

На правах рукописи



Сенцов Алексей Андреевич

**СЕЙСМОТЕКТОНИКА ОБЛАСТЕЙ АКТИВНОГО ТЕКТОНОГЕНЕЗА
НА ОСНОВЕ НОВОГО МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

1.6.1 – Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в лаборатории Фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Научные консультанты

Собисевич Алексей Леонидович – член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Макеев Владимир Михайлович – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории эндогенной геодинамики и неотектоники им. В.И. Макарова Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук

Официальные оппоненты

Ведущая организация

«Земля охватывает близкое и далекое, легко преодолимое и препятствия, широкие равнины и узкие ущелья – сущность жизни и смерти»

Сунь-цзы, VI в.д.н.э

ВВЕДЕНИЕ

Для областей активного тектоногенеза характерна высокая сейсмическая активность. За инструментальный период наблюдений именно в таких регионах происходили разрушительные землетрясения, примерами которых могут послужить Крымские землетрясения (1927), Фуюнское (1938), Ашхабадское (1948), Рачинское (1991), Нефтегорское (1995), Сычуаньское (2008), Тувинское (2011), Турецкое землетрясение (2023) и др. Подобные события наносят колоссальный социально-экономический ущерб, но, с другой стороны, дают развитие соответствующим научным направлениям, ориентированным на выделение и оценку основным характеристикам зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ).

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Актуальность связана с необходимостью совершенствования фундаментальных основ определения зон ВОЗ на основе комплексного методического подхода, позволяющего получать новые данные для развития экспертных систем содействия принятию управленческих решений в отношении сейсмотектонобезопасности на горизонте среднесрочного прогнозирования в пределах областей активного тектоногенеза. Глубокая формализация алгоритмов выделения зон ВОЗ направлена на обновление фундаментальных основ сейсмического районирования, улучшение воспроизводимости результатов и создание цифровых карт общего сейсмического районирования (ОСР) нового поколения средствами современных географических информационных систем, обеспечивающих их динамическую корректировку на различных масштабных уровнях.

Первая карта общего сейсмического районирования территории Советского Союза, основанная на детерминистическом подходе к оценке сейсмической опасности, была составлена Г.П. Горшковым в 1937 году (ОСР-37) и с тех пор претерпевала (до 1997 г.) определенные изменения, связанные преимущественно с новыми данными о сильных землетрясениях СССР, России и ближнего зарубежья. Несомненным прорывом в этом направлении стала карта ОСР 1997 года, созданная ОИФЗ РАН и основанная на оценке вероятности превышения ожидаемой интенсивности сейсмических сотрясений [Комплект..., 1999]. При этом научной основой для оценки сейсмической опасности послужила линеаментно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель, элементами которой являются площадные (домены) и линейные (линеаменты) зоны возникновения очагов землетрясений. Дальнейшее развитие научных основ для корректного и объективного выделения зон ВОЗ продиктовано необходимостью усиления формализации процесса применением открытых алгоритмов и программ с целью минимизации проблемы вовлеченности эксперта (человеческого фактора).

Евгений Александрович Рогожин [2012] выделял три основных метода сейсмотектонических исследований, положенных в основу методики построения карт зон ВОЗ: 1) традиционный, предполагающий анализ сейсмических каталогов и активных разломов, позволяющий выделить сейсмогенерирующие структуры, оценить их энергетический потенциал (M_{max}) и повторяемость землетрясений; 2) палеосейсмологический метод, направленный на изучение проявлений сильных землетрясений доинструментального времени;

3) формализованный сейсмотектонический метод оценки сейсмической опасности обширных территорий [Рейснер, 1997], базирующийся на кластерном анализе геолого-геофизических данных с целью типизации земной коры и оценки M_{max} в выделенных кластерах.

Используемые при построении карт ОСР-97 и ОСР-2016 ЛДФ-модели в большинстве случаев базируются на экспертном выделении зон ВОЗ и ограничены представительностью доступных материалов для того или иного региона. *Представляется целесообразным использовать общедоступные источники имеющихся данных, которые должны быть, в большинстве своем, однородными и обрабатываться, в большинстве своем, в автоматизированном режиме на основе открытых кодов/алгоритмах, что позволит снизить роль субъективной оценки.*

На заседании Президиума РАН академик РАН С.А. Тихоцкий подчеркнул необходимость создания новых фундаментальных основ в построении карт ОСР, которые должны быть реализованы на цифровой платформе и включать *«...набор разномасштабных фактических геолого-геофизических данных, являющихся исходными для использования алгоритмов расчёта...»* [Задачи ..., 2026].

Таким образом, **актуальность исследования** определяется необходимостью научно-методического развития подходов к построению карт ОСР в интересах квалифицированных заказчиков, которыми могут выступать МЧС России и Минстрой России, **а его тематика** согласуется с п. 19 перечня критических технологий (Мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды и изменения климата, в том числе ключевых районов Мирового океана, морей России, Арктики и Антарктики, технологии предупреждения и снижения рисков чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, негативных социально-экономических последствий), утвержденных Указом Президента Российской Федерации № 529 от 18.06.2024.

Научная новизна.

Новизна исследования состоит в создании нового, в значительной степени формализованного, методического подхода¹ выделения зон ВОЗ на основе анализа рельефа и современного напряженно-деформированного состояния. Методика апробирована на примере ряда сейсмоактивных регионов. В рамках исследования получил развитие метод интерпретации величины тектонической раздробленности, первоначально предложенный Ю.В. Нечаевым. Выделены зоны потенциально активных разломов и пликативных морфоструктур (поднятий и впадин) на основе анализа удельной длины линементов (УДЛ).

На основе предлагаемого подхода построены новые сейсмотектонические модели для Большого Кавказа, о. Сахалин, Алтае-Саянской складчатой области (входят в настоящую работу), а также для территорий дружественных стран: Республики Союз Мьянма и Республики Куба.

Разработана геодинамическая модель образования разнотипных морфоструктур (площадных и линейных) в рамках адвективно-конвективной модели М.А. Гончарова.

¹ В настоящей работе термины «методический подход», «методика» и «метод» являются взаимозаменяемыми.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость исследования связана с разработкой нового, в значительной степени формализованного, методического подхода к построению сейсмогеодинамических моделей в областях активного тектоногенеза.

Выделены новые и подтверждены ранее известные зоны ВОЗ Большого Кавказа, о. Сахалин и Алтае-Саянской области, проведена оценка M_{max} выделенных зон ВОЗ на основе эмпирических формул для обеспечения сейсмобезопасности территорий с высокой степенью новейшей геодинамической активности.

Цель – решение крупной научной проблемы, связанной с развитием междисциплинарного подхода изучения сейсмогеодинамических условий формирования зон ВОЗ для обеспечения сейсмобезопасности на горизонте долгосрочного прогнозирования.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**.

1. Построение схем различных морфометрических характеристик рельефа по цифровой модели рельефа (ЦМР). Установление количественной взаимосвязи между рядом расчетных параметров, землетрясениями и активными разломами.

2. Создание сеймотектонических моделей на основе сопоставления морфометрических параметров рельефа с эпицентрами землетрясений с $M \geq 5,5$ и оценка их достоверности.

3. Разработка методики сейсмогеодинамических исследований на основе анализа комплекса геоморфологических, тектонофизических и геодезических данных для ЛДФ-моделей нового поколения.

4. Выделение активных разломов по градиентным изменениям величины тектонической раздробленности верхней части литосферы.

5. Геодинамическая интерпретация величины тектонической раздробленности в контексте формирования пликативных и дизъюнктивных структур в рамках адвективно-конвективной модели М.А. Гончарова [Гончаров и др., 2005].

Методы исследования.

В основу работы положены три основные группы методов – геоморфологические, геодезические и тектонофизические, успешно применяемые в настоящее время для решения достаточно широкого круга сеймотектонических задач. К геоморфологической группе относятся структурно-геоморфологический и морфометрический анализ рельефа. Они позволяют дать качественное и количественное описание интенсивности и направленности неотектонических движений. Применение нечетких множеств и операций над ними, математической статистики при сопоставлении с пространственным положением эпицентров землетрясений позволяет выделять сейсмоактивные участки. Использование данных о площадной деформации по анализу перемещения стационарных пунктов ГНСС и решения механизмов очагов землетрясений позволяет установить тип напряженно-деформированного состояния исследуемых регионов, которое используется при выделении зон ВОЗ совместно с результатами анализа рельефа. Большинство расчетов выполнено в современных ГИС-системах. Более подробно методическим основам посвящена Глава 1 диссертации.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Формализованный методический подход для анализа геолого-геоморфологических, тектонофизических и геодезических пространственных данных (с применением аппарата нечеткой логики и математической статистики) позволяет на количественном уровне выделять зоны возникновения очагов землетрясений для событий с $M \geq 5,5$.

2. Новые объёмные сейсмостектонические модели земной коры, построенные на основе предлагаемого методического подхода, позволяют выделять зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) высокомагнитудных землетрясений в областях активного тектоногенеза.

3. Новейшие поднятия и впадины соответствуют экстремумам тектонической раздробленности, а ее градиентам – зоны потенциальных активных разломов, что является одной из компонент при создании карт общего сейсмического районирования нового поколения.

Достоверность полученных результатов и их апробация. На количественном уровне, с учетом использования инструментов математической статистики и нечеткой логики, показана достоверность построенных сейсмостектонических моделей исследуемых регионов. Строгость построения моделей обусловлена всесторонним непротиворечивым анализом геоморфологических, тектонофизических, сейсмологических, геодезических и геологических данных.

Основные выводы и положения диссертации обсуждались на ряде всероссийских научных конференций, профильных семинарах ИФЗ РАН, среди которых «ГеоЕвразия» (2025), «Добрецовские чтения» (2022, 2024), «Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов» (2022, 2024) и др. По теме диссертации опубликована 21 статья в журналах, входящих в перечень ВАК, сделано 50 сообщений. Общее количество опубликованных работ составляет 79.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем работы – 231 страница, включая 17 таблиц и 114 рисунков.

Благодарности. Автор выражает благодарность научным консультантам – члену-корреспонденту РАН д.ф.-м.н. Алексею Леонидовичу Собисевичу (ИФЗ РАН) и д.г.-м.н. Владимиру Михайловичу Макееву (ИГЭ РАН) за всестороннюю поддержку от момента идеи данной работы до ее реализации. Искренне благодарен моему другу и соавтору к.г.-м.н. А.О. Агибалову (МГУ имени М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН). Огромную признательность выражаю профессору РАН д.ф.-м.н. Г.М. Стеблову (ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН), д.ф.-м.н., профессору Ю.О. Кузьмину (ИФЗ РАН), д.ф.-м.н. А.Д. Завьялову (ИФЗ РАН), д.г.-м.н. А.М. Корженкову (ИФЗ РАН), д.г.-м.н. Ф.Л. Яковлеву (ИФЗ РАН), д.т.н. А.Н. Морозову (ИФЗ РАН), к.ф.-м.н. И.М. Алёшину (ИФЗ РАН), к.т.н. К.И. Холодкову (ИФЗ РАН), Ф.В. Передерину (ИФЗ РАН) за помощь, поддержку и консультирование при подготовке материала диссертационной работы к защите. Большое спасибо к.г.-м.н. В.А. Зайцеву, к.г.-м.н. Л.В. Паниной, к.г.-м.н. Н.С. Фроловой и д.г.-м.н. В.С. Захарову (МГУ имени М.В. Ломоносова) за полученные во время обучения навыки и поддержку. Трудно оценить степень благодарности моим самым дорогим и близким людям, которые поддерживали меня на всем научном пути: родителям И.А. Сенцовой и А.В. Сенцову, моему самому замечательному брату А.Ю. Сенцову и дорогой жене Д.В. Гринёвой.

Автор хранит самые теплые воспоминания о человеке, первым поверившим в него как в ученого – д.г.-м.н. Евгении Александровиче Рогожине.

Глава 1. Материалы и методы исследования

В данной главе, состоящей из двух разделов, последовательно рассмотрены основные источники данных и методы, на основе которых проводилось исследование.

Первый раздел главы посвящен использованным первичным данным. Основными источниками данных при проведении исследования служили цифровые модели рельефа (ЦМР) ASTER с разрешением 1-arc секунда (~30 м), база данных активных разломов Северной Евразии [Zelenin et al., 2022], каталоги землетрясений ISC, USGS и ФИЦ ЕГС РАН [International..., 2024; United States..., 2024; Сейсмический каталог..., 2024], база данных водотоков [Lehner, Grill; 2013], а также литературные источники по современным перемещениям станций глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и палеосейсмологическим исследованиям. Выбор данных обусловлен их открытостью и одинаковой представительностью для исследуемых регионов.

Использование в диссертационной работе ЦМР ASTER GDEM в качестве исходных материалов обосновано, поскольку ее точность достаточна для проведения региональных исследований.

Используемые в настоящей работе сейсмические каталоги находятся в открытом доступе. Магнитуды землетрясений не всегда рассчитаны в единой шкале, поэтому во многих случаях необходим пересчет разных типов магнитуд в наиболее распространенные единицы – моментные магнитуды (M_w) и магнитуды по поверхностным волнам (M_s). В работе использованы данные каталогов ISC, USGS и ФИЦ ЕГС РАН за весь доступный период наблюдений для каждого исследуемого района (Большой Кавказ, о. Сахалин, Алтае-Саянская область). Исходя из мощности земной коры [Павленкова, 2019], рассмотрены только малоглубинные землетрясения (глубина очага ≤ 45 км). Кроме того, по данным каталогов ISC и USGS, а также литературным источникам проанализированы механизмы очагов землетрясений.

В рамках диссертационной работы использованы литературные данные о скоростях перемещений стационарных станций ГНСС для каждого рассматриваемого региона, что позволило рассчитать величину современной площадной деформации. Более подробное описание методики расчета приведено в разделе 1.2.2.

В разделе 1.1.4 приведена расшифровка основных терминов, используемых в работе во избежание их двоякого трактования.

1.2.1. Геоморфологические методы

В основу работы положены три основные группы методов – геоморфологические, геодезические и тектонофизические, успешно применяемые в настоящее время для решения достаточно широкого круга сеймотектонических задач.

К первой группе относятся структурно-геоморфологический анализ [Костенко, 1999; Корчуганова, 2007; Несмеянов, 2012] и морфометрические исследования рельефа [Философов, 1960; Философов, 1967; Николаев, 1988; Голодовкин, 1966; Симонов, 1999; Трегуб, 2010; Нетребин, 2012], на основе которых строятся карты неотектоники. Выбор этих методов обусловлен тем, что они

помогают оценить степень новейшей тектонической активности при средне- и мелкомасштабных исследованиях, но с использованием новых высокоточных моделей местности их детальность значительно увеличивается, что делает их более актуальными, по сравнению с обзорными картами амплитуд новейших движений [Национальный атлас..., 2007] и новейшей тектоники [Карта новейшей..., 1997]. Кроме того, по мнению автора, именно тектоническая составляющая вносит больший вклад в формирование рельефа, нежели экзогенный компонент.

Структурно-геоморфологический метод направлен на выделение новейших поднятий и впадин, сформировавшихся за конэрозионный этап развития. Как правило, они нарушены многочисленными «слабыми» зонами, фрагментирующими территорию на отдельные блоки. В качестве основных исходных материалов для составления структурно-геоморфологических карт служат ЦМР, радарные изображения и космические снимки. В диссертационной работе основное внимание уделено выделению «слабых» зон в масштабе 1:500 000. С помощью стандартных инструментов геоинформационных систем (ГИС) рассчитана плотность «слабых» зон, в определенном приближении отражающая степень раздробленности верхней части геосреды.

К морфометрическим характеристикам среды относятся следующие параметры: глубина вертикального расчленения рельефа, уклон (наклон), кривизна рельефа, плотность водотоков и линеаментов, асимметрия, математическое ожидание и дисперсия высот рельефа, а также схемы разности базисных поверхностей водотоков разных порядков.

Анализ разности базисных поверхностей водотоков разных порядков позволяет оценить направленность неотектонических движений [Философов, 1960]. Схемы базисных поверхностей строятся следующим способом: сначала выделяются водотоки и им присваивается определенный порядок. Наименьшим порядком (первым) считаются водотоки, у которых отсутствуют притоки. Слияние однопорядковых водотоков приводит к формированию водотока более высокого порядка.

Для оценки направленности неотектонических движений применялся также анализ глубины вертикального расчленения рельефа (J), рассчитанной как разность максимальной и минимальной высот в пределах ячейки [Голодовкин, 1966; Философов, 1967; Симонов, 1999; Нетребин, 2012].

$$J = Z_{max} - Z_{min}, \quad (1.1)$$

где Z_{max} и Z_{min} - максимальная и минимальная высоты в ячейке, J – глубина вертикального расчленения.

Асимметрия описывает распределение больших и меньших высот относительно средних, что дает представления о тенденции развития рельефа за весь этап его формирования [Трегуб, 2010]. Значения этого показателя бывают положительными, нулевыми и отрицательными. Положительные значения асимметрии указывают на преобладание в рельефе высот меньших, чем средние, над высотами большими, чем средние. Такое соотношение характерно для этапа выравнивания рельефа, снижения запасов его потенциальной энергии. Отрицательные значения асимметрии свидетельствуют об увеличении вертикального расчленения и роста потенциальной энергии, а нулевые значения – о равновесном состоянии морфогенеза [Трегуб, Жаворонкин, 2000]. Схемы дисперсии высот

рельефа также позволяют оценить потенциальную энергию рельефа и дать оценку суммарной интенсивности неотектонических движений с начала этапа рельефообразования [Спиридонов, 1975]. Схемы математического ожидания служат для выделения основных элементов морфоструктуры. Последние два параметра также рассчитываются с использованием специализированных ГИС-инструментов.

Все морфометрические параметры, за исключением кривизны рельефа, его наклона и базисных поверхностей водотоков различного порядка, оценивались в ячейках 15×15 км. Для всех упомянутых морфометрических параметров рассчитаны квартильные значения по точечным шейп-файлам с шагом точек от 750 до 3 000 м (в зависимости от размера территории). Это позволило получить большие выборки, состоящие не менее чем из 50 000 элементов. Кроме того, оценена доля эпицентров малоглубинных землетрясений, эпицентры которых попадают в области, где значения определенного морфометрического параметра превышают медиану или третий квартиль. Наиболее информативными для оконтуривания сейсмоактивных участков считались те параметры, в области положительных аномалий которых, оконтуренных по медианным значениям, попадает более половины эпицентров сейсмических событий. Отметим, что рельеф, в целом, сформировался за достаточно длительный неотектонический этап, в то время как каталоги землетрясений охватывают небольшой период инструментальных наблюдений, поэтому для выделения зон ВОЗ необходимо привлечение данных о современном поле напряжений.

1.2.2. Анализ геодезических данных

Нами произведен расчет площадной деформации (дилатации) (ε_s) на основе анализа перемещения пунктов ГНСС. Данные о положении и скоростях перемещения этих пунктов приведены в литературных источниках. Расчет дилатации производился по формуле:

$$\varepsilon_s = \frac{(S_2 - S_1)}{S_1}, \quad (1.2)$$

где S_1 – площадь элемента покрытия; S_2 – площадь того же элемента с учетом смещения его вершин за 1 год. Элементы покрытия построены методом триангуляции [Делоне, 1934] и представляют собой треугольники, вершины которых соответствуют пунктам ГНСС.

1.2.3. Анализ расчетных параметров нечеткой логикой на основе гамма-оператора

Использование нечеткой логики для выделения зон ВОЗ является относительно новым и не очень широко распространенным алгоритмом. Теория нечетких множеств впервые рассмотрена в [Заде, 1976]. Среди отечественных исследований в этой области можно выделить работы А.Д. Гвишиани и Б.А. Дзедоева [Дзедоев и др., 2019; Гвишиани и др., 2021], которые использовали для выделения зон ВОЗ в т.ч. геоморфологические данные. В диссертационной работе применена обработка морфометрических и геодезических данных гамма-оператором нечеткой логики, предложенная Циммерманом [1996]. Для этого исходные растры преобразованы в нечеткие линейные множества. Это преобразование заключается в расчете степени принадлежности, варьирующей от 0 до 1 (0 – значение не принадлежит множеству, 1 – принадлежит множеству). Трансформация к нечеткому линейному множеству производится на основе линейной функции трапецеидального вида между минимальным и максимальным значениями

в выборке [Tanaka, Asai, 1984; Демидова, Лукичев, 2017]. После преобразования линейный тип функции имеет следующий вид:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-x_0}{x_m-x_0}, & x_0 \leq x < x_m \\ 1, & x = x_m \end{cases} \quad (1.3)$$

где x – значение функции принадлежности μ , x_0 – начальное значение диапазона, x_n – конечное значение диапазона, x_m – значение, при котором значение функции принадлежности максимально [Демидова, Лукичев, 2017; Tanaka, Asai, 1984]. В диссертационной работе рассмотрен частный случай этой функции, когда были заданы только 2 значения: x_0 , соответствующее минимальному значению морфометрического параметра и x_m , соответствующее его максимальному значению.

Отметим, что в качестве исходных морфометрических параметров, преобразованных в нечеткие множества, выбраны только те, которые наилучшим образом связаны с сейсмичностью. В пределах их положительных аномалий, оконтурированных по значениям, превышающим медиану или 3-ий квартиль, расположено более половины (или более четверти для 3 квартиля) эпицентров землетрясений. При этом при переходе от медианы к 3 квартилю доля эпицентров сокращается менее, чем в 2 раза. *Пример:* 70% землетрясений расположены в области, превышающей значения медианы параметра А и 50% в области, превышавшей значения третьего квартиля (Q_3), в то время как для параметра В для аналогичных интервалов (Q_2 и Q_3) имеется процент землетрясений в 60 и 30% соответственно. Из приведенного примера следует, что параметр А может быть использован в качестве входных данных для обработки нечеткой логикой, а параметр В – нет.

Обработка нечетких множеств выполнена с помощью γ -оператора [Zimmerman, 1996], который ранее применялся для прогноза мест образования оползней в Индии и Нигерии [Abdulrazzaq et al., 2020; Valamurugan et al., 2016; Sema et al., 2017; Tangestani, 2004]. В упомянутых работах, помимо геологических характеристик, в большом количестве используются морфометрические параметры рельефа, преобразованные в нечеткие множества. Для их анализа γ -оператором использованы формулы расчета нечеткой суммы:

$$\mu_{Summ} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (1.4)$$

и нечеткого произведения:

$$\mu_{Prod} = \prod_{i=1}^n \mu_i. \quad (1.5)$$

С их помощью рассчитывается

$$\mu(x) = (\mu_{Summ})^\gamma \times (\mu_{Prod})^{(1-\gamma)}, \quad (1.6)$$

где γ – параметр, варьирующий от 0 до 1. Если значение γ стремится к 0, то результат обработки будет стремиться к нечеткому произведению (1.5), а если γ стремится к 1, то выражение (1.6) будет приближаться к нечеткой сумме (1.4). Нами были апробированы разные значения $\gamma=0,25, 0,5, 0,75$ и $0,9$. Эмпирически установлено, что во всех изученных регионах при $\gamma=0,9$ схема степени принадлежности, которую можно обозначить как схему *индекса неотектонической активности* (F), наилучшим образом согласуется с данными о распределении эпицентров землетрясений по площади, в том числе высокомагнитудных ($M \geq 5,5$).

Для оценки прогностичности (качества) полученного параметра была произведена оценка ROC-AUC методом. Если построенная ROC-кривая

расположена выше значения случайного распределения (диагональ квадрата на диаграмме), то имеет смысл расчет площади под этой кривой (AUC). Чем больше значение AUC, тем сильнее взаимосвязь между сравниваемыми параметрами. Такими параметрами послужила величина индекса неотектонической активности и значения 0 или 1, присвоенные расчетной ячейке в зависимости от того, попадает ли в нее хотя бы 1 эпицентр землетрясения. Нами были рассчитаны значения AUC как для всех эпицентров землетрясений, так и отдельно для высокомагнитудных ($M \geq 5,5$) событий. Полученные результаты были сопоставлены с данными тектонофизических исследований.

На примере Республики Союз Мьянма показано [Сенцов и др., 2025], что при использовании аппарата нечеткой логики не всегда получается достичь высоких значений F. В таких случаях правомерно использовать метод равнозначных градаций, рассмотренный в [Копылов, 2019]. Его суть заключается в пересчете морфометрических параметров в баллы: 1 балл соответствует значениям (Z), меньшим 1-го квартиля (Q_1), 2 балла – $Q_1 \leq Z < Q_2$, 3 балла – $Q_2 \leq Z < Q_3$, 4 балла – $Z \geq Q_3$. Индекс неотектонической активности равен отношению суммы баллов к количеству использованных морфометрических параметров. При этом коэффициент корреляции Пирсона между полученными значениями индекса неотектонической активности, рассчитанными методом равнозначных градаций и с использованием нечеткой логики, составляет 0,88, что свидетельствует о схожести полученных результатов.

1.2.4. Тектонофизическое моделирование

Существует несколько вариантов моделей среды: упругая, пластичная и упруго-пластичная. Нами была выбрана упругая модель, поскольку время накопления напряжений, вызывающих землетрясение, намного меньше времени релаксации напряжений [Кузьмин, 2023]. Например, время подготовки Ассамского землетрясения 1950 г. с $M=8,6$ составляло 20 лет [Кейлис-Борок, Малиновская, 1966], а время релаксации напряжений после землетрясений в целом оценивается приблизительно в 10^3-10^5 лет [Кузьмин, 2023]. Описанное в диссертационной работе компьютерное геодинамическое моделирование проведено на базе специального программного обеспечения, рассмотренного ранее в [Агибалов, 2019; Сенцов, 2022]. Моделирование предполагает создание трехмерной модели исследуемой области, на которую наносится сетка новейших неоднородностей и задается внешнее (региональное) поле напряжений.

Методика расчёта относительных величин напряжений базируется на том, что модель состоит из упругого однородного материала [Крауч, Старфилд, 1987; Oda, 1985; Becker, 1992; Daly, Mueller, 2004], для которого известны осредненные коэффициенты Пуассона и внутреннего трения. Под действием регионального поля напряжений, величина которого достаточна для возникновения новых трещин или малых разрывных нарушений, происходит перераспределение локального поля напряжения. Физической основой определения областей нового разломообразования служит закон Кулона-Мора, описывающий зависимость касательных напряжений (τ) от величины приложенных нормальных напряжений (σ):

$$\tau = C + \sigma_n \tan \varphi \quad (1.7)$$

где τ – касательные напряжения, σ_n – нормальные напряжения, φ – угол внутреннего трения, C – сцепление ($C=2T$, где T – предел прочности породы).

Так, близость предела на разрыв в кулоновой среде (которой являются горные породы) определяется кулоновским напряжением τ_c . Оно определяется как разность между касательными напряжениями и напряжением «сухого» трения, вызванным суммарным воздействием нормального напряжения к трещине и флюидного давления ($p(fl)$) внутри самой трещины (эффективного нормального напряжения (σ^*)):

$$\tau_c = \tau_n + k * \sigma_{nn}^* \quad (1.8)$$

$$k = k_s, k_f, \quad (1.9)$$

где $\sigma_{nn}^* = \sigma + p(fl) \leq 0$, $p(fl) \geq 0$, $\tau_n \geq 0$, k_f и k_s – коэффициенты внутреннего трения эффективно сплошной породы [Терцаги, 1961; Terzaghi, 1965] и статического поверхностного трения трещины, используемые при оценке кулоновских напряжений, в результате воздействия которых происходит образование новых трещин или реактивизация уже имеющихся. Тогда положительным значениям эффективного нормального напряжения отвечает растяжение, а положительные значения давления порового флюида соответствуют сжатию. Разрушение горных пород посредством образования новых трещин возможно по следующим причинам: 1) из-за повышения уровня максимальных касательных напряжений (начальная фаза дилатантно-диффузионной модели), 2) понижения эффективного всестороннего давления, 3) снижения прочности пород на завершающей стадии модели лавинного неустойчивого трещинообразования [Ребецкий, 2008].

В рамках данного исследования методика компьютерного моделирования имеет свои особенности: 1) одна из нормальных осей действует вертикально; 2) промежуточное напряжение (σ_2) равно среднему, 3) перемещения по заданной сетке активных разломов происходит до полной релаксации напряжений; 4) приложенное к модели внешнее напряжение является региональным и достаточным для разрушения пород по теории Кулона-Мора ($\sigma_2 = \sigma + \alpha\tau$, где σ – вертикальное напряжение,

$$\alpha = \begin{cases} -1, & \text{обстановка растяжения} \\ 0, & \text{обстановка сдвига} \\ 1, & \text{обстановка сжатия} \end{cases}.$$

Тензор напряжений полностью определен ($\tau = \sigma_2 \sin \varphi + C \cos \varphi$), поскольку значения σ_2 , C и φ известны. Тензор напряжений, связанный с кругом Мора, фиксируется до целого значения. Смещение σ_2 вдоль оси абсцисс приводит к изменению масштаба тензора напряжений.

Программное обеспечение при проведении расчетов использует величины деформаций, что позволяет ему произвольно выбирать значение нормальных напряжений σ . Разломы разделяются на сегменты, для каждого из которых рассчитываются относительные амплитуды перемещений. Они определяются с помощью коэффициента Пуассона и модуля Юнга посредством системы дифференциальных уравнений [Руководство..., 2020; Агибалов и др., 2017; Агибалов, 2019; Сенцов, 2022]. Для сопоставления с современной сейсмичностью нами были выбраны относительные величины горизонтальных напряжений. При этом значения этого параметра, превышающие медиану, использовались в обстановках сжатия, а значения меньше медианы – в обстановках сдвига.

Для определения типа напряженно-деформированного состояния в исследуемых регионах использовался метод катакластического анализа Ю.Л. Ребецкого (МКА) [Ребецкий и др., 2017]. Он позволяет в автоматизированном режиме

с помощью программы StressGeol разделить множество решений фокальных механизмов очагов землетрясений на несколько кинематических групп, каждой из которых соответствует определенный тип напряженного состояния. Результаты анализа для наиболее представительной группы использовались как исходные данные при геодинамическом моделировании. Графическое представление результатов обработки реализовано в программе FaultKin [Allmendinger, 2023].

Основные результаты моделирования – схемы вероятности трещинообразования и относительных величин напряжений. Они сопоставлены с пространственным распределением эпицентров современных землетрясений и данными морфометрического анализа рельефа.

1.2.5. Выделение зон возможных очагов землетрясений и оценка максимальных магнитуд зон возможных очагов землетрясений

В настоящее время алгоритм выделения зон ВОЗ не в полной мере формализован из-за сложности учета геологических факторов. Например, по уравнению макросейсмического поля [Шебалин, 1997] возможно рассчитать интенсивность сотрясений вокруг эпицентра землетрясения. Однако сокращение площади областей, где интенсивность сотрясений превышает 5 баллов, на основе полученных результатов анализа рельефа и компьютерного моделирования, оказалось малоинформативным. В связи с этим предложено выделять зоны ВОЗ в 2 этапа: 1) на основании значений $F \geq 0,6$ и $M \geq 5,5$ и 2) на основе наличия сейсмических событий с $M \geq 5,5$, $0,4 \leq F < 0,6$ и относительной величины горизонтальных напряжений (в обстановке сжатия – превышающих медиану, в обстановках сдвига и растяжения – меньше медианы) в пределах единой площади. Этот подход также формализован не в полной мере, однако он позволяет существенно снизить роль субъективной оценки границ зон ВОЗ и учитывать геолого-геоморфологические данные.

После выделения зон ВОЗ данные каталога на каждую из территорий были сопоставлены с результатами расчета максимальной магнитуды ожидаемого землетрясения (M_{\max}). Нами были использованы следующие формулы:

$$M_{\max} = 5,0 + 1,88 \lg(L) + 0,63 \lg(G) + 0,63 \lg(t_{\text{ож}}), \quad (1.10)$$

где M_{\max} – максимальная моментная магнитуда ожидаемого землетрясения; L – длина разрыва, км; G – скорость деформаций (получена по результатам анализа данных ГНСС), 1/год; $t_{\text{ож}}$ – время ожидания, равное 50 лет для срока службы объектов использования атомной энергии [Приказ..., 2018];

$$M_{\max}(\text{по } M_S) = 0,5 + M_{S_{\max}}, \quad (1.11)$$

где $M_{\max}(\text{по } M_S)$ – максимальная магнитуда ожидаемого землетрясения по поверхностным волнам; $M_{S_{\max}}$ – максимальная зарегистрированная M_S ;

$$M_{\max}(\text{по } M_W) = 0,5 + M_{W_{\max}}, \quad (1.12)$$

где $M_{\max}(\text{по } M_W)$ – максимальная моментная магнитуда ожидаемого землетрясения; $M_{W_{\max}}$ – максимальная зарегистрированная M_W [Приказ..., 2018];

$$\lg(L) = 0,5 M_W - 1,92, \quad (1.13)$$

где L – длина разлома, км [Kanamori, Anderson, 1975];

$$M_W = (1,16 \pm 0,07) \lg(L) + 5,08 (\pm 0,1), \quad (1.14)$$

где L – длина разлома, км [Wells, Coppersmith, 1994];

$$\lg(L) = 0,43 M - 1,27, \quad (1.15)$$

где L – длина разлома, км [Завьялов, Зотов, 2021].

Использование формулы (1.14) оправдано тем, что наибольшая

корреляция достигается между магнитудой и 3 параметрами – длиной разрыва на поверхности, его площадью и длиной разлома на глубине [Wells, Coppersmith, 1994]. Значения коэффициента корреляции варьируют от 0,84 до 0,95, в то время как степень корреляции между магнитудой и амплитудой смещения значительно зависит от кинематики разломов. Наилучшая корреляция достигнута для сдвигов.

Полученные значения были нами сопоставлены с региональными линейно-доменно-фокальными (ЛДФ) моделями для конкретных территорий, ЛДФ-моделями к комплексу карт ОСР–97, ОСР–2016 и результатами палеосейсмологических исследований из литературных источников. Подобный подход к оценке M_{max} был рассмотрен в работе [Стеблов и др., 2023].

1.2.6. Пример использования предлагаемого методического подхода

Для того, чтобы продемонстрировать возможности предлагаемого подхода проанализирована территория Республики Союз Мьянма, где 28 марта 2025 г. произошло землетрясение с $M_w=7,7$. Этот регион также интересен тем, что он расположен в пределах 2 разновозрастных блоков, разделенных трансформным разломом Сагайн – альпийского на западе и герцинского – на востоке.

Были рассчитаны 18 морфометрических параметров рельефа. Далее анализировались две модели: построенная на всю территорию Республики Союз Мьянма и отдельно для 2 расположенных в ее пределах ранее упомянутых блоков [Карта..., 1983]. В первом случае для выделения зон ВОЗ информативны 3 морфометрических параметра рельефа: плотность водотоков, плотность их базисов и асимметрия высот. Во втором случае для западной и восточной частей Мьянмы выбраны асимметрия высот, плотность водотоков (для западной части) и высоты остаточного рельефа, разность базисных поверхностей 1-2 и 3-4 порядков (для восточной части). Индекс неотектонической активности (F) на основе морфометрических характеристик рельефа был рассчитан в пределах каждого блока как с использованием нечеткой логики, так и методом равнозначных градаций.

Полученные модели были сопоставлены на численном уровне с применением ROC-AUC-анализа. Значения F в случае использования нечеткой логики варьируются от 0 до 1, а при методе равнозначных градаций – от 1 до 4. Правильность подобной замены подтверждается высокой степенью корреляции (по шкале Чеддока) между значениями F , полученного разными методами в пределах одной территории, что подтверждается значением коэффициента корреляции Пирсона в 88%. Похожие значения коэффициента корреляции получены и при оценке индекса F в пределах Северомуйского тоннеля БАМ [Агибалов и др., 2025].

Анализ решений механизмов фокальных очагов землетрясений МКА показал, что в пределах Мьянмы преобладает сдвиговый тип напряженно-деформированного состояния с осью сжатия, простирающейся по азимуту 225° .

На основе комплексирования результатов анализа рельефа и компьютерного моделирования выделены зоны ВОЗ, занимающие 27% площади государства. Для четырех наиболее крупных зон были рассчитаны значения M_{max} по формуле (1.15). Они составляют 8,7, 7,5, 8,1 и 7,6 для ВОЗ № I, II, III и IV, соответственно.

В пределах выделенных зон ВОЗ локализовано 12% эпицентров всех

землетрясений и 75% – с $M_w \geq 5,5$. Учитывая полученные количественные результаты, можно сделать вывод о том, что проведенные исследования имеют поисковый характер и должны дополняться геолого-геофизическими данными. В то же время результаты представительны, а методика в значительной степени формализована, что снижает субъективную оценку при выделении зон ВОЗ.

Выводы по главе 1

На основе приведенного описания разработанного методического подхода можно сделать следующие выводы.

1. Предлагаемый подход основан на комплексном количественном анализе геоморфологических, геодезических и тектонофизических данных.

2. Схемы индекса неотектонической активности, полученные с использованием алгоритмов нечеткой логики, имеют большую разрешающую способность (детальность) и согласуются с закономерностями распределения эпицентров современных землетрясений по площади.

3. Данный подход является развитием идей Г.И. Рейснера о формализованном сеймотектоническом методе [Буне и др., 1974; Борисов и др., 1976; Рейснер, Чичагов, 1991; Рейснер, 2003], который направлен на оценку M_{max} и предполагает разделение земной коры на блоки, отличающиеся геолого-геофизическим строением. В случае слабой изученности территории, Г.И. Рейснер предлагал использовать данные о рельефе и мощности земной коры, что и было реализовано в диссертационной работе.

Таким образом, представленные результаты обосновывают **первое защищаемое положение**: *формализованный методический подход для анализа геолого-геоморфологических, тектонофизических и геодезических пространственных данных (с применением аппарата нечеткой логики и математической статистики) позволяет на количественном уровне выделять зоны возникновения очагов землетрясений для событий с $M \geq 5,5$.*

Глава 2. Сеймотектонические модели областей активного тектоногенеза

2.1. Альпийский ороген Большого Кавказа

В разделе рассматриваются новейшая тектоника, анализ сейсмичности региона и результаты морфометрических и тектонофизических исследований альпийского орогенного сооружения Большого Кавказа, проведенного автором, а также общее описание геологического строения региона по литературным источникам.

Существует несколько концепций, объясняющих формирование орогенной структуры Крымско-Кавказского региона [Патина и др., 2017]: а) покровно-складчатая, б) содвиговая, в) сдвиговая. Первые две применимы ко всему Большому Кавказу, в то время как третья – преимущественно к Копетдагу, Восточному и Центральному Кавказу. На сегодняшний день есть несколько точек зрения о начале орогенного этапа Большого Кавказа. Традиционный [Милановский, Хаин, 1963; Милановский, 1968; Карта поверхностей..., 1971; Гроссгейм, 1972; Панина и др., 2019; Ломов и др., 2025] подход основывается на анализе возрастов поверхностей выравнивания и корреляции отложений в смежных краевых прогибах. В приведенных работах отмечается, что в миоценовое время на территории Большого Кавказа уже существовали отдельные острова (особенно в районе Центрального Кавказа), а отправной точкой начала неотектонического

этапа принято сарматское время, когда сформировалась поверхность выравнивания. Существует также точка зрения о более молодом возрасте данного орогена (~3 млн. лет) [Кузнецов, Романюк; 2025]. Детальный анализ упомянутых точек зрения выходит за рамки диссертационной работы и требует отдельного рассмотрения, поэтому в диссертации неотектонический этап развития Большого Кавказа рассмотрен с позиции наиболее распространенной точки зрения [Большой..., 2007; Милановский, 1968].

По характеру движений и типам отложений неотектонический этап разделен на две стадии: раннюю и позднюю [Милановский, 1968]. Ранняя стадия в Альпийско-Гималайском поясе приходится на границу олигоцена и раннего миоцена [Трифонов, 2017]. Поздняя отвечает плиоцен-четвертичному времени.

Разрывные нарушения относительно простирания горного сооружения разделены на две системы: продольные («кавказские») и поперечные («антикавказские»). Часть из них заложилась в герцинскую эпоху и была обновлена в альпийскую фазу тектоногенеза, однако преобладающее большинство активных разломов сформировалось на альпийском этапе, а нынешний вид разломов оформился на поздней стадии альпийского тектоногенеза [Рогожин, 2012]. Большая часть разрывных нарушений «кавказского» направления имеет взбросо-надвиговую, реже сдвиговую кинематику.

Согласно данным сейсмического каталога ISC, с октября 1905 по июнь 2023 гг. на данной территории произошло 8 077 землетрясений с глубиной очага $H \leq 45$ км в диапазоне магнитуд от 0,5 до 6,5. Представительность каталога определяется значением $M \geq 3,5$. Анализ кумулятивной кривой и интервального графика повторяемости позволили выделить наличие в районе значения $M \approx 5,8-6,0$ небольшой изгиб кумулятивного графика, что может свидетельствовать об отклонении от закона Гутенберга-Рихтера или, что более вероятно, о малой выборке сейсмических событий.

К наиболее разрушительным землетрясениям относится Рачинское (29.04.1991, $I_0 = 7-8$ баллов, глубина очага 6-14 км, $M_{S_{\text{ФИЦ ЕГС РАИ}}} = 7,2$, $M_{\text{ISC}} = 6,3$). В тектоническом отношении оно приурочено к Рача-Лечхумской шовной зоне. Механизм очага взбросо-надвигового типа [Арефьев и др., 1993].

Морфометрические исследования

Для территории Большого Кавказа нами проанализированы 16 морфометрических характеристик рельефа, рассчитанные с горизонтальным разрешением 750 м (количество анализируемых точек составляет 322 040). В целом, эти параметры в определенной степени отражают характер неотектонической активности. Более подробное описание всех параметров приведено в полном тексте диссертационной работы.

В качестве исходных данных для расчета индекса неотектонической активности (F) послужили 4 параметра: разности базисных поверхностей 2–3 и 4–5 порядков, дисперсия глубины вертикального расчленения рельефа и асимметрия высот. Эти параметры отвечают критериям, описанным в разделе 1.2.5 настоящей диссертации. Области, где $F \geq 0,6$, занимают 22% площади территории, и в их пределах сконцентрировано 37% эпицентров всех землетрясений, в т. ч. 60% – с $M \geq 5,5$. Области, где $0,4 \leq F < 0,6$ занимают 73% площади Большого Кавказа, и в них попадет 62% эпицентра всех землетрясений, в т. ч. 40% – с $M \geq 5,5$ (рисунок 2.1.1). Достоверность взаимосвязи значений F с сейсмичностью

подтверждена результатами ROC-анализа. Значение AUC для всей выборки сейсмических событий составляет 0,7, для высокомагнитудных землетрясений – 0,8, а для $F \geq 0,6$ эти значения составляют 0,6 и 0,76, соответственно [Собисевич и др., 2024]. Отметим, что рассмотренные в разделе «Анализ сейсмической активности региона» участки, где обнаружены палеосейсмодислокации, расположены в пределах 2 основных интервалов индекса неотектонической активности: $0,4 \leq F < 0,6$ и $F \geq 0,6$.

Анализ механизмов очагов землетрясений из [Лукк, Шевченко, 2019] методом МКА Ю.Л. Ребецкого показал, что 25 механизмов объединены в единую кинематическую группу, которой соответствует обстановка сжатия (**рисунок 2.1.1, врезка**).

Зоны возникновения очагов землетрясений

В ходе исследования выделены 8 зон ВОЗ (**рисунок 2.1.2**), в пределах которых находятся 14 из 15-ти эпицентров высокомагнитудных событий. Оцененные по эмпирическим формулам (1.10, 1.13-1.15) значения M_{\max} в их пределах хорошо согласуются с инструментальными сейсмическими наблюдениями (**рисунок 2.1.3**) [Собисевич и др., 2024]. Из приведенного графика видно, что использование формулы 1.10 сильно занижает возможную M_{\max} даже по сравнению с зарегистрированной сейсмичностью, поэтому формула 1.10 может быть использована только в случае оценки M_{\max} в региональном масштабе всего Большого Кавказа, исходя из длины самого протяженного разлома. Наибольшие превышения рассчитанной и зарегистрированной максимальной магнитуды землетрясения достигнуты при использовании формул 1.13 и 1.14. Учитывая, что формула 1.14 получена на основе эмпирических материалов палеосейсмологических и инструментальных наблюдений, предлагается использовать ее для дальнейших работ по оценке сейсмической опасности.

Таким образом, разработана сеймотектоническая модель Большого Кавказа на основе количественной оценки морфометрических характеристик рельефа и напряженно-деформированного состояния среды. Ее корректность проверена на количественном уровне с использованием ROC-анализа. На основе этой модели выделены зоны ВОЗ. Сопоставление полученной модели с имеющимися схемами зон ВОЗ, входящих в комплекты карт ОСР-97 и ОСР-2016, а также с региональными схемами, приведено в разделе 2.4.

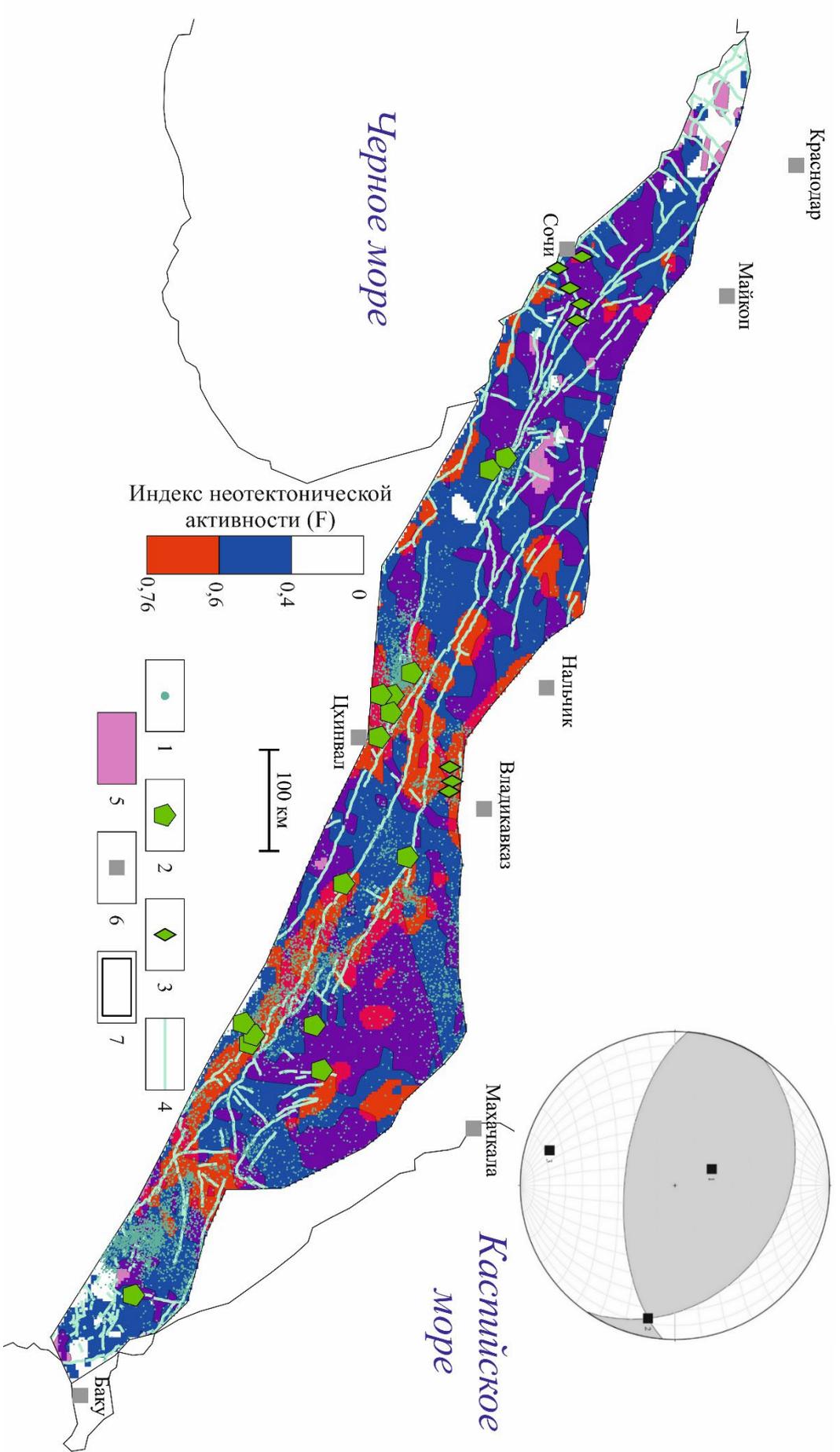


Рисунок 2.1.1. – Схема индекса неотектонической активности Большого Кавказа. 1-2 – эпицентры землетрясений (по каталогу ISC) с: 1 – $M < 5,5$; 2 – $M \geq 5,5$; 3 – закартированные участки проявления донструментальной сейсмичности (по литературным источникам); 4 – активные разрывные нарушения [Zelenin et al., 2022]; 5 – области локализации максимальных горизонтальных напряжений, полученные в результате моделирования; 6 – города; 7 – границы Большого Кавказа (по [Короновский, 2011]). На врезке – реконструкция положений главных нормальных осей напряжений по решениям фокальных механизмов очагов землетрясений (нижняя полусфера): серое – области растяжения, белое – сжатия; 1–3 – главные нормальные оси напряжений: 1 – растяжения, 2 – промежуточная; 3 – сжатия.

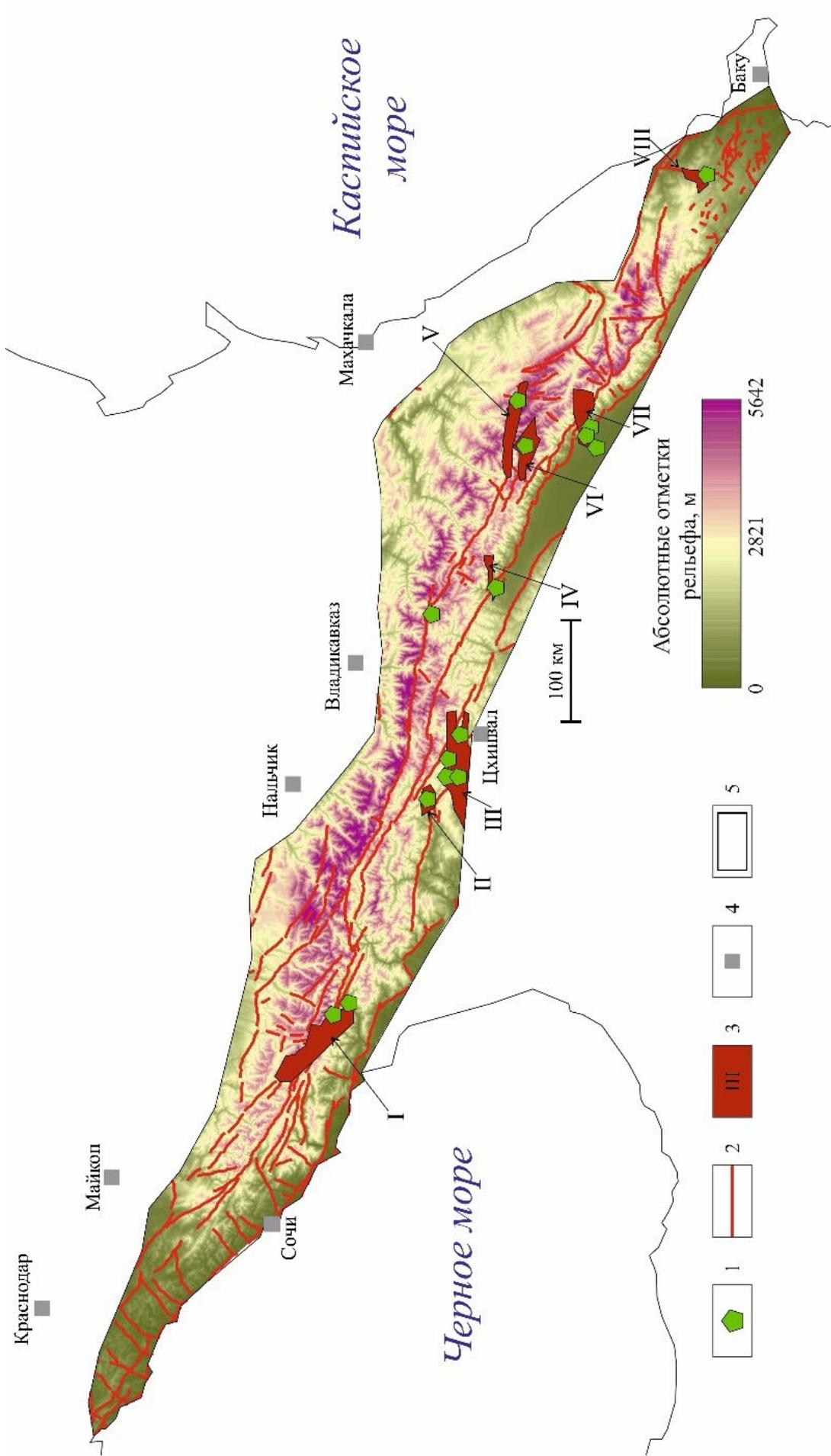


Рисунок 2.1.2. – Схема зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ), полученная на основе индекса неотектонической активности (F) и результатов геодинамического моделирования. 1 – эпицентры землетрясений (по каталогу ISC) с – $M \geq 5,5$; 2 – активные разрывные нарушения [Zelenin et al., 2022]; 3 – зоны ВОЗ и их номера; 4 – города; 5 – границы Большого Кавказа (по [Короновский, 2011]).

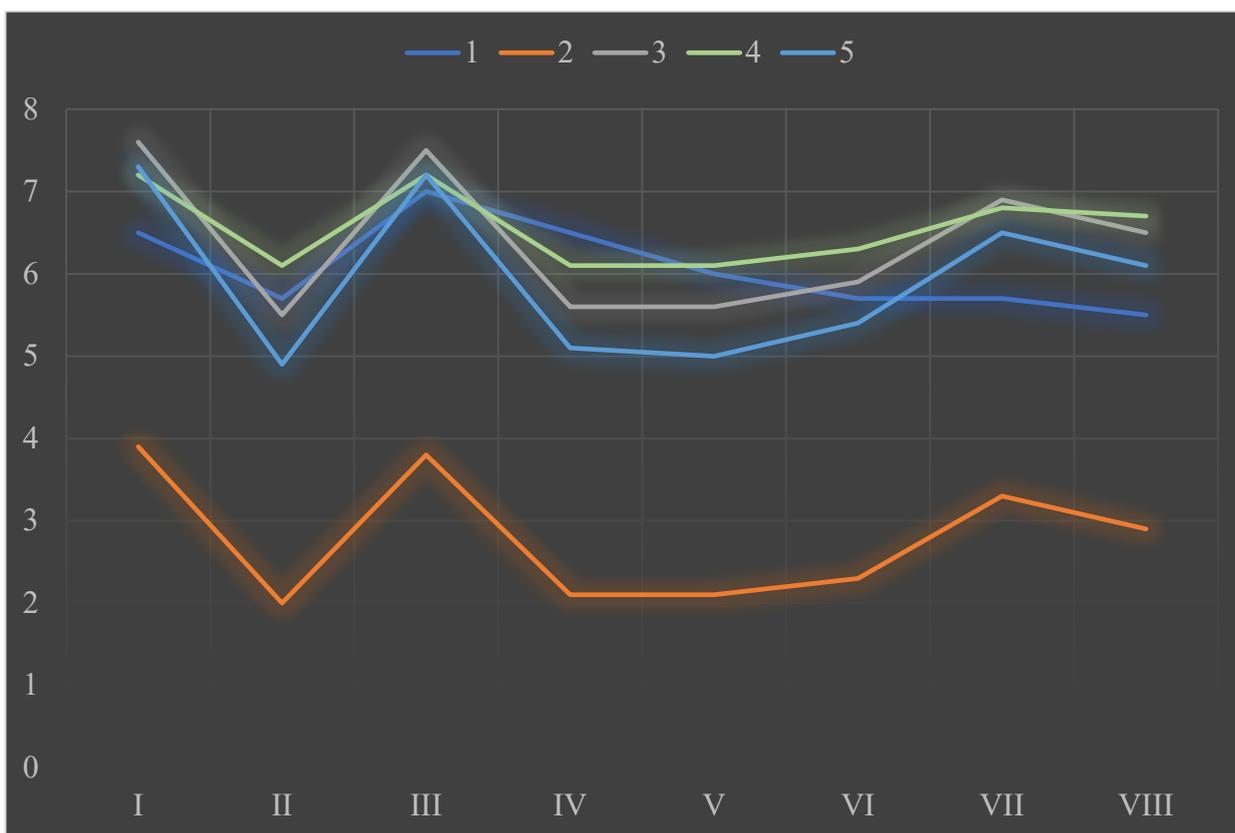


Рисунок 2.1.3. – Максимальная магнитуда ожидаемого землетрясения (M_{max}) в зонах ВОЗ Большого Кавказа, рассчитанная по разным формулам: римскими цифрами обозначены номера зон ВОЗ, по оси ординат отложена магнитуда (M). 1 – зарегистрированная магнитуда в пределах зоны ВОЗ; 2 – по формуле [Руководство..., 2018]; 3 – по формуле из [Kanamori, Anderson, 1975]; 4 – по формуле из [Wells, Coppersmith, 1994]; 5 – по формуле из [Завьялов, Зотов, 2021].

2.2. Новейшее горно-складчатое поднятие острова Сахалин

В разделе приведена краткая информация о геологическом строении о. Сахалин, входящего в состав Хоккайдо-Сахалинской системы островных поднятий. Так, в разделе рассматривается краткое геологическое строение, неотектоника региона, описание современной сейсмичности, результаты морфометрических и тектонофизических исследований. В совокупности полученные результаты дали основу для построения сейсмотектонической модели региона.

За начало новейшего этапа принята граница тортонского века позднего миоцена (~ 11 млн. лет). В его пределах выделяются две стадии – ранне- и позднеорогенная. Первой стадии соответствует сусанайская поверхность выравнивания. Граница между стадиями приходится на заклийский и пьяченцкий века позднего неогена (~3,5 млн. лет). К позднеорогенной стадии относятся 4 поверхности выравнивания (от более древних к более молодым): маруямская, бачинская (эоплейстоцен), северосахалинская (неоплейстоцен) и террасовый ряд (неоплейстоцен-голоцен) [Воейкова и др., 2007]. Значительная часть неотектонических структур развивается унаследовано. Так, Восточно-Сахалинскому складчатому поднятию соответствуют Восточно-Сахалинское (в рельефе представлено Восточно-Сахалинскими горами) и Сусунайско-Тонинское поднятия, а Западно-Сахалинской моноклинали – Центрально-Камышовое и Южно-Камышовое мегаподнятия [Воейкова и др., 2007]. Амплитуды вертикальных движений за конэрозийный этап в пределах Сахалина неравномерны и подчеркивают блоковое строение региона. Наибольшие амплитуды характерны для западной части острова (Центрально- и Южно-Камышовое, а также Восточно-Сахалинское

мегаподнятия), где они превышают 1000 м [Сим и др., 2017], а минимальные амплитуды поднятия проявлены в пределах Шмидтовского сегмента и Тымь-Поронайской мегавпадины [Амплитуды..., 2007].

По данным сейсмических каталогов ISC и ФИЦ ЕГС РАН, из которых были удалены дублирующие события и землетрясения с не определенной магнитудой, на о. Сахалин и близлежащей акватории с 1924 года по март 2023 года зарегистрировано 464 землетрясения, гипоцентры 406 из которых располагались на глубинах до 45 км, т. е. произошли в земной коре, а не в субдуцирующем под Курильскую гряду слэбе Тихоокеанской плиты [Стеблов и др., 2024].

Из анализа кумулятивных кривых и интервальных графиков, построенных на основе M_s , M_w (по [Lolli et al., 2014] и [Носов, Большакова, 2020]). Установлено, что представительность сводного каталога определяется магнитудой 3,5. Начиная с $M \approx 5,5-5,8$, заметно отклонение от линейной зависимости. Совместный анализ кривых позволил установить справедливость описания повторяемости землетрясений регрессией $lg\left(\frac{N}{T}\right) = -0,67M_s (\pm 0,07) + 2,87 (\pm 0,38)$ для интервала $M_s \in [3,8; 5,6]$, что подтверждается F- и t-критериями для уровня статистической значимости $\alpha=0,01$.

К наиболее сильным (в энергетическом отношении) сейсмическим событиям Сахалина за инструментальный период наблюдений относятся Нефтегорское 27.05.1995 г. ($M_s=7,5$, $M_w=7,6$, $H \approx 17,5$ км, $I=8-9$ баллов в эпицентральной области по шкале MSK-64) и Углегорское 04.08.2000 г. ($M_s=7,1$, $M_w=7,1$, $H \approx 13,7$ км, $I=8-9$ баллов) землетрясения [Рогожин, 2012].

Для исследуемого региона было проанализировано 12 морфометрических характеристик рельефа с общим количеством точек $N=80\ 804$. Установлено, что наклон рельефа и кривизна рельефа, взятая по модулю, наиболее тесно связаны с дизъюнктивными структурами: 61% и 96% общей протяженности разломов попадает в области, где наклон поверхности рельефа и его кривизна превышают медиану. Другие параметры, такие как разности базисных поверхностей рельефа, глубина вертикального расчленения, асимметрия, дисперсия и математическое ожидание высот связаны с пликативными структурами острова. В целом распределение значений рассмотренных морфометрических параметров по площади хорошо согласуются с данными о неотектоническом строении региона. Более подробное описание анализируемых параметров приведено в разделе 2.2 диссертационной работы.

Наибольшая количественная взаимосвязь между пространственным положением эпицентров землетрясений и расчетными параметрами установлена для асимметрии высот рельефа и плотности линейных элементов («слабых» зон), что позволило построить схему индекса неотектонической активности (F) (рисунок 2.2.1). Области с $F \geq 0,6$ занимают 14% исследуемой территории, и в их пределах расположено 47% эпицентров землетрясений. Данные о конфигурации этих участков использованы для выделения зон ВОЗ без проведения дополнительных исследований. Области, где $0,4 \leq F < 0,6$ занимают 57% площади острова, и в их пределах расположено 46% эпицентров землетрясений. Для выделения зон ВОЗ в их пределах использованы результаты компьютерного геодинамического моделирования. В областях низких значений $F < 0,4$ зоны ВОЗ не были выделены.

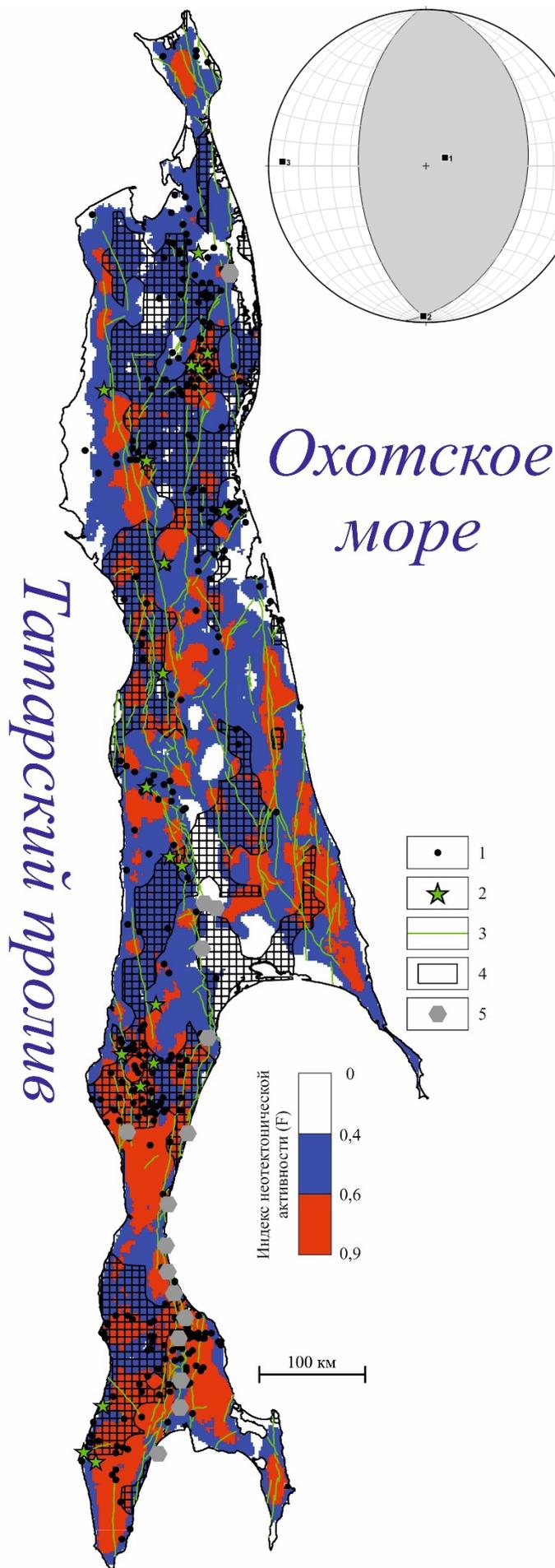


Рисунок 2.2.1. – Схема индекса неотектонической активности. 1-2 – эпицентры землетрясений с: 1 – $M_w < 5,5$; 2 – $M_w \geq 5,5$; 3 – активные разрывные нарушения [Zelenin et al., 2022]; 4 – контуры острова по гипсометрической отметке 0 м; 5 – палеосейсмодислокации (по [Булгаков и др., 2002; Лободенко, 2010]). На врезке – Реконструкция положений главных нормальных осей напряжений по решениям фокальных механизмов очагов землетрясений (нижняя полусфера): серое – области растяжения, белое – сжатия; 1–3 – главные нормальные оси напряжений: 1 – растяжения, 2 – промежуточная; 3 – сжатия.

Корректность модели проверена с помощью ROC-анализа: прогностичность (корректность) модели составляет 66%, а для высокомагнитудных событий 68% ($M_s \geq 5,5$) и 69% ($M_w \geq 5,5$). Кроме того, установлено, что 82% палеосейсмодислокаций, рассмотренных [Булгаков и др., 2002; Лободенко, 2010] расположены в областях, где $F \geq 0,4$. При этом 47% палеосейсмодислокаций попадают в области, где $F \geq 0,6$.

Для того, чтобы оценить возможность использования данных о площадной деформации по данным о движениях стационарных станций ГНСС для расчета индекса F , была построена модель, учитывающая величину площадной деформации.

В пределах элементов покрытия расположено 146 эпицентров землетрясений, из них 9 – с $M_w \geq 5,5$. Сейсмоактивные области со значением $F \geq 0,6$ занимают 47% изученной площади, на 19% меньшей площади всего острова, из-за того, что для его северной и южной оконечностей

нет данных о величине ε_s . В сейсмоактивных областях локализовано 66% (27% от всей выборки) эпицентров землетрясений, в том числе 89% – с $M_w \geq 5,5$. В

зону неопределенности, где F варьирует от 0,4 до 0,6, попадает 40% эпицентров сейсмических событий и 11% – с $M_w \geq 5.5$. Значения AUC составляют 65% для всей выборки и 69% – для событий с $M_w \geq 5.5$. Таким образом, в случае недостаточной представительности морфометрических параметров рельефа для оценки индекса неотектонической активности можно использовать данные о современной площадной деформации.

В пределах острова были выделены 10 зон ВОЗ (рисунок 2.2.2) для событий с $M_w \geq 5,5$ в 2 этапа: первый заключался в оконтуривании зон ВОЗ на основе параметра $F \geq 0,6$ и конфигурации эпицентров низкомагнитудных землетрясений. На втором этапе к зонам ВОЗ отнесены области, где значения $0,4 \leq F < 0,6$ и относительные величины Sh превышают медиану. При этом учтено также расположение эпицентров слабых землетрясений. Зоны ВОЗ занимают 14% площади Сахалина, и в них попадает 79% эпицентров землетрясений с $M_w \geq 5,5$. Большинство зон ВОЗ ориентировано субмеридионально.

Как и в случае Большого Кавказа, значения M_{max} (рисунок 2.2.3), определенные по формуле 1.10, занижены по сравнению с магнитудами землетрясений инструментального периода наблюдений. Для зоны ВОЗ № VIII M_{max} определена исходя из протяженности предполагаемого разлома, поскольку в базе данных [Zelenin et al., 2022] нет информации о достоверных разломах на соответствующем участке. Этот разлом протяженностью 21 км выделен нами по характеру тектонической раздробленности верхней части литосферы, оцененной методом Ю.В. Нечаева [2010].

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана сеймотектоническая модель Сахалина, интегрирующая 2 ключевых параметра – неотектоническую активность, количественно оцененную по морфометрическим характеристикам рельефа, и напряженно-деформированное состояние геосреды, позволившее определить расположение зон ВОЗ в областях с низкими значениями индекса неотектонической активности $0,4 \leq F < 0,6$. Для верификации модели был применен ROC-анализ, который позволил провести количественную оценку её эффективности. Результаты тестирования показали высокую достоверность модели: общая точность прогнозирования для всей выборки землетрясений составила 66%, а для сейсмических событий с магнитудой $M_w \geq 5,5$ – 69%. Эти данные подтверждают высокую надежность разработанной модели, особенно в части выявления потенциально опасных зон с магнитудой землетрясений $M \geq 5,5$, не зависимо от используемой магнитудной шкалы.

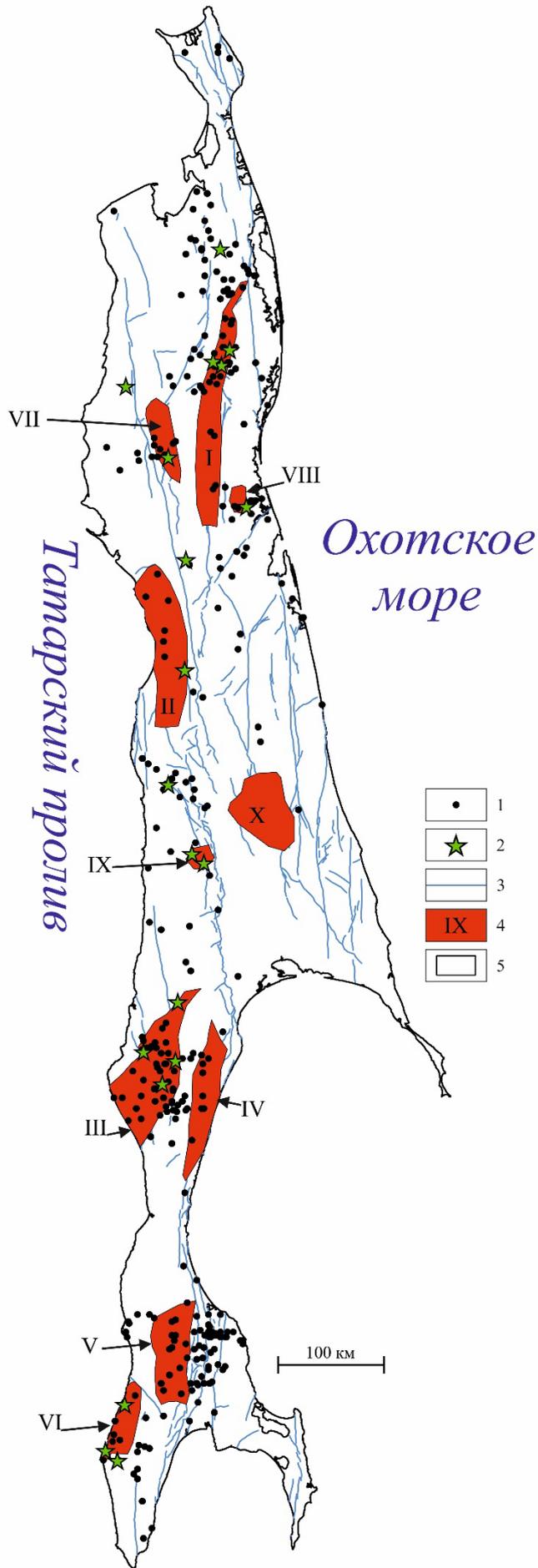


Рисунок 2.2.2. – Схема зон ВОЗ о. Сахалин. 1-2 – эпицентры землетрясений с: 1 – $M_w < 5,5$; 2 – $M_w \geq 5,5$; 3 – активные разрывные нарушения [Zelenin et al., 2022]; 4 – зоны ВОЗ и их номера; 5 – контуры острова по гипсометрической отметке 0 м.



Рисунок 2.2.3. – Максимальная магнитуда ожидаемого землетрясения (M_{max}) в зонах ВОЗ Сахалина, рассчитанная по разным формулам: римскими цифрами обозначены номера зон ВОЗ, по оси ординат отложена магнитуда (M_w). 1 – зарегистрированная магнитуда в пределах зоны ВОЗ; 2 – по формуле [Руководство..., 2018]; 3 – по формуле из [Kanamori, Anderson, 1975]; 4 – по формуле из [Wells, Coppersmith, 1994]; 5 – по формуле из [Завьялов, Зотов, 2021].

2.3. Новейшее горно-складчатое сооружение Алтае-Саянской области

В данном разделе приводится описательная информация об истории Алтае-Саянского региона, входящего в состав Центрально-Азиатского подвижного пояса, и основных фазах тектоногенеза, происходивших в нем: каледонском, герцинском.

Современная Алтае-Саянская горная система относится к системе кайнозойских континентальных орогенных поясов на севере Центральной Азии, которые сформировались в результате столкновения Индии и Евразии [Molnar and Tapponnier, 1975; Yin, 2010]. Кайнозойская структура во многом наследует более ранние этапы развития.

Новейший этап в этом регионе начинается с деформирования в кайнозойское время позднемезозойского пенеппена, что позволяет отнести Алтае-Саянский ороген к эпиплатформенным. Новейший этап разделен на три стадии по усилению тектонических движений: палеоген-неогеновую, олигоцен-плиоценовую и плиоцен-квартерную (четвертичную). На первой стадии произошли деформации верхнекорового слоя – древнего гетерогенного основания, представляющего собой коллаж блоков разного возраста, величины и типа происхождения, спаянных в единый массив к концу палеозоя. Движения данного временного интервала являются наименее интенсивными, а отложения слагают основание разрезов крупных межгорных впадин. Это свидетельствует в пользу преобладания денудационных процессов на первой стадии. Две последующие стадии сформировали современный структурный план [Геологическое..., 1988]. На новейшем этапе докайнозойские складчатые структуры Алтае-Саянской области рассматриваются как ремобилизированные из-за их значительной удаленности от индентора – Индостанской литосферной плиты.

Для Алтае-Саянского внутриконтинентального эпиплатформенного орогена характерно сводово-блоковое строение. Среди его структурных особенностей можно отметить почти полное отсутствие соразмерных впадин на фоне преобладания сводовых поднятий [Геологическое..., 1988].

Инструментальная сейсмичность регистрировалась региональной сейсмической сетью в течение шестидесяти лет, в то время как в архивах имеются свидетельства исторических землетрясений 200-летней давности [Кондорская, Шибалин, 1977; Хилько и др., 1985; Жалеев, Мгии и др., 1995; Адия и др., 2003; Уломов, Медведева, 2011; Еманов и др., 2012].

Сводный каталог землетрясений, составленный на основе данных ISC и USGS, включает данные о 2261 землетрясении с глубиной гипоцентра до 45 км, произошедших с 1922 по 2024 гг., среди которых 41 событие с $M_w \geq 5,5$. Представительность каталога определяется значением $M \geq 3,5$.

Алтае-Саянский регион характеризуется высокой сейсмической активностью. За последние 200 лет здесь произошел ряд сильных землетрясений, среди которых Монгольское (9.12.1761, $M_w=8$; I=XI-XII баллов) [Davaasambuу et al., 2023], Фуюньское (10.08.1931, $M_w=7,6-7,8$; H=10 км) [Shao et al., 2024], Ачитнурское (19.10.1938, $M_w=6,9$, H=10 км) [Deev et al., 2013], Чуйское (Алтайское) 27.09.2003 ($M_w=7,3$; H=10,3 км, I=IX баллов) землетрясения [Rogozhin et al., 2007].

В пределах исследуемой территории удалось проанализировать 16 морфометрических характеристик рельефа. В отличие от Большого Кавказа и о. Сахалин, почти все эти характеристики отвечают критериям, изложенным в Главе 1 настоящей работы (таблица 2.3.1.). Как в случае о. Сахалин, уклон и кривизна рельефа связаны с дизъюнктивными структурами, а остальные, в большинстве своем, с пликативными: 77% разрывных нарушений связаны со средним значением вдоль разлома, превышающего медианное значение уклона рельефа, и 81% суммарной протяженности расположены в областях, где значения кривизны рельефа превышают нижнюю границу четвертого квартиля.

Исходя из приведенных в таблице 2.3.1 данных, в качестве наиболее информативных параметров выбраны разность гипсометрической и базисной поверхности шестого порядка, глубина вертикального расчленения и математическое ожидание высот.

Они были преобразованы в нечеткие множества, обработанные с помощью γ -оператора. В результате получена схема индекса неотектонической активности (F) (рисунок 2.3.1). Значениям $F \geq 0,6$ соответствует 29% площади территории, а $F \geq 0,4$ – 54%. В первой области локализовано 57% эпицентров всех землетрясений и 68% – с $M_w \geq 5,5$, в то время как для $F \geq 0,4$ подобные отношения составили 78% и 90%, соответственно. Для оценки достоверности полученной модели применялся ROC-анализ. С помощью него установлено, что значения площади под кривой (AUC) составляет 66% для всех сейсмических событий и 80% – землетрясений с $M_w \geq 5,5$.

Таблица 2.3.1. Квартильные значения морфометрических характеристик рельефа и их взаимосвязь с современной сейсмичностью.

№	Параметр	Q1	Q2	Q3	Доля эпицентров землетрясений с магнитудой M_w , расположенных в областях, где значения морфометрических параметров рельефа превышают			
					медиану		третий квартиль	
					все значения M_w	$M_w \geq 5,5$	все значения M_w	$M_w \geq 5,5$
1	Разность базисных поверхностей 1 и 2 порядков, м	5	34	120	0,68	0,68	0,44	0,45
2	Разность базисных поверхностей 2 и 3 порядков, м	3	33	119	0,70	0,79	0,42	0,42
3	Разность базисных поверхностей 3 и 4 порядков, м	2	38	133	0,70	0,63	0,41	0,31
4	Разность базисных поверхностей 4 и 5 порядков, м	4	44	136	0,60	0,79	0,40	0,71
5	Разность базисных поверхностей 5 и 6 порядков, м	-16	58	174	0,72	0,76	0,49	0,50
6	Разность гипсометрической и базисной поверхности 6 порядка, м	121	489	1067	0,76	0,84	0,48	0,58
7	Глубина вертикального расчленения рельефа, м	183	496	843	0,75	0,84	0,48	0,58
8	Уклон рельефа, °	1.65	4.22	8.77	0,66	0,74	0,39	0,45
9	Кривизна рельефа, взятая по модулю, $\times 10^{-3} \text{ м}^{-1}$	10	25	53	0,64	0,6	0,38	0,45
10	Дисперсия глубины вертикального расчленения рельефа, м	21	47	77	0,71	0,79	0,43	0,63
11	Дисперсия уклона рельефа, °	1.31	2.88	4.24	0,75	0,76	0,49	0,45
12	Дисперсия высот, м	42	114	197	0,75	0,84	0,47	0,58
13	Средняя высота, м	405	1077	1740	0,79	0,97	0,52	0,71
14	Плотность водотоков, км^{-1}	19	20	22	0,47	0,30	0,20	0,11
15	Асимметрия высот	-0.1	0.2	0.6	0,41	0,55	0,17	0,19
16	Плотность линейментов, км^{-1}	0.31	0.43	0.49	0,66	0,41	0,28	0,24

*Примечание: зеленым выделены параметры, использованные в качестве исходных данных для анализа γ -оператором нечеткой логики.

Из-за того, что области низких значений $0,4 \leq F < 0,6$ занимают 25% площади территории, где расположено 25% эпицентров всех землетрясений и 29% – с $M_w \geq 5,5$, для выделения зон ВОЗ нами были привлечены результаты компьютерного геодинамического моделирования.

Выборка из 78 решений МКА Ю.Л. Ребецкого [Ребецкий и др., 2017] была разделена на 2 группы: первой соответствует сдвиговая обстановка с осью сжатия, ориентированной по азимуту 35° ($N=35$), а второй – взбросо-сдвиг с осью сжатия, полого наклонной в субмеридиональном направлении ($N=39$) (рисунок 2.3.2).

Из-за неопределенности полученного типа напряженно-деформированного состояния при моделировании были опробованы 10 типов напряженно-деформированного состояния: построено по пять моделей для обстановок сдвига и сжатия с ориентировкой оси сжатия от 0° до 40° с шагом 10° . Показано, что самая высокая степень взаимосвязи конфигурации областей пониженных (\leq медианных) значений горизонтальных напряжений (Sh) с сейсмичностью достигается в сдвиговой обстановке, когда ось максимального сжатия простирается по азимуту 20° . Таким образом, области пониженных значений Sh занимают половину площади Алтае-Саянской области, а в их

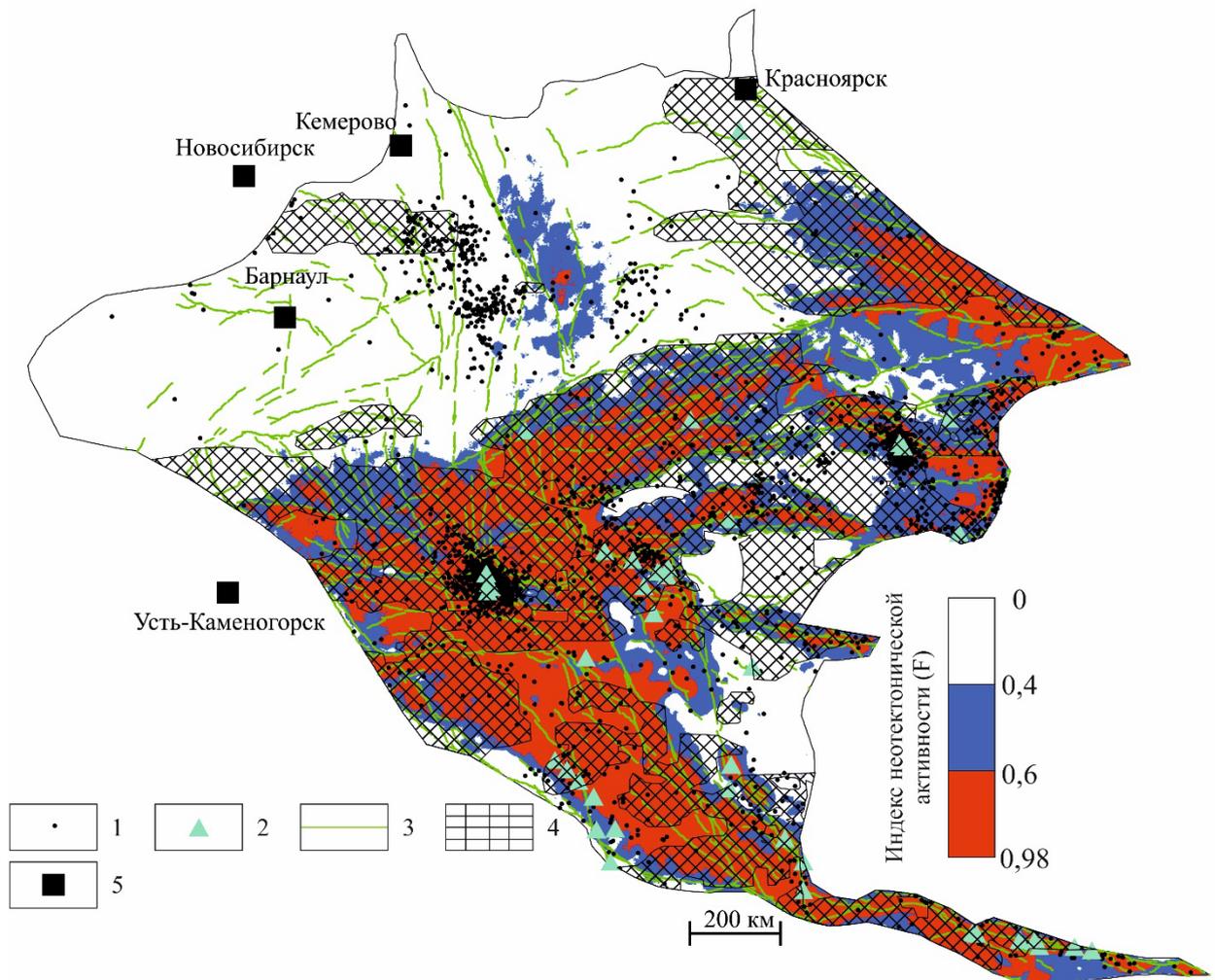


Рисунок 2.3.1. – Схема индекса неотектонической активности (F). 1-2 – эпицентры землетрясений с: 1 – $M_w < 5,5$; 2 – $M_w \geq 5,5$; 3 – активные разрывные нарушения [Zelenin et al., 2022]; 4 – области локализации горизонтальных напряжений; 5 – крупные города.

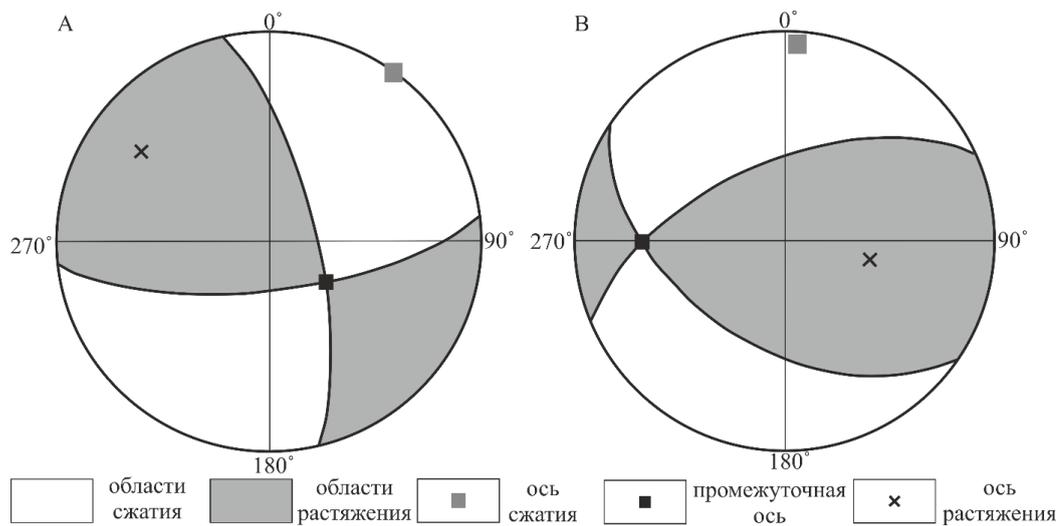


Рисунок 2.3.2. – Реконструкция положения главных нормальных осей напряжений Алтае-Саянской области по решениям фокальных механизмов очагов землетрясений (нижняя полусфера). Буквами А и В обозначены две кинематические группы.

пределах локализовано 72% эпицентров всех землетрясений и 83% эпицентра землетрясений с $M_w \geq 5,5$ (рисунок 2.3.1). Полученные результаты были использованы вместе с индексом неотектонической активности (F) для выделения зон ВОЗ.

Полученные 13 зон ВОЗ занимают 9% от исследуемой территории, а в их пределах сосредоточено 53% эпицентров всех землетрясений, в т. ч. 88% – с $M_w \geq 5,5$. Для выделенных зон ВОЗ с $M_w \geq 5,5$ оценена M_{\max} по нескольким эмпирическим формулам (рисунок 2.3.3 и 2.3.4). Как видно из таблицы, M_{\max} , рассчитанная по всем формулам, кроме (1.10), значительно превышает зарегистрированную максимальную M_w , что делает возможным применение упомянутых формул для оценки сейсмического потенциала.

Обоснованность полученного результата – схемы зон ВОЗ Алтае-Саянской области – подтверждается новыми данными о современной сейсмичности: после подачи статьи [Sobisevich et al., 2025] в печать в пределах зоны ВОЗ № I произошли 2 сильных землетрясения: 15 февраля 2025 г. с $M_s=5,7$ и 25 мая 2025 г. с $m_b=5,2$ (согласно формулам (1.11 и 1.13 текста диссертации), значения M_w составляют 5,9 и 4,8, соответственно) [Служба...2025]. Кроме того, в зоны ВОЗ попадают все эпицентры сильных исторических землетрясений, ранее рассмотренных в разделе «Сейсмическая активность региона» основного текста диссертации, за исключением эпицентра землетрясения Фуюн.

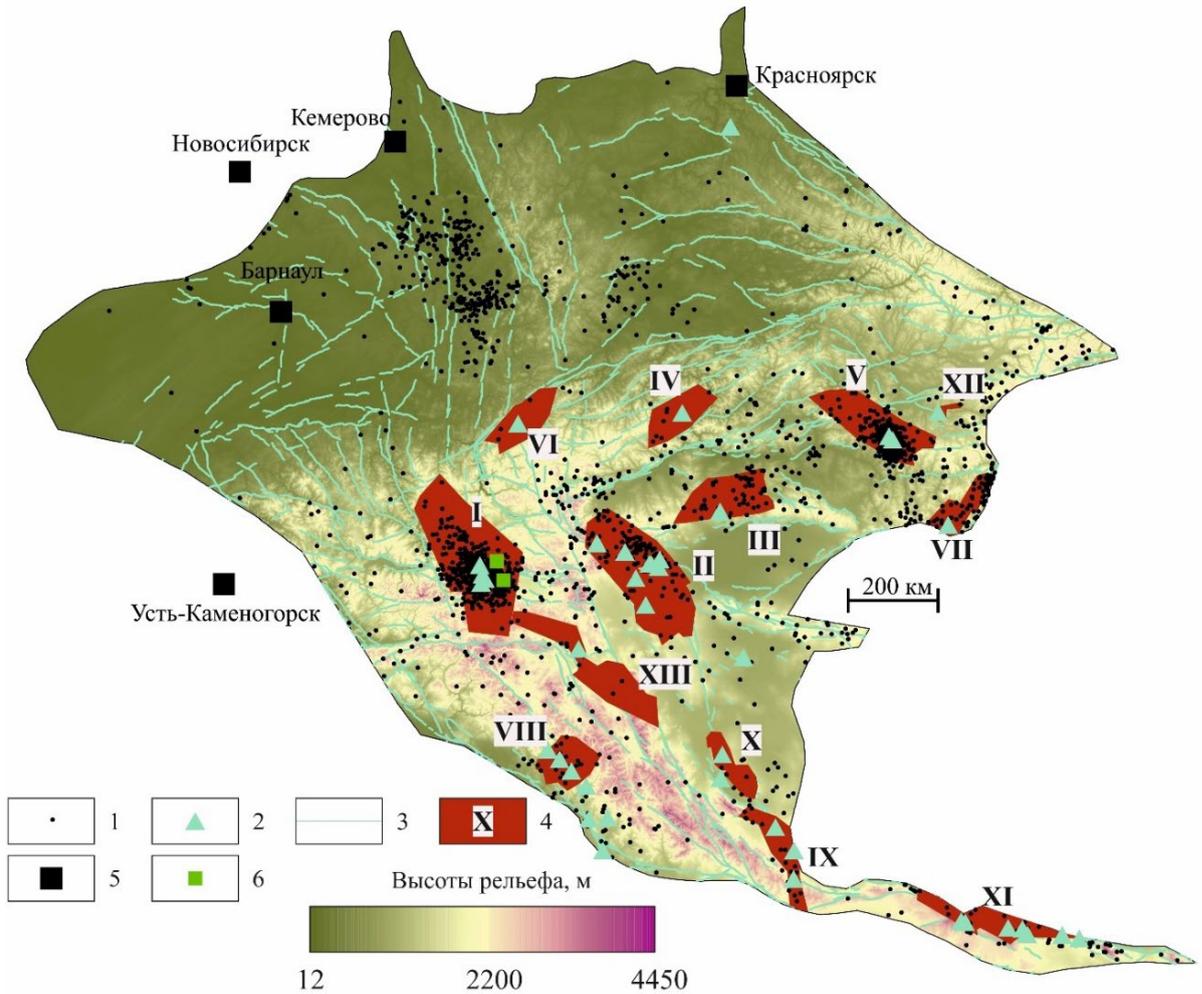


Рисунок 2.3.3. – Схема зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) Алтае-Саянской области. 1-2 – эпицентры землетрясений с: 1 – $M_w < 5,5$; 2 – $M_w \geq 5,5$; 3 – активные разрывные нарушения [Zelenin et al., 2022]; 4 – зоны ВОЗ и их номера; 5 – крупные города; 6 – эпицентры землетрясений 15.02.2025 с $M_w=5,9$ (южный) и 25.05.2025 с $M_w=4,8$ (северный).

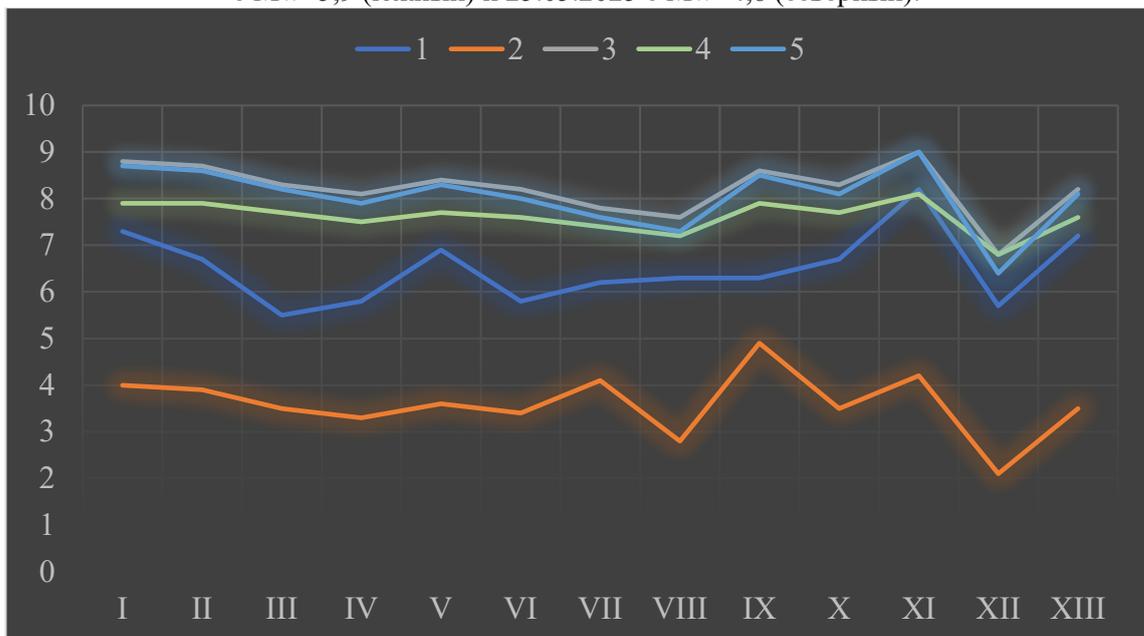


Рисунок 2.3.4. – Максимальная магнитуда ожидаемого землетрясения (M_{max}) в зонах ВОЗ Алтае-Саянской области, рассчитанная по разным формулам: римскими цифрами обозначены номера зон ВОЗ, по оси ординат отложена магнитуда (M_w). 1 – зарегистрированная магнитуда в пределах зоны ВОЗ; 2 – по формуле [Руководство..., 2018]; 3 – по формуле из [Kanamori, Anderson, 1975]; 4 – по формуле из [Wells, Coppersmith, 1994]; 5 – по формуле из [Завьялов, Зотов, 2021].

2.4. Сопоставление полученных зон ВОЗ с ЛДФ-моделями карт ОСР-97, ОСР-2016 и региональными моделями

Проведено сравнение выделенных зон ВОЗ с результатами работ других авторов. В этом разделе рассмотрено, как конфигурация зон ВОЗ согласуется с региональными линеаментно-доменно-фокальными (ЛДФ) моделями территории Большого Кавказа, о. Сахалин и Алтае-Саянской области и с ЛДФ-моделями, входящими в комплект карт ОСР–1997 и ОСР–2016. Кроме того, сопоставлены значения M_{\max} , полученные по формуле 1.14, с приведенными в работах предшественников.

Схема зон ВОЗ Большого Кавказа сопоставлена со схемой оценки M_{\max} и потенциальных очагов землетрясений (ПОЗ), разработанной Е.А. Рогожиным [Рогожин, 2012] по материалам [Шолпо и др., 2004]. Методика выделения ПОЗ основана на внерегиональном сейсмотектоническом подходе Г.И. Рейснера [Рейснер, Иогансон, 1993]. Он формализован и основан на типизации земной коры по геодинамической активности, в то время как данные о сейсмической активности анализируются на финальном этапе работ.

Зона ВОЗ № I с $M_{\max}=7,2$ имеет ту же ориентировку и положение, что и ПОЗ с $M_{\max}=7,0\pm 0,2$, расположенная в зоне регионального разлома и рассмотренная в [Рогожин, 2012]. Зона ВОЗ № II с $M_{\max}=6,1$ расположена в граничной части схожей зоны ПОЗ с такой же M_{\max} . Большая часть зоны ВОЗ № III с $M_{\max}=7,2$ находится в ПОЗ с $M_{\max}=6,5\pm 0,2$. Зоны ВОЗ № IV-VI с $M_{\max}=6,1$, $6,1$ и $6,3$ соответственно, в разной степени связаны с ПОЗ с $M_{\max}=6,0\pm 0,2$. Зона ВОЗ № VII с $M_{\max}=6,8$ расположена за пределами ПОЗ, а зона ВОЗ № VIII с $M_{\max}=6,7$ приурочена к ПОЗ с $M_{\max}=6,5\pm 0,2$. Таким образом, 7 из 8 выделенных зон ВОЗ достаточно хорошо согласуются с ПОЗ. Отметим, что в работе [Рогожин, 2012] рассмотрены ПОЗ с $M_{\max}=7,5\pm 0,2$, расположенные в районе Эльбруса, Дербента и на юго-восточном замыкании Большого Кавказа.

Отметим также, что выделенные зоны ВОЗ № I–VII расположены в областях ПОЗ, оконтуренных формализованным подходом, описанным в [Гвишиани и др., 2021]. Таким образом, форма и конфигурация выделенных зон ВОЗ достаточно сходна с ПОЗ. Важные отличия зон ВОЗ от ПОЗ связаны с исходными данными об активных разломах. Нами выбрана сетка активных разломов, приведенная в базе данных [Zelenin et al., 2022], которая охватывает всю территорию России и разработана в рамках единого методического подхода. Это обеспечивает воспроизводимость результатов. В целом все вышеизложенное подтверждает применимость предлагаемого методического подхода, описанного в Главах 1 и 2 диссертации.

Схема зон ВОЗ Сахалина сопоставлена с ЛДФ-моделью, приведенной в [Оскорбин, 1997]. Зона ВОЗ № I проходит через 2 сейсмогенные зоны – с $M_{\max}=5,5$ и $M_{\max}=6$, а также затрагивает линеамент с $M_{\max}=7,5$. Конфигурация зоны ВОЗ № I сходна с контурами сейсмогенной зоны с $M_{\max}=6$. В пределах этой же сейсмогенной зоны расположена ВОЗ № VIII с $M_{\max}=6,6$, через которую проходит тот же линеамент с $M_{\max}=7,5$. Он не входит в базу данных активных разломов [Zelenin et al., 2022]. Зоны ВОЗ № II, V, VI, VII и IX, для которых M_{\max} составляют $7,4$, $6,9$, $6,7$, $6,8$ и $6,6$, соответственно, расположены в пределах сейсмогенных зон с $M_{\max}=5,5$ и линеаментами с $M_{\max}=7$.

На основе разработанной модели значения M_{\max} завышаются в пределах

сейсмогенных зон, но более чем в 2 раза уменьшает их площадь. При этом в выделенные зоны ВОЗ не попали 3 эпицентра землетрясений с $M_w \in [5,6-6,1]$. Зоны ВОЗ № III и IV с M_{max} 7,2 и 7,6 достаточно значительно (почти на 2 магнитудные единицы) превышают M_{max} в пределах сейсмогенных зон [Оскорбин, 1997]. Это представляется обоснованным и подтверждается магнитудой Углегорского землетрясения 2000 г. M_{max} в пределах зоны ВОЗ № X – дискуссионная и требует дополнительных исследований, т. к. в непосредственной близости от нее расположен эпицентр одного сейсмического события с $M_w=5,3$, а рассчитанная M_{max} достигает 7,0. В сейсмогенной зоне этого района $M_{max}=5$.

Сравнение основных методических подходов к выделению зон ВОЗ

Зоны ВОЗ Алтае-Саянской области сопоставлены с данными о сейсмолинеаментах [Карта..., 2015] из-за отсутствия региональных схем с площадными зонами ВОЗ. Так, через зоны ВОЗ № I и II с $M_{max}=7,9$ проходят сейсмолинеаменты с $M_{max}=7,5-8$. В целом эти зоны ВОЗ имеют схожую с ними конфигурацию. Сейсмолинеаменты с $M_{max}=7$ пересекают зоны ВОЗ № II, IV, V и XII, для которых M_{max} составляет 7,9, 7,5, 7,7 и 6,8, соответственно. Как видно из приведенных значений, различия составляют до 0,9 магнитудных единицы. Чуть меньшее различие между линеаментом с $M_{max}=7,0$ и зоны ВОЗ № XIII с $M_{max}=7,6$. На рассмотренной территории выделено 6 эллипсов, где значение функции принадлежности составляет 0,5 и 11 – где это значение равно 1 [Гвишиани и др., 2021]. Эти эллипсы проинтерпретированы как потенциальные места возникновения землетрясений с $M \geq 6$. Выделенные нами зоны ВОЗ в разной степени «захватывают» 7 из 11 эллипсов с функцией принадлежности 1 и 3 из 6 с функцией принадлежности 0,5.

В ОСР-97 рассмотрены линеаменты и домены – «квазиоднородные в тектоническом и геодинамическом отношении объемы геологической среды, характеризуются рассеянной сейсмичностью» [Комплект..., 1999]. Однако в записке к карте ОСР-97 не рассмотрена терминология и исходные данные, положенные в основу ЛДФ-модели. Например, не проанализирован важный методический вопрос о том, на основании каких геолого-геофизических материалов и в каком масштабе необходимо выделять линеаменты. Кроме того, приведенные в ЛДФ-модели линеаменты нередко крестообразно пересекают друг друга. По определению, по активному разлому происходят смещения [Wallace, 1949; Геологический..., 2025], которые должны быть в большинстве случаев видимы в узлах крестообразного пересечения линеаментов. Исключением могут служить разломы с незначительной амплитудой горизонтальных смещений (которая может быть не видна в региональном масштабе) или разломы, по которым происходили только вертикальные подвижки. В связи с этим возникает вопрос о тектонической интерпретации сейсмолинеаментов, которым могут соответствовать как активные разломы, так и линейные элементы, вдоль которых ориентированы эпицентры землетрясений. Отметим также недостаточную определенность термина «рассеянная сейсмичность», который не предполагает строгого алгоритма выделения областей ее проявления. Недостаточная проработанность этих методических аспектов затрудняет воспроизводимость разработанных ЛДФ-моделей другими исследователями.

В [Комплект..., 1999] приведена схема сейсмогеодинамики и

сейсмичности Северной Евразии. В ней произведено разделение территории на сегменты и регионы, которое во многих случаях не согласуется с геологическими данными. Например, Восточно-Европейский сегмент разделен на Восточно-Европейский и Прибалтийский регионы. При этом границы обоих регионов включают области как плитной части Восточно-Европейской платформы, так и Балтийского щита. В состав Иран-Кавказ-Анатолийского региона включены не только горно-складчатые сооружения, но и Скифская молодая плита с фундаментом герцинского возраста. Западно-Сибирский регион включает часть Восточной Сибири с архей-протерозойским фундаментом. Это позволяет предположить, что регионализация выполнена исходя из зон ответственности филиалов ФИЦ ЕГС РАН.

Частично упомянутые методические вопросы проработаны в пояснительной записке к комплекту карт ОСР–2016. Отмечено, что к сейсмолинеаментам относятся крупные активные разрывные нарушения, методика выделения которых описана в работе [Трифонов, Кожурин, 2010]. Однако оценки M_{\max} «получены экспертным путем на основе сопоставления оценок, полученных разными сейсмологическими и геологическими методами с учетом их достоверности» [Пояснительная..., 2016], поэтому такие оценки представляются трудно воспроизводимыми другими исследователями.

Рассмотренная в диссертационной работе методика выделения зон ВОЗ в значительной мере формализована и учитывает данные о конфигурации активных разломов, современном поле напряжений, рельефе. Она предполагает использование относительно небольшого объема исходных данных, поэтому применима для труднодоступных и слабо изученных территорий. Ограничения, связанные с ее использованием, заключаются в том, что она предполагает анализ только малоглубинных (коровых) землетрясений в областях, где не происходило активного вулканизма, оказавшего значительное влияние на рельеф. Эти особенности не позволяют применить разработанный подход для выделения зон ВОЗ ряда сейсмоактивных регионов нашей страны, прежде всего, полуострова Камчатка, где значительная часть землетрясений происходит на большой глубине, а вулканизм является одним из главных факторов рельефообразования. Отметим также необходимость дальнейшей апробации методики на примере платформенных территорий со слабо расчлененным рельефом.

Сопоставляя ЛДФ-модели Большого Кавказа, Сахалина и Алтае-Саянской области, отметим, что конфигурация линеаментов, заложенных в основу карт ОСР–97 и ОСР–2016, сходны. Определенные отличия наблюдаются в конфигурации доменов, прежде всего, в пределах Алтае-Саянской области. Представленные в диссертационной работе схемы зон ВОЗ значительно отличаются от доменов, показанных на обеих картах ОСР, однако значения M_{\max} в пределах зон ВОЗ и доменов достаточно близки. Это утверждение справедливо для зон ВОЗ № I, II, VI-VII на о. Сахалин. В пределах Большого Кавказа части линеаментов, положенных в основу карты ОСР-2016, соответствуют зоны ВОЗ, где значения M_{\max} на 1,5-2 магнитудные единицы меньше по сравнению с ОСР. В пределах Алтае-Саянской области основное отличие связано с зоной ВОЗ № VIII, где значения M_{\max} ниже на 0,5-0,8 магнитудные единицы по сравнению с ЛДФ-моделью к карте ОСР-2016.

В целом в мировой практике нет однозначного подхода к

сейсморайонированию и выделению зон ВОЗ. В [Clark, 2006] оконтуривание сейсмических доменов Австралии предложено проводить на основе неотектонических данных, прежде всего, конфигурации активных разломов (не линеаментов). Домены должны выделяться с учетом различий основных параметров разломов (протяженности, кинематики и др.) и их сейсмической активности. В этой же работе рассмотрено несколько вариантов оценки сейсмической опасности. Они предполагают проведение компьютерного моделирования, использование неотектонических и палеосейсмологических данных, анализ современной площадной деформации. Эти результаты использованы для построения карты сейсмической опасности [Allen et al., 2018]. Согласно [Delvaux et al., 2017], в основу выделения зон сейсмических источников должны быть положены данные, отраженные на геологических картах и картах неотектоники. При недостаточной изученности активных разломов выделение сейсмических источников может быть основано на анализе повторяемости землетрясений, описываемой законом Гутенберга-Рихтера. В [Hók et al., 2016] рассмотрена модель сейсмических источников (по своей сути – ЛДФ-модель) территории Словакии, в основу которой положены унифицированный сейсмический каталог (все магнитуды приведены к M_w) и данные о напряженно-деформированном состоянии геосреды. Под сейсмодоменом понимается объем земной коры с гомогенными геодинамическими характеристиками, при выделении которого учитываются в т. ч. особенности тектонического районирования. В [Meletti et al., 2008] для построения моделей затухания на территории Италии предложено в качестве исходных материалов использовать информацию о кинематике активных разломов и типе напряженно-деформированного состояния. Методика построения карты сейсмических источников Швейцарии рассмотрена в [Burkhard, Grünthal, 2009]: их выделение с использованием логических деревьев предполагает анализ величины максимального горизонтального напряжения, конфигурации активных разломов и тектонических единиц регионального и локального масштабных уровней.

Таким образом, можно сделать вывод об общей тенденции в развитии подходов к сейморайонированию, заключающемся в формализации алгоритмов выделения зон сейсмических источников, использовании технологий машинного обучения, комплексировании большого объема геолого-геофизических данных. В отечественной литературе, например, [Шебалин и др., 2022], обоснована необходимость совершенствования подходов к оценке сейсмической опасности. Согласно [Шебалин и др., 2024], выбор границ доменов и зон ВОЗ в принципе не имеет однозначного решения, поэтому рассмотренные в диссертационной работе подходы к их выделению на основе формализованных алгоритмов представляются актуальными и практически значимыми.

Выводы по главе 2

В основу ЛДФ-моделей, использованных для создания карт ОСР-97 и ОСР-2016, вошли сейсмические каталоги ФИЦ ЕГС РАН и схемы линеаментов. Алгоритмы разработки этих моделей недостаточно формализованы и не учитывают большой объем данных о новейших движениях, напряженно-деформированном состоянии среды, которые в значительной мере влияют на сейсмичность. Предложенный в диссертационной работе подход направлен на выделение зон

ВОЗ с учетом данных не только о линеаментов и разломах, но и пликвативных морфоструктурах напряженно-деформированного состояния земной коры. Зоны ВОЗ представляют собой площадные объекты, в пределах которых расположены активные разломы. Их протяженность позволяет оценить M_{max} по разным эмпирическим формулам. Апробация этого методического подхода выполнена на примере активных в сеймотектоническом отношении областей – Алтае-Саянской области, о. Сахалин, Большого Кавказа. Достоверность построенных сеймотектонических моделей обоснована на количественном уровне методом ROC-анализа.

Таким образом, на основании результатов, изложенных в главе 2, обосновано **второе защищаемое положение**: *новые объёмные сеймотектонические модели земной коры, построенные на основе предлагаемого методического подхода, позволяют выделять зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) высокомагнитудных землетрясений в областях активного тектоногенеза.*

Глава 3. Механизмы новейшего внутриплитного тектоногенеза на основе анализа тектонической раздробленности

Анализ удельной длины линеаментов, выполненный по методике Ю.В. Нечаева [2010], позволяет оценить степень тектонической раздробленности геосреды на разной глубине. Аномалии этого параметра связаны с морфоструктурным планом территории, к элементам которого относятся в т. ч. сейсмогенерирующие разломы. Тектоническая раздробленность геосреды связана с проявлениями неотектонических движений и деформаций, поэтому ее изучение значимо для понимания закономерностей новейших структурообразующих процессов.

Проведенные морфометрические исследования территорий Большого Кавказа, Сахалина и Алтае-Саянской области показали блоковое строение каждой территории. Кроме того, ряд параметров, таких как кривизна рельефа и плотность линеаментов, выделенных по методу Н.П. Костенко [1999], показали взаимосвязь с активными разрывными нарушениями.

Задача – установка взаимосвязи между активными разрывными нарушениями, линеаментами (в контексте данной работы, под линеаментами понимаются «слабые» зоны [Костенко, 1999]), и нарушенными формами рельефа. Для решения поставленной задачи рассмотрены методические аспекты тектонической раздробленности, раздробленность Большого Кавказа, острова Сахалин и Алтае-Саянской области.

3.1. Методика оценки тектонической раздробленности

Методика оценки величины тектонической раздробленности Ю.В. Нечаева основана на «тотальном дешифрировании линеаментов», которое может быть выполнено визуально или в автоматизированном режиме в программе Lessa А.А. Златопольского [2011].

Она предполагает расчет удельной длины линеаментов (УДЛ) – отношение суммы длин линеаментов в пределах ячейки к ее площади. Степень раздробленности (K) определяется не только количеством линеаментов, интерпретируемых как выраженные в рельефе мегатрещины, но и характером раскрытия трещин. Затем рассчитывается удельная длина линеаментов (l) в пределах элементарной квадратной ячейки как отношение суммы длин линеаментов в пределах ячейки к ее площади:

$$K = l = C_1 C_2 \frac{\Sigma l}{S}, \quad (4.1)$$

где l – длина линамента (м или км), S – площадь элементарной ячейки (м^2 или км^2), C_1 и C_2 – константы, характеризующие среднюю степень раскрытия трещин и их относительную раскрытость. Понимание УДЛ как меры раздробленности среды на глубине основано на эмпирически установленном соответствии трещиноватости одной грани образца кубической формы степени трещиноватости всего образца. В этом случае для оценки раздробленности верхняя часть литосферы разбивается на серию кубических блоков с ребром a [Таскин и др., 2014]. Для небольшой глубины УДЛ в определенном приближении характеризует степень раздробленности на глубине $h=a/2$, где a – размер расчетной ячейки. Варьируя значения a , можно оценить степень раздробленности на разной глубине (рисунок 3.1.1).

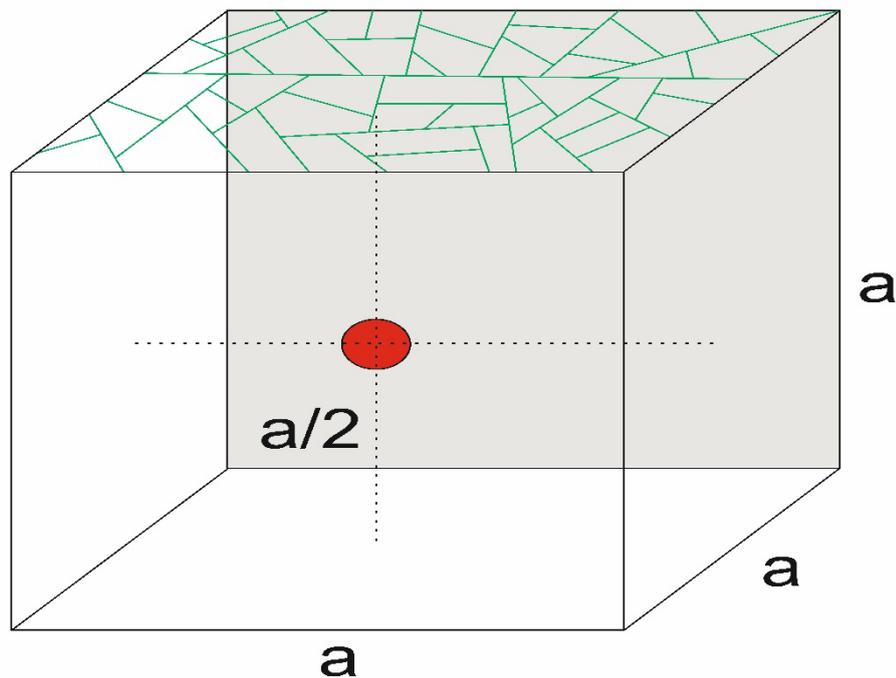


Рисунок 3.1.1. – Пример элементарной ячейки, для которой рассчитывается значение тектонической раздробленности. Зелеными линиями показаны линаменты, красная точка – геометрический центр ячейки (куба) со стороной a .

Исходя из размеров исследуемых территорий были построены горизонтальные и вертикальные срезы поля тектонической раздробленности Большого Кавказа для интервала глубин 5, 10 и 20 км, о. Сахалина – 2,5, 5, 10 и 20 км, Алтае-Саянской области – 10, 20, 30 и 40 км. При построении схем УДЛ интерполяция значений этого параметра выполнена методом кригинга. При построении вертикальных профилей для Большого Кавказа и Сахалина применялся метод интерполяции сплайн, в то время как для Алтае-Саянской области — кригинг. Упомянутые алгоритмы интерполяции подобраны эмпирически, их применение позволяет получить горизонтальные и вертикальные срезы поля тектонической раздробленности высокого качества, удобные для структурной интерпретации. Линии вертикальных профилей были расположены преимущественно вкрест простирания основных разломов [Zelenin et al., 2022], для того чтобы количественно оценить степень их выраженности по резким (градиентным) изменением значений УДЛ. Поправка на рельеф не учитывалась при построении

разрезов.

3.2. Тектоническая раздробленность Большого Кавказа

Для территории Большого Кавказа тектоническая раздробленность оценена на глубине 5, 10 и 20 км, построено 9 вертикальных профилей. Расстояние между точками вдоль линии профиля составляет 5 км, расстояние между профилями – 150–170 км. На глубине 5 км значения тектонической раздробленности достигают $22 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$. Основные максимумы простираются вдоль горноскладчатого сооружения Большого Кавказа. Градиентный переход от максимальных к минимальным значениям приурочен к Главному Кавказскому разлому. Средние значения данного параметра по линиям активных разрывных нарушений составляют $7,5 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, что незначительно меньше медианы для УДЛ на данной глубине ($7,9 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$).

На глубине 10 км (рисунок 3.2.1) значения УДЛ могут достигать $10 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, при медианном значении $5,2 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ и границе четвертого квартиля в $5,9 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$. В целом, рисунок положительных и отрицательных аномалий УДЛ становится более генерализованным. Границы основных разрывных нарушений конформны градиентным зонам данного параметра. По данному глубинному срезу, как наиболее обособленному от влияния эрозионных процессов (с учетом поправок на рельеф), были выделены предположительные активные разрывные нарушения. Среднее значение УДЛ для предполагаемых разломов составляет $5,2 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, т.е. соответствует медиане, в то время как на глубинном срезе 20 км (рисунок 3.2.2) эти разломы не выражены.

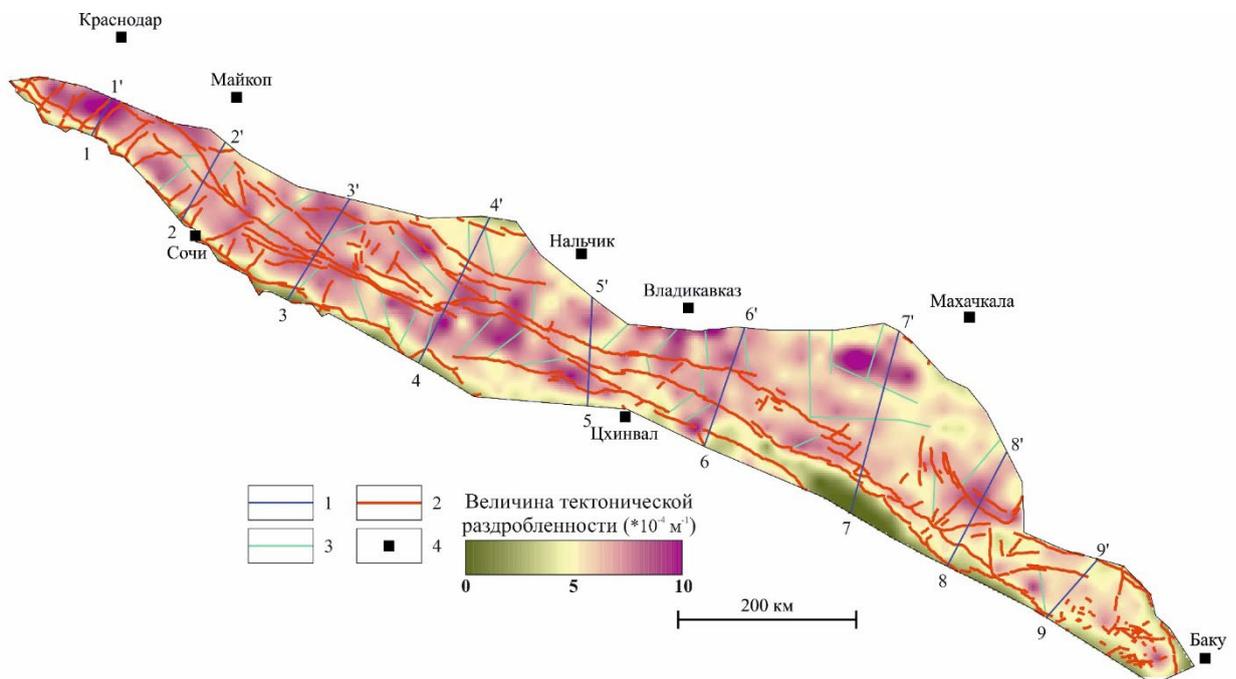


Рисунок 3.2.1. – Схема площадного распределения тектонической раздробленности для глубины 10 км. 1 – линии профилей тектонической раздробленности; 2 – активные разрывные нарушения [Zelenin et al., 2022]; 3 – предполагаемые активные разломы, выделенные по глубинному срезу в 10 км; 4 – города.

Установлено, что на профилях 2–2' – 8–8' 80% активных разрывных нарушений приурочены к градиентным зонам УДЛ. Для всех построенных это значение достигает 84%, однако на профилях 1–1' и 9–9', по-видимому, наблюдается краевой эффект, поэтому значение 80% можно принять как наиболее

достоверное.

При сопоставлении значения величины тектонической раздробленности с рельефом можно (рисунок 3.2.2) заметить, что областям повышенных значений соответствуют локальные новейшие поднятия, а пониженным – области опускания. Подобное утверждение можно считать достаточно достоверным, т.к. предел прочности на отрыв (что происходит при росте поднятий) меньше, чем на скол (в областях сжатия). Это может быть связано с региональным напряженно-деформированным состоянием, которое, по-видимому, наследует древнее, когда происходило складкообразование. Также это явление объяснимо с помощью деформационных процессов, происходящих в рамках адвективно-конвективной модели М.А. Гончарова [1979] за счет взаимодействия конвективных ячеек разного ранга.

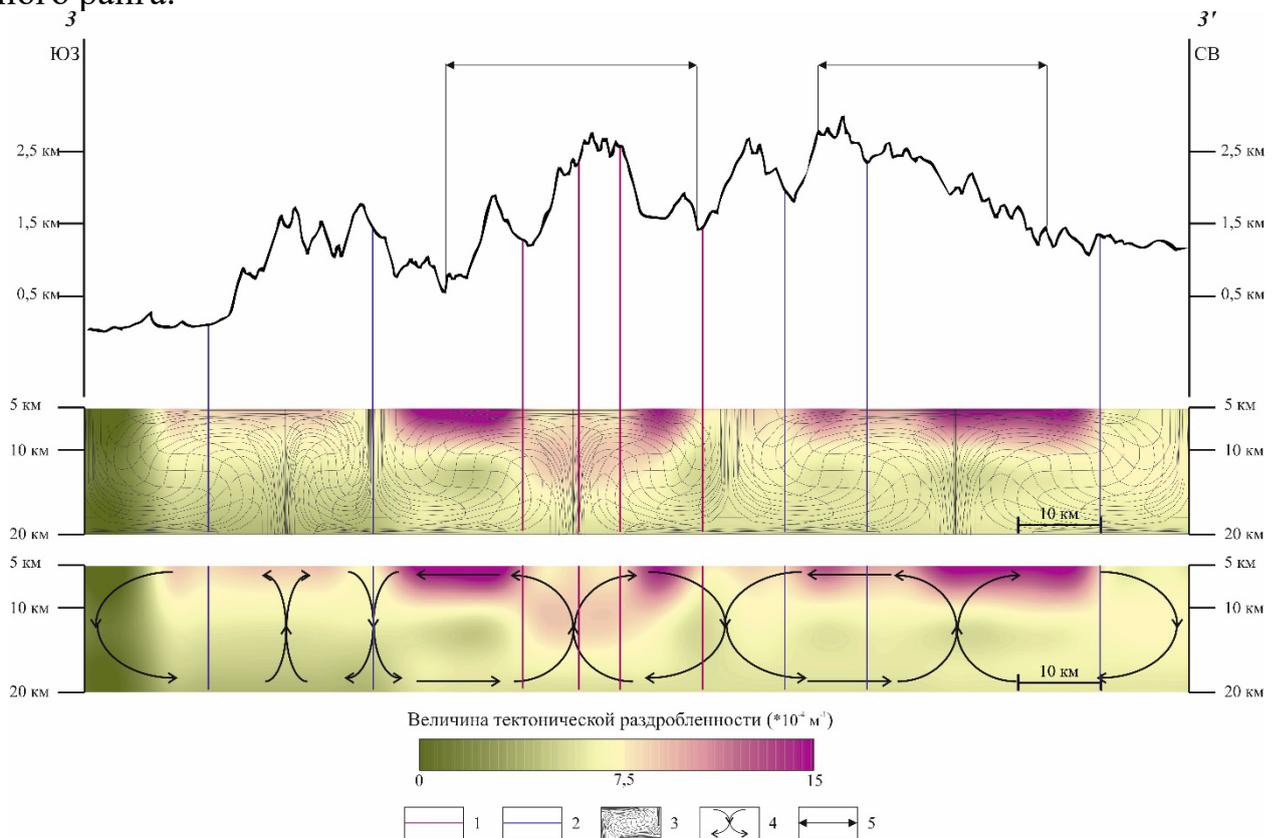


Рисунок 3.2.2. – Профиль поля тектонической раздробленности по линии 3-3'. 1 – выраженные в поле тектонической раздробленности активные разрывные нарушения из [Zelenin et al., 2022]; 2 – линейменты; 3 – искривленная квадратная сетка, иллюстрирующая заключительный этап деформации в результате конвективного процесса в слоистой среде (по [Гончаров, 1979]); 4 – направление перемещения вещества на заключительной стадии конвекции; 5 – предполагаемые границы новейших поднятий.

3.3. Тектоническая раздробленность острова Сахалин

Для территории Сахалина построено 6 поперечных профилей, характеризующих тектоническую раздробленность на глубине от 2,5 до 20 км. Их расположение приведено на рисунке 3.3.1. Большинство линейментов расположено в пределах региональных неотектонических поднятий и маркирует активные разрывные нарушения [Zelenin et al., 2022]. Характер распределения положительных и отрицательных аномалий УДЛ по площади подчеркивает сводово-блоковое строение острова, элементами которого являются как региональные плиткativo-структуры, так и расположенные в их пределах локальные поднятия и впадины. Наибольшие значения УДЛ связаны с поднятиями, а зоны их

градиентного изменения сходны с конфигурацией активных разрывных нарушений.

Примечательно, что на глубинном срезе 10 км высокие значения УДЛ локализованы в пределах Тымь-Поронайской мегавпадины. Это объяснимо большим количеством водотоков в ее пределах: спрямленные участки гидросети выделяются как линеаменты. Исходя из конфигурации линеаментов и по градиентам изменениям значений УДЛ выделены предполагаемые активные разломы (рисунок 3.3.1).

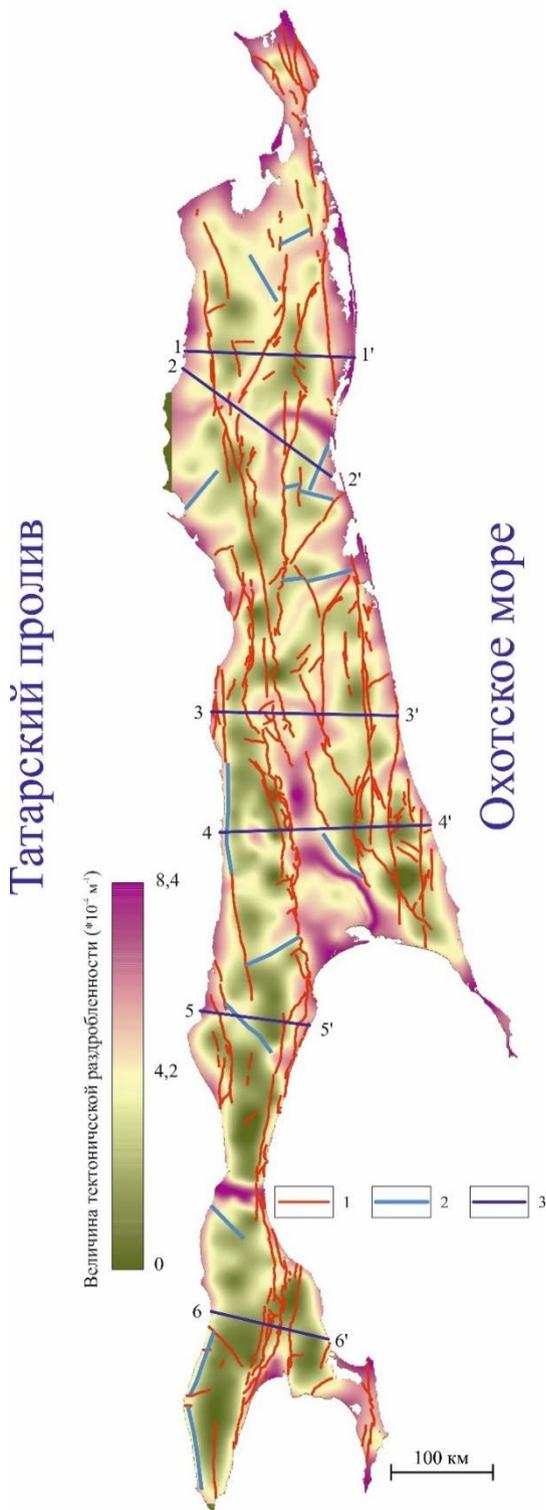


Рисунок 3.3.1. – Схема по площадного распределения тектонической раздробленности на глубине 10 км. 1 – активные разрывные нарушения (по [Zelenin et al., 2022]; 2 – предполагаемые активные разломы; 3 – профили тектонической раздробленности и их номера.

На примере о. Сахалин 71% активных разрывных нарушений идентифицируется на профилях по градиентным зонам УДЛ. По этому признаку также выделяются предполагаемые активные разломы, ранее рассмотренные как линеаменты. Как правило, они приурочены к отрицательным формам рельефа и склонам, и только в редких случаях – к поверхности водоразделов. По характеру поля тектонической раздробленности выделен ряд локальных новейших поднятий, расположение которых согласуется с литературными данными и ранее полученными результатами морфометрического анализа рельефа. В то же время, повышенные значения УДЛ иногда наблюдаются в пределах отрицательных форм рельефа, что может быть связано интенсивной эрозией, нивелирующей рельеф.

Как и в случае Большого Кавказа, почти все профили ориентированы по ориентировке оси максимального сжимающего напряжения, установленного в результате исследований, приведенных в Главе 2.2. Геодинамическая интерпретация тектонической раздробленности позволяет сделать вывод о том, что субдукция Тихоокеанской плиты может запускать образование разломов конвективного типа внутри литосферных блоков в пределах коры, тем самым объясняя внутриплитные вертикальные движения, в т.ч. на большом удалении. Они также могут быть связаны и с процессами гравитационной дифференциации вещества.

3.4. Результаты анализа тектонической раздробленности Алтае-Саянской области

Для территории Алтае-Саянской области проанализированы значения тектонической раздробленности на 4 глубинных срезах — 10, 20, 30 и 40 км. В качестве исходных данных была использована схема линеаментов. Количество линеаментов составляет 258169, общая протяженность — около 1 млн. км.

Для глубины 10 км (рисунок 3.4.1) положительные аномалии УДЛ приурочены к крупным горным массивам – Горному и Монгольскому Алтаю, Западнему и Восточному Саяну, Кузнецкому Алатау. Для впадин характерны значения, равные или меньше медианы. Интересна область Приобского плато, в пределах которого выделяются линейные области повышенных значений УДЛ северо-восточного простирания. По зонам градиентного изменения значений УДЛ выделены предполагаемые активные разломы таким образом, чтобы их данные об их конфигурации могли дополнить материалы [Zelenin et al., 2022].

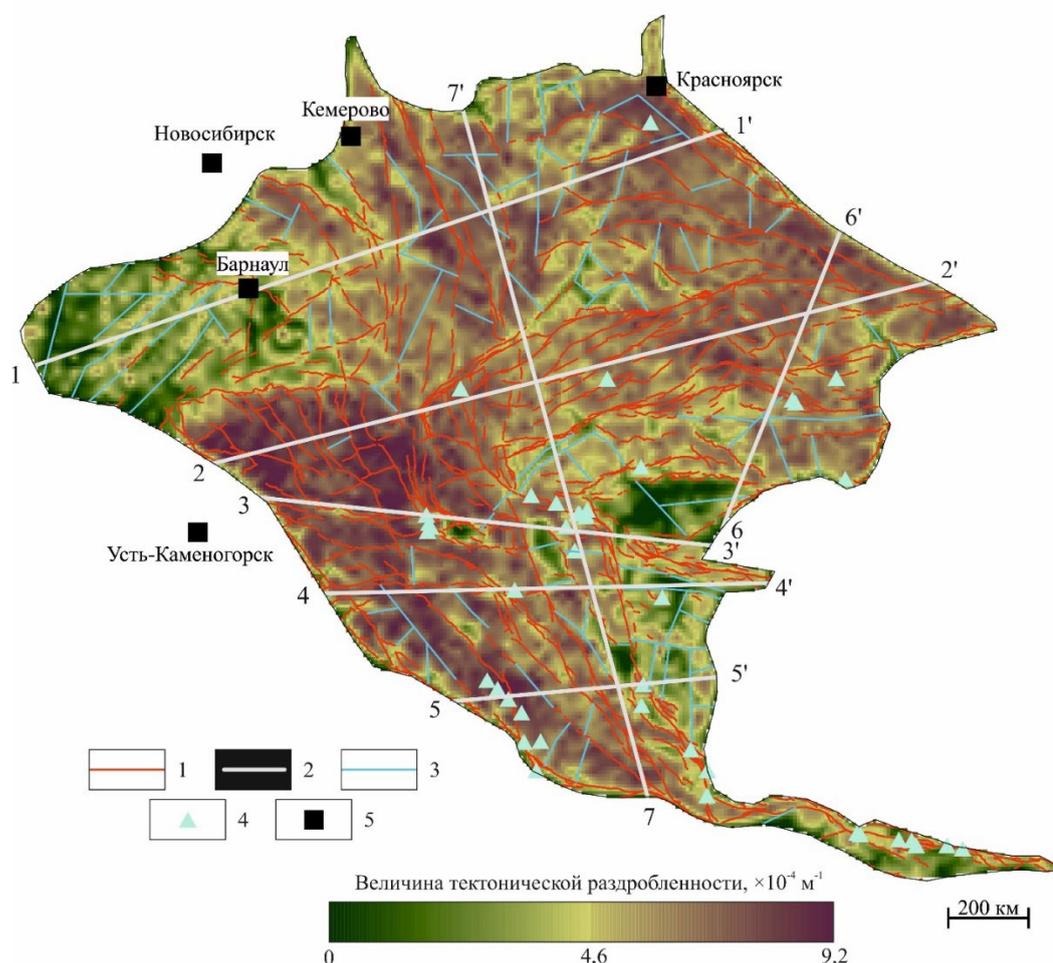


Рисунок 3.4.1. – Значение тектонической раздробленности Алтае-Саянской области на глубине 10 км. 1 – активные разрывные нарушения [Zelenin et al., 2022]; 2 – линии профилей тектонической раздробленности и их номера; 3 – выделенные по градиентным зонам УДЛ предполагаемые активные разломы; 4 – эпицентры землетрясений с $M_w \geq 5$; 5 – города. Черная линия – границы Алтае-Саянской области.

Анализ тектонической раздробленности Алтае-Саянской области позволил построить более глубокие структурные срезы по сравнению с Большим Кавказом и Сахалином, выделить на разных глубинных срезах активных новейших структуры – разломы, поднятия и впадины. На глубинах 10 и 20 км выделены локальные морфоструктуры, в то время как срезы, построенные для глубин 30 и 40 км, значимы для понимания более общих закономерностей новейшего

структурного плана. Установлена высокая (по шкале Чеддока) пространственная взаимосвязь между градиентными зонами УДЛ и активными разломами (в среднем, 71% разломов выражен на профиле). Профили тектонической раздробленности нередко пересекают близко расположенные активные разломы, которые можно объединить в разломные зоны. В этом случае степень выраженности активных разломов повышается, однако такой подход не применялся в диссертационной работе как недостаточно формализованный. По глубинному срезу 10 км выделены предполагаемые активные разломы, которые могли бы дополнить базу данных активных разломов Северной Евразии [Zelenin et al., 2022] после проведения дополнительных исследований. Отметим, что для одного из выделенных на профиле 3–3' (рисунок 3.4.2) линеаментов Е.А. Мануиловой доказано его соответствие достоверному активному разлому [Сенцов и др., 2025]. Кроме того, установлено расположение гипоцентров землетрясений с $M_w \geq 5,5$ в пределах областей высокой тектонической раздробленности.

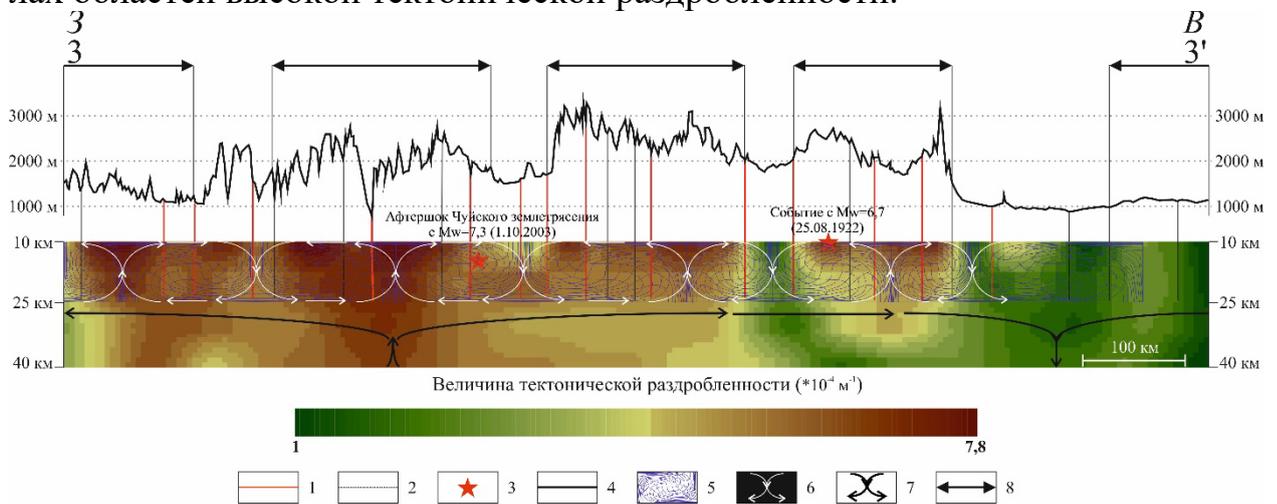


Рисунок 3.4.2. – Профиль поля тектонической раздробленности по линии 3-3'. 1 – выраженные в поле тектонической раздробленности активные разрывные нарушения из [Zelenin et al., 2022]; 2 – выраженные в данном параметре линеаменты; 3 – гипоцентры землетрясений с $M_w \geq 5,5$, через которые проходит профиль; 4 – профиль рельефа; 5 – искривленная первоначально квадратная сетка, иллюстрирующая заключительный этап деформации в результате конвективного процесса в слоистой среде (по [Гончаров, 1979]); 6 – деформационная ячейка 2-го порядка в адвективно-конвекционной модели М.А. Гончарова [Гончаров, 1979]; 7 – деформационная ячейка 1-го порядка в адвективно-конвекционной модели М.А. Гончарова [Гончаров, 1979]; 8 – предполагаемые границы новейших поднятий.

Выводы по главе 3

Анализ тектонической раздробленности Большого Кавказа, Сахалина и Алтае-Саянской области позволил по значениям УДЛ выделить поднятия и впадины, предполагаемые активные разломы. Формирование пликативных структур объяснимо в рамках региональной адвективно-конвективной модели М.А. Гончарова. В этом случае глобальное поле напряжений, контролируемое тектоникой литосферных плит, является триггером к региональным конвективным деформациям. Последние могут быть запущены в результате гравитационной дифференции вещества, рассмотренной в т.ч. в диссертации Д.С. Мягкова [2022]. Несмотря на определенные достоинства нового подхода к интерпретации поля тектонической раздробленности, существует ряд ограничений. Одно из них связано со сложностью установления глубинности разломов по данным анализа вертикальных профилей. Второе заключается в невозможности в полной мере учитывать расслоенность земной коры. Допустимо использование адвективно-конвективной модели для объяснения горообразования на Большом Кавказе с

учетом двухъярусной плит-тектонической схемы, предложенной Л.И. Лобковским [1989]. Ее суть заключается в том, что возможно нагнетание пластичного деформируемого вещества в нижние слои земной коры, за счет чего происходит ее утолщение и изостатическое воздымание после основного этапа складчатости. В случае Алтае-Саянской области формирование складчатой структуры произошло задолго до новейшего этапа. Можно предположить, что в данном регионе орогенез связан с влиянием Альпийско-Гималайского пояса при закрытии океана Тетис.

На основании изложенного в главе 3 обосновывается **третье защищаемое положение**: *Новейшие поднятия и впадины соответствуют экстремумам тектонической раздробленности, а ее градиентам – зоны потенциальных активных разломов, что является одной из компонент при создании карт общего сейсмического районирования нового поколения.*

Заключение

В результате выполнения работы решена крупная научная проблема, связанная с генерацией фундаментальных подходов к созданию цифровых динамических карт ОСР нового поколения, разработан комплексный методический подход, сочетающий количественный анализ морфометрических характеристик рельефа с учётом данных стационарных станций ГНСС, решений фокальных механизмов очагов землетрясений, оценка взаимосвязи рельефа с коровой сейсмичностью, расчёт индекса неотектонической активности, а также создание геодинамических и сеймотектонических моделей.

Анализ **морфометрических характеристик рельефа**, количество которых в каждом из исследуемых регионов (Большой Кавказ, о. Сахалин, Алтае-Саянская область) превышает 10 наименований, позволил дать характеристику новейшим движениям. Показано, что кривизна и уклон рельефа связаны дизъюнктивными новейшими структурами, в то время как разности базисных поверхностей водотоков различного порядка, математическое ожидание высот рельефа, дисперсия и асимметрия высот рельефа, глубина вертикального расчленения связаны с пликативными структурами и помогают локализовать области локальных, в первую очередь, положительных морфоструктур.

На количественном уровне установлена **взаимосвязь морфометрических характеристик рельефа с коровой сейсмичностью**. Для территории Большого Кавказа наиболее связанными с сейсмичностью являются разности базисных поверхностей 2 и 3, а также 4 и 5 порядков, дисперсия глубины вертикального расчленения и асимметрия высот рельефа как для всего магнитудного спектра, так и для событий с $M \geq 5,5$. Для Сахалина наибольшая взаимосвязь с землетрясениями показали плотность линеаментов и асимметрия высот рельефа для аналогичных выборок интервалов магнитуд. В случае Алтае-Саянской области почти все из 16 проанализированных параметров показали высокую взаимосвязь с рельефом, поэтому в качестве наиболее значимых были выбраны три из них: разность гипсометрической поверхности рельефа и базисной 6 порядка, глубина вертикального расчленения и математическое ожидание высот рельефа.

Анализ данных **стационарных станций ГНСС** позволил определить величину площадной деформации. Для Большого Кавказа установлено близкое соотношение между областями растяжения и сжатия, в то время как на Сахалине

отчетливо доминирует обстановка сжатия. Алтае-Саянская область находится в схожей ситуации с Большим Кавказом. Полученные результаты говорят о необходимости привлечения дополнительного источника информации о напряженно-деформированном состоянии среды. К таковым были отнесены данные о решениях фокальных механизмов очагов землетрясений. На основе их обработки методом катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого [Ребецкий и др., 2017] установлены обстановки поперечного сжатия (по отношению к простирацию структур) Большого Кавказа и Сахалина, где субгоризонтальная ось сжатия ориентирована в северо-восточном и широтном направлениях, соответственно. На Алтае-Саянской области сложилась иная ситуация: механизмы очагов были сгруппированы в две кинематические группы с разным типом напряженно-деформированного состояния – это обстановка сжатия с субмеридионально ориентированной осью сжатия и обстановка сдвига с осью сжатия, ориентированной в северо-восточных румбах. К каждой выборке относится почти равное количество решений фокальных механизмов очагов землетрясений (39 и 35 событий для первого и второго типа).

Используя данные о рельефе, землетрясениях, активных разломах и мощности земной коры **построены новые геодинамические модели**, которые учитывают напряженно-деформированное состояние земной коры. В случаях Большого Кавказа и Сахалина получены однозначные решения регионального напряженно-деформированного состояния. Для Алтае-Саянской построено семейство моделей, для различных типов внешних условий нагружения. Установлена оптимальная конфигурация параметров, приводящих к получению непротиворечивых решений: в областях локализации максимальных горизонтальных напряжений (Sh) расположено 36%, 53% и 72% эпицентров коровых землетрясений Большого Кавказа, Сахалина и Алтае-Саянской области, соответственно.

На основе рассчитанных морфометрических параметров рельефа, показавших высокую степень взаимосвязи с инструментальной сейсмичностью, с помощью инструментов нечеткой логики **оценен индекс неотектонической активности (F)**. В случаях низких значений полученного значения индекса F γ -оператором нечеткой логики допустимо применение метода равнозначных градаций, что отражено в методической части работы на примере Республики Союз Мьянма. Эмпирически установлено, что наибольшие значения индекса F достигаются при значении $\gamma=0,9$. Полученные значения F разделяются на три интервала значений: недостоверный ($F<0,4$), требующий дополнительных исследований ($0,4\leq F<0,6$) и достоверный ($F\geq 0,6$). Достоверность полученного индекса неотектонической активности проверена на количественном уровне ROC-AUC-анализом по сетке 15×15 км. Значения AUC для всех интервалов магнитуд составляют 0,7 и 0,8 для событий с $M\geq 5,5$ в пределах Большого Кавказа для всех значений F , и 0,6 и 0,76, соответственно, при $F\geq 0,6$. В случае Сахалина значения AUC для всего интервала магнитуд и событий с M_s и $M_w\geq 5,5$ составляют 0,66, 0,69 и 0,68, что свидетельствует о возможности использования любой из упомянутых из магнитудных шкал для расчета индекса F . Для всех значений F площадь под кривой (AUC) Алтае-Саянской области составляет 0,66 в случае всех магнитуд и 0,8 — в случае $M_w\geq 5,5$.

Полученные результаты площадного распределения параметра F сопоставлены с областями локализации максимальных горизонтальных напряжений

(Sh). Эти результаты легли в основу разработки **новых сеймотектонических моделей** и выделения зон ВОЗ. **Зоны ВОЗ** выделены в два этапа: 1) на основании значений $F \geq 0,6$ и $M \geq 5,5$ и 2) на основе наличия событий с $M \geq 5,5$, $0,4 \leq F < 0,6$ и Sh в пределах единой площади. Формы зон ВОЗ контролируются площадным распределением вышеуказанных параметров и наличием землетрясений более низких магнитуд. Показано, что применение уравнения макросейсмического поля для выделения формальных границ зон ВОЗ с учетом вышеуказанных ограничений не соответствует геологическому и неотектоническому строениям регионов.

Выделение зон ВОЗ в рамках предлагаемой методики является в значительной степени формализованным и связано с новейшим морфоструктурным планом. В пределах Большого Кавказа выделено 8 зон ВОЗ для событий с $M \geq 5,5$, Сахалина — 10, Алтае-Саянской области — 13. С зонами ВОЗ и параметром F согласуются литературные данные о расположении палеосейсмодислокаций. На основе эмпирических формул установлены M_{\max} в зонах ВОЗ. По своей морфологии они отличаются от приведенных ЛДФ-моделей, входящих в ОСР-97 и ОСР-2016, а также от некоторых региональных схем. Но значения расчетных M_{\max} в пределах авторских зон ВОЗ и литературных, в целом, согласуются.

Используя результаты структурно-геоморфологического анализа, по удельной длине линейных элементов оценена **степень величины тектонической раздробленности** верхней части литосферы. Установлена взаимосвязь между значениями УДЛ, дизъюнктивными и пликативными структурами. На количественном уровне доказана высокая (по шкале Чеддока) приуроченность активных разрывных нарушений к градиентным зонам УДЛ. Это дает основание использовать горизонтальные и вертикальные срезы поля тектонической раздробленности для выделения потенциальных активных разломов, которые трассируются на площади по распределению градиентов на глубинном срезе в 10 км. Положительным значениям УДЛ соответствуют области локальных поднятий (в случае малых глубин, до 20 км), в то время как на больших глубинах (более 20 км) выделяются региональные поднятия.

Анализ профилей тектонической раздробленности позволил выделить **конвективные ячейки** первого (для глубин 25–40 км) и второго (глубины до 20–25 км) порядков в рамках адвективно-конвективной модели М.А. Гончарова. В качестве источника подобных конвективных процессов на региональном уровне выступает тектоника литосферных плит, которая приводит к изменению плотностных свойств в земной коре и появлению разнотипных движений.

Таким образом, на основе камеральных формализованных исследований разработан новый методический подход, нацеленный на решение проблем, связанных с выявлением зон ВОЗ для обеспечения сейсмобезопасности территорий активного тектоногенеза.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях из списка ВАК

1. Sobisevich A. L., Steblov G. M., **Sentsov A. A.**, Deev E. V., Eppelbaum L. V., Agibalov A. O., Aleshin I. M., Balashov G. R., Kamenev O. T., Kotov A. N., Makeev V. M., Perederin V. P., Perederin F. V., Rosenberg N. K., Kholodkov K. I., Safronov O. V. Identification of Potential Earthquake Source Locations Zones in the Altai-Sayan Mountain Region: A New Approach Based on the Morphometric Terrain Analysis and the Geodynamic Modeling // *Natural Hazards*. 2025. V. 121. P. 19863–19887.
2. **Сенцов А. А.**, Собисевич А. Л., Агибалов А. О., Славина Л. Б., Котов А. Н. Выделение зон возникновения очагов коровых землетрясений Республики Союз Мьянма: новый методический подход на базе анализа рельефа и компьютерного геодинамического моделирования // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2025. Т. 525. № 1. С. 135–142.
3. **Сенцов А. А.**, Собисевич А. Л., Агибалов А. О., Балашов Г. Р., Макеев В. М., Мануилова Е. А., Пузич И. Н., Славина Л. Б. Оценка тектонической раздробленности земной коры Алтае-Саянской области // *Геофизические процессы и биосфера*. 2025. Т. 24. № 4. С. 120–129.
4. Агибалов А. О., Фёдоров В. М., Маякин А. Т., **Сенцов А. А.**, Зайцев В. А., Симонов Д. А., Захаров В. С., Сывороткин В. Л., Балашов Г. Р., Казанцев А. А., Павлова А. П. Взаимосвязь современной сейсмичности района Северомуйского тоннеля с рельефом и геодезическими данными // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. 2025. № 5. С. 27–38.
5. Агибалов А. О., **Сенцов А. А.**, Собисевич А. Л., Балашов Г. Р., Дударов З. И., Дмитриева И. Ю., Зайцев В. А., Зыков Д. С., Котов А. Н., Полещук А. В. К оценке геодинамических режимов вулканических центров // *Вулканология и сейсмология*. 2025. №6. С.61-74.
6. Собисевич А. Л., Стеблов Г. М., Агибалов А. О., Алёшин И. М., Балашов Г. Р., Кондратов А. Д., Макеев В. М., Передерин В. П., Передерин Ф. В., Розенберг Н. К., **Сенцов А. А.**, Холодков К. И. Выделение зон возможных очагов землетрясений в областях новейшего тектогенеза на основе геолого-геоморфологических факторов и инструментов нечеткой логики (на примере Большого Кавказа) // *Вулканология и сейсмология*. 2024. № 5. С. 53–66.
7. Собисевич А. Л., Стеблов Г. М., Агибалов А. О., **Сенцов А. А.**, Балашов Г. Р., Зайцев В. А., Зыков Д. С., Макеев В. М., Маякин А. Т., Передерин В. П., Передерин Ф. В., Полещук А. В., Рузайкин А. И., Холодков К. И. Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа и сейсмичности острова Сахалин // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2024. № 6. С. 32–41.
8. Собисевич А. Л., Агибалов А. О., Бергаль-Кувикас О. В., Зайцев В. А., Зыков Д. С., Макеев В. М., Полещук А. В., **Сенцов А. А.**, Шевченко А. В. Развитие методов комплексного морфометрического анализа рельефа для оценки тектонической раздробленности недр // *Вулканология и сейсмология*. 2024. № 3. С. 59–69.
9. Sobisevich A. L., Steblov G. M., Agibalov A. O., Aleshin I. M., Balashov G. R., Kondratov A. D., Makeev V. M., Perederin V. P., Perederin F. V., **Sentsov A. A.**, Kholodkov K. I. Seismic Domain Identification Algorithm Using Fuzzy Logic Methods With Combined Geological and Geomorphological Data for the Case of Sakhalin Island // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024. Т. 24. № 2. <https://doi.org/10.2205/2024es000906>

10. Агибалов А. О., Бергаль-Кувикас О. В., Зайцев В. А., **Сенцов А. А.** Взаимосвязь выраженной в рельефе мегатрещиноватости юго-востока Камчатки с вулканизмом и термическим состоянием верхней части литосферы // Геофизические процессы и биосфера. 2024. Т. 23. № 4. С. 1–10.
11. Стеблов Г. М., Агибалов А. О., Макеев В. М., Передерин В. П., Передерин Ф. В., **Сенцов А. А.** К проблеме оценки максимально возможных магнитуд землетрясений острова Сахалин различными методами // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50. № 4. С. 25–35.
12. **Сенцов А. А.**, Агибалов А. О., Зайцев В. А., Полещук А. В., Хрусталеv Е. Ю. Геоморфологические индикаторы сдвиговых перемещений на острове Уруп (Большая Курильская гряда) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2023. № 3. С. 82–91.
13. Стеблов Г. М., Агибалов А. О., Белобородов Д. Е., Зайцев В. А., Передерин В. П., Передерин Ф. В., **Сенцов А. А.**, Фадеева К. В. Анализ современных деформаций Северо-Западного Кавказа и Предкавказья по данным ГНСС // Физика Земли. 2023. № 4. С. 65–74.
14. Стеблов Г. М., Агибалов А. О., Мельник Г. Э., Передерин В. П., Передерин Ф. В., **Сенцов А. А.** Анализ современных движений и деформаций земной коры Фенноскандии по данным ГНСС // Физика Земли. 2022. № 4. С. 19–29.
15. Агибалов А. О., Зайцев В. А., Манулилова Е. А., **Сенцов А. А.** Выделение сейсмически активных участков Воронежской антеклизы геоморфологическими и тектонофизическими методами // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2022. № 2. С. 3–10.
16. Милюков В. К., Миронов А. П., Овсяченко А. Н., Горбатилов А. В., Стеблов Г. М., Корженков А. М., Дробышев В. Н., Хубаев Х. М., Агибалов А. О., **Сенцов А. А.**, Dogan U., Ergintav S. Современные тектонические движения Западного Кавказа и Предкавказья по ГНСС наблюдениям // Геотектоника. 2022. № 1. С. 51–67.
17. Агибалов А. О., Зайцев В. А., **Сенцов А. А.** Сравнительный анализ новейшей геодинамики Балтийской синеклизы и северного склона Воронежской антеклизы // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 4. С. 951–968.
18. Агибалов А. О., Зайцев В. А., **Сенцов А. А.**, Полещук А. В., Манулилова Е. А. Морфометрические параметры рельефа и локализация месторождений углеводородов Волго-Уральской антеклизы // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2021. № 4. С. 15–22.
19. **Сенцов А. А.**, Агибалов А. О. Выделение зон возможных очагов землетрясений в Фенноскандии по данным анализа сейсмичности и компьютерного геодинамического моделирования // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2021. № 1. С. 15–22.
20. Агибалов А. О., Зайцев В. А., **Сенцов А. А.** Выделение активных докембрийских морфоструктур Северного Приладожья по комплексу геолого-геоморфологических данных // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2020. № 4. С. 64–70.
21. Агибалов А. О., Зайцев В. А., **Сенцов А. А.**, Девяткина А. С. Оценка влияния современных движений земной коры и активизированного в новейшее время докембрийского структурного плана на рельеф Приладожья (юго-восток Балтийского щита) // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 791–807.