

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе

Ирины Викторовны Медведь *«Глубинные механизмы коллизионных процессов в регионах Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня на основе результатов региональной и локальной сейсмической томографии»,*

представленной на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук по специальности

25.00.03 – Геотектоника и геодинамика

Вводная часть. Записи колебаний, вызванных сейсмическими событиями – это экспериментальная основа геофизики, изучающей скоростное строение Земли. Скорости распространения сейсмических волн в недрах Земли линейно связаны с плотностью вещества Земли, что позволяет по их величине или по их аномалиям судить о состоянии планеты в конкретной ее области.

В настоящее время существует несколько томографических школ, занимающихся определением скоростных аномалий глубинной структуры. Классическая телесеismicкая томография школы К. Аки (Aki K., Christofferson A. and Husebye E.S., 1977) выполняется исследователями непосредственно по цифровым записям далеких землетрясений, полученным профильными или площадными сейсмическими наблюдениями. Удаленность землетрясений обеспечивает более вертикальные сейсмические лучи, а значит – меньшие помехи в районе регистрации и высокую точность определения вступления волн на цифровых записях. Координаты анализируемых землетрясений берутся из каталогов мировой сети, а невязки определяются непосредственно по цифровым записям при большом компьютерном увеличении. Подвергаются инверсии центрированные невязки. Они центрируются относительно опорной сейсмостанции в районе исследования, таким образом эффективно исключается влияние очагов землетрясений и пути от очага до района исследования. Кроме того, анализируется равное количество землетрясений с противоположных направлений, иначе существующие под центром района исследования аномалия исказятся (например, углубятся, вытянутся в ту сторону, откуда землетрясений приходит больше). Важным также является правило: длина профиля наблюдений должна вдвое или больше превышать глубину разреза. При нарушении этого правила, например, при плоскости разреза, близкой по форме к квадрату, томография будет реальна только для средней части профиля, а в краевые зоны, необеспеченные пересечением встречных лучей, «перетекут» близповерхностные низкоскоростные аномалии, что проявится на

томографии в виде так называемых «плюмов». Специалист, знакомый с этими правилами и имеющий всю информацию об использованных землетрясениях, может видеть, какой элемент томографии нереален. Разнообразные синтетические графические тесты в случае нарушения этих правил не добавляют уверенности в объективности томографии, а свидетельствуют только о малом или большом количестве используемых землетрясений.

При всех своих достоинствах классическая томография К. Аки в настоящее время по экономическим и географическим причинам не может удовлетворить насущные потребности геофизиков и геологов в изучении глубинного строения Земли. Поэтому стали развиваться менее строгие томографические методы, необеспеченные специальными системами наблюдениями, но использующие как далекие, так и близкие землетрясения, что позволило получить представление о глубинном строении на гораздо большей территории, чем прежде. С помощью томографических методов такого плана выполнено исследование и Ирины Викторовны Медведь.

Представленная к защите научная работа Ирины Викторовны Медведь – результат многолетних исследований автора. Диссертация состоит из 4 глав, введения и заключения. Общий объем работы составляет 120 страниц, включает 3 таблицы, 40 рисунков, список библиографии из 217 наименований, в том числе 173 иностранных. **Объектами исследования** являются кора и верхняя мантия под коллизионными зонами Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня.

Цель работы состоит в выявлении закономерностей формирования континентальных зон коллизии Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня на основе изучения глубинного строения коры и верхней мантии методами сейсмической томографии.

Во Введении также сформулированы задачи работы, обоснована их актуальность.

Актуальность темы определена (1) недостаточностью изученности глубинной структуры Земли, в частности скорости прохождения сейсмических волн в земной коре и верхней мантии, и механизмов коллизионных процессов, представляющих особый интерес для геотектоники и геодинамики; (2) несогласованностью и противоречивостью моделей отдельных участков Альпийско-Гималайского пояса, основанных на различных типах данных; (3) необходимостью подходов, учитывающих при восстановлении мантийных структур существование неоднородностей в земной коре (т.е. применением параметризации, использующей разномасштабные сетки).

Во Введении перечислены положения, выносимые на защиту, их научная и практическая значимость. Все необходимые характеристики работы имеются и соответствуют автореферату.

В **Главе 1** дан подробный Обзор мировых знаний о строении и механизмах коллизионных зон Киргизского Тянь-Шаня и Кавказа, относящихся к Альпийско-Гималайскому складчатому комплексу, который образовался в результате закрытия океана Тетис, отделявшего Гондвану от Лавразии [Хаин, Ломизе, 2005].

Эволюция Киргизского Тянь-Шаня изложена в работе начиная с палеозойского времени, когда происходило закрытие океанических и окраинных бассейнов [Бакиров, 1999; Бакиров, 2001, Максумова 1996]. В своем обзоре автор опирается на многочисленные литературные источники. Согласно работам [Dobretsov et al., 1996 и Buslov, 2004], Индо-Евразийское столкновение, вызвало распространение деформации внутри континента с юга на север по принципу «домино», пока 5–3 млн. лет назад не достигло мощного упора – Сибирской платформы. В связи с этим, в коллизионных областях Центральной Азии почти одновременно начинают расти высокие горы. В рамках рассматриваемой теории, деформации активировали движение Тарима и Памира на север – северо-восток, что вызвало подъем Южных хребтов Тянь-Шаня. Считается, что Казахстанская плита остановила распространение деформаций, так что хребты Киргизского Тянь-Шаня являются самой северной субширотной складчатостью в Азии, порожденной Индо-Евразийской коллизией.

Отмечено, что Эволюция Кавказа отличается от эволюции Киргизского Тянь-Шаня. В позднем протерозое, палеозое, мезозое и раннем кайнозое Кавказский регион еще принадлежал к ныне исчезнувшему океану Тетис и его Евразийской и Гондванской/Африко-Аравийской окраинам. Формирование происходило в течение многостадийной эволюции литосферы, обусловленной сближением Аравийской и Восточно-Европейской плит [Khain et al., 1975, Adamia et al., 2011]. Эволюция сопровождалась сокращением окраинных морей и возникновением новых, а также образованием зон активного вулканизма. Только в кайнозое произошла континентальная коллизия, с закрытием последнего окраинного бассейна и прекращением вулканической деятельности. В миоцене начался новейший этап развития, связанный с интенсивным горообразованием. В это время была сформирована основная структура Средиземноморского орогенного пояса. Последующие ее изменения и деформации обусловлены продолжающимся движением континентальных масс с юга [Cowgill et al., 2016]. Сближение Аравийской и Скифской плит, которое привело к образованию Кавказских гор, началось около 12 млн. лет назад [Mosar et al., 2010]. Конечная стадия коллизии происходит в неогене и четвертичном периоде [Adamia et al., 2011a].

Также выполнен обзор геологических, тектонических и геофизических исследований Тянь-Шаня и Кавказа, включающий в том числе моделирование глубинной скоростной структуры методом функции приемника по объемным волнам под руководством Л.П. Винника, упомянуты результаты анализа поверхностных волн, результаты исследований фокальных механизмов, направления векторов скорости смещений структур согласно спутниковой геодезии и другие исследования. Обзор сопровождается качественной графикой из различных работ.

Содержание **1-й главы** убедительно показывает высокую эрудицию И.В. Медведь, касающуюся наук о Земле.

В **Главе 2** описана методика исследований.

Поскольку исследованиям глубинного строения еще не так много лет, и в разрозненном научном мире нет никакой системности в сейсмических наблюдениях, то соответственно нет системности и в получаемых на их базе глубинных моделях. Однако, в геодинамических исследованиях планеты системность необходима, как необходима хотя бы гипотетическая, но каким-то образом обоснованная единая точка отсчета. В этой связи правильной, хотя и неисчерпывающей является постановка выполненных научных задач, сводящаяся к выявлению механизмов взаимодействия литосферных плит в двух существенно удаленных друг от друга коллизионных зонах (Кавказ и Киргизский Тянь-Шань) **на базе скоростных аномалий сейсмических волн, найденных по единому томографическому комплексу**. Этот комплекс включает инверсию времен прихода продольных и поперечных волн от локальных и региональных землетрясений. Для локальных масштабов (глубины до 70–80 км) был использован алгоритм LOTOS (Local Tomography Software). Для региональных данных был использован алгоритм региональной томографии, который позволяет строить скоростные модели в мантии от 50 км до глубин 700–1000 км.

В **Главе 3** приведены результаты томографических исследований регионов Киргизского Тянь-Шаня и Кавказа. Для проверки достоверности произведен ряд тестов:

- Сравнение аномалий скоростей P- и S-волн, полученных независимо.
- Тест «Четные/Нечетные источники».
- Синтетический тест «Шахматная доска».
- Синтетические тесты с реалистичными аномалиями.

Это комплекс тестов Ирина Викторовна называет верификацией. Но, как уже было отмечено во вводной части моего Отзыва, подобные тесты верификацией не являются, так как в каждый из них автоматически закладываются уже перечисленные мною ранее недочеты в методике: (1) отсутствие ограничений в виде центрирования невязок относительно опорной сейсмостанции в районе исследования, которое исключает влияние особенностей очаговой зоны землетрясений и пути от очага до района исследования; (2) отсутствие контроля за равным количеством используемых землетрясений с противоположных направлений, а ведь неравное количество встречных лучей вызывает перекося формы восстанавливаемых аномалий; (3) нарушение пропорций глубины и длины анализируемой области, что образует неравномерную сеть сейсмических лучей в исследуемой области. При невыполнении этих правил, томография будет реальна не для всех частей разреза, поскольку аномалии будут бесконтрольно растягиваться как для Р- так и для S-лучей.

Настоящей верификацией является сравнение моделей, полученных для одной и той же области Земли различными методами по различным данным. Например, сравнение моделей по объемным волнам с моделями по поверхностным волнам. Или сравнение томографии с разрезом, построенным по приемным функциям.

В **Главе 4** Ириной Викторовной Медведь проведена детальная интерпретация полученных результатов томографии Киргизского Тянь-Шаня и Кавказа, на основе которой предложена новая точка зрения на процессы взаимодействия литосферных плит под коллизионными зонами Кавказа и Тянь-Шаня. При выявлении механизмов приняты во внимание также результаты ряда работ по геофизике, геологии, геохимии и геодинамике. Автор связывает особенности строения исследуемых коллизионных зон, выявленные с помощью полученных сейсмических моделей, с процессом деламинации. Деламинация - это процесс отслоения мантийной части литосферы и ее погружение в астеносферу на глубину [Kay and Kay, 1993]. Существует ряд факторов, выступающих триггерами при процессе деламинации: (1) критический уровень сжатия (скорость сжатия и наличие флюида), (2) эклогитизация, (3) адвекция астеносферы, (4) субдукция.

Автор склонен считать, что деламинация на Тянь-Шане обусловлена процессами эклогитизации, а на Кавказе отчасти субдукционными и, отчасти, коллизионными процессами.

В **ЗАКЛЮЧЕНИИ** работы на основании полученных результатов, а также по данным материалов по геологии, геофизике и геохимии, опубликованных для

исследуемых регионов в последние годы, соискателем Ириной Викторовной Медведь было обосновано наличие различных сценариев деламинации под Кавказом и Киргизским Тянь-Шанем.

Вывод соискателя в принципе не вызывает возражения. Хотя в том и другом регионе, возможно, причина деламинации в адвекции астеносферы, инициируемой условиями коллизии. Несомненно, регионы различаются по возрасту становления, по условиям расположения, по условиям взаимодействия с соседними структурами, но воздействие адвекции астеносферы на последних этапах перестройки больших и достаточно древних массивов представляется более универсальным.

Перед интерпретацией следовало бы все-таки, не ограничиваясь синтетическими тестами, выполнить реальную верификацию – то есть провести сравнение хотя бы с одной независимой томографической моделью вдоль того же разреза. Наш опыт показывает, что может быть получено прекрасное соответствие с поверхностно-волновой томографией, поскольку речь идет в основном о мантии. В нашей лаборатории этим методом ведется плодотворная работа. Раньше модели строились Кожевниковым Владимиром Михайловичем – учеником Татьяны Борисовны Яновской, а теперь эстафету подхватили Оксана Соловей и Алена Середкина. Поскольку их трехмерная модель охватывает большой объем Азии, то предполагаю, что поверхностно-волновой томографическое сечение для Киргизского Тянь-Шаня они смогут выполнить достаточно оперативно. Но это план на ближайшее будущее.

Работа является завершенной, хотя есть некоторые недостатки в ее изложении и в оформлении.

1. Несколько нечетким является название диссертации.
2. Стр.3, строки 10–11. «Основной причиной споров является поведение *мантийной части литосферы. Она является менее плотной, чем !!! подстилающая астеносфера*, поэтому не может погружаться на глубину.» На самом деле астеносфера характеризуется не только пониженной скоростью, но и пониженной плотностью. Связь между скоростью и плотностью линейная. И V и ρ несколько меньше, чем в выше расположенной литосфере. Но вопрос о локальном погружении или об отсутствии этого феномена актуален, поскольку может как-то характеризовать геодинамическую обстановку в недалеком прошлом.

3. Видно, что работа оформлена в спешке. Знакомство с ней затруднено, так как графики много, на почти на всех рисунках нет необходимых надписей и подписей: не указаны названия регионов, координаты, где север, где юг ? ...

Если горизонтальные сечения еще спасают нанесенные географические элементы, то вертикальные разрезы трудно связать с конкретным местоположением. Пришлось подписывать. Многие рисунки очень мелкие, нечитаемые.

Отмеченные замечания не меняют общего положительного впечатления от диссертации И.В. Медведь. Диссертация написана достаточно хорошим языком. Автореферат правильно отражает ее содержание. Все вынесенные на защиту положения опубликованы в ведущих научных журналах и известны специалистам по геофизике. Результаты диссертационной работы И.В. Медведь могут быть использованы в научных организациях, проводящих геофизические исследования, в частности, в Институте Физики Земли РАН (Москва), в ИНГГ СО РАН (Новосибирск), в Институте земной коры СО РАН и других.

Подводя итог вышеизложенному, сделано заключение о том, что диссертационная работа И.В. Медведь «Глубинные механизмы коллизионных процессов в регионах Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня на основе результатов региональной и локальной сейсмической томографии» представляет законченное исследование, которое можно квалифицировать как научное достижение, важное для геофизики. Диссертация удовлетворяет требованиям Положения «О порядке присуждения ученых степеней» ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Ирина Викторовна Медведь, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика.

Ведущий научный сотрудник ИЗК СО РАН,

доктор геолого-минералогических наук

В.В. Мордвинова

Валентина Владимировна Мордвинова

В.н.с. ИЗК СО РАН

Адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

e-mail: mordv@crust.irk.ru

телефон: (3952) 422-761; 89149089370

специальность 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Я, Мордвинова Валентина Владимировна, даю свое согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета, и на их дальнейшую обработку.



16 ноября 2018 г.

Подпись В.В. Мордвиновой заверяю

Ученый секретарь ИЗК СО РАН

К.Г.-м.н.



Р.П. Дорофеева