

Отзыв научного консультанта
диссертационной работы Сычёвой Найли Абдулловны
«ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ
ДЕФОРМАЦИИ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ»,
представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по
специальности 1.6.9. «Геофизика»

Соискатель – Сычёва Н.А. работает в Институте физики Земли им О.Ю. Шмидта РАН, в лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики в должности старшего научного сотрудника. Окончила Томский политехнический институт им. С.М. Кирова (в настоящее время – ТПУ, Томский политехнический университет). Научно-исследовательскую деятельность начала вести в 80-е годы в Научной станции ИВТАН-2, г. Фрунзе. Организация была неоднократно переименована, последнее название, с которым у неё аффилировано множество публикаций по теме диссертации – Научная станция РАН в г. Бишкеке. Параллельно с первичной обработкой геофизических данных (геомагнитное поле, ГНСС позиционирование, сейсмические записи) Найля Абдулловна повышала свою квалификацию как программиста. Освоила работу в операционной системе UNIX на SUN SPARK LX с программным пакетом COLORADO для обработки сейсмических данных. Уже в те годы сложился её подход к решению научных задач по обработке и интерпретации геофизических данных, соединяющий тщательность и аккуратность камеральщиков и профессионализм программистов-распорядителей информационно-вычислительных ресурсов. Она как бы предугадала, насколько это будет важно для науки в следующем веке.

После развертывания в Северном Тянь-Шане сейсмической сети KNET задачей Сычёвой Н.А. стало сопровождение этой сети, контроль за оперативной обработкой данных. При этом получаемые данные: сейсмограммы со всех 10 станций, каталоги землетрясений, зарегистрированных сетью KNET, стали предметом её исследований. Сычёва Н.А. участвовала в разработках ряда вопросов региональной сейсмичности, а особую инициативу и интерес проявила к расчёту параметров фокальных механизмов для максимально возможного числа землетрясений, а также к оценкам сейсмоструктурных деформаций (СТД). Ей удалось показать, что для компактной территории, околостанционной станциями KNET и называемой Бишкекским геодинамическим полигоном, БГП, можно получить статистически значимый набор этих параметров за сравнительно небольшой период времени.

Сычёва Н.А. защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 - «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» в 2005 г. в диссертационном совете ИФЗ РАН, тема «Исследование фокальных механизмов очагов землетрясений и сейсмоструктурных деформаций Северного Тянь-Шаня по данным цифровой сейсмической сети KNET». Научным руководителем кандидатской диссертации был доктор физико-математических наук, профессор С.Л. Юнга, сотрудничество с ним продолжилось и после защиты.

В дальнейших исследованиях кинематических (фокальных) и динамических параметров землетрясений Северного Тянь-Шаня важным этапом было выполнение 3 проектов по грантам РФФИ № 09-05-00687а, № 12-05-00234-а и № 15-05-06857а, полученным Н.А. Сычёвой. В ходе этих проектов сложилось творческое сотрудничество с лабораторией фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики ИФЗ РАН, руководитель - доктор физико-математических наук Ю.Л. Ребецкий. Результаты исследований очаговых параметров и добротности, полученные Сычёвой Н.А. для территории Северного Тянь-Шаня, изложены в 24 публикациях в журналах, рекомендованных ВАК для изложения материалов диссертаций. А в журналах, включенных в Белый список (уровни 1, 2) опубликовано больше 20 статей по теме диссертации. По инициативе соискателя было подготовлено обобщение – коллективная монография «Вычислительные технологии в сейсмологических исследованиях (на примере сети KNET, Северный Тянь-Шань)». В этой монографии, изданной в 2020 г. и содержащей 358 с, она написала более 2/3 текста, оформила все рисунки и электронные приложения.

В период работы в ИФЗ РАН с 2022 г. Сычёва Н.А. подключилась к исследованиям по сейсмотектонике и тектонофизике в Алтае-Саянском и Крымско-Черноморском регионах. При этом представилась подходящая возможность сопоставить результаты об очаговых параметрах землетрясений и добротности литосферы Северного Тянь-Шаня и других регионов. Такое сравнение позволило дополнить и уточнить интерпретацию материалов, полученных для Северного Тянь-Шаня. Более того, это способствовало завершению подготовки и оформления научно-квалификационной работы – диссертации.

Цель диссертации соискателем сформулирована как «установить закономерности распределений сейсмотектонических деформаций и параметров поля напряжений Северного Тянь-Шаня на основе получения и обработки большого объёма данных по кинематическим и динамическим параметрам очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня, а также характеристик добротности коры и верхней мантии исследуемого региона». Такая цель отражает более широкий исследовательский замысел, объединяющий работы соискателя, - извлечь максимум информации о напряжённо-деформируемом состоянии коровых массивов по данным с сейсмических станций сети KNET для внутреннего района, охваченного этими станциями (средней части Северного Тянь-Шаня). Актуальность работы, в которой реализован, насколько возможно, этот замысел, и при обобщении материала выявлены вышеупомянутые закономерности, самоочевидна. Ведь представления о напряжённо-деформированном состоянии среды (в данном случае коры Тянь-Шаня) являются тем фундаментом, базисом, на который опираются специализированные сейсмологические и геодинамические модели. А главным источником информации о поле напряжений на глубинах более первых км являются сейсмические записи и результаты их обработки.

Основными результатами диссертационной работы являются:

- Создан уникальный по своему объёму информационный банк данных по параметрам фокальных механизмов землетрясений на территории Северного Тянь-Шаня, что позволило провести устойчивую классификацию очаговых подвижек, установить количественные соотношения между наиболее частыми и реже встречающимися типами фокальных

механизмов, а также преобладающие направления осей сжатия и растяжения и углы их погружения, которые характеризуют напряжённое состояние коры исследуемого региона. С увеличением глубины ось сжатия меняет свое преимущественное направление с северо-северо-западного на северное, что является ранее неизвестным индикатором тектонической расслоенности литосферы Тянь-Шаня. Сформированный банк данных сделал возможными детальный расчёт сейсмотектонических деформаций (СТД) и частичную реконструкцию тектонических напряжений методом катакластического анализа (МКА).

- При реконструкции поля напряжений методом МКА установлено, что на глубинах до 25 км ось максимального сжатия (сигма-3) направлена субмеридионально, а направление оси минимального сжатия (девиаторного растяжения, сигма-1) – субширотное, но имеет большой угловой разброс. При этом поле напряжений в коре Северного Тянь-Шаня неоднородно по своей структуре, с характерным размером доменов с однотипными геодинамическими режимами и значениями параметра Лоде-Надаи порядка 50 км. Чередование горных поднятий и впадин согласуется с распределением по территории зон с различными геодинамическими режимами (горизонтального сжатия, горизонтального сдвига и др.).

- Результаты расчётов тензора сейсмотектонических деформаций с оптимальным зонированием (для каждой зоны количество фокальных механизмов статистически значимо), картирование значений инварианта тензора СТД – параметра Лоде-Надаи μ_ϵ , маркирующих тип напряжённого состояния коровых массивов. На западной и крайней восточной части, составляющей 20% от площади исследуемой области ($41.5-43.5^\circ$ с.ш. – $73-77^\circ$ в.д.), имеет место режим чистого сдвига (значения $\mu_\epsilon < 0.2$), на восточной части с долей площади 21% - преобладания одноосного сжатия ($0.2 < \mu_\epsilon < 0.6$), а на территории центральной части, занимающей 23% от общей площади, – одноосное сжатие $\mu_\epsilon > 0.6$. Для верхнего слоя у дневной поверхности (глубины 0 – 10 км) характерно множественность режимов СТД от горизонтального сжатия до горизонтального растяжения.

- Проекция на горизонтальную плоскость главных осей тензора СТД, рассчитанного для всего исследуемого региона, совпадают или близки к направлениям главных осей деформаций земной поверхности по данным ГНСС для Северного Тянь-Шаня. Различие азимутов этих направлений не превышает 15° почти для всей территории. Исключение вносит только эпицентральная зона Суусамырского землетрясения 1992 г., где различие направлений оси укорочения по данным СТД и ГНСС составляет около 30° , причем для данных СТД направление этой оси северо-северо-западное, а для данных ГНСС - северо-северо-восточное. Скорость субмеридионального сокращения поверхности по данным ГНСС достигает $\sim 10^{-7}$ год $^{-1}$ и значительно больше среднегодовой интенсивности СТД, составляющей даже по месту максимумов около $0.2 \cdot 10^{-9}$ год $^{-1}$.

- Определены значения добротности среды и коэффициента затухания сейсмических волн в зависимости от частоты для коры и верхней мантии Северного Тянь-Шаня. Среднее значение добротности для глубины 80 км на реперной частоте 1 Гц оценено как $Q_0 = 80$. Для зон радиусом 100 км вокруг станций сети KNET и в целом для территории, оконтуриваемой этими

станциями, частотная зависимость $Q(f)$ описывается нарастающей степенной функцией f^n с показателем степени $n = 0.9 \pm 0.02$.

- Результаты расчётов динамических параметров очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня, по которым сформирован представительный банк данных о значениях скалярного сейсмического момента, M_0 , радиуса очага, сброшенных касательных напряжений, $\Delta\sigma$, и приведенной сейсмической энергии, e_{PR} , Установлена регрессия значений сброшенных напряжений и приведенной сейсмической энергии для землетрясений с небольшими магнитудами ($M < 4.5$) в зависимости от скалярного сейсмического момента, описываемая степенной функцией $\sim (M_0)^{0.42}$. Наличие такой зависимости – признак того, что для очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня с разным сейсмическим моментом (энергией) отсутствует самоподобие.

- Определены усреднённые значения сброшенных напряжений в разных зонах на территории Северного Тянь-Шаня, выделены зоны с наибольшим уровнем сброшенных напряжений. Эти зоны расположены внутри или в близкой окрестности областей с наиболее высокими значениями параметра Лоде-Надаи (режим деформации простого, или преобладающего сжатия).

Теоретическая и практическая значимость результатов определяются следующим.

Длительное отсутствие сильных землетрясений после 1992 г. в Северном Тянь-Шане (а точнее в его срединной части, т.е. на территории Бишкекского геодинамического полигона) является феноменом, представляющим интерес для исследований различными методами. Результаты диссертации дают картину, как в данном случае реализуется геодинамический (сейсмический) процесс на разных масштабных уровнях: от характерных размеров очагов (сотни м или первые км), до размеров доменов, формирующих неоднородность поля напряжений (порядка 50 км) и далее до характерных размеров сейсмогенерирующих зон и всего региона (десятки и сотни км). Для каждого масштаба имеются свои закономерности: на низшем уровне они проявляются через статистику фокальных механизмов и динамических параметрах очагов, а на уровне наибольших размеров – в реконструкциях среднего поля напряжений методом МКА и усредненных параметрах СТД. Эта информация становится высокозначимой при анализе, происходит ли изменение сейсмического режима, увеличивается или нет сейсмическая опасность на территории Северного Тянь-Шаня.

Значимым для современной геодинамики является результат о неоднородности поля напряжений в исследуемом регионе, поскольку он свидетельствует, что для современного напряжённо - деформированного состояния кроме коллизии Индостана с Евразийской плитой столь же существенны и эффекты локальной неотектоники. Это допущение ранее основывалось на геологических данных, теперь оно дополнительно аргументировано со стороны тектонофизики. Результаты о неоднородной структуре поля напряжений Северного Тянь-Шаня также важны в связи с тектонофизическим районированием разломов. Ведь при их комплексировании с данными об углах погружения региональных разломов они позволяют определить распределения кулоновских напряжений на поверхностях простирания для выявления или уточнения расположения активных сегментов этих разломов.

Разработанные в ходе исследований программы и алгоритмы для потоковой обработки сейсмических записей больших объемов могут использоваться для анализа сейсмических данных для других регионов при оценках уровня сейсмического шума и соотношения сигнал/шум, при расчётах спектральных параметров очагов, оценках добротности среды и др.

В перспективе, карты типов напряженного состояния (составленные по методике реконструкции) или карты режимов СТД могут стать практически значимыми и востребованными в случае развития строительства в городах Северного Тянь-Шаня с применением проектов сейсмической изоляции здания от фундамента, для которых важна информация как о величине пиковых ускорений грунта, так и о направленности ускорений.

Ценность научных работ соискателя определяется значимостью полученной новой информации о закономерностях распределений очаговых параметров землетрясений, сейсмотектонических деформаций и параметров напряжённого состояния коры Северного Тянь-Шаня для обоснования новых геодинамических и/или геомеханических моделей, описывающих деформирование и сейсмичность этого региона. На примере Северного Тянь-Шаня продемонстрирован возможный перечень параметров и характерный объём данных о сейсмическом процессе, с которыми будут оперировать модели следующего этапа исследований, не ограниченные рамками параметров гипоцентров. Большие массивы геофизической информации, в особенности, полученные при углублённой обработке данных с современных сейсмических приборов, ценны как сами по себе, так и для последующих прикладных или поисковых исследований. В частности для задач инженерной сейсмологии могут быть востребованы карты режимов деформации, или распределений параметра Лоде-Надаи, из которых вытекает различие пиковых ускорений в сейсмических волнах, направленных по вертикали и горизонтали, при ожидаемом близком землетрясении (до сих пор они предполагаются одинаковыми, вопрос о различиях не поднимается). Ряд работ имеет методическую ценность: отработка методики расчёта добротности среды позволяет вычислить очаговые спектры землетрясений при учете неупругого затухания сейсмических волн.

В ходе выполнения исследований Сычёва Н.А. придерживалась наиболее надёжных методов, обеспечивающих высокую степень достоверности результатов. Стоит отметить «разумную» избыточность проведенных тестов при адаптации алгоритмов и отладке программ, а также повторных расчётов с обновленными входными данными. Такая верификация – важная составляющая диссертационной работы, поскольку соответствие результатов с данными для других регионов – лишь косвенное их подтверждение (региональные особенности могут проявиться в статистике очаговых параметров).

Текст диссертации написан ясным научным языком, включая использование формул, несущих ключевую информацию о физических величинах, и изложение аспектов компьютерной математики. Излагаемый материал хорошо иллюстрирован графическими объектами, которые способствуют его пониманию.

Диссертация Сычёвой Н.А. является законченным научно-квалификационным исследованием закономерностей распределений в коре Северного Тянь-Шаня очаговых параметров землетрясений, сейсмотектонических деформаций и направлений действия

главных напряжений, выполненным на актуальную тему. В работе получено множество новых, оригинальных результатов, совокупность которых имеет важное значение для геофизики и сейсмологии, направление «Физика очага землетрясения и вмещающей среды». Работа выполнена на высоком научном уровне и содержит результаты, имеющие практическое значение при использовании в других сейсмоопасных регионах. Научные результаты диссертации соответствуют пунктам 6, 8, 9, 17 Паспорта специальности 1.6.9. «Геофизика».

Считаю, что диссертация «Очаговые параметры землетрясений и сеймотектонические деформации Северного Тянь-Шаня» соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям доктора наук, а ее автор – **Сычёва Найля Абдулловна** заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.9. «Геофизика».

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»



Контактные данные:

Тел.: 8 (4242) 791517,

Электронная почта: nauka@imgg.ru, bleom@mail.ru

Специальность, по которой научным консультантом защищена диссертация:

25.00.10 - «Геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Адрес места работы: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки 1Б, ИМГиГ ДВО РАН

Подпись Богомолова Л.М. заверена,
Учёный секретарь ИМГиГ ДВО РАН,
кандидат технических наук



А.А. Верхотуров