

На правах рукописи



Найля Абдулловна Сычева

**ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ
ДЕФОРМАЦИИ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ**

Специальность 1.6.9 «Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке.

Научный консультант: **Богомолов Леонид Михайлович**, доктор физико-математических наук, директор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Виноградов Юрий Анатольевич**, доктор технических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук»;

Пантелеев Иван Алексеевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией цифровизации горнотехнических процессов Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук;

Горшков Александр Иванович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамики, спутниковой геодезии и математических методов изучения геосистем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук».

Защита диссертации состоится 24 сентября 2026 г. в 14:00 на заседании Диссертационного совета 24.1.132.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук по адресу: 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр.1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <https://vak.gisnauka.ru> и на сайте ИФЗ РАН.

Автореферат разослан « » июля 2026 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 1-м экземпляре, с согласиями на использование персональных данных, просьба направлять по адресу: 123242, г. Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Р.А. Жосткову.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук



Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Исследования деформационных процессов в тектоносфере Земли на современном уровне требуют анализа информации о действующих в ней полях тектонических напряжений. Наиболее полная информация о действующих в коре современных тектонических напряжениях получается, в основном, при анализе очаговых (кинематических и динамических) параметров землетрясений. На территории Северного Тянь-Шаня задел для таких исследований создан благодаря данным сейсмического мониторинга, проводимого с помощью сейсмологической сети квазиреального времени KNET (Kyrgyz Network), и развитию современных алгоритмов и методов обработки первичных данных. Сейсмологическая сеть KNET обеспечивает уверенную регистрацию локальной сейсмичности внутри области $41.5\text{--}43.5^\circ$ с.ш. и $73\text{--}77^\circ$ в.д., условно называемой Бишкекским геодинамическим полигоном (БГП).

Актуальность исследования очаговых параметров землетрясений как источника количественных данных о параметрах напряженно-деформированного состояния земной коры и литосферы в целом определяется необходимостью оценки потенциальных природно-техногенных рисков и обеспечения безопасной эксплуатации промышленных и гражданских сооружений, а также крупных месторождений твердых полезных ископаемых, нефти и газа. Данные о направлениях осей сжатия и растяжения в сейсмических волнах являются существенным дополнением к оценкам пиковых ускорений и скоростей при вероятных землетрясениях в исследуемом регионе. Помимо чисто прикладного интереса, эти исследования имеют большое научное значение для решения теоретических задач геотектоники, развития представлений о природе и причинах сейсмичности. Первостепенное значение имеет развитие этих исследований в горных областях Тянь-Шаня, характеризующихся, с одной стороны, высоким уровнем сейсмичности, а с другой стороны – высокой для горной местности плотностью населения и промышленных объектов.

Настоящая работа посвящена исследованию очаговых параметров землетрясений Северного Тянь-Шаня. В работе выполнен расчет механизмов очагов землетрясений, тензоров сейсмического момента, динамических параметров, характеристик добротности среды, а также сеймотектонических деформаций земной коры и др.

Степень разработанности темы исследования. Ранее, до конца XX века, кинематические (фокальные механизмы) и динамические параметры (ДП) очагов землетрясений определялись в основном для сильных землетрясений. При этом составление каталога фокальных механизмов и динамических параметров очагов для компактной территории было возможно лишь для регионов с наиболее высокой сейсмической активностью. В настоящее время развитие современных методов обработки данных (волновая инверсия, GIT (Generalized Inversion Technique) и др.) позволяет с хорошей точностью определять очаговые параметры и для слабых землетрясений. Для территории БГП это возможно для землетрясений с $K \geq 7$.

В Институте сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики для территории Киргизского Тянь-Шаня механизмы очагов исследовались для

землетрясений с $M \geq 3.5$. Известны работы Т.А. Лопатиной (1975, 1978 гг.), где определены фокальные механизмы слабых землетрясений (более 70) Чуйской впадины и ее горного обрамления, произошедших в 1967–1973 годах. Для многочисленных землетрясений слабой и умеренной силы на территории Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) фокальные механизмы не определялись.

Сеймотектонические деформации земной коры исследовались в работах Т.Я. Беленович с соавторами (1982, 1988, 1993), в которых рассматривались Иссyk-Кульская впадина, Чуйская впадина и ее обрамление, очаги сильных землетрясений Киргизии. СТД земной коры Тянь-Шаня исследовались в работах С.Л. Юнги (1990). В работе В.Г. Трифонова (2002) проведено детальное исследование полей СТД геологических структур на территории Южного Тянь-Шаня, Афгано-Таджикской впадины, Памира и Северного Гиндукуша. Работа А.М. Муралиева (2010) посвящена анализу и изучению СТД земной коры Тянь-Шанского орогена. Во всех этих работах рассматривались либо малые области, либо значительные территории, и при расчете СТД применялся подход, описанный в работах Ю.В. Ризниченко (1985). С.Л. Юнга после 1990 года развил методику расчета СТД и предложил классификацию режимов СТД, которая применяется в данной работе.

В лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики № 204 ИФЗ РАН интенсивно развивается метод катакластического анализа разрывных смещений (МКА), однако для оценки напряженно-деформированного состояния земной коры Тянь-Шаня этот метод не применялся.

Региональные оценки эффективной добротности среды Тянь-Шаньского региона были сделаны в работе А.Г. Земцовой (1985) на основе исследования кода-волн по записям широкополосной аппаратуры СКМ (сейсмограф Кирноса длиннопериодный), СКД (сейсмограф Кирноса модифицированный) и частотно-избирательной станции. Полученные результаты были основаны на обработке аналоговых записей 160 землетрясений, произошедших в основном на территории Южного Тянь-Шаня. Эти записи не могут обеспечить надежную оценку добротности среды Северного Тянь-Шаня.

С учетом степени разработанности вопросов об очаговых параметрах в диссертационной работе проведен массовый расчет механизмов очагов землетрясений, сеймотектонических деформаций, тензора сейсмического момента, сброшенных напряжений и др.

Цель работы – установить закономерности распределения сеймотектонических деформаций и параметров поля напряжений Северного Тянь-Шаня на основе получения и обработки большого объема данных о кинематических и динамических параметрах очагов землетрясений региона, а также характеристиках добротности коры и верхней мантии.

Объектом исследования являются записи волновых форм землетрясений и сейсмического шума, зарегистрированные станциями сети KNET.

Для достижения цели поставлены и решены следующие основные задачи:

- Выполнен аналитический обзор состояния изученности сеймотектоники и сейсмичности Тянь-Шаня.

- Разработаны методики и алгоритмы для мониторинга сейсмичности БГП и углубленной обработки полученных данных.
- Определены кинематические параметры очагов землетрясений и на их основе рассчитаны и построены карты распределения различных параметров напряженно-деформированного состояния земной коры Северного Тянь-Шаня, выполнен их анализ и проведено сравнение моделей деформации земной коры на основе сейсмологических и ГНСС-данных.
- Получены зависимости добротности от частоты для земной коры и верхней мантии Северного Тянь-Шаня (БГП). Построены модели затухания сейсмических волн для приповерхностного слоя земной коры (0–15 км).
- Построены очаговые спектры, определены характеристики (спектральная плотность и угловая частота), выполнен расчет динамических параметров очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня и выявлены закономерности в их распределении.

Научная новизна

- Определена оптимальная скоростная модель (из существующих) для земной коры Северного Тянь-Шаня, позволяющая улучшить точность расчета параметров гипоцентров землетрясений по данным сети KNET.
- Впервые сформированы банки данных большого объема по фокальным механизмам очагов (1770 событий) и тензорам сейсмического момента (334 события) землетрясений Северного Тянь-Шаня.
- Для расчета сейсмотектонических деформаций применена методика усреднения параметров фокальных механизмов отдельных землетрясений, использующая региональную весовую функцию и позволяющая вовлечь данные по сравнительно слабым землетрясениям.
- Впервые построены карты распределения интенсивности или режимов СТД, включая распределение вертикальной компоненты СТД и коэффициента Лоде – Надаи, для территории Северного Тянь-Шаня.
- Проведен расчет среднегодовой скорости СТД на исследуемой территории. Выполнено детальное сопоставление горизонтальных компонент деформаций, определенных по сейсмическим и ГНСС-данным, включая численный анализ азимутов осей укорочения.
- Впервые построены разрезы поля затухания сейсмических волн и получены функции зависимости добротности от частоты для территории БГП.
- Впервые сформирован банк данных динамических параметров очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня со статистически значимым числом записей.
- Впервые установлены скейлинговые зависимости динамических параметров очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня: радиуса очага, сброса касательных напряжений и приведенной сейсмической энергии – от скалярного сейсмического момента.
- Проведено сопоставление площадных распределений сброшенных напряжений и коэффициента Лоде – Надаи.

Теоретическая и практическая значимость работы. Знания о параметрах напряженно-деформированного состояния земной коры важны для всех направлений геофизики и геодинамики. Выполненная работа содержит обширную информацию об очаговых параметрах землетрясений, сеймотектонических деформациях и типе геодинамического режима для территории Северного Тянь-Шаня. Определенные в работе функции зависимости добротности среды от частоты важны для расчета очагового спектра и ДП очагов землетрясений. Информация о динамических параметрах (сброс касательных напряжений) может использоваться на заключительных этапах реконструкций напряжений методом МКА, при которых определяются численные значения эффективных напряжений в коре сейсмически активных регионов.

Определенные в работе функции зависимости добротности от частоты для среды БГП использовались при построении очагового спектра. В дальнейшем их также можно использовать при решении задач, связанных с построением очагового спектра и др.

Практическая значимость работы определяется возможностью применения полученных новых знаний в качестве основы для тектонофизического районирования участков активных разломов по степени опасности генерирования сильных землетрясений. Карты с распределением СТД, типа геодинамического режима и коэффициента Лоде – Надаи могут быть использованы для уточнения расположения активных сегментов разломов Северного Тянь-Шаня.

Также практическую значимость для исследований других сейсмоопасных регионов России могут иметь разработанные программы и алгоритмы для обработки больших массивов данных по анализу сейсмических записей при оценке характеристик добротности среды, калибровочных функций сейсмических станций (site effect) и др.

Методология и методы исследования. Основными методами для решения поставленных задач являлись: сбор сейсмологических данных, их систематизация и подготовка к компьютерной обработке, проведение расчетов на основе стандартных и протестированных авторских программ, а также статистический анализ выходных данных.

Для расчета механизмов очагов землетрясений использовались метод первых вступлений и метод волновой инверсии. Для оценки параметров напряженно-деформированного состояния земной коры Северного Тянь-Шаня применялись метод сеймотектонических деформаций Юнги (СТД) и метод катакластического анализа разрывных нарушений Ребецкого (МКА). Оценка характеристик добротности среды выполнена с применением стандартных методов сейсмотомографии.

Все используемые методы были автоматизированы, протестированы и отработаны в различных операционных системах: Windows, Linux и Solaris, в зависимости от реализации программного продукта.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности пространственного распределения сеймотектонической деформации земной коры Северного Тянь-Шаня. Неоднородность СТД проявляется в распределении параметра Лоде – Надаи, образующем квазиоднородные домены, с характерными размерами порядка 50 км.

2. Количественная и качественная типизация подвижек в очагах землетрясений слабой и умеренной силы на территории Северного Тянь-Шаня: взбросы и взбросо-сдвиги – 40%, горизонтальные сдвиги – 36%. Пропорции между фокальными механизмами разных типов и ориентация осей очаговых механизмов отражают сокращение земной коры Тянь-Шаня.
3. Частотная зависимость добротности коры и верхней мантии Северо-Тянь-Шаньского региона на глубинах (60–100 км) описывается степенной функцией $Q \sim f^{0.9}$ в диапазоне частот 0.75–24 Гц.
4. Статистические закономерности динамических параметров очагов низко- и среднемагнитудных землетрясений Северного Тянь-Шаня, выраженные через регрессии значений ДП от скалярного сейсмического момента в диапазоне магнитуд 2.7–6. Для регрессии сброшенных напряжений имеет место увеличение дисперсии для землетрясений с $M > 4.5$.
5. Характер напряженного состояния в коре Северного Тянь-Шаня определяется морфологическим типом: для коры хребтов наибольшее сжатие всегда субгоризонтально, а для коры внутригорных впадин промежуточное главное напряжение всегда субвертикально.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается тщательным отбором и контролем качества исходных данных, применением современных методов анализа и обработки данных, принятых в мировом научном сообществе, а также использованием протестированных программных продуктов, разработанных на современном уровне, проведением сравнения результатов расчета, полученных разными подходами (методами) или сравнением данных расчета с результатами, полученными исследователями для других регионов.

Основные положения диссертации докладывались на ряде международных и всероссийских конференций и совещаний, в том числе: на двух ассамблеях «The 2011 International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly», Melbourne, Australia, from 28 June to 7 July, 2011; «33rd General Assembly of the European Seismological Commission (GA ESC)», Moscow, 19–24 August, 2012; на девяти международных симпозиумах World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium WMESS 2015 7–11 September, 2015 – Prague, Czech Republic; 2018 3–7 September, 2018 – Prague, Czech Republic, «Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы», Бишкек, 15–20 июня 2008; 19–24 июня 2011; 23–29 июня 2014; 19–24 июня 2017; 28 июня – 2 июля 2021; 24–29 июня 2024; на четырех международных конференциях «Problems of Geocosmos», St. Petersburg, 20–24 September, 2010; 6–10 October, 2014; 03–07 October, 2022; 22–24 April, 2024; на пяти российских конференциях с международным участием «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», Новосибирск, 6–10 июля 2009; «Конференция, посвященная 50-летию сейсмологического мониторинга Сибири», Новосибирск, 21–25 октября 2013; «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле», Москва, 8–12 октября 2012; 3–7 октября 2016; 6–9 октября 2020; 7–12 октября 2024; III Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы», г. Южно-Сахалинск, 27–31 мая 2019; II

Всероссийская научная конференция «Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов», посвященная 300-летию Российской академии наук, 22–24 октября 2024 г.

Личный вклад автора состоит в постановке и решении ряда сейсмологических задач для определения закономерностей очаговых параметров землетрясений Северного Тянь-Шаня. В публикациях по теме диссертации автором написано более 2/3 объема текста и сделаны выводы. По тематике диссертационной работы диссертант являлся руководителем проектов РФФИ (№ 09-05-00687а, № 12-05-00234-а и № 15-05-06857а). В соавторстве разработаны программы для ЭВМ, на которые получены свидетельства в Роспатенте РФ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 39 научных работ, в том числе одна монография и 24 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. 6 публикаций, проиндексированы в международных базах научных знаний Scopus, Web of Science. Получено 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 385 наименований. Работа изложена на 269 страницах машинописного текста и содержит 125 рисунков и 38 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному консультанту д.ф.-м.н. Л.М. Богомолу (ИМГиГ ДВО РАН) за всестороннюю поддержку, плодотворные дискуссии и консультации. Автор выражает признательность д.ф.-м.н., академику РАН С.А. Тихоцкому (ИФЗ РАН), д.ф.-м.н. А.К. Рыбину (НС РАН) за поддержку и создание условий для выполнения работы. Автор благодарен д.ф.-м.н. Ю.Л. Ребецкому (ИФЗ РАН), д.г.-м.н., члену-корреспонденту РАН, профессору РАН И.Ю. Кулакову (ИНГГ СО РАН), д.ф.-м.н. А.Д. Завьялову (ИФЗ РАН), к.ф.-м.н. С.И. Кузикову (НС РАН), а также коллегам – соавторам ряда публикаций: к.т.н. А.Н. Мансурову (НС РАН), д.г.-м.н. Л.А. Сим (ИФЗ РАН), к.г.-м.н. А.В. Маринину (ИФЗ РАН), к.ф.-м.н. В.Н. Сычеву (ИМГиГ ДВО РАН), к.ф.-м.н. И.В. Сычеву (ИНГГ СО РАН), а также И.И. Коваленко (НС РАН) и Н.Ю. Краснокутской (НС РАН) за обработку сейсмологических данных и формирование каталога землетрясений по данным сети KNET.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы, определяются цель и задачи исследования, описываются научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приводится структура работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Определение и анализ очаговых параметров землетрясений – путь к реконструкции напряжений и созданию геомеханических моделей сейсмогенерирующих зон (обзор состояния исследований)

Глава состоит из трех разделов. *Первый раздел* главы посвящен описанию сейсмического процесса в Тянь-Шаньском регионе. Тянь-Шань – область внутриконтинентального горообразования (рис. 1). Геологическое строение Тянь-Шаня и активную сейсмичность можно объяснить следствием столкновения Индостана и Евразии. Движение Индостана на север обеспечивает утолщение и укорочение коры на большой территории [Molnar, Tapponnier, 1975]. В Тянь-Шане выделяют Западную, Центральную и Восточную провинции. По возрасту основных фаз тектогенеза он разделяется на Северный, Южный и Срединный. К *Северному Тянь-Шаню* принято относить хребет Кетмень, Заилийский Алатау, Кунгей-Алатау и Киргизский Алатау (Киргизский хребет) [Буртман, 2012]. Южной границей Северного Тянь-Шаня является линия Николаева [Макаров, 2005].

Центральный Тянь-Шань занимает обширную территорию, окаймленную хребтами: Ферганским – на западе, Заилийским, Киргизским, Таласским Алатау – на севере, Меридиональным – на востоке и Кокшаал-Тоо – на юге [Буртман, 2012]. Киргизский хребет ограничивает Центральный Тянь-Шань с севера, относясь, таким образом, одновременно к обоим регионам. К *Западному Тянь-Шаню* относятся хребет Таласский Алатау с отходящими от него хребтами: Чаткальским, Сандалашским, Пскемским, Майдантальским и Угамским. На востоке находится Ферганский хребет. На юге расположены хребты Туркестанский, Гиссарский, Зерафшанский, Алайский, Кичик-Алай и Восточный Алай.

Основными объектами исследования в работе являются Северный Тянь-Шань, а также отдельно рассматривается территория БГП, расположенная в Северном и частично в Центральном Тянь-Шане (отмечена штрихпунктирной линией на рис. 1).

Тянь-Шаньский эпиплатформенный ороген почти целиком располагается в области 8–9-балльной сейсмичности. На исследуемой территории отмечены многочисленные землетрясения с магнитудой 7 и даже более 8. Основная масса эпицентров сильных землетрясений с $M \geq 5$ закономерно вытягивается в виде двух сейсмогенных зон – Северо-Тянь-Шаньской и Гиссаро-Кокшаальской (Южно-Тянь-Шаньской). Эти две крупные зоны, называемые сейсмоактивными швами первой категории, являются границами между крупными блоками Туран–Тянь-Шань–Тарим. В пределах этих сейсмоактивных швов возможны предельные для земной коры магнитуды землетрясений – $M > 8$. Сильные исторические и современные землетрясения, произошедшие на рассматриваемой территории, отмечены звездочками на рис. 1. Последнее сильное землетрясение – Суусамырское (19.08.1992, $M = 7.3$).

Очаги землетрясений киргизской части Тянь-Шаня залегают в пределах земной коры [Юдахин, 1983]. Наиболее широкое распространение имеют очаги с глубинами 5–15 км, меньше – 16–20 км и еще меньше – более 25 км. Очаги глубже 30 км на исследуемой территории встречаются крайне редко [Бунэ, Горшков, 1980; Турдукулов, 1996]. Катастрофические последствия разрушительных землетрясений поставили перед человечеством вызов – обеспечить безопасность населения и уменьшить материальный ущерб от этой стихии. Проблема сейсмической безопасности остро стоит для региона Северный Тянь-Шань. На ее решение направлены геофизические и сейсмологические исследования глубинных геодеформационных процессов, определяющих подготовку сильных тектонических землетрясений. Исследования включают анализ возможных геофизических, сейсмологических и других предвестников землетрясений. Для продвижения таких исследований в Северном Тянь-Шане в 1980-е годы был развернут комплексный полигон, получивший известность благодаря применению мощных источников электротондирований и плотной сети геофизических измерений. Впоследствии, уже в 1990-е годы, этот полигон был назван Бишкекским геодинамическим полигоном.

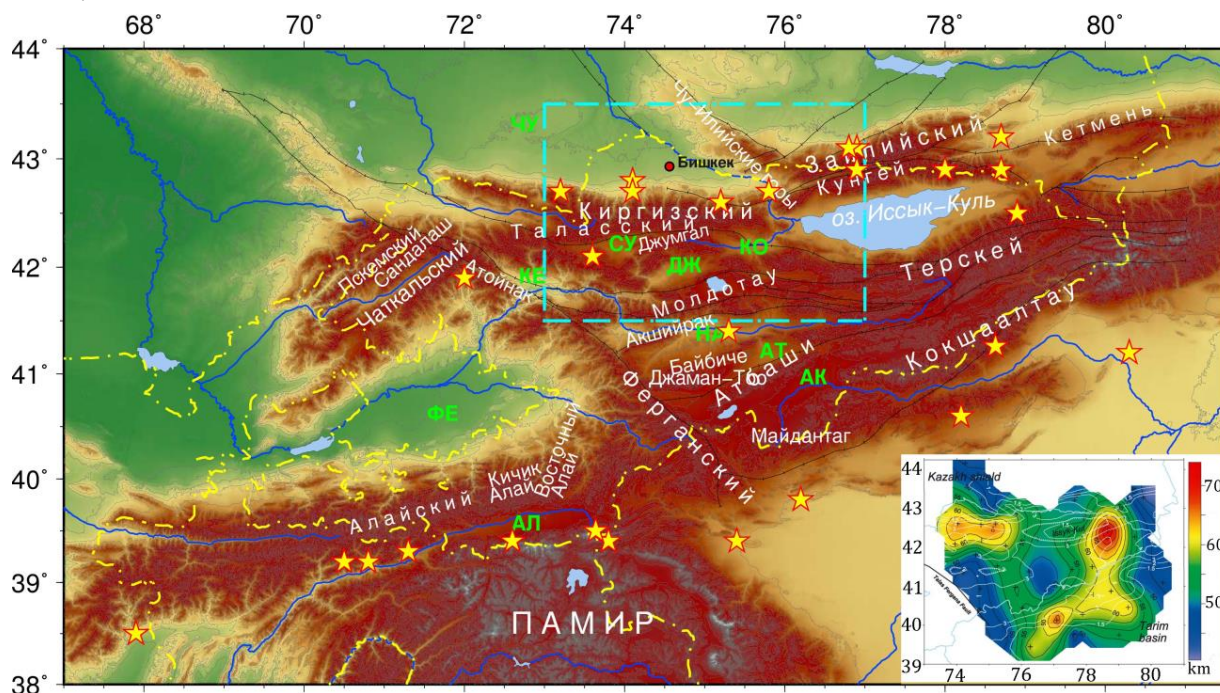


Рисунок 1 – Горные хребты, долины и реки Западного и Центрального Тянь-Шаня. Черные линии – региональные разломы. Прямоугольником отмечена территория БГП. Звездочки – положение сильных исторических и современных землетрясений. На врезке – карта глубины залегания поверхности Мохо [Vinnik, 2004]. Межгорные и предгорные впадины: АЛ – Алайская, АК – Аксайская, АТ – Атбашинская, ДЖ – Джумгалская, КЕ – Кетмень-Тюбинская, КО – Кочкорская, НА – Нарынская, СУ – Суусамырская, ЧУ – Чуйская. Желтая штрихпунктирная линия – границы государств

Второй раздел содержит краткое описание исследуемой территории – Бишкекского геодинамического полигона (Северный Тянь-Шань). Приводится модель верхней части земной коры, которая представляется в виде системы блоков, возникшей на разных этапах

геологического развития и последовательно усложнявшейся [Абдрахматов, 2003, 2016]. Границами блоков служат разломы, многие из которых имеют большую глубину залегания. В течение неотектонического этапа блоки испытали движения разных знаков и интенсивности. В обсуждаемой модели рассматриваются блоки преобладающих поднятий и опусканий, а также относительно устойчивые участки.

Третий раздел посвящен обзору работ по очаговым параметрам. Подавляющий объем накопленной в современной сейсмологии экспериментальной информации по механизмам очагов землетрясений получен на основе данных о полярности вступлений сейсмических волн. Развитие цифровых сейсмологических сетей позволило разработать методы, позволяющие производить расчет синтетических сейсмограмм, которые могут быть использованы в сравнении с наблюдаемыми в действительности сейсмограммами. Этот метод носит название волновой инверсии. На современном этапе оба метода активно используются для расчета фокальных механизмов, и результаты исследования по рассматриваемому региону опубликованы в работах О.А. Кучай (1984, 1990, 2002, 2009), А.М. Муралиева (1983, 2006, 2008, 2010), К.Д. Джанузакова (1997), А.Д. Костюка (2008, 2010) и др.

Для реконструкции деформаций и напряжений по сейсмическим данным используют метод сеймотектонической деформации (СТД) и метод катакластического анализа разрывных нарушений (МКА). Несмотря на то, что метод СТД был предложен в 1980-е годы, в настоящее время он остается актуальным. Результаты исследования напряженно-деформированного состояния различных регионов Тянь-Шаня и Памира представлены в работах О.А. Кучай (2007, 2008, 2017), Ю.Л. Ребецкого (2012, 2013, 2014, 2016, 2024), А.А. Лукка (2005, 2008, 2020), В.Г. Трифонова (2002, 2005) и др.

По исследованию добротных характеристик среды и расчету калибровочных функций сейсмических станций, которые важны для построения очагового спектра, известны работы А.Г. Земцовой (1985), Ю.Ф. Копничева и И.Н. Соколовой (2004, 2007, 2011, 2012, 2019), О.И. Аптикаевой (2018), С.Ж. Орунбаева (2018), Ш.Э. Усупаева (2010, 2011, 2014) и др.

Разработка новых подходов к прогнозированию разрушительных землетрясений и уменьшению их последствий включает, при необходимости, расширение объема данных о спектральных характеристиках очагов землетрясений и определяемых на их основе динамических параметров. Для территории Северного Тянь-Шаня расчеты динамических параметров для умеренных и слабых событий ранее проводились лишь в работе З.А. Кальметьевой и И.В. Горбуновой (1988). Для других регионов поиску корреляций между значениями радиуса очага r (радиуса Брюна), скалярного сейсмического момента M_0 и магнитуды M было посвящено большое число работ, в том числе работы Г.Г. Кочаряна (2014, 2016), R.E. Abercrombie (2005), J. Mori (2003), В.Р. Allmann (2009), А. Baltay (2010, 2011), В.Е. Shaw (2015), F. Pacor (2016) и др. Для различных сейсмоактивных регионов установлены соответствующие им соотношения, которые, как правило, представляют собой линейные зависимости в логарифмическом масштабе. Наиболее известными среди таких соотношений можно считать среднюю корреляционную

зависимость между M и M_0 (Н·м) из работы Ю.В. Ризниченко и численно близкую к ней зависимость Х. Канамори.

Выводы к первой главе

1. Сейсмичность в зоне сочленения Тянь-Шаньского орогена и Казахской плиты (Северный Тянь-Шань) является проявлением современных региональных и локальных геодформационных (тектонических) процессов. Данные о геологическом строении этого региона и современной геодинамике не могут объяснить особенности сильных землетрясений на его территории: геофизические предвестники отсутствуют или выражены значительно слабее, чем в других регионах.
2. Для продвижения исследований возможностей прогноза ЗЛТ в Северном Тянь-Шане важно изучение очаговых параметров землетрясений и параметров напряженно-деформированного состояния среды. Для этого актуально массовое определение кинематических (фокальных) и динамических параметров землетрясений и создание банков данных, включающих сильные, умеренные и, по возможности, слабые сейсмические события.
3. Наличие современной цифровой сейсмологической сети KNET и сети глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) на территории Бишкекского геодинамического полигона обеспечивает возможность все более подробного исследования ключевых проблем геодинамики и сейсмической опасности территории Северного Тянь-Шаня. Сейсмические данные предоставляют существенную часть информации о напряженном состоянии земной коры, сравнение которой с данными ГНСС-наблюдений представляет значительный интерес.

Глава 2. KNET – особенности первичной обработки данных и подготовки локального каталога землетрясений.

Основная часть исследований в работе проведена на основе данных сейсмологической сети KNET. В связи с этим все четыре раздела главы содержат описание различных аспектов работы этой сети и качества полученных данных.

Первый раздел содержит краткую историю развития сети KNET, которая была установлена вокруг г. Бишкека в августе – сентябре 1991 года. Сеть представляет собой часть совместной Сейсмической программы США – СССР, осуществляемой в рамках Договора об ограничении подземных испытаний ядерного оружия. Описание местоположения станций и технического оборудования, установленного на них, а также системы реального времени, которая работает на станциях сети KNET с середины 1998 года, представлено в [Сычева, Богомолов, Кузиков, 2020].

Успех решения различных сейсмологических задач, основанных на анализе волновых форм, в большей степени зависит от качества данных. В связи с этим в работе проведен анализ уровня сейсмического шума станций сети [Сычева и др., 2020; Sycheva, Mansurov, 2019; авт. св-во № 2020061813 РФ], результаты которого также приведены в первом разделе главы. По каждому каналу сейсмологической станции сформированы

пятнадцатиминутные сегменты сейсмического шума с частотой дискретизации 100 Гц по временам года (март, июнь, сентябрь, декабрь) и временам суток (0, 6, 12 и 18 ч UTC). Рассчитаны вероятностные спектральные плотности мощности сейсмического шума (ВСПМ, рис. 2; дан пример для двух станций). Уровень сейсмического шума, мало зависящий от времени года на периодах 2–5 с (0.2–0.5 Гц), незначительно понижается в летнее время года и повышается в холодное на периодах 5–10 с (0.1–0.2 Гц), для периода 0.02–2 с (0.5–50 Гц) менее благоприятным является сентябрь. В диапазоне периодов 0.02–10 с (0.1–50 Гц) станции сети KNET в целом обладают характеристиками, позволяющими отнести их к разряду маломушьящих.

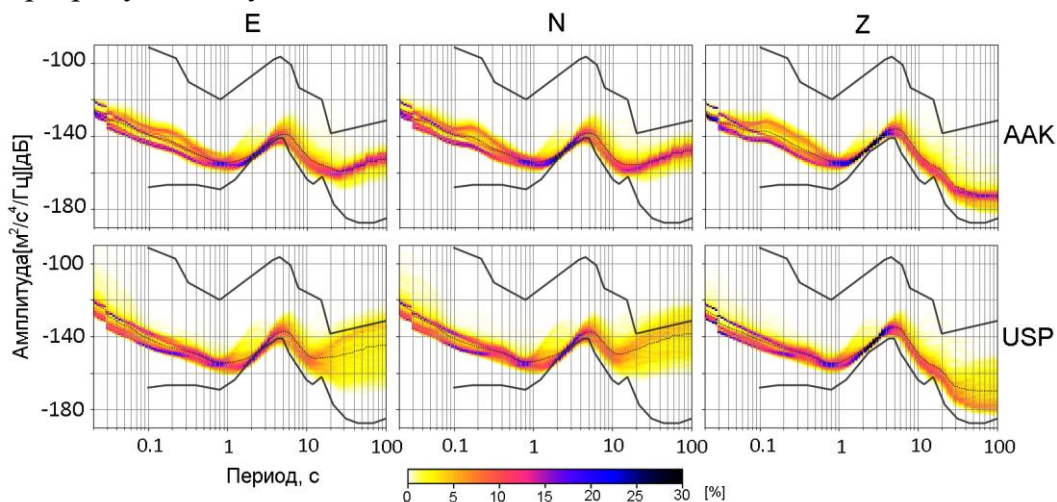


Рисунок 2 – ВСПМ сейсмического шума по всем каналам 2-х станций сети KNET (в качестве примера), построенные по описанному в тексте набору данных. Тонкой черной пунктирной линией на рисунке ВСПМ показана кривая зависимости среднего значения ВСПМ от частоты. Черной линией указаны эталонные модели [Peterson, 1993]

Несмотря на хорошую автоматическую регистрацию сетью KNET локальных и сильных далеких событий, на Научной станции РАН формируется каталог землетрясений, для которых разница во времени между приходом *P*- и *S*-волн не превышает 20 с (~600 км от станций сети).

Второй раздел посвящен описанию программ, используемых при локализации землетрясений, и исследованию по определению предпочтительной скоростной модели среды (из существующих). Уточнение параметров гипоцентров землетрясений включает в себя корректировку времен прихода *P*-волн и определение времен прихода *S*-волн на станции, которые не определены при автоматической обработке (пакет Antelope), а также пересчет параметров гипоцентра на основе уточненных данных. Программа расчета параметров гипоцентров из пакета Antelope использует таблицу годографов, рассчитанных на основе простой двухслойной модели, и вычисляет локальную магнитуду M_L . Для заключительного расчета параметров гипоцентра используется программа Hypocenter, основанная на центрировании, масштабировании и адаптивном способе решения уравнений методом наименьших квадратов. Она позволяет использовать априорно заданную скоростную модель среды и рассчитывать класс землетрясения. Точность

расчета параметров землетрясений зависит от скоростной модели среды. Выбор оптимальной скоростной модели выполнен на основе сравнительного анализа четырех наиболее известных скоростных моделей литосферы Центрального Тянь-Шаня [Сычева, Кузиков, 2012; Сычева, Богомолов, Кузиков, 2020; Сычева, Баскевич, 2011]. При исследовании скоростных моделей анализировались различные характеристики расчета гипоцентров: среднеквадратическое отклонение невязок прихода сейсмических волн (RMS), ошибки по горизонтали (ERH) и вертикали (ERZ). По результатам анализа в качестве предпочтительной была выбрана модель Стива Роекера (1993), которая и используется программой *Hypocenter*. Каталог землетрясений, полученный по данным сети KNET, на настоящий момент включает в себя более 10 500 сейсмических событий, которые произошли на территории, контролируемой сетью за 1994–2020 годы. Эпицентры землетрясений из каталога представлены на рис. 3А.

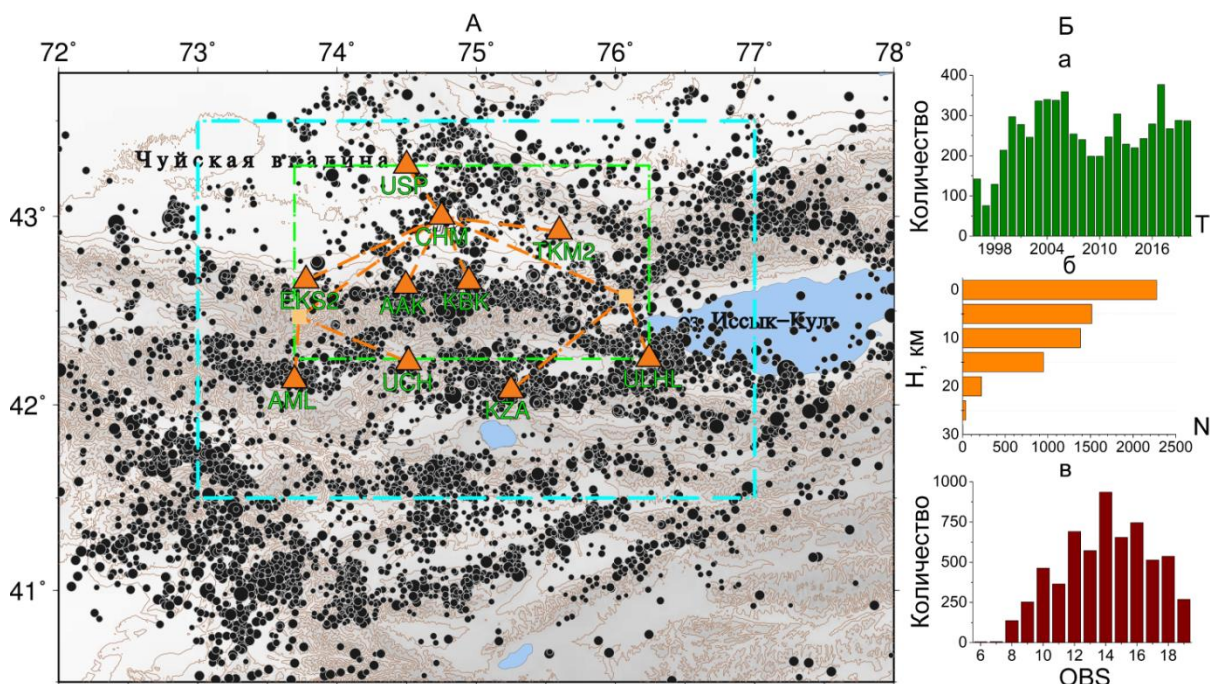


Рисунок 3 – А – эпицентры землетрясений по данным сети KNET (1994–2020 гг.) и положение станций сети KNET (треугольники). Штриховая линия – границы БГП (41.5–43.5°с.ш. – 73–77° в.д.). Б – количественное распределение землетрясений: а – по времени; б – по глубине; в – по количеству зарегистрированных фаз (время прихода Р- и S-волн на станцию)

Третий раздел посвящен описанию каталога землетрясений и результатам анализа сейсмичности на основе данных KNET. За исследуемый период (1994–2020 гг.) обработано 10 604 землетрясения. Каждому событию соответствует свой *arrival*-файл, содержащий времена прихода Р- и S-волн (фазы) на станции. За исследуемый период станциями сети зарегистрировано 130 265 времен прихода Р- и S-волн: 70 423 по Р- и 59 842 по S-волне [Сычева, 2022; Sychev, Sycheva, 2020]. Наибольшей плотностью трасс объемных волн покрыта территория БГП. Эти данные могут быть использованы при решении различных сейсмологических задач. Согласно каталогу землетрясений, наиболее сейсмически активными являются 1996, 1999, 2004, 2012 и 2017 годы (рис. 3Ба). Основную часть

каталога составляют слабые события ($M = 1.1-2.2$, $K = 6-8$), произошедшие на глубине 0–15 км (рис. 2Бб). Большая часть событий определена по 12–16 фазам (рис. 2Бв), при этом максимально возможное количество фаз при заданной конфигурации сети может быть равно 20.

В четвертом разделе главы представлены характеристики сейсмичности, полученные по данным каталога KNET: изменение количества событий с заданной энергетической характеристикой во времени, распределение землетрясений по глубине и по территории; отдельно рассмотрены землетрясения умеренной силы, афтершоки и форшоки. Отмечено отсутствие значительного положительного или отрицательного тренда изменения количества событий с заданной энергетической характеристикой во времени. Значительная часть землетрясений происходит в сейсмогенерирующем слое 5–15 км. Землетрясения, произошедшие на глубине 0–5 км, локализованы за пределами расположения станций сети. Такой результат, скорее всего, связан с артефактами вычислительного процесса [Сычева, 2022; Sychev, Sycheva, 2020]. За указанное время зарегистрировано 46 землетрясений умеренной величины с $K \geq 12$ ($M \geq 4.4$, пересчет в магнитуду осуществлен на основе зависимости $K = 1.8 \cdot M + 4$ [Ризниченко, 1985]) (см. рис. 4). Основная часть этих землетрясений сосредоточена вдоль Таласо-Ферганского разлома, по восточным бортам Ферганской впадины и в Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенерирующей зоне. К наиболее значимым землетрясениям можно отнести Кочкорское (25.12.2006, $K = 14.8$, $M_w = 5.8$ [Муралиев и др., 2012]) и Луговское (22.05.2003, $K = 14.2$, $M = 5.6$). Последнее сильное землетрясение в исследуемом регионе – Суусамырское 19.08.1992 с $M = 7.3$.

Некоторые характеристики каталога землетрясений определялись после удаления из него афтершоков методом локального отношения интенсивностей (ЛОИ), разработанным [Молчан, Дмитриева, 1991]. Выделено 22 землетрясения с $K \geq 10$ ($M \geq 3.3$), которые сопровождались афтершоками (см. рис. 4). Максимальное количество афтершоков последовало после событий 21.04.2017 ($K = 12.1$) и 22.05.2003 ($K = 14.2$) – 72 и 70 афтершоков соответственно. Количество афтершоков слабо зависит от класса события, что отмечено в работах и других авторов. Более детальные исследования афтершоков представлены в работах [Сычев, Сычева, Имашев, 2019; Мухаммадеева, Сычева, 2018; Sychev, Sycheva, 2021; 2019]. После удаления афтершоков для каталога был построен график повторяемости и кумулятивное распределение Гутенберга – Рихтера, по которому определены линейная часть и параметры уравнения регрессии. Для территории БГП представительная часть включает события с $K \geq 6.7$, для полного каталога – с $K \geq 7.2$. Сеть KNET расположена на территории БГП и в полном объеме регистрирует события с $K \geq 6.7$, происходящие на этой территории [Сычева, 2022; Sychev, Sycheva, 2020]. Для анализа слабой сейсмичности по данным сети KNET целесообразно ограничиваться территорией БГП.

Одним из предвестников крупного землетрясения могут являться форшоковые события. Для исследования вопроса о том, насколько форшоки могут служить прогнозным признаком для землетрясений Северного Тянь-Шаня, был рассмотрен каталог землетрясений, полученный на основе данных сети KNET за 1996–2020 гг. Из каталога были выбраны землетрясения с $K \geq 12$ (землетрясения умеренной силы). За исследуемый

период произошло 46 таких сейсмических событий: 31 землетрясение с $12 \leq K < 13$ и 15 землетрясений с $K \geq 13$. Минимальная энергетическая характеристика землетрясения составила $K = 12$, максимальная – $K = 14.8$.

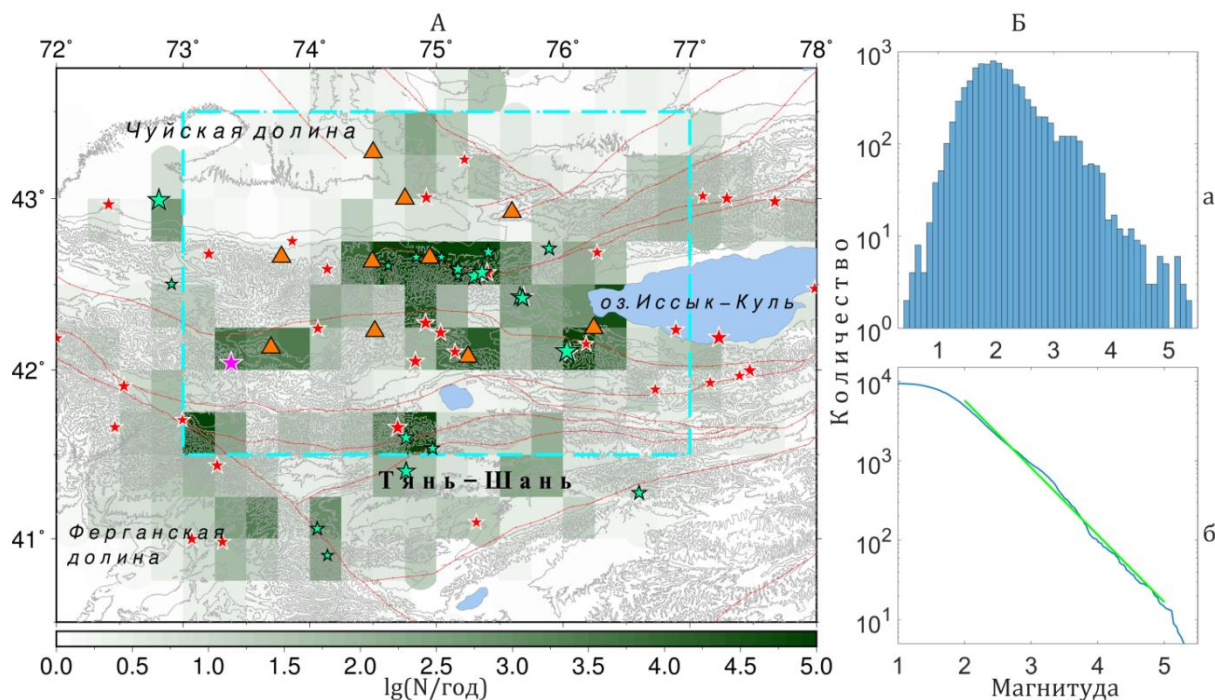


Рисунок 4 – А – количественное распределение землетрясений в год. Звездочками отмечено положение умеренных землетрясений (красный цвет, $M \geq 4.4$ ($K \geq 12$)) и событий с афтершоками (зеленый цвет, $M \geq 3.3$ ($K \geq 10$)). Бирюзовая штрихпунктирная линия – границы БГП. Треугольники – положение станций сети KNET. Б – график повторяемости и распределение Гутенберга – Рихтера, рассчитанные для каталога по данным сети KNET

Форшоковые события наблюдались для 28 % землетрясений с $K \geq 12$. По большей части это слабые события, которые можно принять за регулярную сейсмичность. Максимальное количество форшоковых событий произошло за два дня до главного события 21.04.2017 с $K = 12.1$ (6 событий). Это единственный пример, когда форшоки могли быть предвестником главного толчка.

Согласно количественному распределению землетрясений в год, рассчитанному по ячейкам размером $0.25 \times 0.25^\circ$, более пяти землетрясений в год происходит в восточной части хребта Молдотау, вдоль Иссык-Атинского разлома ($74.25\text{--}75.5^\circ$ в.д, в восточной части северных предгорий Киргизского хребта) и в юго-восточной части Кочкорской впадины. В указанных областях произошли землетрясения, за которыми последовали афтершоки. Значимое число землетрясений с афтершоками произошло в восточной части северных предгорий Киргизского хребта. Центральную часть Таласо-Ферганского разлома также можно отнести к области активной сейсмичности. К асейсмичным можно отнести область Джумгальской впадины и западную часть Чуйской впадины (рис. 4).

Выводы ко второй главе

1. Уровень сейсмического шума станций сети KNET позволяет отнести их к малозумящим. Качественные сейсмограммы, полученные при эксплуатации Киргизской сейсмологической сети KNET, пригодны для использования при расчете очаговых параметров (кинематических и динамических) для большого числа землетрясений в исследуемом регионе, сопоставимого с общим числом зарегистрированных событий с магнитудами $M > 3$.
2. Для расчета параметров гипоцентров локальных землетрясений предпочтительной является скоростная модель, предложенная в работе Стива Роеккера для территории Тянь-Шаня.
3. Для каталога землетрясений по данным сети KNET представительными являются события, начиная с $M \geq 1.8$ ($K \geq 7.2$). Для каталога, ограниченного координатами Бишкекского геодинамического полигона ($41.5\text{--}43.5^\circ$ с. ш., $73\text{--}77^\circ$ в. д.), представительными являются землетрясения, начиная с $M \geq 1.5$ ($K \geq 6.7$).
4. Каталог землетрясений, банк времен прихода P - и S -волн, а также волновые формы, полученные на основе данных сети KNET, обеспечивают хороший задел для решения различных сейсмологических задач.

Глава 3. Исследование распространения сейсмических волн в среде (Функции Грина)

Глава состоит из трех разделов. Она представляет результаты исследования добротных характеристик среды [Сычева, Сычев, 2017; 2015; Sychev et al., 2018; Сычева и др., 2015; Сычева, 2017], для расчета которых разработаны программы (авт. св-во 2018610919 РФ).

Первый раздел посвящен оценке поглощающих свойств (Q -фактор) коры и верхней мантии территории БГП на основе анализа кода-волн локальных землетрясений. Для оценки добротности среды территории БГП достаточно оценить добротность в окрестности расположения каждой станции сети KNET. Если радиус окрестности выбрать 100 км, то пересечения таких областей покрывают всю территорию БГП. Для определения добротности рассматривался участок кода-волн на разных частотах (0.75, 1.5, 3, 6, 12, 24 Гц) и различной длительности (5, 10, 20, 30, 40 и 50 с). Исследование кода-волн на разных частотах позволяет получить функцию зависимости добротности от частоты, увеличением длительности оценить поглощающие свойства более глубоких слоев среды.

Для каждой станции сети (в окрестности с $R = 100$ км) получены оценки добротности для всех рассматриваемых частот и исследуемых участков кода-волн разной длительности. Суммарное рассмотрение этих оценок отнесено ко всей территории БГП. Эмпирическая зависимость добротности от частоты для БГП при глубине исследования 80 км (20 с) представляет собой функцию вида $Q_c(f) = (80 \pm 4)f^{(0.9 \pm 0.02)}$. Значения Q_0 и показатель степенной зависимости от частоты n удовлетворяют значениям, характерным для тектонически активных регионов. Изменение показателя n и значения Q_0 в зависимости от глубины исследования для всех станций сети KNET и БГП представлено

на рис. 5а и 5б. Построена зависимость коэффициента затухания сейсмических волн δ (определенного на частоте 1 Гц) от глубины исследования (рис. 5в). Поглощающие свойства среды меняются по экспоненциальному закону до глубины 80 км. Проведено сравнение δ с границей Мохо на исследуемой территории.

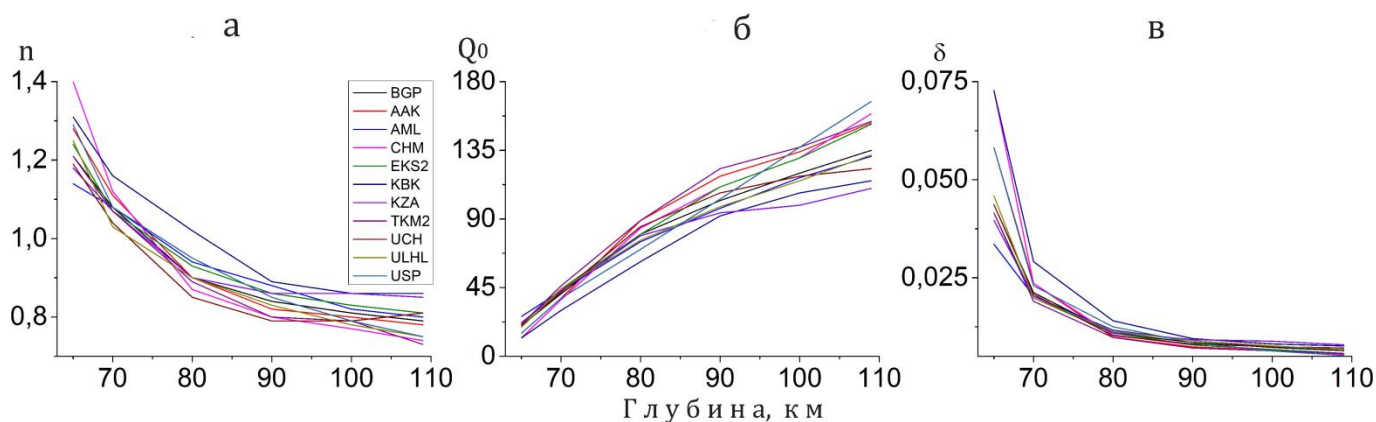


Рисунок 5 – Изменение показателя степени n (а), значения Q_0 (б) и коэффициента затухания (в) в зависимости от глубины исследования для станций сети KNET и БГП

Во втором разделе главы представлены методика и результаты расчета поля затухания территории БГП [Sychev et al., 2018]. Расчет выполнен на основе метода томографической инверсии. В качестве исходных данных использовались сейсмические записи и данные о временах прихода сейсмических волн более 6000 землетрясений, зарегистрированных сейсмической сетью KNET с 1999 по 2014 г. Для томографии скоростей сейсмических волн были выбраны данные с общим числом времен прихода P - и S -волн на событие, равным или больше 10. Времена прихода P - и S -волн были приведены к трехмерным моделям P - и S -скоростей и локации событий с использованием итеративного кода LOTOS Ю.И. Кулакова (2009), реализующего алгоритм томографии с пассивным источником. Итерационная процедура томографической инверсии начинается с перемещения источников, на основе использования обновленной трехмерной модели P - и S -скоростей. На этом этапе был использован градиентный метод оптимизации, который позволяет быстро вычислить наиболее вероятное местоположение источника. Время в пути вычислялось с использованием 3D-трассировщика лучей на основе принципа минимизации времени (алгоритмы изгиба), предложенного Um and Thurber (1987).

Инверсия выполняется одновременно для определения аномалий скорости P - и S -волн, поправок координат источников, времени начала событий и поправок станций. Инверсия на большой разреженной матрице была выполнена с использованием алгоритма LSQR [Paige and Saunders, 1982; Nolet, 1987].

Результаты исследования представлены для территории чуть шире, чем рассматриваемая территория БГП. На картах затухания P - и S -волн на глубинах 5 и 15 км (рис. 6) отчетливо видно, что зоны с более высоким затуханием в основном связаны с горными районами, в то время как аномалии с низким уровнем затухания соответствуют устойчивым сегментам Казахского щита. Депрессия озера Иссык-Куль связана с локальным уменьшением затухания в моделях ослабления P - и S -волн. Также можно

идентифицировать локальное увеличение затухания вдоль Чу-Илийских гор, отделяющих бассейн реки Чу от остальной части Казахской плиты.

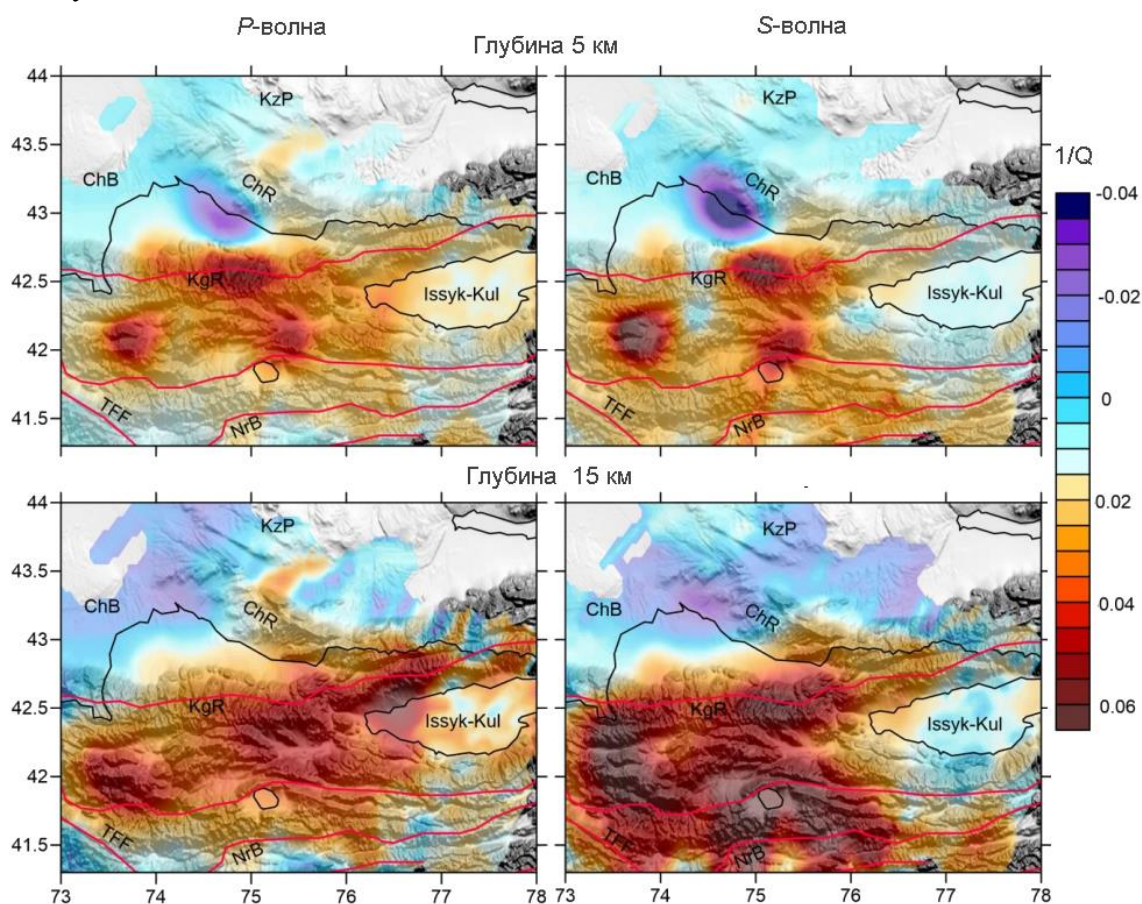


Рисунок 6 – Отклонения от средних значений затухания скоростей P - и S -волн в горизонтальных сечениях. Красные линии – основные разломы. Фоном является топография. Сокращения: ChB – Чуйский бассейн, KzP – Казахская плита, ChR – Чу-Илийские горы, KgR – Киргизский хребет, TFF – Таласо-Ферганский разлом, NrB – Нарынская впадина

Поскольку поля затухания для P - и S -волн вычислялись отдельно друг от друга и инверсии выполнялись независимо, была проверена корреляция структур затухания P - и S -волн, которая оказалась высокой, что указывает на надежность результатов. Действительно, значительно деформированная и трещиноватая кора в горных районах сильно рассеивает сейсмические волны и аналогичным образом приводит к затуханию P - и S -волн. Во впадинах Казахского щита рассеивание относительно низкое, и волны распространяются с незначительным ослаблением.

В третьем разделе главы представлены результаты расчета стационарных поправок станций сети KNET [Сычева, Мансуров, 2018; Сычева, Богомолов, Кузиков, 2020; авт. св-во № 2017662696 РФ]. Такие исследования необходимы для учета влияния на сейсмические волны небольшого слоя горных пород низкой плотности, расположенного непосредственно под сейсмической станцией, который может порождать резонанс сигнала и усиливать его. Стационарные поправки получены на основе вычисления отношения спектра горизонтальных компонент сигнала к спектру вертикальной компоненты (метод

Накамуры). Проанализированы записи S -волн 90 локальных землетрясений и более 5000 60-секундных записей сейсмического шума (рис. 7а, 7б).

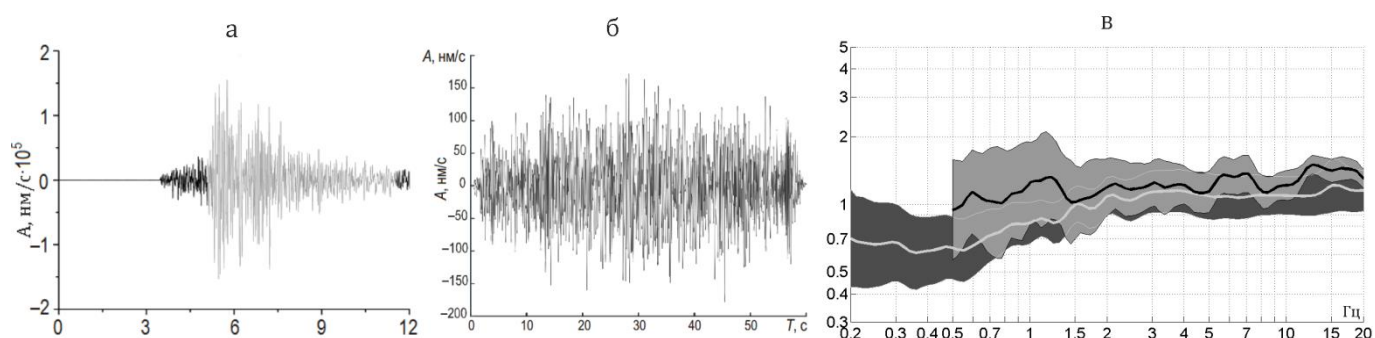


Рисунок 7 – а – пример записи землетрясения (серым цветом выделена часть записи, используемая для анализа); б – пример записи сейсмического шума; в – сравнение спектральных отношений N/V для землетрясений (черные графики на сером фоне) и сейсмического шума (серые графики на черном фоне) для станции ULHL. Залитые серым и черным области демонстрируют диапазон среднеквадратичных отклонений

Проведено сравнение станционных поправок, полученных на основе анализа сейсмического шума и землетрясений; они в целом согласуются (рис. 7в). На отдельных участках рассматриваемого диапазона частот (1–20 Гц) наблюдаются некоторые различия в форме графиков зависимости величины поправки от частоты; на станциях ААК, АМЛ, КЗА отличается и диапазон этих значений. При этом на всех станциях отсутствуют сильные резонансные явления во всем диапазоне рассматриваемых частот. Для станций ААК, АМЛ, КВК, ТКМ2 отмечены незначительные резонансные эффекты на отдельных участках исследуемого диапазона частот; для станций СНМ, ЕКС, КЗА, УСН, ULHL, USP значения станционных поправок всюду близко к единице, и ими можно пренебречь. Полученные станционные поправки могут быть использованы при расчете очаговых спектров землетрясений.

Выводы к третьей главе

1. На основе применения модели однократного рассеяния к кода-волнам землетрясений установлены параметры Q_0 и n , описывающие частотную зависимость добротности для областей радиусом 100 км вокруг станций сети KNET и для территории БГП в целом. Эти параметры определены для глубин 65, 70, 80, 90, 100 и 109 км.
2. Наблюдается высокая скорость изменения коэффициента затухания до глубины 80 км, после чего коэффициент затухания меняется незначительно.
3. На основе метода томографической инверсии получены модели затухания сейсмических волн (P и S), и на глубинах до 15 км выявлены области с более высоким (горные хребты) и низким (впадины) ослаблением сейсмических волн.
4. Станции сейсмологической сети KNET расположены на гранитном основании и не порождают резонансных эффектов.

Полученные в главе результаты доказывают четвертое защищаемое положение.

Глава 4. Кинематические параметры очагов землетрясений

Глава состоит из трех разделов и посвящена расчету фокальных механизмов и тензоров сейсмического момента (ТСМ) применительно к условиям размещения станций сети KNET.

Подавляющий объем накопленной в современной сейсмологии экспериментальной информации о механизмах очагов землетрясений получен на основе данных по полярности вступлений сейсмических волн. В настоящее время, в условиях оснащенности все большего числа сейсмических станций цифровой аппаратурой, этот источник продолжает оставаться важнейшим. Метод волнового моделирования, который активно используется при решении различных сейсмологических задач, позволяет произвести расчет синтетической сейсмограммы, используемой для сравнения с наблюдаемыми в действительности реальными сейсмограммами. Определение механизмов очагов в работе выполнено по знаку прихода P -волны [Сычева, Сычев, 2015; Сычева и др., 2005], а при определении ТСМ используется метод волновой инверсии [Сычева, 2016; Сычева, 2020, 2024]. Особенности обработки и результаты исследований по каждому методу представлены в отдельных разделах.

Одним из условий надежного определения фокального механизма по знакам первых вступлений P -волн является полнота азимутального охвата эпицентра пунктами наблюдений. Исходя из конфигурации станций сети KNET, расчет механизма очага по знаку вступления P -волны возможен для землетрясений, произошедших на территории, ограниченной координатами краевых станций сети ($42.0\text{--}43.0^\circ$ с.ш. и $73.75\text{--}76.0^\circ$ в.д.), что представляет собой небольшую площадь $100 \times 300 \text{ км}^2$, расположенную на территории Северного Тянь-Шаня (отмечена зеленым прямоугольником, см. рис. 3А). Метод волновой инверсии для расчета тензоров сейсмического момента на основе данных сети KNET позволяет расширить эту площадь и дополнительно рассматривать землетрясения, произошедшие за пределами расположения станций сети в пределах $1\text{--}2^\circ$.

В первом разделе главы описана используемая силовая модель очага землетрясения, система параметров, а также рассмотрены вопросы наглядного графического представления фокального механизма. Как правило, механизм очага характеризуется ориентацией в пространстве своих главных осей снимаемых напряжений P и T . Вместе с тем возможны и другие способы представления единичного по интенсивности тензора механизма, естественные при картировании типов механизмов. В этом же разделе представлены основные кинематические типы подвижек по разлому.

Во втором разделе главы представлены результаты расчета фокальных механизмов по знакам вступления P -волн [Сычева и др., 2005; Костюк и др., 2010; Сычева, Мансуров, 2016, 2017; Сычева, Сычев, 2015]. Рассмотрены некоторые методические вопросы, описаны программное обеспечение, тип компьютера и операционной системы, используемые при расчете [Сычева, 2005]. В условиях сети KNET необходимым условием определения фокального механизма землетрясения установлено следующее: количество знаков прихода P -волны ≥ 7 . Максимальное количество знаков прихода P -волн составляет 10 (по количеству станций KNET). На рис. 8 слева представлено положение станций сети KNET и фокальные механизмы очагов землетрясений (1770 событий). Цвет механизма указывает

на тип подвижки, обозначение которой представлено на рисунке внизу. На территории Северного Тянь-Шаня наблюдается разнообразие механизмов очагов (рис. 8А): взбросы, взбросо-сдвиги, горизонтальные сдвиги, сбросы и сбросо-сдвиги. Небольшая часть событий отнесена к взрезам (разрыв с близвертикальным смещением крыльев). Некоторые количественные характеристики представлены на рис. 8Б: основную часть составляют слабые события ($M = 1.5-2.25$, рис. 8Ба), которые произошли на глубине 5–15 км (рис. 8Бб); взбросы и взбросо-сдвиги составляют 40 %, горизонтальные сдвиги (смещение по простиранию) – 36 %, взрезы (смещение по падению) – 5 %, сбросы и сбросо-сдвиги – 19 % (рис. 8Бв).

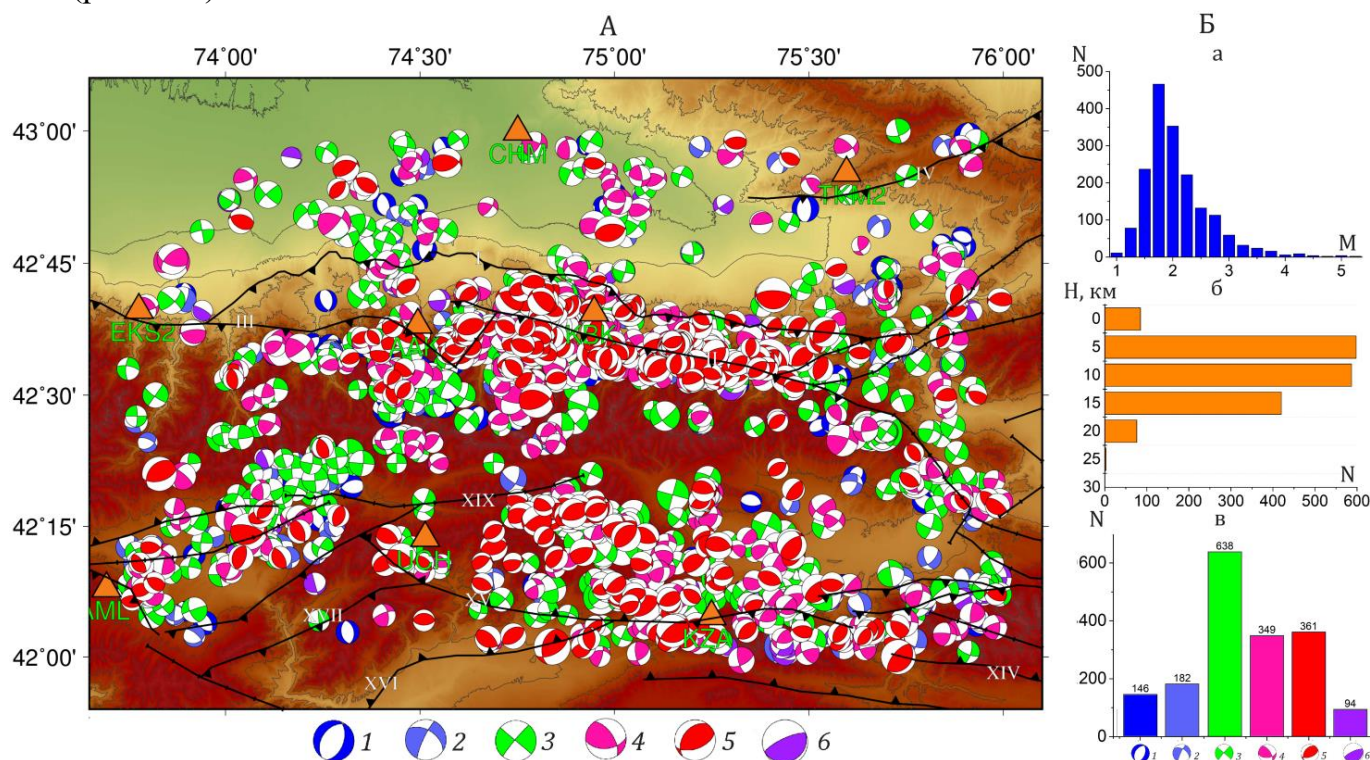


Рисунок 8 – А – фокальные механизмы очагов землетрясений: 1 – сброс; 2 – сбросо-сдвиг; 3 – горизонтальный сдвиг; 4 – взбросо-сдвиг; 5 – взброс; 6 – взрез. Треугольники – станции сети KNET. Черные линии – активные разломы Северного Тянь-Шаня по [Абдрахматов, 2016]: I – Иссык-Атинский, II – Шамси-Тюндюкский, III – Чонкурчакский, IV – Каракурузский, XIV – Центрально-Терскойский, XVI – Джумгалский, XVII – Ойгаинский, XIX – Каракольский. Б – количественное распределение механизмов: а – по магнитуде; б – по глубине; в – по типу подвижки в очаге

Во втором разделе также представлены результаты исследования распределения фокальных механизмов очагов по глубине. Основная часть сбросов и сбросо-сдвигов расположена на глубине 5–10 км, значительная часть взбросов и взбросо-сдвигов происходит на глубине более 10 км. Горизонтальные сдвиги в равной степени происходят на глубинах 5–10, 10–15 и более 15 км; взрезы малочисленны и большей частью происходят на глубине 5–10 км. Построены карты пространственного положения взбросов и сбросов. События взбросового типа расположены: в отдельных областях Чуйской впадины; вдоль северного склона центральной и восточной частей Киргизского хребта и южнее его – на горах Сандык, Карамойнок и Кызарт. События сбросового типа большей частью являются

единичными, и их концентрация отмечается только в центральной части Киргизского хребта на уровне меридиана 74.5° в.д.; несколько событий расположены в районе Суусамырской и Чуйской впадин и вдоль северного склона восточной части Киргизского хребта до Чу-Илийских гор.

Статистические характеристики главных осей снимаемых напряжений P и T позволяют определить некоторые закономерности деформационных процессов. На рис. 9 приведены диаграммы направления этих осей и количественное распределение угла наклона (к горизонтальной плоскости) для двух выборок фокальных механизмов, которые были описаны выше. Для первой выборки (1770 событий) направление осей сжатия меняется от северо-северо-западного до северо-северо-восточного (разброс ограничен сектором $330-10^\circ$ N и $150-180^\circ$ S), что характеризует состояние исследуемой территории как напряжение сжатия; для осей растяжения – от северо-восточного до юго-восточного (разброс ограничен сектором $60-110^\circ$ E и $240-270^\circ$ W), что также отражает региональный характер напряженного состояния. Субгоризонтальное положение (до 30°) имеют 75% осей сжатия и 53% осей растяжения. Для второй выборки наиболее ярко выражены северное и северо-западное направления осей сжатия и более широкий разброс направлений осей растяжения. Полученные результаты хорошо согласуются между рассматриваемыми выборками и с результатами других работ [Крестников и др., 1987; Курскеев, 2004; Костюк и др., 2010 и др.]. Построение аналогичных диаграмм для землетрясений, произошедших на разных глубинах (0–5, 5–10, 10–15 и более 15 км), показало, что с глубиной направление осей P меняется от северо-северо-западного к северному.

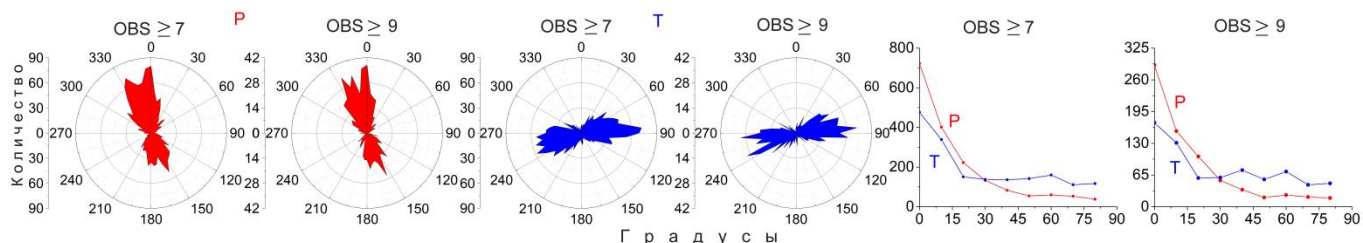


Рисунок 9 – Диаграммы распределения азимутов осей сжатия (P) и растяжения (T), а также количественное распределение углов погружения этих осей для всех событий с $OBS \geq 7$ (1770) и для событий с $OBS \geq 9$ (717)

Результаты, полученные по фокальным механизмам, согласуются с выводами, сделанными в работах [Маринин и др., 2019; Сим и др., 2014] на основе полевых тектонофизических исследований (2009–2018 гг.). Проведенные на территории Киргизского хребта (Северный Тянь-Шань) полевые исследования были нацелены на сбор геологических стресс-индикаторов и реконструкцию основных параметров локальных напряженных состояний в массивах горных пород. На рис. 10 представлено соотношение типов напряженного состояния в пределах Киргизского хребта, которое согласуется с результатами по фокальным механизмам, представленными на рис. 8в.

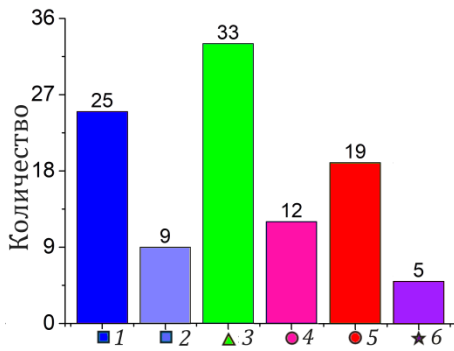


Рисунок 10 – Соотношение типов напряженного состояния в пределах Киргизского хребта по данным реконструкции геологических индикаторов напряжения: 1 – горизонтальное растяжение; 2 – горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом; 3 – горизонтальный сдвиг; 4 – горизонтальное сжатие в сочетании со сдвигом; 5 – горизонтальное сжатие; 6 – сдвиг в вертикальной/горизонтальной плоскости. Цвет режима выбран в соответствии с рис. 8в

Третий раздел главы посвящен вопросам волнового моделирования; отдельно рассмотрены тензор сейсмического момента и функция Грина телесейсмических объемных волн. Принцип, лежащий в основе волнового моделирования, – это разделение свойств источника и эффектов, накладываемых распространением колебаний. В сейсмическом волновом моделировании по Т. Лау (1995) имеется три базовых фильтра:

$$u(t) = s(t) * g(t) * i(t), \quad (2)$$

где $u(t)$ – сейсмограмма, $s(t)$ – сигнал сейсмического источника, $g(t)$ – импульсная характеристика распространения колебаний, $i(t)$ – импульсная характеристика сейсмометра. В действительности $s(t)$ и $g(t)$ могут быть разделены на несколько элементов для описания отдельных эффектов. Аналогично сейсмограмму можно представить через тензор момента:

$$u_n(x, t) = s(t) * i(t) * \sum_{i=1}^5 (m_i \cdot Green_{ni}(t)) \quad (3)$$

$$m_1 = M_{11}, m_2 = M_{22}, m_3 = M_{12}, m_4 = M_{13}, m_5 = M_{23},$$

где u_n – трехкомпонентное смещение. Сумма представляет собой произведение тензора сейсмического момента, здесь записанного как m_i (который полагается девиаторным, то есть $M_{33} = -(M_{11} + M_{22})$), и $Green_{ni}(t)$, соответствующего функциям Грина. Компоненты тензора момента в данном случае могут быть легко определены. Функции Грина – это отклики на единичный импульс смещения сейсмического источника по соответствующим компонентам для каждого элемента тензора момента. Таким образом, создание синтетической сейсмограммы осуществляется путем суммирования пяти базовых решений с различными весами. В данном случае можно пренебречь особенностями источника $s(t)$, используя только волны с большим периодом. Подбирается такое решение, при котором разница между наблюдаемой сейсмограммой и синтетической минимальна. При расчете могут быть использованы различные фазы сейсмограмм.

Наряду с изложением теоретической части волнового моделирования третий раздел главы также включает вопросы расчета TCM применительно к условиям сети KNET. При расчете TCM на основе данных сети KNET используются отраженные фазы pP и sP .

В результате применения метода инверсии к цифровым записям по данным сети KNET получены TCM для 334 землетрясений [Сычева, Сычев, 2016; Сычева, Богомолов, Кузиков, 2020; Сычева, 2020, 2024]. Тензоры сейсмического момента, фокальные механизмы землетрясений и

диаграммы распределения азимутов и углов наклона осей сжатия P и растяжения T представлены на рис. 11.

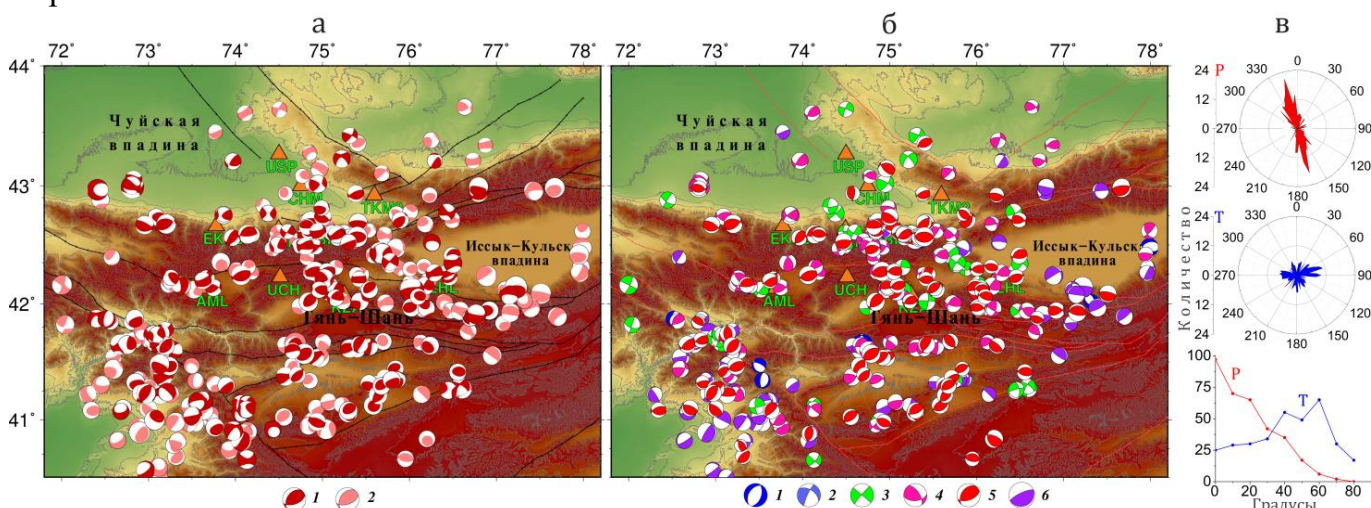


Рисунок 11 – а – тензоры сейсмического момента (334 события): 1 – $OBS \geq 10$ (152 землетрясения); 2 – $OBS < 10$; б – фокальные механизмы очагов, треугольники – положение станций сети KNET; в – диаграммы распределения осей сжатия P (сверху) и растяжения T (в центре), а также распределение углов погружения этих осей (снизу)

Значительная часть землетрясений расположена южнее линии Николаева (южная граница Северного Тянь-Шаня), и рассматриваемые события (334 землетрясения) отнесены к Центральному Тянь-Шаню. ТСМ на рис. 11а отмечены красным и розовым цветом: красным отмечены те, для которых решение получено по более чем 10 компонентам (152 события). Максимальное число компонент – 30 (10 станций, компоненты N, E, Z). Цвет фокального механизма на рис. 11б зависит от типа подвижки в очаге. Согласно рис. 11в, максимум числа осей сжатия P имеет направление $340^\circ N$ и $165^\circ S$, что соответствует северо-северо-западному направлению, и основная часть осей попадает в сектор 330° – 360° , при этом азимуты осей растяжения T не имеют ярко выраженного максимума. Значительная часть осей сжатия P имеет нулевой угол погружения (близгоризонтальное положение), а максимум распределения углов погружения осей растяжения равен 60° (близвертикальное положение). Такое направление главных осей напряжений P и T отмечается и другими исследователями Тянь-Шаньского региона [Юнга, 1990; Трифионов, 2002, 2005; Буртман, 2012 и др.].

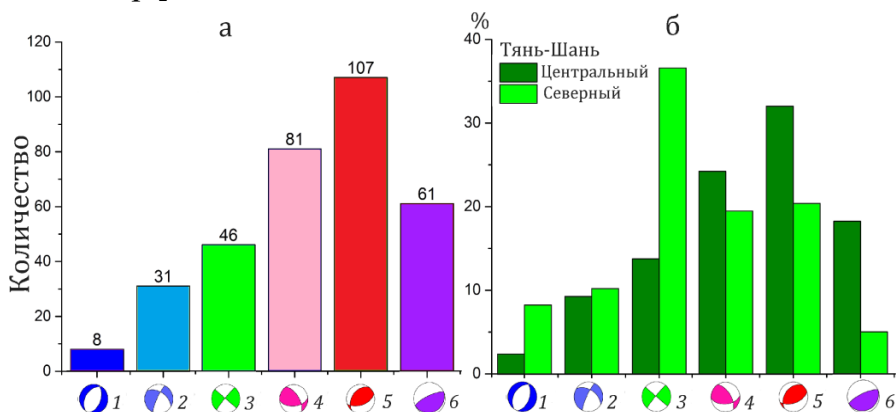


Рисунок 12 – Количественное распределение землетрясений по типу механизма: а – Центральный Тянь-Шань; б – процентное соотношение для Центрального и Северного Тянь-Шаня. 1 – сброс; 2 – сбросо-сдвиг; 3 – горизонтальный сдвиг; 4 – взбросо-сдвиг; 5 – взброс; 6 – взрез

Из рассматриваемых событий более половины (57%) составляют взбросы и взбросо-сдвиги, третью часть (31%) – горизонтальные сдвиги и взрезы, сбросы и сбросо-сдвиги малочисленны (12%) (см. рис. 12б и рис. 12а). На рис. 12б для двух регионов (Северный и Центральный Тянь-Шань) представлено процентное соотношение количества событий по типу подвижки, где значительное различие наблюдается для горизонтальных сдвигов и сбросов. Их количество уменьшается для землетрясений Центрального Тянь-Шаня. Центральный Тянь-Шань представлен событиями с $M \geq 3.5$, а Северный включает слабые землетрясения с $M = 1.6-2.5$ (см. рис. 8), то есть землетрясения имеют разный масштабный уровень, что отражается на количественном распределении землетрясений по типу подвижки.

В работе [Сычева, Богомолов, 2014] проведено сравнение решений фокальных механизмов, полученных по методу полярности сейсмических волн и методу волновой инверсии для 11 землетрясений, некоторые из которых удалось сравнить с решениями из каталога СМТ (<https://www.globalcmt.org/>) (рис. 13). Решения, полученные по знаку прихода P -волны, в целом хорошо согласуются с решениями по методу волновой инверсии; некоторые наблюдаемые различия можно объяснить недостаточностью количества знаков.

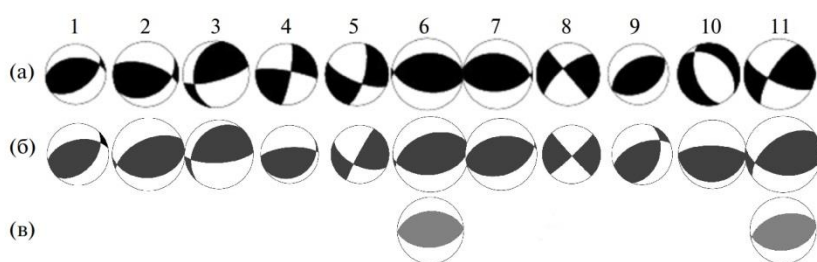


Рисунок 13 –
Механизмы очагов
землетрясений: (а) –
решения, получены по
знаку прихода P -волны;
(б) – инверсный метод;
(в) – СМТ-решения

По методу волновой инверсии и по знаку вступления P -волн определены механизмы для 76 землетрясений. Статистический анализ сравнения полученных решений выявляет некоторые различия в ориентации осей сжатия для ряда землетрясений; в целом определяются северо-северо-западное направление и субгоризонтальное положение осей сжатия.

Фокальные механизмы очагов определялись в процессе накопления сейсмологических данных, и результаты их анализа представлены в работах [Сычева и др., 2004, 2005, 2020; Сычева, 2005, 2020, 2024; Сычева, Юнга, 2010; Сычева, Сычев, 2015 и др.].

Выводы к четвертой главе

1. Полученный банк данных о фокальных механизмах очагов землетрясений, произошедших на территории Северного Тянь-Шаня, можно считать представительным и применять к нему методы оценки напряженно-деформированного состояния.
2. Статистический анализ фокальных механизмов показал, что в рассматриваемом регионе формируются в основном очаги, относящиеся по характеру происходящих в них подвижек к трем типам: взбросы, взбросо-сдвиги и горизонтальные сдвиги.

Сбросовые и сбросо-сдвиговые события происходят реже и имеют случайную пространственную локализацию.

3. Землетрясения со сбросовым и сбросо-сдвиговым типами подвижек происходят большей частью на глубине до 10 км, с типами подвижек «взброс», «взбросо-сдвиг» или «горизонтальный сдвиг» – на глубине более 10 км.
4. Для рассматриваемых событий преобладающим направлением азимутов осей сжатия (P) является северо-северо-западное, а для осей растяжения (T) – восточно-северо-восточное. С глубиной ось сжатия меняет свое направление с северо-северо-западного на северное.

Полученные в главе результаты доказывают первое защищаемое положение.

Глава 5. Динамические параметры очагов землетрясений

Глава состоит из двух разделов, в которых представлены результаты исследования динамических параметров (ДП) очагов землетрясений [Сычева, Богомолов, 2014, 2016; Сычева, Богомолов, 2020; Сычева, Богомолов, Кузиков, 2020]. В первом разделе рассматриваются динамические параметры землетрясений, произошедших на территории Северного Тянь-Шаня, полученные на основе построения и анализа очаговых спектров [Сычева, Богомолов, 2020].

Первый раздел начинается с описания теоретических основ определения ДП очагов землетрясений по параметрам сейсмограмм. Оценочный расчет динамических параметров очагов землетрясений – радиуса очага r , скалярного сейсмического момента M_0 и сброшенных касательных напряжений $\Delta\sigma$ – проводился с использованием классических подходов К. Аки, П. Ричардса (1983) и Ю.В. Ризниченко (1985). Как известно, в этих подходах в выражения для оценки радиуса r , и момента M_0 входит по одному параметру, описывающему частотную зависимость спектральной плотности сейсмограмм $S(f)$. Скалярный сейсмический момент пропорционален низкочастотному пределу спектральной плотности смещения Ω_0 (в работах по расчетам и исследованиям M_0 этот параметр обычно называется кратко «спектральной плотностью»). Радиус очага оценивается по величине угловой частоты f_c – параметру, описывающему затухание спектральной плотности на высоких частотах. Величина сброса напряжений оказывается пропорциональной отношению M_0/r^3 по Б.В. Кострову (1975).

Во *втором разделе* представлены исходные данные, детально описаны методика построения очагового спектра и определения его параметров, а также результаты расчета динамических параметров очагов 187 землетрясений с $8.7 \leq K \leq 14.8$ ($2.2 \leq M \leq 6.0$), которые произошли на территории Северного Тянь-Шаня (рис. 14). Основная часть событий расположена на территории, ограниченной координатами краевых станций сети KNET. Для рассматриваемых событий получены следующие динамические параметры: скалярный сейсмический момент M_0 , радиус очага r , сброс касательных напряжений $\Delta\sigma$ (*stress drop*, далее сброс напряжений), сейсмическая энергия E_S и приведенная сейсмическая энергия e_{PR} .

Значения M_0 лежат в пределах от $2.2 \cdot 10^{12}$ до $4.74 \cdot 10^{16}$ Н·м, r варьирует от 200 м до 1100 м, $\Delta\sigma$ меняется в диапазоне от ~ 0.07 до ~ 16 МПа. Максимальный сброс напряжений произошел при землетрясении 02.03.2010 с $K = 13.3$ ($M = 5.2$), которое локализовано в крайней восточной части Киргизского хребта ($\Delta\sigma \approx 16$ МПа), и при Кочкорском землетрясении 25.12.2006, $K = 14.8$ ($M = 6$) ($\Delta\sigma \approx 12.7$ МПа) (см. рис. 15а).

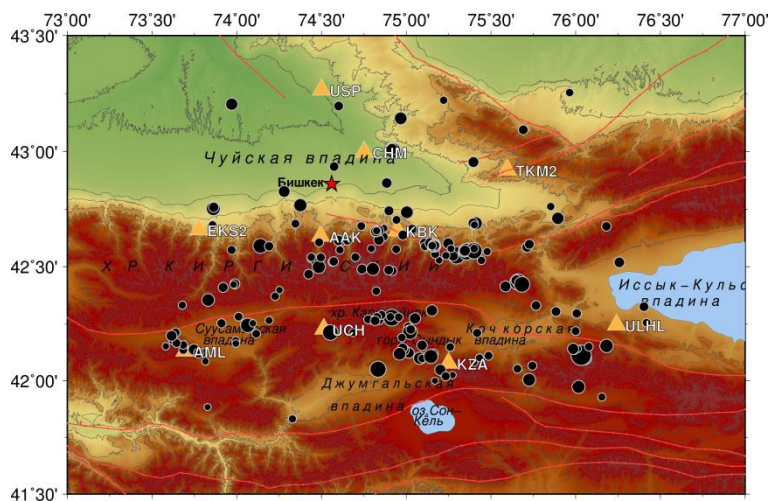


Рисунок 14 – Эпицентральное расположение землетрясений (187 событий). Треугольники – положение станций сети KNET. Красные линии – региональные разломы по [Чедия, 1986]. Минимальный круг соответствует событию с $M = 2.7$, максимальный – с $M = 6.0$

Для распределения динамических параметров в зависимости от магнитуды и скалярного сейсмического момента получены уравнения регрессии и рассчитаны коэффициенты корреляции динамических параметров и скалярного сейсмического момента. Максимальный коэффициент корреляции k отмечен между скалярным сейсмическим моментом M_0 и сейсмической энергией E_s , минимальный – между сбросом напряжений $\Delta\sigma$ и скалярным сейсмическим моментом M_0 . Полученная зависимость $\lg M_0$ (M) = $1.14M + 9.4$ согласуется (с точностью до 10%) с известным выражением $\lg M_0 = 1.6M + 8.4$ по Ю.В. Ризниченко (1985).

Площадное распределение логарифма сброшенных напряжений $\lg(\Delta\sigma_{AW})$, рассчитанное для ячеек размером $0.2 \times 0.2^\circ$, по выражению $\Delta\sigma_{AW} = (7 \cdot \Sigma M_{0i}) / (16 \cdot \Sigma r_i^3)$, представлено на рис. 15б. Для большей части рассматриваемой территории уровень сброшенных напряжений $\Delta\sigma_{AW}$ составляет ~ 0.4 – 0.6 МПа. Наибольшим уровнем $\Delta\sigma_{AW}$ (13.1 МПа) характеризуется область, расположенная в юго-восточной части Киргизского хребта (5 событий), а также юго-восточная часть Кочкорской впадины (очаговая область Кочкорского землетрясения, где произошло 8 событий), где сброс напряжений составил $\Delta\sigma_{AW} = 10.8$ МПа. В северо-восточной части Джумгальской впадины (2 события) сброс напряжений составил $\Delta\sigma_{AW} = 6.9$ МПа. Значительные величины $\Delta\sigma_{AW}$ характерны для гор Карамойнок – $\Delta\sigma_{AW} = 3.1$ МПа (13 событий), а также для предгорий восточной части Киргизского хребта вдоль Иссык-Атинского разлома – $\Delta\sigma_{AW} = 3.5$ МПа (11 событий). В предгорьях центральной части Киргизского хребта на уровне 74.2° в.д. сброс напряжений составил $\Delta\sigma_{AW} = 3.1$ МПа (2 события).

Далее, в первом разделе главы приведены результаты сопоставления сброса напряжений с параметрами СТД: с интенсивностью СТД и распределением коэффициента Лоде – Надаи (рис. 15а). Большая часть событий со значительным уровнем сброса

напряжений попала в области, которые характеризуются интенсивностью деформации более $0.1 \cdot 10^{-9}$ год⁻¹: северные склоны восточной части Киргизского хребта, горы Карамойнок и Сандык.

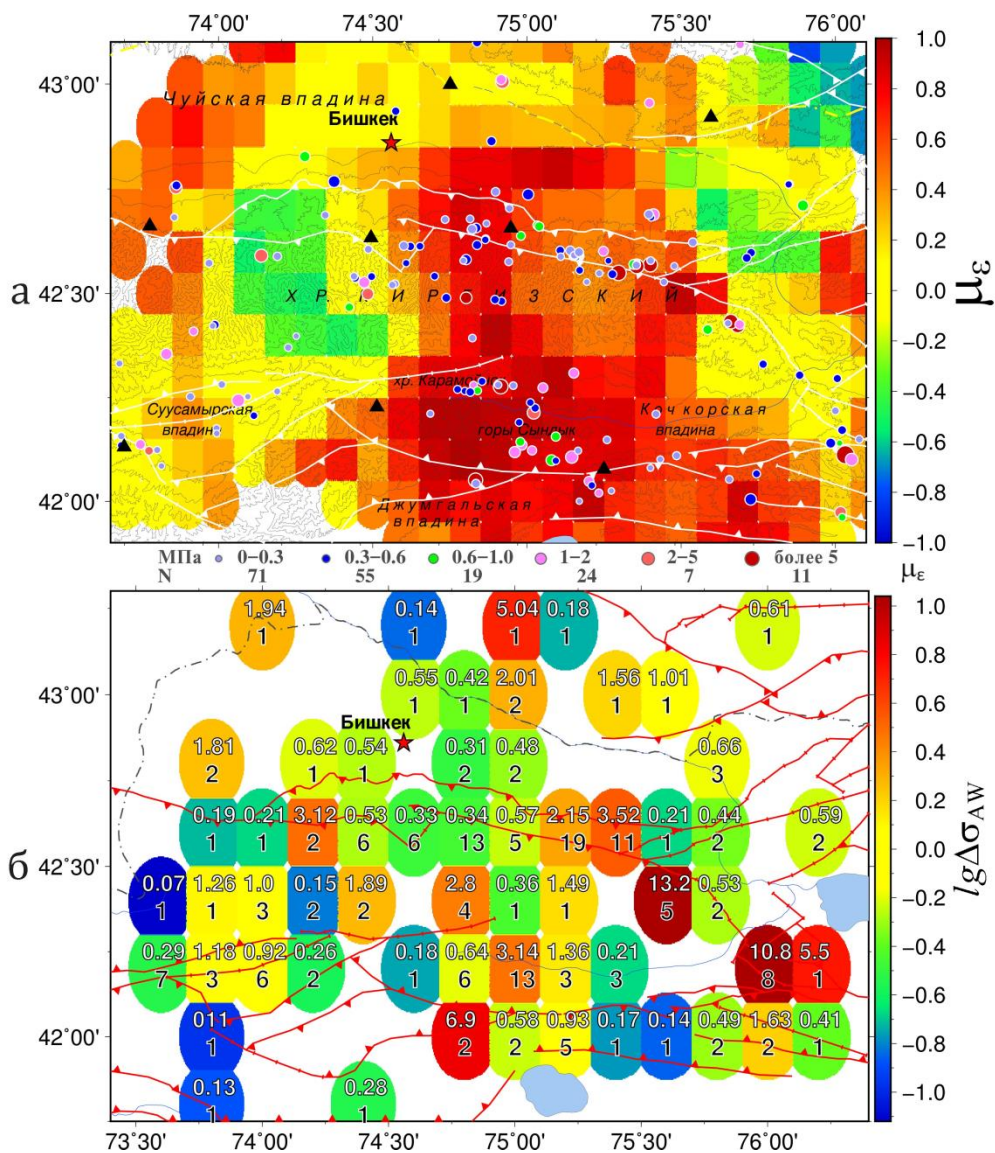


Рисунок 15 – а – распределение коэффициента Лодэ – Надаи и эпицентральное положение землетрясений (176 событий); цвет кружка зависит от величины сброшенных напряжений, треугольники – станции сети KNET. б – распределение логарифма сброшенных напряжений $\Delta\sigma_{ав}$.

Из рассматриваемых событий в поле распределения коэффициента Лодэ – Надаи попало 176 из 187 землетрясений (рис. 15а). Посчитано количество событий и суммарный сброс напряжений для землетрясений в областях с разным режимом деформации, который характеризуется величиной коэффициента Лодэ – Надаи. 119 (~68%) землетрясений локализованы в области деформации простого сжатия и преобладания простого сжатия; суммарный сброс напряжений составил 114.4 МПа. В области с деформацией чистого сдвига произошло 50 землетрясений (28%), и сброс напряжений составил 71.5 МПа. Малочисленны землетрясения (7 событий, 4%), которые произошли в области,

характеризующейся деформацией преобладания простого растяжения, с суммарным сбросом напряжений 5.2 МПа. Преобладающее количество землетрясений и, соответственно, сброс напряжений произошли в области с $\mu_e > 0.2$, соответствующей режиму деформации простого сжатия и преобладания простого сжатия.

Выводы к пятой главе

1. Сформирован представительный банк данных о динамических параметрах землетрясений, произошедших на территории Северного Тянь-Шаня.
2. Построены модельные зависимости (уравнения регрессии) динамических параметров от магнитуды M ; выявлены высокие корреляции между скалярным сейсмическим моментом M_0 и магнитудой (коэффициент корреляции больше 0.9). Полученная регрессия между M_0 и магнитудой ($R^2 = 0.82$) хорошо согласуется с известным соотношением, приведённым Ю.В. Ризниченко.
3. Зависимость сброшенных напряжений от скалярного сейсмического момента для землетрясений на территории Северного Тянь-Шаня описывается степенной функцией $\Delta\sigma = 1.75 \cdot 10^{-6} \cdot M_0^{0.42}$ с показателем порядка 0.4, что указывает на отсутствие подобия очагов событий разных энергетических масштабов.
4. На территории Северного Тянь-Шаня выделены области значительного сброса напряжений. Согласно распределению параметра Лоде – Надаи, повышенный уровень сброса напряжений проявлен в областях, характеризующихся режимом деформации одноосного сжатия и преобладанием одноосного сжатия.

Полученные в главе результаты доказывают пятое защищаемое положение.

Глава 6. Исследование параметров напряженно-деформированного состояния земной коры

Глава состоит из трех разделов и посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния земной коры Северного Тянь-Шаня [Сычева и др., 2005, 2008, 2009; Ребецкий и др., 2016; Сим и др., 2014; Костюк и др., 2010; Сычева, 2017, 2020, 2024; Сычева, Мансуров, 2017, 2019; Rebetsky et al., 2012; Сычева, Богомолов, Юнга, 2009 и др.]. Для оценки напряженно-деформированного состояния использовались данные о фокальных механизмах очагов землетрясений (см. главу 4). Для расчета некоторых параметров применялись программы (авт. св-во № 2018615884 РФ, № 2020665785 РФ). Исследования проведены на основе двух подходов: метода сейсмотектонических деформаций [Юнга, 1990] и метода катакластического анализа разрывных нарушений [Ребецкий, 1997, 2007]. При расчете тензоров деформации различие СТД и МКА заключается в подходе к формированию анализируемой выборки. При описании каждого из методов дается подробное разъяснение этого вопроса.

Первый раздел включает методические особенности анализа сейсмотектонических деформаций и результаты расчетов. В методическом разделе даются основные определения (среднегодовой прирост сейсмотектонической деформации, интенсивность СТД, единичный направляющий тензор сейсмического момента, коэффициент Лоде – Надаи и др.), рассматриваются статистические аспекты анализа СТД, методика расчета

весовой функции для определения вклада каждого землетрясения. Также освещены вопросы параметризации тензоров сеймотектонических деформаций, сейсмического момента и напряжений, на которых основана классификация режимов деформации [Юнга, 1997]. В части описания результатов расчета СТД представлены распределения компонент усредненных тензоров деформации (XX, YY, ZZ), интенсивности СТД, карты СТД, построенные с применением классификации режимов СТД для всего слоя, а также для глубин 0–10, 5–15, 10–20 и 15–25 км (с перекрытием). Наряду с картами СТД построено распределение коэффициента Лоде – Надаи как для всего исследуемого слоя, так и по вышеуказанным глубинам. Проведено сравнение деформации земной коры на основе сейсмологических и ГНСС-данных.

При расчете СТД исследуемая область была разделена на ячейки с радиусом 0.2° (~ 20 км), центры которых размещаются в узлах сетки с шагом 0.1° (~ 10 км). Тензор скорости СТД в пределах ячейки определялся суммой тензоров сейсмических моментов, нормированных на время, объем ($\pi r^2 \cdot h$, $r = 20$ км, $h = 30$ км) и модуль сдвига с использованием предположения о подобии СТД на разных масштабных уровнях.

Вклад каждого события определялся по региональной весовой функции, рассчитанной в работе [Сычева, Мансуров, 2017], и рассматривались усредненные механизмы, для которых коэффициент κ (каппа, мера средней упорядоченности совокупности разрывных деформаций) превышает значение из работы Юнги (1990), где представлены мода и критические значения параметра κ , соответствующие разным кумулятивным вероятностям и объему выборки.

Режим СТД обозначается значком, представляющим геометрическую фигуру: прямоугольник со стрелками, выходящими из его центра перпендикулярно сторонам. Ориентация прямоугольника и стрелок на горизонтальной поверхности позволяет судить соответственно об азимутальном направлении осей укорочения и удлинения (азимут 0° – направление на север). Цвет фигуры определяет режим деформации, а длина прямоугольника и стрелок отражает величину компоненты СТД (собственное значение) вдоль соответствующей главной оси. Для исследуемой территории преобладающими являются два режима деформации (рис. 16а): горизонтальный сдвиг и режим транспрессии. Наряду с этими режимами наблюдается несколько узловых точек с режимами деформации: сжатие, растяжение, режим транстенсии, а также косой сдвиг. Количественная оценка каждого из режимов представлена на гистограмме в правом нижнем углу карты СТД. Режим горизонтального сдвига проявляется в западной части исследуемой территории (восточные и северные окраины Суусамырской впадины, западная часть Киргизского хребта и Чуйской впадины) и в крайней восточной субмеридионально расположенной полосе (юго-восточная часть Кочкорской впадины и восточная концевая часть Киргизского хребта). Между этими двумя областями проявляется режим транспрессии (центральная и восточная части Киргизского хребта, хребет Джумгал-Тоо, горы Сандык и Карамойнок). В предгорьях восточной части Киргизского хребта вблизи Иссык-Атинского разлома расположена небольшая область, в которой проявляется режим сжатия. На восточной окраине Чуйской впадины проявляются

режимы транстенсии и растяжения. Еще одна область с режимом транстенсии пересекает центральную часть Киргизского хребта ($74-74.25^\circ$ в.д.). Азимут осей укорочения меняется от северо-западного направления на западе к субмеридиональному в восточной части рассматриваемой территории. Аналогичные результаты были получены на основе исследования меньшего числа землетрясений (870 событий) в работе [Сычева и др., 2005], что может свидетельствовать об устойчивости деформационного режима.

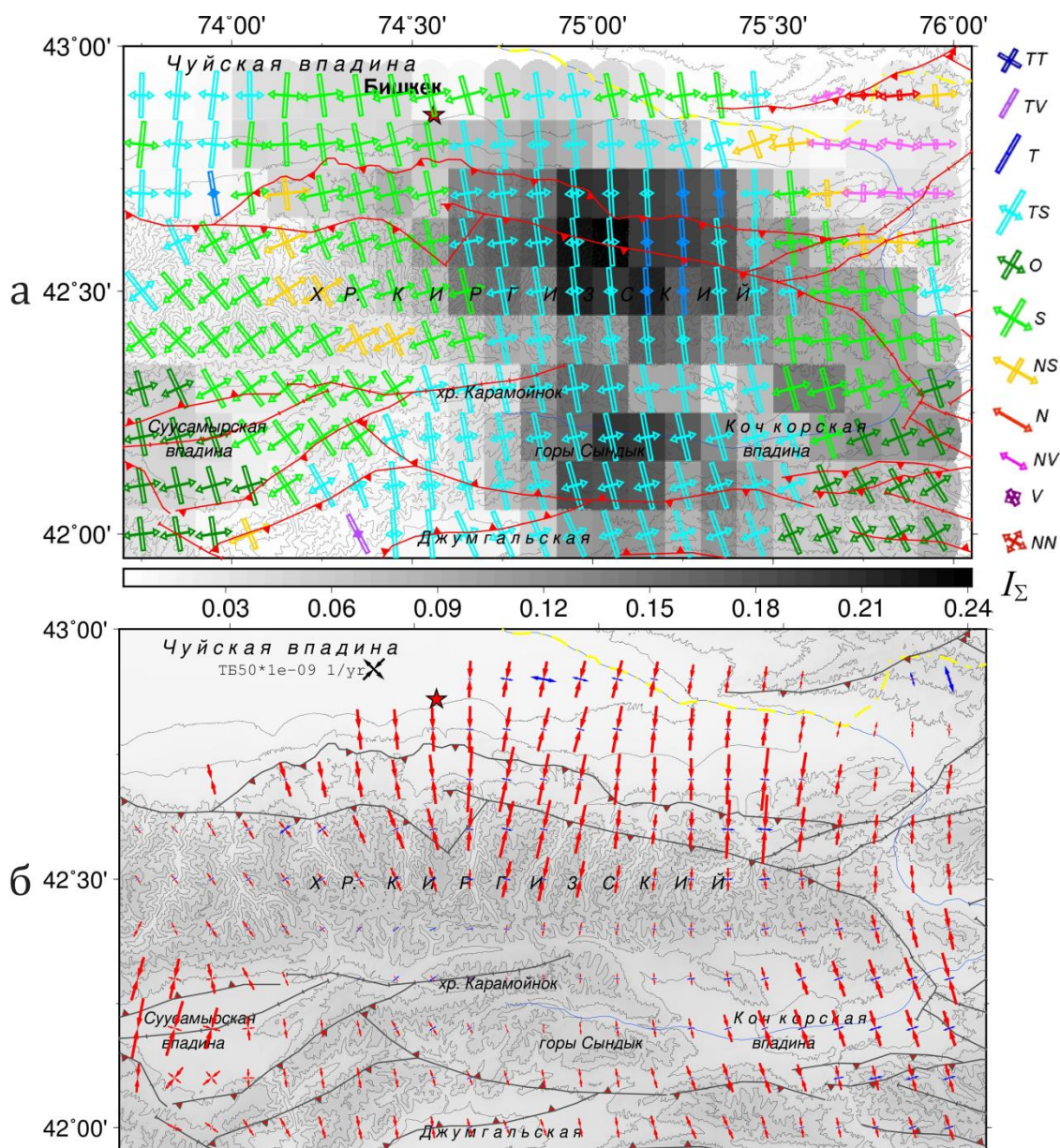


Рисунок 16 – а – карта СТД на фоне распределения интенсивности деформации (масштаб значений на шкале цвета заливки – 10^{-9} год $^{-1}$). Цвет значка обозначает режим деформации согласно классификации режимов СТД: Т – сжатие, N – растяжение, S – горизонтальный сдвиг, V – вертикальный сдвиг, TT – всестороннее сжатие, NN – всестороннее растяжение, O – косой сдвиг, TS – транспрессия, NS – транстенсия, TV – переходный режим от вертикального сдвига к сжатию, NV – к растяжению; б – поле тензора скорости горизонтальной деформации земной коры, полученное по ГНСС-данным.

По картам СТД на разных глубинах отмечена следующая тенденция деформационного режима. На глубине 5 км отмечается разнообразие режимов СТД (рис. 17а, глубина 0–10 км), что можно объяснить раздробленностью и блочным строением приповерхностного слоя земной коры. С увеличением глубины уменьшается количество режимов деформации, расширяется территория, характеризующаяся режимом транспрессии. На глубине 10–20 км (рис. 17б) проявляются такие режимы, как сжатие (Иссык-Атинский разлом в восточной части Киргизского хребта, Джумгал-Тоо), транспрессия (восточная часть Киргизского хребта, горы Сандык, Кызарт, Карамойнок), горизонтальный сдвиг и косой сдвиг (Суусамырская впадина, восточная окраина Чуйской впадины). С глубиной также наблюдается разворот направления осей укорочения от северо-северо-западного к северному.

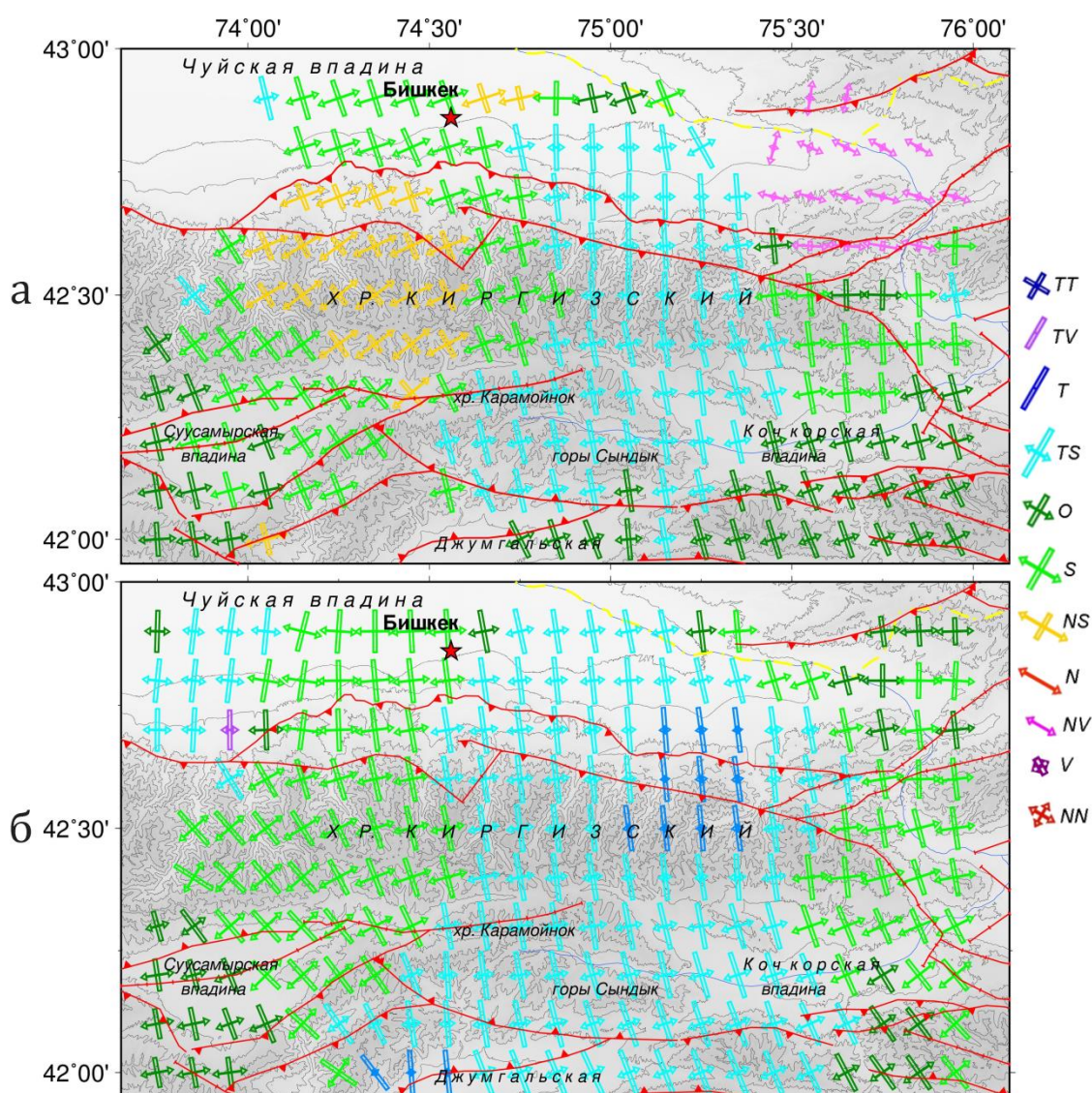


Рисунок 17 – Режимы СТД для двух глубин сейсмогенного слоя: а – 0–10 км; б – 10–20 км

Фоном на рис. 16а показано распределение интенсивности СТД. Отмечена неоднородность интенсивности сеймотектонических деформаций: наиболее интенсивные деформации характерны для восточной части исследуемой территории, менее интенсивные – для западной. Максимальный уровень интенсивности проявляется в восточной части

Киргизского хребта ($2.2 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$) и горах Сандык ($2.0 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$). Проведено сравнение двух моделей поля деформации земной коры, полученных на основе сейсмологических и ГНСС-данных. Оценки современных движений земной коры получены по результатам геодезических измерений Центрально-Азиатской ГНСС-сети. Поле тензора скорости горизонтальной деформации земной коры по ГНСС-данным представлено на рис. 166. Численный анализ показал, что для рассматриваемой территории направление осей укорочения по сейсмическим данным смещено против часовой стрелки от осей укорочения по ГНСС-данным на некоторую величину. Для основной части точек (~70 %) абсолютное значение разницы в направлении осей укорочения составляет 0–15°. Незначительная часть точек имеет разницу в направлении более 20°.

Второй раздел включает описание методики и результаты расчета напряженного состояния методом МКА [Rebetsky et al., 2012; Ребецкий и др., 2016]. Метод МКА включает четыре этапа реконструкции напряжений. В разделе представлены результаты двух этапов (1–2), которые описаны в методической части. Первый этап реконструкции решает задачу определения ориентации главных осей и вида тензоров напряжений и приращений сеймотектонических деформаций. Этот этап начинается с формирования начальной выборки. В отличие от метода СТД, где в выборку попадают все события исследуемого объема, в МКА выборка формируется на основе двух критериев: принципа диссипации упругой энергии после смещения по разрыву и принципа упорядоченности квазипластического деформирования. Такая выборка считается однородной. Второй этап реконструкции решает задачу расчета относительных величин напряжений. На этом этапе проводится анализ распределения компонент тензора напряжений для плоскости разрыва на диаграмме Мора.

Для анализа данных методом МКА был использован каталог фокальных механизмов, полученный за период наблюдений 1994–2012 гг., который на тот момент включал 1056 сейсмических событий с магнитудами от 1.16 до 5.40. Реконструкция напряжений выполнялась по сетке $0.05 \times 0.05^\circ$ в латеральном направлении. По результатам расчетов были получены данные о параметрах напряжений для 286, 467, 407 и 142 доменов для глубин 5, 10, 15 и 20 км соответственно. В работе представлен детальный анализ поля природных напряжений в коре Северного Тянь-Шаня в масштабе осреднения 10–15 км. Результаты в виде ориентации осей главных напряжений, геодинамического типа напряженного состояния, а также распределения коэффициента Лоде – Надаи представлены для четырех глубинных уровней коры. Реконструкция показала, что оси алгебраически минимального главного напряжения (максимального сжатия) σ_3 имеют субмеридиональное простирание $330\text{--}360^\circ\text{N}$ и $150\text{--}180^\circ\text{S}$. Области верхней части коры, где оси σ_3 имеют субвертикальное направление, приурочены к восточному сегменту Чуйской впадины, северному и южному склонам Киргизского хребта к северо-востоку от Суусамырской впадины. Оси алгебраически максимального напряжения σ_1 (минимального сжатия или максимального девиаторного растяжения) имеют несколько большую вариабельность ориентации, чем напряжения максимального сжатия, и в двух верхних слоях в основном направлены субширотно $240\text{--}270^\circ\text{W}$ и $60\text{--}90^\circ\text{E}$.

Результаты расчетов коэффициента Лодэ – Надаи показали, что в земной коре Северного Тянь-Шаня основной вид тензора напряжений отвечает чистому сдвигу со значениями коэффициента, изменяющимися от -0.2 до 0.2 (рис. 18а; результат показан для глубины 0-10 км). При этом существует достаточное число доменов, где величина этого коэффициента близка к $+1$ и -1 . Здесь имеют место, соответственно, одноосное сжатие и растяжение. С глубиной количество доменов с режимом простого сжатия и преобладания простого сжатия увеличивается и начинает преобладать над количеством доменов с режимом простого сдвига.

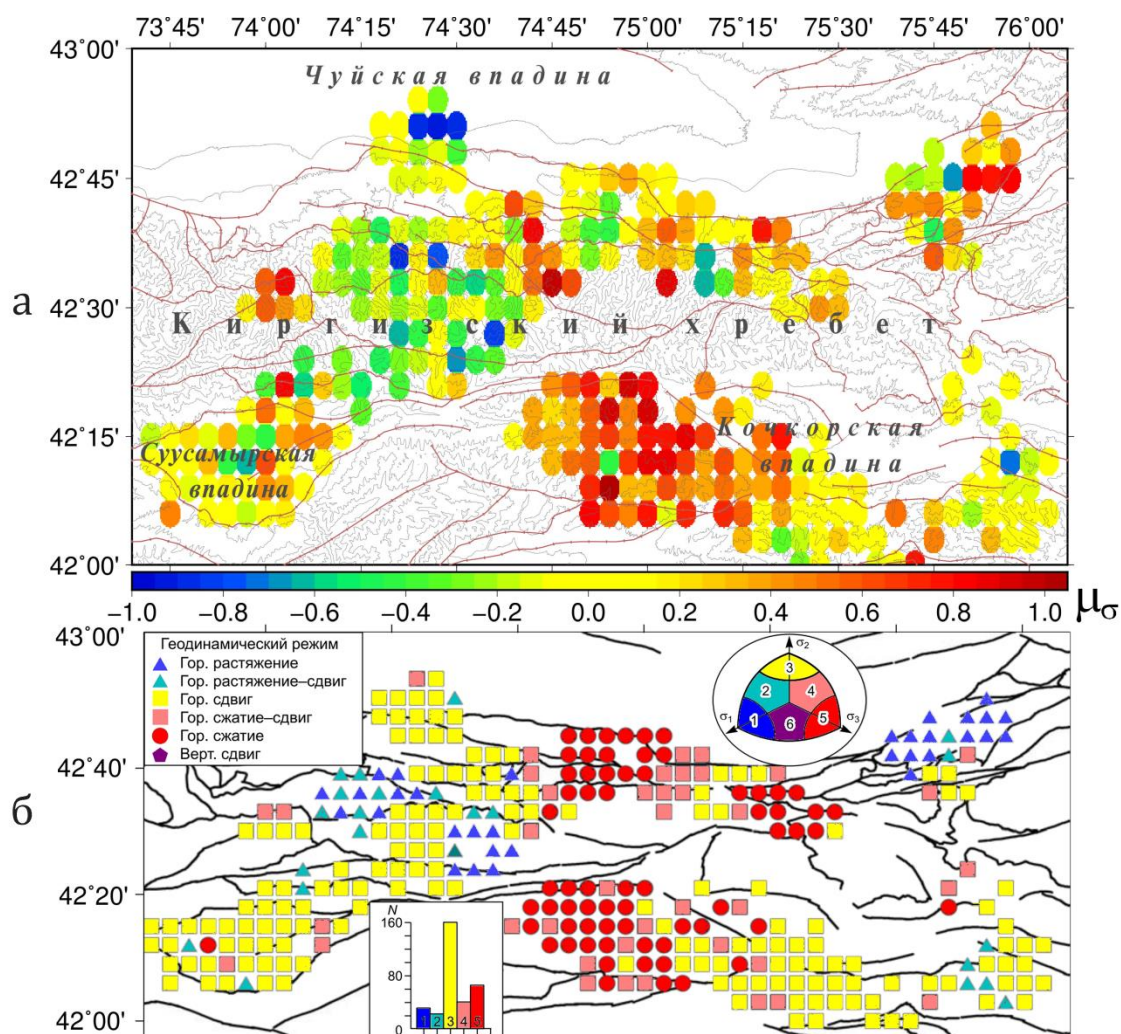


Рисунок 18 – Значения коэффициента Лодэ – Надаи (а) и геодинамический тип напряженного состояния по Ю.Л. Ребецкому (2007) (б) на глубинах 0–10 км. Для рисунка б показано деление квадранта, построенного на осях главных напряжений, на 6 зон. Попадание оси на зенит в каждую из зон определяет соответствующий геодинамический тип напряженного состояния: 1 – горизонтальное растяжение; 2 – горизонтальное растяжение со сдвигом; 3 – сдвиг в горизонтальной плоскости; 4 – горизонтальное сжатие со сдвигом; 5 – горизонтальное сжатие; 6 – сдвиг в вертикальной плоскости.

Установлено, что, помимо геодинамического типа напряженного состояния – горизонтального сжатия, встречающегося преимущественно в коре центральной части

Северного Тянь-Шаня для поднятий в виде хребтов, и режима горизонтального сдвига (внутригорные впадины), имеется также большое число участков с режимом горизонтального сдвига со сжатием и растяжением и даже с чистым горизонтальным растяжением (для верхних слоев восточной части Чуйской котловины, в срединной части Киргизского хребта) (рис. 18б; результат показан для глубины 0-10 км).

Третий раздел включает обсуждение результатов исследования напряженно-деформированного состояния земной коры, полученных двумя методами. В разделе, в частности, отмечено, что по методу МКА напряженное состояние земной коры Северного Тянь-Шаня не выглядит таким простым, как следовало из первичного анализа горизонтальных движений поверхности коры, получаемых по данным ГНСС. Эта сложность напряженного состояния не выявляется, если анализировать только ориентацию осей главных напряжений максимального сжатия. Полученная ориентация осей главных напряжений максимального сжатия очень устойчива, определяет преимущественное направление погружения этих осей на северо-северо-запад и юго-юго-восток, соответствующая ориентации векторов смещений по данным ГНСС. Сложность напряженного состояния коры изучаемого района проявляется в площадном распределении ряда важнейших параметров, характеризующих особенности деформирования горных массивов. Результаты тектонофизической реконструкции, выполненной для Северного Тянь-Шаня, показали, что для коры центральной части исследуемого района, характеризующейся плотным сочленением высокогорных хребтов, типичен режим горизонтального сжатия, кора Суусамырской и Кочкорской впадин испытывает режим горизонтального сдвига, а восточное окончание Чуйской впадины характеризуется режимом горизонтального растяжения.

Выводы к шестой главе

1. Двумя методами – СТД и МКА проведена оценка параметров напряженно-деформированного состояния земной коры Северного Тянь-Шаня. Полученные результаты однозначно отображают напряженно-деформированное состояние исследуемой области; некоторые отличия связаны с разным подходом к формированию анализируемой выборки.
2. По данным СТД оси укорочения имеют направление в границах $330\text{--}360^\circ\text{N}$ и $150\text{--}180^\circ\text{S}$. С глубиной ось укорочения меняет свое направление на меридиональное. Оси удлинения имеют направление в пределах $255\text{--}275^\circ\text{W}$ и $75\text{--}95^\circ\text{E}$.
3. Западная и крайняя восточная части исследуемой территории характеризуются режимом горизонтального сдвига, а центральная и восточная – режимом транспрессии. Приповерхностный слой земной коры (0–10 км) характеризуется многообразием режимов СТД: от режима растяжения до сжатия, что можно объяснить блочным строением приповерхностного слоя и локальным режимом деформации. С увеличением глубины деформационное поле становится более однородным.
4. Значительная часть исследуемой территории (60%, центральная и восточная части)

характеризуется деформацией одноосного сжатия ($\mu_\varepsilon > 0.6$) или преобладанием одноосного сжатия ($\mu_\varepsilon > 0.2$), третья часть территории (31%, западная часть) находится в условиях чистого сдвига ($-0.2 \leq \mu_\varepsilon \leq 0.2$) и незначительная часть (9%, сегмент в западной части и северо-восточная часть) в условиях преобладания одноосного растяжения ($\mu_\varepsilon \leq -0.2$).

5. Для исследуемой территории по сейсмическим и ГНСС-данным наблюдается хорошая совместимость деформационных моделей: направления главных осей горизонтальной части тензора совпадают либо близки, режимы деформации в большей части территории также идентичны. Для основной части территории (68% площади) разница в направлении осей укорочения составляет $0-15^\circ$. На незначительной площади разница в направлении более 20° .
6. По данным реконструкции МКА оси алгебраически минимального главного напряжения (максимального сжатия) σ_3 имеют субмеридиональное простирание $330-360^\circ\text{N}$ и $150-180^\circ\text{S}$; оси алгебраически максимального напряжения σ_1 (минимального сжатия или максимального девиаторного растяжения) имеют несколько большую вариабельность ориентации, чем напряжения максимального сжатия и в основном направлены субширотно $240-270^\circ\text{W}$ и $60-90^\circ\text{E}$.
7. В коре центральной части Северного Тянь-Шаня наблюдается геодинамический тип напряженного состояния горизонтального сжатия в субмеридиональном направлении; со всех сторон эта зона окружена корой, где имеет место горизонтальный сдвиг и его сочетание со сжатием и растяжением.

Полученные в главе результаты доказывают первое и пятое защищаемые положения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении диссертационной работы были определены основные закономерности распределения сейсмотектонических деформаций и параметров поля напряжений Северного Тянь-Шаня на основе обработки большого объема данных о кинематических и динамических параметрах очагов землетрясений региона, а также характеристиках добротности коры и верхней мантии. Разработаны программы и получено 6 свидетельств. Получены следующие результаты:

1. Сформирован банк данных по фокальным механизмам очагов, который включает 1770 землетрясений слабой и умеренной силы ($M > 1.8$), произошедших на территории Северного Тянь-Шаня с 1994 по 2021 г., и тензоры сейсмического момента для 334 землетрясений с $M > 3.5$ Центрального Тянь-Шаня, произошедших с 1996 по 2021 г. Выполнена типизация подвижек в очагах землетрясений (взбросы, взбросо-сдвиги, горизонтальные сдвиги, взрезы, сбросы и сбросо-сдвиги) и определены их количественные соотношения для исследуемой территории. Определены направления осей сжатия и растяжения и углы их погружения, которые характеризуют состояние исследуемой территории как напряжение сжатия.
2. На основе данных о фокальных механизмах очагов слабых и умеренных землетрясений (1770 событий, 1994–2021 гг.) и метода СТД определены основные закономерности пространственного распределения сейсмотектонической деформации земной коры (глубина до 30 км) Северного Тянь-Шаня (построены карты СТД, распределения коэффициента Лодэ – Надаи, направлений осей укорочения и удлинения). Проведено сравнение моделей деформации на основе сейсмических и ГНСС-данных.
3. На основе данных о фокальных механизмах землетрясений (1056 событий, 1994–2012 гг.) и метода МКА получены компактные модели распределения параметров поля напряжений в коре Северного Тянь-Шаня (карты ориентации осей главных напряжений σ^3 и σ^1 , геодинамического типа напряженного состояния и др.).
4. Впервые получены параметры затухания: сейсмическая добротность Q и функции затухания для территории Бишкекского геодинамического полигона (Северный Тянь-Шань), а также стационарные поправки для станций сети KNET, которые были использованы при построении очагового спектра. Методом томографической инверсии получены первые модели затухания сейсмических P - и S -волн для территории БГП до глубины 15 км, на основе которых были выделены области с разным уровнем затухания.
5. Выполнен расчет динамических параметров (скалярный сейсмический момент, радиус очага, сброс касательных напряжений и др.) очагов землетрясений слабой и умеренной силы, произошедших на территории Северного Тянь-Шаня. Построены распределения динамических параметров в зависимости от магнитуды и скалярного сейсмического момента, определены зависимости и коэффициенты корреляции (статистические закономерности ДП). Для рассматриваемых событий установлена степенная зависимость (регрессия) сброшенных напряжений от скалярного сейсмического момента M_0 .

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Сычева Н.А.** Сейсмотектонические деформации и сброшенные напряжения землетрясений Центрального Тянь-Шаня // Геосистемы переходных зон. – 2024. – Т. 8. – № 3. – С. 174–200. DOI:10.30730/gtrz.2024.8.3.174-200
2. Богомолов Л.М., Сычев В.Н., **Сычева Н.А.** О сброшенных напряжениях в очагах умеренных и слабых землетрясений: особенности распределения во времени // Геосистемы переходных зон. – 2023. – Т. 7. – № 1. – С. 25–53. DOI: 10.30730/gtrz.2023.7.1.025-036.037-053
3. **Сычева Н.А.** Исследование сейсмотектонических деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть I. Геосистемы переходных зон. – 2023. – Т. 7. – № 3. – С. 223–242. DOI. 10.30730/gtrz.2023.7.3.223-242
4. **Сычева Н.А.** Некоторые характеристики каталога землетрясений и сейсмического процесса по данным сети KNET // Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13. – № 3,0640. DOI: 10.5800/GT-2022-13-3-0640
5. Богомолов Л.М., **Сычева Н.А.** Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции, предвестники и проблемы // Геосистемы переходных зон. – 2022. – Т. 6. – № 3. – С. 145–182. DOI:10.30730/gtrz.2022.6.3.145-164. 164–182
6. **Сычева Н.А.** Сейсмотектонические деформации земной коры Центрального и Западного Тянь-Шаня // Вулканология и сейсмология. – 2021. – № 6. – С. 1–23. DOI: 10.31857/S0203030621060109
7. Сычев В.Н., **Сычева Н.А.** Неэкстенсивный анализ афтершоков умеренных землетрясений Тянь-Шаня и Северного Памира // Вулканология и сейсмология. – 2021. – № 1. – С. 65–79. DOI: 10.31857/S0203030621010053
8. **Сычева Н.А.**, Сычев И.В., Мансуров А.Н., Кузиков С.И. Исследование уровня сейсмического шума станций сети KNET // Вулканология и сейсмология. – 2020. – № 4. – С. 22–39. DOI: 10.31857/S0203030620040069
9. Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В., Кузиков С.И., **Сычева Н.А.**, Сычев В.Н. Тектонофизические исследования активности разлома Верхового на северном склоне Киргизского хребта // Геодинамика и тектонофизика. – 2020. – Т. 11. – № 4. – С. 770–784. DOI: 10.5800/GT-2020-11-4-0506
10. **Сычева Н.А.**, Мансуров А.Н. Сейсмотектонические деформации литосферы Памира и прилегающих территорий // Геодинамика и тектонофизика. – 2020. – Т. 11. – № 4. – С. 785–805. DOI: 10.5800/GT-2020-11-4-0507
11. Соболев Г.А., Кузиков С.И., В.Д. Брагин, **Сычева Н.А.** Изменение деформаций на территории геодинамического полигона на Тянь-Шане и местное землетрясение 12.02.2013 г. // Геофизические исследования. – 2017. – Т. 18. – № 3. – С. 45–59. DOI: 10.21455/gr2017.3
12. **Сычева Н.А.**, Мансуров А.Н. Оценка стационарных поправок для сейсмологической сети KNET на основе анализа отношения спектров H- и V-компонент сейсмического шума и

- локальных землетрясений // Геофизические исследования. – 2018. – Т. 19. № 1. – С. 30–48. DOI: 10.21455/gr2018.1–3
13. **Сычева Н.А.**, Мансуров А.Н. Сравнение оценок деформаций земной коры Бишкекского геодинамического полигона на основе сейсмологических и GPS-данных // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8. – № 4. – С. 809–825. DOI: 10.5800/GT-2017-8-4-0318.1.3
 14. **Сычева Н.А.**, Богомолов Л.М. Закономерности падения напряжений при землетрясениях Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 11. – С. 2071–2083. DOI: 10.15372/GiG20161109.
 15. Ребецкий Ю.Л., **Сычева Н.А.**, Сычев В.Н., Кузиков С.И., Маринин А.В. Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сети KNET // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 3. – С. 496–520. DOI: 10.15372/GiG20160303
 16. **Сычева Н.А.**, Сычев В.Н., Сычев И.В., Ильичев П.В. Расчет добротности коры и верхней мантии северного Тянь-Шаня на основе разработанного программного комплекса CODAQ // Геоинформатика. – 2015. – № 2. – С. 12–23. <https://elibrary.ru/item.asp?id=24344190>
 17. **Сычева Н.А.**, Кузиков С.И. Анализ скоростных моделей литосферы Тянь-Шаня и метод двойных разностей при определении положения гипоцентров землетрясений по данным сейсмологической сети KNET // Геофизические исследования. – 2012. – Т. 13. – № 2. – С. 5–22. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17901225>
 18. **Сычева Н.А.**, Богомолов Л.М. Падение напряжения в очагах среднемагнитудных землетрясений в Северном Тянь-Шане // Физика Земли. – 2014. – № 3. – С. 115–126. DOI: 10.7868/S0002333714030119
 19. Сим Л.А., **Сычева Н.А.**, Сычев В.Н., Маринин А.В. Особенности палео- и современных напряжений Северного Тянь-Шаня // Физика Земли. – 2014. – № 3. – С. 127–141. DOI: 10.7868/S0002333714030107
 20. Костюк А.Д., **Сычева Н.А.**, Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Ю. Яги (Y. Yagi). Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии // Физика Земли. – 2010. – № 3. – С. 52–65. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13724351>
 21. Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Акатова К.Н., Гитис В.Г., Дерендяев А.Б., Брагин В.Д., **Сычева Н.А.**, Кузиков С.И. Динамика взаимодействия полей сейсмичности и деформаций земной поверхности (Бишкекский геодинамический полигон) // Физика Земли. – 2010. – № 10. – С. 3–12. <https://elibrary.ru/item.asp?id=15249193>
 22. **Сычева Н.А.**, Богомолов Л.М., Юнга С.Л. Геоинформатика в статистическом подходе к расчетам сейсмотектонических деформаций // Геоинформатика. – 2009. – № 1. – С. 33–43. <https://elibrary.ru/item.asp?id=12945489>
 23. **Сычева Н.А.**, Богомолов Л.М., Юнга С.Л., Макаров В.И. Сейсмотектонические деформации и новейшая тектоника Тянь-Шаня // Физика Земли. – 2008. – № 5. – С. 3–15.
 24. **Сычева Н.А.**, Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадеева В.А. Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов

очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) // Физика Земли. – 2005. – № 11. – С. 62–78.

Прочие публикации

1. Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., **Sycheva N.A.**, Tatevossian R.A. Development of inversion methods on fault slip data Stress state in orogenes of Central Asia // Tectonophysics. – 2012. – V. 581. – P. 114–131. DOI: 10.1016/j.tecto.2012.09.027
2. Пя V. Sychev, Ivan Koulakov, **Nailia A. Sycheva**, Alexander Koptev, Irina Medved, Sami El Khrepy, and Nasir Al-Arifi. Collisional processes in the crust of the northern Tien Shan inferred from velocity and attenuation tomography studies // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2018. – V. 123. – No. 2. – P. 1752–1769. DOI: 10.1002/2017JB014826
3. **Sycheva N.A.** and Mansurov A.N. Seismotectonic deformations of Earth crust in Pamir and neighbor areas // IOP Conf. Series Earth and Environmental Science. – 324 – 2019. 012012. DOI:10.1088/1755-1315/324/1/012012
4. **Sycheva N.A.** and Mansurov A.N. Analysis of seismic noise level at high-mountain stations of the KNET network // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 324. – 2019. 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/324/1/012006
5. Sychev V.N., **Sycheva N.A.** The earthquakes aftershock processes of the Tien Shan and its surrounding area // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 324. – 2019. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/324/1/012003
6. Sychev V.N., **Sycheva N.A.** Analysis of the seismic process of the Bishkek geodynamic test site (Northern Tien Shan) // E3S Web of Conferences. – 2020. – 196. 02006 DOI: 10.1051/e3sconf/202019602006
7. **Сычева Н.А.** Тензор сейсмического момента и динамические параметры землетрясений Центрального Тянь-Шаня // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т. 4. – № 2. – С. 178–191. DOI:10.30730/gtrz.2020.4.2.178-191.192-209
8. **Сычева Н.А.**, Богомолов Л.М. О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т. 4. – № 4. – С. 393–416. DOI:10.30730/gtrz.2020.4.4.393-416.417-446
9. Сычев В.Н., **Сычева Н.А.**, Имашев С.А. Исследование афтершоковой последовательности Суусамырского землетрясения // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3. – № 1. – С. 35–43. DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.035-043
10. Мухамадеева В.А., **Сычева Н.А.** Об афтершоковых процессах, сопровождающих умеренные и слабые землетрясения на территории Бишкекского геодинамического полигона и в его окрестностях // Геосистемы переходных зон. – 2018. – Т. 2. – № 3. – С. 165–180. DOI:10.30730/2541-8912.2018.2.3.165-180
11. **Сычева Н.А.**, Сычев И.В. Исследование добротности среды Бишкекского геодинамического полигона на основе кода-волн локальных землетрясений // Геосистемы переходных зон. – 2017. – Т. 1. – № 3. – С. 21–39. doi:10.30730/2541-8912.2017.1.3.021-039.
12. **Сычева Н.А.** Обновленные оценки интенсивности сейсмотектонической деформации и весовой функции для расчета СТД Бишкекского геодинамического

полигона // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2017. – Т. 17. – № 1. – С. 206–211.

13. **Сычева Н.А.** Кыргызская сейсмологическая сеть KNET // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2016. – Т. 16. – № 5. – С. 175–183.
14. **Сычева Н.А.** Применение метода волновой инверсии и сеймотектонических деформаций для оценки напряженно-деформированного состояния территории Центрального Тянь-Шаня // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 172–177.
15. **Сычева Н.А.,** Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Костюк А.Д. Интенсивность сеймотектонических деформаций как показатель динамических процессов в земной коре (на примере Тянь-Шаня) // Геофизические исследования. – 2009. – Т. 10. – № 2. – С. 37–46.

Монография

1. **Сычева Н.А.,** Богомолов Л.М., Кузиков С.И. Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере сети KNET, Северный Тянь-Шань). – Южно-Сахалинск: ИМГиГ, 2020. – 358 с. ISBN 978-5-6040621-6-6. DOI: 10.30730/978-5-6040621-6-6.2020-2

Список зарегистрированных программ для ЭВМ

1. Программа для расчета вероятностной спектральной плотности мощности по временным выборкам волновых форм "SUR_PPSPD" / А.Н. Мансуров, И.В. Сычев, Н.А. Сычева. – № 2020618131; заявл. 18.03.2020; опубл. 21.07.2020. – 1 с.
2. Программа расчета параметров деформации земной коры (интенсивность сеймотектонических деформаций и параметр концентрации сейсмогенных разрывов) / Н.А. Сычева. – № 2020665785; заявл. 17.11.2020; опубл. 01.12.2020. – 1 с.
3. Автоматизированное рабочее место сейсмолога для исследования фокальных механизмов, расчета и картирования сеймотектонических деформаций / В.Н. Сычев, Н.А. Сычева. – № 2018613440; заявл. 03.04.2018; опубл. 17.05.2018. – 1 с.
4. Программный комплекс CodaQ расчета добротности среды на основе модели однократного рассеяния / Н.А. Сычева, В.Н. Сычев. – № 2018610919; заявл. 25.05.2017; опубл. 19.01.2018. – 1 с.
5. Программа для расчета стационарных поправок на основе H/V отношения спектров сейсмического шума и локальных землетрясений SUR_SPECTRAL_RATIO: программа для ЭВМ / А.Н. Мансуров, Н.А. Сычева. – № 2017662696; заявл. 18.07.2017; опубл. 14.11.2017. – 1 с.
6. Программа для расчета динамических характеристик сейсмических событий SUR_SEIS_EVENT_PROCESSOR / А.Н. Мансуров, Н.А. Сычева. – № 2016610152; заявл. 12.11.2015; опубл. 11.01.2016. – 1 с.

Подписано в печать 20 июня 2026 г.
Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.
Тираж 100 шт. Заказ №__
Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1
Тел./факс: (499) 254 90 88