

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Сычевой Найли Абдулловны

«Очаговые параметры землетрясений и сейсмотектонические деформации Северного Тянь-Шаня»

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика

Актуальность темы исследований. Диссертационная работа Н.А. Сычевой посвящена фундаментальной и одновременной практически значимой проблеме современной геофизики – детальной оценке напряженно-деформированного состояния литосферы на основе комплексного анализа кинематических и динамических параметров очагов землетрясений. Выбор в качестве объекта исследования территории Северного Тянь-Шаня обусловлен как его сложным геологическим строением, сформированным в условиях интенсивного внутриконтинентального орогенеза, так и исключительно высоким уровнем сейсмической опасности региона. Научное обоснование и реализация массового расчета механизмов очагов и тензоров сейсмического момента, охватывающего, в том числе слабые землетрясения, открывает новые возможности для выявления тонкой структуры деформационных процессов в тектоносфере.

Высокая актуальность работы также тесно связана с сейсмологической сетью квазиреального времени KNET, функционирование и развитие которой позволило аккумулировать значительный объем первичных данных, требующих глубокого теоретического осмысления и применения современных алгоритмов обработки. Полученные диссертантом результаты по картированию режимов сейсмотектонических деформаций и вида напряженного состояния, расчету частотной зависимости добротности среды и скейлинговых соотношений динамических параметров очагов землетрясений не только обогащают теоретические представления о природе сейсмогенеза, но и имеют прямое прикладное значение. Они служат основой для тектонофизического районирования, оценки природно-техногенных рисков и уточнения моделей сейсмической опасности густонаселенных и промышленно развитых горных территорий, что полностью отвечает запросам геодинамики и инженерной сейсмологии.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 125 иллюстраций и 38 таблиц. Общий объем диссертационной работы составляет 269 страниц, список использованной литературы включает 385 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой в диссертации проблемы, сформулированы цель и задачи работы, раскрыта новизна полученных результатов, их научно-практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, а также аргументирована обоснованность и достоверность результатов и выводов, приведены сведения о публикации полученных результатов.

Первая глава посвящена обзору состояния исследований в области определения очаговых параметров землетрясений и их использования для реконструкции напряженно-деформированного состояния геосреды, закладывающих теоретическую и фактологическую основу для последующих разделов диссертации. В первом разделе главы подробно охарактеризован сейсмический процесс в Тянь-Шаньском регионе, который рассматривается как область интенсивного внутриконтинентального орогенеза, вызванного коллизией Индостана и Евразии. Диссертант детально описывает строение Северного Тянь-Шаня и пространственные границы Бишкекского геодинамического полигона. Отдельный раздел посвящен обзору методов оценки очаговых параметров землетрясений. Рассмотрены классический метод оценки механизма очага по полярности первых вступлений сейсмических волн и метод волновой инверсии, а также методы сейсмотектонических деформаций С.Л. Юнги и катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого для реконструкции деформаций и напряжений по сейсмическим данным. Приведен обзор методов оценки добротности среды по кода-волнам землетрясений на одной станции и по томографической инверсии на основе множества станций.

Резюмируя главу, Н.А. Сычева аргументирует необходимость массового расчета кинематических и динамических параметров землетрясений широкого энергетического диапазона, и указывает на высокую научную ценность сопоставления сейсмологических данных с данными ГНСС-измерений.

Во второй главе детально рассмотрены методические вопросы первичной обработки данных сейсмологической сети KNET и формированию на их основе локального каталога землетрясений Бишкекского геодинамического полигона за период 1994-2020 годов. В первом подразделе приводится история развертывания сети KNET, описываются технические параметры оборудования и результаты детального анализа уровня сейсмических шумов с расчетом вероятностных плотностей мощности сейсмического шума. Проведенный диссертантом анализ по сезонам и времени суток позволил доказать, что станции сети KNET в целом являются малошумящими, а регистрируемые ими волновые формы обладают высоким качеством и полностью пригодны для прецизионного расчета очаговых параметров.

Второй подраздел посвящен выбору оптимальной скоростной модели среды. Приведены результаты сравнительного анализа четырех существующих скоростных моделей Тянь-Шаньского региона по критериям минимизации невязок прихода сейсмических волн и ошибок определения гипоцентров. В третьем подразделе подробно описывается структура и количественные параметры созданного каталога, который включает более 10500 землетрясений и свыше 130000 верифицированных времени прихода Р- и S-волн. Четвертый подраздел направлен на углубленное исследование статистических характеристик сейсмического процесса. В нем представлены количественные распределения землетрясений по классам во времени и по глубине, также результаты очистки каталога от афтершоков методом локального отношения интенсивностей. На основе анализа графиков повторяемости Гутенберга-Рихтера определен уровень представительности событий, который для Бишкекского геодинамического полигона $K \geq 6.7$. Сделан вывод о том, что для анализа слабой сейсмичности по данным сети KNET целесообразно ограничиваться территорией полигона.

Третья глава диссертационного исследования посвящена детальному изучению закономерностей распространения сейсмических волн в Северо-Тянь-Шаньском регионе, а также расчету передаточных характеристик среды и станционных поправок. В первом подразделе изложены методика и результаты оценки эффективной сейсмической добротности среды рассматриваемого региона на основе анализа затухания кода-волн локальных землетрясений. Проанализировав участки кода-волн разной длительности на

разных частотах получена эмпирическая степенная зависимость добротности среды от частоты, характерная для тектонически активных регионов, а также показано, что коэффициент затухания сейсмических волн изменяется по экспоненциальному закону до глубины 80 км, после чего его изменения становятся незначительными.

Второй подраздел главы посвящен построению трехмерных моделей поля затухания объемных волн на основе метода томографической инверсии с пассивным источником, реализованного с использованием итеративного кода LOTOS. На основе большого массива данных, включающего сейсмические записи более 6000 землетрясений, построены детальные карты распределения аномалий затухания Р- и S-волн на глубинах 5 и 15 км. Установлено, 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 и депрессии озера Иссык-Куль.

В третьем подразделе представлены результаты расчета индивидуальных станционных поправок для цифровой сети KNET с применением метода Накамуры. На основе сравнительного анализа записей S-волн 90 локальных землетрясений и более 5000 сегментов сейсмического шума доказано отсутствие выраженных резонансных эффектов, что позволяет использовать полученные калибровочные функции для корректного построения очаговых спектров в последующих главах диссертации.

В четвертой главе представлены результаты определения кинематических параметров очагов землетрясений Северного и Центрального Тянь-Шаня на основе данных сети KNET. В первом подразделе изложены теоретические основы силовой модели очага, геометрические параметры плоскости разрыва и методология двух подходов: метода полярности первых вступлений Р-волн и метода инверсии волновых форм для расчета тензоров сейсмического момента.

Во втором подразделе представлены результаты массового расчета фокальных механизмов по знакам вступления Р-волн для 1770 событий. Н.А. Сычевой выполнена типизация подвижек, показано преобладание взбросов и взбросо-сдвигов, а также горизонтальных сдвигов, что отражает субмеридиональное сокращение коры Тянь-Шаня. Выявлено глубинное

разделение: сбросовые события приурочены к верхним 10 км коры, тогда как взбросы и сдвиги доминируют на больших глубинах. Полученные результаты успешно верифицированы независимыми данными полевых структурно-геологических исследований Киргизского хребта.

В третьем подразделе представлены результаты расчеты тензора сейсмического момента методом волновой инверсии для 334 землетрясения ($M \geq 3.5$). Статистический анализ подтвердил устойчивое субгоризонтальное положения осей сжатия северо-северо-западного направления и субвертикальное положение осей растяжения. Показано изменение типов подвижек при переходе от слабых к умеренным событиям.

Пятая глава посвящена определению и анализу динамических параметров очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня на основе построения очаговых спектров. В первом подразделе изложена методология расчетов ключевых параметров: скалярного сейсмического момента, радиуса очага и сброса касательных напряжений с использованием классических подходов К. Аки, П. Ричардса и Ю.В. Ризниченко. Второй подраздел представляет результаты расчета динамических параметров для 187 землетрясений, которые произошли на территории, ограниченной координатами краевых станций сети KNET, за 1998-2017 гг. с $2.2 \leq M \leq 6.0$. Н.А. Сычевой определены границы вариаций радиуса очага (от 200 до 1100 м) и сброса касательных напряжения (от 0.07 до 16 МПа), а также установлена степенная зависимость сброшенных напряжений от скалярного сейсмического момента с показателем порядка 0.4, что указывает на отсутствие подобия очагов событий разных энергетических масштабов. На основе площадного анализа выделены зоны аномально высокого сброса напряжений, приуроченные к областям интенсивного одноосного сжатия.

Шестая глава диссертационной работы посвящена комплексному исследованию и картированию параметров напряженно-деформированного состояния земной коры Северного Тянь-Шаня. В первом подразделе изложены результаты применения метода сеймотектонических деформаций С.Л. Юнги. На основе анализа 1770 события установлено преобладание режимов транспрессии и горизонтального сдвига, обнаружен разворот осей укорочения с глубиной к меридиональному направлению, а также доказана высокая совместимость деформационной модели, построенной по сейсмическим данным, с данным ГНСС-наблюдений.

Второй подраздел представляет описание и результаты расчета напряженного состояния методов катакластического анализа Ю.Л. Ребецкого на четырех глубинах (5, 10, 15 и 20 км). Показано, что оси максимального сжатия имеют устойчивое субмеридиональное простирание, а вид тензора напряжений в основном отвечает чистому сдвигу. В третьем подразделе показано, что рассматриваемый регион с точки зрения напряженно-деформированного состояния, характеризуется блочным неоднородным строением: для высокогорных хребтов типичен режим горизонтального сжатия, а для Суусамырской и Кочкорской впадин – горизонтального сдвига, а для восточного окончания Чуйской впадины – режим растяжения. Приповерхностный слой (0-10 км) характеризуется мозаичностью деформационных режимов, которая с увеличением глубины сменяется более однородным полем простого сжатия.

В **заключении** на основе полученных решений поставленных задач сформулированы основные выводы.

Список публикаций автора диссертационной работы **отражает** основные теоретические и практические результаты работы, **обосновывает** основные защищаемые положения. Автореферат диссертации по своему содержанию полностью соответствует основным идеям диссертации.

Научная новизна результатов работы заключается в реализации комплексного системного подхода к изучению очаговых параметров землетрясений и количественной оценке напряженно-деформированного состояния земной коры Северного Тянь-Шаня на новом фактическом и методическом уровне. К наиболее значимым элементам новизны относятся следующие результаты:

- Сформирована база данных фокальных механизмов очагов 1770 слабых и умеренных сейсмических событий, а также тензоров сейсмического момента 334 землетрясений.
- Впервые построены карты распределения интенсивности и типов сеймотектонических деформаций, включая распределения вертикальной компоненты тензора сеймотектонической деформации и коэффициента Лоде-Надаи для территории Северного Тянь-Шаня. Выявленная квазиоднородная доменная структура существенно дополняет существующие геодинамические схемы региона.

- Впервые построены региональные эмпирические зависимости ключевых динамических параметров от скалярного сейсмического момента.
- Впервые построены разрезы поля затухания сейсмических волн и получены функции зависимости добротности среды от частоты для территории Бишкекского геодинамического полигона.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в возможности непосредственного использования его результатов для снижения природно-техногенных рисков и совершенствования методов сейсмологического мониторинга. Построенные детальные карты сеймотектонических деформаций и типов геодинамических режимов могут быть использованы для уточнения положения и уровня опасности сегментов разломов Северного Тянь-Шаня. Разработанные диссертантом алгоритмы и программы обработки больших массивов сейсмических данных (получено 6 свидетельств Роспатента РФ), включая комплексы для анализа шумов, расчета добротности среды и станционных поправок, могут быть непосредственно внедрены в практику Единой геофизической службы РАН для мониторинга других сейсмоактивных регионов России. Сформированные базы данных по фокальным механизмам и тензорам сейсмического момента могут служить основой для верификации численных моделей деформирования данного региона.

Результаты, полученные Н.А. Сычевой, обладают несомненной значимостью, как с фундаментальной, так и практической точки зрения, так как вносят существенный вклад в развитие современной тектонофизики, континентальной геодинамики и сейсмологии.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, базируется на использовании огромного объема качественных первичных данных и корректном применении современных, признанных в мировом научном сообществе методов, таких как метод полярности первых вступлений Р-волн, метода инверсии волновых форма, методы оценки добротности среды по кода-волнам землетрясений на одной станции и по томографической инверсии на основе множества станций, методы сеймотектонических деформаций и катакластического анализа. Также достоверность полученных

результатов убедительно доказывается их успешной кросс-верификацией с использованием независимых подходов. В частности, рассчитанные по сейсмологическим данным направления осей укорочения хорошо коррелируют с ГНСС-данными (для 70% точек разница в азимутах не превышает 15 градусов). Геометрические параметры фокальных механизмов подтверждаются результатами независимых полевых структурно-геологических исследований в пределах Киргизского хребта, а полученные решения для тензоров сейсмического момента демонстрируют высокую степень сходимости с независимыми определениями из международного каталога GCMT.

Дополнительным свидетельством достоверности основных положений работы служит их широкая апробация на всероссийских и международных конференциях (включая генеральные ассамблеи IUGG и ESC), отражение основных результатов в 39 научных публикациях и закрепления приоритета разработанных алгоритмов 6 свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Замечания по работе носят рекомендательный характер и не влияют на общее положительное впечатление от работы:

1. Текст диссертации не лишен опечаток и неточностей, например, в четвертой главе имеет место сбой в нумерации рисунков.
2. В разделе 2.2.2 в результате проведенного анализа показано, что оптимальной скоростной моделью литосферы является шестислойная модель С. Реккера. При этом и для нее на проекциях сейсмических событий на вертикальные плоскости различной ориентации имеют место артефакты в виде горизонтальных границ. Из текста диссертации неясно участвовали ли эти события в дальнейшем анализе или они были удалены из итогового каталога.
3. При расчете фокальных механизмов очагов землетрясений указано, что минимальное количество знаков прихода Р-волны (параметр OBS), для которых найденное решение можно считать надежным, составляет семь и более. При этом вопрос устойчивости найденных решений даже для $OBS = 9-10$ остается открытым. Использование, например, метода «складного ножа» (jackknife resampling), заключающегося в последовательном исключении данных с одной станции, позволило бы количественно оценить устойчивость

найденного решения или определить среднее решение для всех реализаций.

4. В разделе 4.2.3, посвященном расчету тензора сейсмического момента в условиях сети KNET указано, что при расчете функции Грина для территории Северного Тянь-Шаня использовалась скоростная модель ИГД РАН. В тексте не приведено разъяснение, почему не была выбрана скоростная модель С. Реккера, оптимальность которой было доказана выше.
5. В разделе 6.1.2, посвященном расчету сеймотектонических деформаций земной коры Северного Тянь-Шаня, приведены распределения главных компонент усредненного тензора деформации (рис. 6.1.4), а также распределения произведения главных компонент этого тензора на интенсивность деформации (рис. 6.1.5). На самом деле для построения этих распределений использованы диагональные компоненты тензора деформации, а не его главные значения.
6. Несомненным преимуществом данной работы является оценка как напряженного (с использованием метода катакластического анализа), так и деформированного (с использованием метода сеймотектонических деформаций) состояния рассматриваемого региона. При этом, по мнению оппонента, перспективным является исследование степени несоосности главных осей усредненного тензора деформаций и главных осей тензора напряжений, являющейся индикатором степени анизотропии и трещиноватости (блочности) исследуемой геосреды.

Общая оценка работы.

Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.9 «Геофизика» (физико-математические науки).

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации можно сделать заключение, что диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная проблема, имеющая важное значение, как для развития фундаментальных представлений современной тектонофизики и физики очага землетрясений, так и для решения актуальных задач сейсмического

районирования, детальной оценки природно-техногенных рисков и обеспечения геомеханической безопасности критически важных объектов инфраструктуры в сейсмоопасных горных регионах.

Считаю, что диссертация «Очаговые параметры землетрясений и сейсмостектонические деформации Северного Тянь-Шаня» соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.), а ее автор, Сычева Найля Абдулловна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.9 «Геофизика».

Я, Пантелеев Иван Алексеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета Д 24.1.132.01, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

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, доктор физико-математических наук (1.1.8 Механика деформируемого твердого тела)

Сведения об организации: 614090, г. Пермь, ул. Ленина, 13а; (342) 212-60-08; psc@permisc.ru; <http://www.permisc.ru>

04.09.2026

Пантелеев Иван Алексеевич
pia@icmm.ru, +7 (342) 23783117

Личную подпись _____
удостоверяю _____
Специалист по кадрам _____

