем под северной. Кроме того, под южной частью Байкальской впадины по данным сейсмотомографии выявлен выступ аномальной мантии [Gao et al., 2003].

По записям региональных землетрясений выделяется область низкого затухания сейсмических волн в южной части Байкальской впадины, как и по записям местных землетрясений. Достаточно контрастно особенности затухания в литосфере южной оконечности впадины проявляются в частотном диапазоне 4–8 Гц. В работе [Ten Brink, Taylor, 2002] предполагается, что нижняя часть коры под Байкалом является остатком первоначальной коры Сибирской платформы или континентальных дуг в пределах Саяно-Байкальского складчатого пояса.

Анализ вариаций логарифма отношения пиковых амплитуд  $S$ - и  $P$ -волн для землетрясений подтвердил полученный в работе [Копничев, Соколова, 2014] вывод о низком поглощении  $S$ -волн в литосфере региона на частотах до 2 Гц. Однако, для диапазона высоких частот выделяются участки умеренного и сильного спада амплитуд поперечных волн по отношению к продольным волнам (величина  $\log(A_S/A_P)$  до 0.3–0.6), что может связываться с флюидизацией отдельных участков земной коры и верхней мантии [Добрынина и др., 2019].

Также проводилось картирование по абсолютной величине коэффициентов поглощения и рассеяния, суммарного затухания (общей добротности), а также по величине сейсмического альбедо  $B_0$ . (рис. 8, вкладка) Для южной части впадины было получено высокое значение суммарной добротности (более 300). Этой области характерно также минимальное рассеяние – на частоте 3 Гц величина сейсмического альбедо менее 0.2, что говорит о том, что около 20% затухания вызвано рассеянием на неоднородностях среды, а основной вклад дает поглощение. В отличие от южной части впадины, на центральном Байкале в среднем 30–50%, а для отдельных блоков – и до 70% затухания на частоте 3 Гц и до 90% на 1.5 Гц вызвано рассеянием.

Проводилось также сопоставление пространственного распределения характеристик затухания с картами кумулятивной сейсмической энергии, плотности эпицентров землетрясений [Радзиминович и др., 2018], поверхностной плотности разломов [Лунина и др., 2010] и теплового потока [Лысак, 2002; Голубев, 2007]. Сейсмическая энергия оценивалась путем пересчета из энергетического класса для землетрясений с  $K \geq 8.5$ , произошедших в центральной части Байкальской рифтовой системы и в пределах окружающих ее территорий за период 1952–2019 гг. Сравнение пространственных вариаций показывает хорошую общую сходимость аномалий: области с высокой сейсмической



активностью характеризуются высокой плотностью разломов и высокими значениями теплового потока (рис. 9, вкладка).

Области интенсивного рассеяния (высокого значения сейсмического альбеда  $B_0$ ) и повышенного затухания сейсмических волн совпадают с областями максимальных выделений сейсмической энергии и плотности эпицентров (рис. 9, вкладка). Согласно [Radziminovich et al., 2019], меньшее значение угла наклона графика повторяемости землетрясений характерно для южной части Южнобайкальской впадины, находящейся в режиме трансенсии, в то время как высокое значение угла наклона получено для района к северо-востоку от дельты Селенги, которая характеризуется более неоднородным строением земной коры.

В целом, полученные данные подтверждают вывод о том, что области низкого затухания наблюдаются в районах с интенсивным разломообразованием и высокой сейсмичностью [Kumar et al., 2005; Banerjee, Kumar, 2017; Добрынина и др., 2019]. Ранее вывод о возможной связи очагов сильных землетрясений с областями аномального поглощения в литосфере был сделан также в работе [Копничев, 1992].

Таким образом, был получен довольно сильный контраст в свойствах литосферы между южной и центральной частью Южнобайкальской впадины, разделенных Селенгино-Бугульдейской перемычкой. В свою очередь, этот район, включающий Селенгинскую депрессию и залив Провал, имеет свои характерные особенности. Полученные результаты демонстрируют тесную взаимосвязь между структурными неоднородностями и процессами затухания и демонстрируют эффективность анализа пространственных вариаций затухания, который можно использовать в качестве инструмента визуализации, дополняющего традиционные методы (например, томография по скоростям сейсмических волн).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовалось затухание сейсмических волн тектонических землетрясений, локализованных в районе Южнобайкальской впадины и прилегающих к ней территориях. Оценивалось изменение амплитуд сейсмической коды и объемных волн во временной области с помощью различных методов и моделей формирования кода-волн. В зависимости от заданных параметров, эти модели удовлетворительно согласовываются с экспериментальными наблюдениями по записям землетрясений. Количественная оценка затухания, полученная по этим моделям, позволяет получить дополнительную информацию о строении и свойствах среды распространения сейсмических волн.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1) Латеральные вариации затухания сейсмических волн коррелируют с геологическими и геофизическими характеристиками среды, при этом, затухание зависит в первую очередь от сейсмической активности и степени неоднородности среды. Найденные зависимости добротности от частоты и расстояния, учитывающие региональные особенности, позволяют количественно характеризовать среду распространения сейсмических волн.

2) Изменение параметров поглощения в различных регионах зависит от действующего тектонического режима и отличаются в районах с различной геодинамической ситуацией.

3) Анализ латеральных вариаций добротности показывает, что положение областей повышенного и пониженного затухания в Южнобайкальской впадине определяется различиями в свойствах земной коры и верхов мантии. Для южной части впадины в целом было получено более слабое поглощение, что подтверждается, например, макросейсмическими проявлениями при сильных землетрясениях. Кроме того, величина затухания вследствие рассеяния на неоднородностях среды здесь меньше по сравнению с Центральным Байкалом. Сопоставление пространственных вариаций затухания с сейсмичностью и другими геолого-геофизическими характеристиками среды показало совпадение областей высокого затухания сейсмических волн с положением районов с

повышенной сейсмической активностью, высокой плотностью разломов и аномальными значениями теплового потока. Области интенсивного рассеяния совпадают с областями максимальных выделений сейсмической энергии и плотности эпицентров.

Результаты данной работы по уточнению поглощающих свойств на территории центрального Байкала позволят более корректно решать задачу перехода от стационарного спектра к очаговому, получать значительно более точные оценки выделившейся энергии в очаге землетрясения, а также могут использоваться при построении и актуализации карт сейсмического районирования различной детальности.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК для предоставления основных научных результатов диссертации**

1. Добрынина А. А., Саньков В. А., **Предеин П. А.**, Чечельницкий В. В., Тубанов Ц. А. Неоднородности поля затухания сейсмических волн на территории Южного Прибайкалья и Забайкалья // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2016. Т. 17. С. 46-63.

2. **Predein P. A.**, Dobrynina A. A., Tubanov T. A., German E. I. CodaNorm: A software package for the body-wave attenuation calculation by the coda-normalization method // SoftwareX. – 2017. – Т. 6. – С. 30-35.

3. Добрынина А. А., **Предеин П. А.**, Саньков В. А., Тубанов Ц. А., Санжиева Д.П.Д., Горбунова Е. А. Пространственные вариации затухания сейсмических волн в Южнобайкальской впадине и прилегающих областях (Байкальский рифт) // Геодинамика и тектонофизика. – 2019. – Т. 10. – №. 1. – С. 147-166.

4. **Предеин П. А.**, Тубанов Ц. А. Оценка затухания сейсмических волн по огибающей коды в литосфере регионов с разным геодинамическим режимом на примере Тянь-Шаня и Байкальского рифта // Геодинамика и тектонофизика. – 2022.

5. Тубанов Ц. А., Санжиева Д. П.-Д., Кобелева Е. А., **Предеин П. А.**, Цыдыпова Л. Р. Кударинское землетрясение 09.12.2020 г. (Mw=5.5) на озере Байкал: результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. Т. 48, №4, с.32-47.

## Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. **Предеин П. А.**, Добрынина А. А., Тубанов А. А. «CodaNorm» – программа для расчета сейсмической добротности методом нормализации к коде» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615190, Российская Федерация. Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем».

2. **Предеин П. А.**, Добрынина А. А., Тубанов А. А. «GEnvelope» – программа для расчета параметров затухания сейсмических волн методом огибающей коды // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018613010, Российская Федерация. Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем».

## Материалы и тезисы докладов научных конференций

1. **Предеин П. А.**, Тубанов Ц. А., Герман Е. И. Изучение затухания сейсмических волн в земной коре Байкальского рифта методом нормализации // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVI Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 20–25 апреля 2015 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015. С. 140–142.

2. Добрынина А.А., Герман В.И., Тубанов Ц.А., **Предеин П.А.** Сейсмическая добротность литосферы южного обрамления Сибирской платформы // Строение литосферы и

геодинамика: Материалы XXVI Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 20–25 апреля 2015 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015. С. 64–66.

3. Герман Е.И., Тубанов Ц.А., **Предеин П.А.** Методика расчета сейсмической добротности земной коры по прямым S-волнам // Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике: Материалы III всероссийской молодежной конференции / Улан-Удэ. – 2015. – С. 322-324.

4. Добрынина А.А., Саньков В.А., Тощакова С.А., **Предеин П.А.**, Чечельницкий В.В. Мониторинг поглощения сейсмических волн в очаговых областях сильных землетрясений южной части Байкальской рифтовой системы // Материалы международного научного конгресса «Интерэкспо Гео-Сибирь» / Изд-во: Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – 2017. – Т. 4. №1. С. 215-219.

5. **Предеин П. А.**, Добрынина А. А., Тубанов Ц. А., Герман Е. И. Оценка параметров затухания сейсмических волн в центральной части Байкальской рифтовой зоны по записям близких землетрясений // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 45-летию Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ, 27-31 августа 2018 г.). С. 300-302.

6. **Предеин П. А.**, Добрынина А. А., Саньков В. А., Чечельницкий В. В., Герман В. И. Временные вариации поглощения короткопериодных сейсмических волн в эпицентральных областях сильных землетрясений // Тезисы докладов XII Российско-монгольской международной конференции «Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-монгольского региона: результаты многолетних исследований и научно-образовательная политика» (г. Иркутск, 1-5 октября 2018 г.). С. 121-122.

7. **Предеин П. А.**, Добрынина А. А., Тубанов Ц. А. Затухание низкочастотной составляющей спектра сейсмических волн в центральной части Байкальского рифта // Материалы V Всероссийской молодежной научной конференции (г. Улан-Удэ, 27-31 августа 2019 г.). 2019. С. 63-64.

8. Добрынина А.А., **Предеин П.А.**, Саньков В.А., Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д. 2D-модель затухания короткопериодных сейсмических волн в коре и верхней мантии Южнобайкальской рифтовой впадины // Материалы IV Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых «Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы» / Под редакцией С.В. Рассказова, С.П. Приминой. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2019, с. 55-56.

9. Добрынина А.А., **Предеин П.А.**, Саньков В.А., Тубанов Ц.А., Горбунова Е.А., Санжиева Д.П.-Д. Пространственные вариации затухания короткопериодных сейсмических волн в центральной части Байкальского рифта // Геодинамика. Геомеханика и геофизика: Материалы девятнадцатой Всероссийской конференции (22-28 июля 2019, Новосибирск, Алтайский край). – Новосибирск: Издательство ИНГГ СО РАН, 2019. – С. 170–173.

10. **Предеин П.А.**, Добрынина А.А., Тубанов Ц.А. Затухание низкочастотной составляющей спектра сейсмических волн в центральной части Байкальского рифта. Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике. Материалы V Всероссийской молодежной научной конференции. 2019. С. 63-64.

11. **Предеин П. А.**, Добрынина А. А., Тубанов Ц. А. Внутреннее поглощение и рассеяние сейсмических волн в литосфере центральной части Байкальской рифтовой системы // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ. – 2021. – С. 208-209.

12. **Предеин П. А.**, Добрынина А. А., Тубанов Ц. А. Затухание объемных волн в центральной части Байкальского рифта: методы оценки и результаты // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. – 2021. – С. 73-73.

13. Добрынина А. А., Саньков В. А., Герман В. И., Тощакова С. А., **Предеин П. А.**, Чечельницкий В. В., Тубанов Ц. А. Временные вариации затухания сейсмических волн в очаговых областях сильных землетрясений юга Восточной Сибири // Актуальные проблемы науки Прибайкалья. Иркутск, 2015. С. 114-120.



