

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу

**Медведь Ирины Викторовны**

***«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

В начале 1970-х годов сейсмологи подошли к пониманию того, что полная трехмерная модель вариации наблюдаемого времени по сейсмическим годографам позволят лучше интерпретировать внутреннее строение земных недр. В 1974 г. американский сейсмолог Кей Аки доложил на Осенней сессии Американского Геофизического союза свое первое исследование совместно с норвежскими сейсмологами по сейсмической томографии коры и верхней мантии под Калифорнией. Этим была открыта эра томографических исследований с помощью сейсмических волн, впервые предпринятой в медицине на основе рентгеновских лучей для сканирования человеческого тела. Сейсмическая томография позволяет реконструировать сейсмические скорости по временам пробега волн, получаемым из сейсмограмм. При этом американцы Г. Бэкус и Ф. Гильберт, советские ученые Н. Тихонов, В. Кейлис-Борок и Т. Яновская и другие подготовили прочный теоретический фундамент для решения задач сейсмической томографии, а именно, для решения некорректных задач математической геофизики/сейсмологии (существование, однозначность и устойчивость решения задач сейсмической томографии, регуляризация решений и т.п.) Советские и российские ученые внесли существенный вклад в развитие сейсмической томографии, и среди них Л. Винник и И. Кулаков. Представленная к защите диссертация является трудом Ирины В. Медведь, ученика Ивана Кулакова, и представляет собой оригинальное исследование по сейсмической томографии Кавказа и Тянь-Шаня с геодинамическими интерпретациями этих сейсмических моделей.

Диссертационная работа И.В. Медведь посвящена глубинному строению и возможным механизмам коллизионных процессов на Кавказе и Киргизской части Тянь-Шаня на основе анализа локальных и региональных сейсмических томограмм. Работа нацелена на выявление закономерностей формирования континентальных зон коллизии. Хотя первоначально не совсем ясна была связь этих двух регионов в рамках одной диссертации, соискатель представила достаточно убедительные факты этой связи, основанные на геодинамическом развитии регионов в рамках Альпийско-Гималайского сейсмического пояса. Работа вызывает интерес с точки зрения понимания процессов в зонах коллизии и горообразования. Особое значение данной работе придает тот факт, что это первое исследование по совместной интерпретации разномасштабных (локальной и региональной) томографических моделей двух горных регионов. Создание достоверных моделей строения коры и верхней мантии под Кавказом и Тянь-Шанем определяет актуальность данной диссертационной работы.

#### Метод исследований и фактический материал

Исследования выполнены методами пассивной сейсмической томографии, разработанной ранее И. Кулаковым. В работе использовались две разномасштабные схемы сейсмической томографии и соответствующие алгоритмы: (1) алгоритм локальной томографии LOTOS (Local Tomography Software по Koutrakov, 2009) и (2) алгоритм томографической инверсии (по Koutrakov and Sobolev, 2006). Алгоритм LOTOS использует времена пробега продольных и поперечных волн от местных землетрясений, зарегистрированных станциями в исследуемом регионе, и позволяет изучать структуру земных недр в масштабах коры и верхов мантии. Региональная томографическая модель основана на данных по временам пробега сейсмических волн, полученными из глобальных сейсмических каталогов, и для исследования отдельного региона используются все сейсмические лучи, проходящие через изучаемый объем.

В диссертационной работе представлены сейсмо-томографические модели под областями коллизии Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня с использованием каталогов глобальных данных Международного сейсмологического центра за период с 1964 по 2007 гг.

### Научная новизна

Новизна данной диссертации заключается в понимании механизмов коллизионных процессов в Альпийско-Гималайском сейсмическом поясе и основана на комплексном подходе к интерпретации сейсмических моделей, полученных с помощью разномасштабных методов сейсмической томографии. Также впервые автором диссертационной работы был произведен сравнительный анализ скоростных сейсмических моделей двух коллизионных зон внутри одного и того же сейсмического пояса.

### Научная значимость работы

Одним из самых достоверных индикаторов научной значимости работы является цитируемость опубликованных исследований, которые вошли в диссертацию. Я провел анализ по Google цитируемости работ соискателя (представленных в диссертации на стр. 11) и получил, что на 12 ноября 2018 г. работа 1 цитировалась 34 раза (с 2012 г.), работа 2 – 15 раз (с 2013 г.), работа 3 – 1 раз (с 2016 г.) – 50 раз за несколько лет. Это говорит об интересе к научным исследованиям соискателя со стороны научной общественности. С теоретической точки зрения научная значимость работы заключается в понимании динамики и возможных механизмов погружения мантийной части литосферы в зонах коллизии. С практической точки зрения значимость работы заключается в использовании современных методов томографии и их комбинации для лучшей интерпретации моделей.

### Основные научные положения, выносимые на защиту

Следующие основные научные положения вынесены на защиту.

- (1) *«Под регионом Киргизского Тянь-Шаня имеет место аномалия пониженных скоростей сейсмических волн размерами ~200 км по глубине*

*и латерали (с юго-востока на северо-запад), а под Таримской и Казахстанской плитами – аномалии повышенных скоростей мощностью 100–150 км, характеризующиеся наклоном в сторону Тянь-Шаня до глубин ~500 км». Согласен с этим положением.*

(2) *«Под горными областями Кавказа имеет место аномалия пониженных скоростей сейсмических волн размерами ~450 км по латерали с юга на север и ~300 км по глубине, а под Скифской и Аравийской плитами – аномалии повышенных скоростей мощностью 150–200 км, характеризующиеся наклоном в сторону Кавказа до глубины ~350 км.»* Также согласен с этим положением.

(3) *«Глубинные механизмы коллизионных процессов в регионах Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня обусловлены процессом деламинации, о чем свидетельствуют отсутствие мантийной части литосферы у взаимодействующих плит непосредственно под горными областями и следы ее погружения в краевых частях исследуемых регионов. Установленные особенности глубинного строения коллизионных зон и предлагаемый механизм их формирования основаны на интерпретации авторских моделей скоростей сейсмических волн, а также на материалах по геологии, геофизике и геохимии, опубликованных для исследуемых регионов в последние годы.»* Имеются замечания. Данное утверждение автора диссертации носит слишком категоричный характер в отношении механизмов динамики литосферы.

- Во-первых, сейсмическая томография — это модель мгновенных сейсмических скоростей, которая не может достоверно определить динамику и историю развития литосферной части мантии, а только предполагать возможные этапы развития. Поэтому утверждение, что процессы коллизии в регионах Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня обусловлены процессом деламинации, является сильно преувеличенным и не может являться положением диссертации, основанным на двух первых достаточно точных ее научных положениях.

- Во-вторых, отсутствие мантийной части литосферы – еще более сильное утверждение. Аномалии сейсмических волн порядка 3% (что приблизительно 0.24 км/с для скоростей продольных волн порядка 8 км/с и порядка 0.135 км/с для скоростей поперечных волн порядка 4.5 км/с) приводят к скоростям Р-волн порядка 7.76 км/с и S-волн порядка 4.365 км/с, которые не являются прямым свидетельством отсутствия литосферы и присутствия более горячей астеносферы. Эти аномалии могут быть связаны с химическими неоднородностями, процессами плавления и разуплотнения при коллизионных процессах.
- И в-третьих, геодинамические процессы могут предсказывать численные ретроспективные модели (описанные в книгах Ismail-Zadeh and Tackley, 2010; Ismail-Zadeh et al., 2016), которые основаны на сейсмических томографических моделях; напр., как это сделано в работах по геодинамической эволюции коллизионной зоны Карпат (Ismail-Zadeh et al., EPSL, 2008) или по субдукции плит под Японскими островами в геологическом прошлом (Ismail-Zadeh et al., Sci. Rep., 2013).

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из четырех глав, введения и заключения. Общий объем работы составляет 120 страниц, включает 3 таблицы, 40 рисунков, список литературы из 217 наименований, в том числе 173 иностранных.

### **Содержание диссертации**

**«Введение»** представляет собой краткое изложение диссертационной работы с описанием актуальности и объектов исследования, целей работы и научных задач исследования, личного вклада соискателя, методологии исследования, научной новизны и значимости работы, степени достоверности полученных результатов, основных положений диссертации и соответствия диссертации паспорту научной специальности. Результаты исследований по работе представлены в пяти научных

работах, часть из которых опубликованы в высокорейтинговых международных научных журналах. Результаты также доложены автором диссертации на многих российских и международных конференциях. По этой части работы имеются следующие замечания.

- Автор пишет на стр. 4, что «при этом очевидно, что неоднородности в коре могут оказывать влияние на восстановление мантийных структур, и, если они не учитываются в региональных исследованиях, это может привести к определенным ошибкам.» Это далеко не очевидно, и автор должен подробнее изложить, почему неоднородности в коре влияют на восстановление мантийных структур.
- На той же странице автор приводит задачи исследования. Вторая задача – «Выявление механизмов взаимодействия литосферных плит...». Хорошо бы кратко описать как механизмы могут быть выявлены на основе сейсмических томографических моделей.
- На стр. 8 в пункте 3 раздела «Теоретическая и практическая значимость работы» утверждается, что «способ сравнения сейсмических моделей двух разных регионов был применен впервые». Автор должен уточнить, что этот способ сравнения применен впервые для двух конкретных регионов Альпийско-Гималайского пояса. Иначе, это утверждение не совсем верно (см. работу: Wortel, M.J.R., Spakman, W., 2000. Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region. Science 290, 1910–1917, где сравниваются различные регионы по моделям сейсмической томографии).

**Глава 1 «ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ О СТРОЕНИИ И МЕХАНИЗМАХ КОЛЛИЗИОННЫХ ЗОН КАВКАЗА И КИРГИЗСКОГО ТЯНЬ-ШАНЯ»** представляет собой развернутый обзор геолого-геофизического исследований по двум регионам. Глава начинается с изложения эволюции коллизионных зон с описанием трех стадий коллизии (пре-, син- и пост-коллизионных этапов развития). Далее автор разбирает эволюцию Альпийско-Гималайского складчатого пояса с триасового времени и закрытие Тетиса, и в частности, эволюцию Тянь-Шаня и Кавказа. Обзор показывает, что основными различиями Аравийско-Евразийской коллизионной

зоны от Гималайской являются: этап жесткого столкновения плит, который произошел в миоцене-плиоцене, большое количество офиолитов и останцы задуговых бассейнов (Черное и Каспийское моря). Далее приводится подробный обзор геолого-геофизических исследований двух регионов: Тянь-Шаня и Кавказа. По данной главе имеются следующие замечания.

- На стр. 24 при обсуждении разломов в регионе Тянь-Шаня, необходимо представить рисунок с основными разломами; названия разломов не дают точного представления о их расположении друг относительно друга и затрудняет понимание кинематики и динамики литосферных блоков.
- На стр. 24 на основе некоторых публикаций утверждается, что «преобладание горизонтального сжатия в регионе также подтверждается анализом изображений со спутника». Вопрос: каким конкретно анализом спутниковых данных получено утверждение о преобладании горизонтального сжатия? Геодезическими измерениями
- На стр. 27 в разделе «Данные спутниковой геодезии» утверждается, что «Значительная часть этой общей величины приходится на *коэффициент сжатия* в районе Тянь-Шаня». Что подразумевается под «коэффициентом сжатия» и как скорость связана с этим коэффициентом?
- Стр. 27. «Направления векторов скорости смещений»
- На стр. 28 утверждается, что была проведена большая работа по исследованию глубинной структуры коры и верхней мантии Тянь-Шаня с помощью локальной и региональной томографии. При этом ссылки не приводятся. Если это так, то возникает вопрос: что нового сделано в диссертационной работе по этому району?
- Стр. 28. МОВ-ОГТ должен быть расшифрован как «метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки».
- Стр. 29. МОВЗ должен быть расшифрован как «метод обменных волн землетрясений».

- На стр. 31 утверждается, что «изменчивы, как выяснилось, мощности гранитного и базальтового слоев.» Вопрос: Как осуществляется привязка скоростей к базальтовому и гранитному слоям? По скачкам скоростей?
- На стр. 42 утверждается, что «за сейсмичностью на Кавказе, преимущественно в Грузии, ведутся наблюдения еще со времен СССР.» Это неверное утверждение, так как наблюдения велись и ведутся как в РФ (напр., Геофизическая служба РАН), так и в Азербайджане (Республиканская сейсмологическая служба НАНА) и в Армении (Институт геофизики и инженерной сейсмологии АН Армении).
- На стр. 43 утверждается, что «фокальные механизмы землетрясений свидетельствуют о том, что коллизия Евразийской и Аравийской плиты вызывает чистое сжатие на Кавказе». Основная картина деформаций на Кавказе действительно свидетельствует о преобладании сжатия. Однако механизмы землетрясений также свидетельствуют о сдвиговых и нормальных сбросах центральной части Кавказа.
- Стр. 44. Обзор данных по спутниковой геодезии необходимо дополнить новыми исследованиями и результатами по Кавказскому региону.

**Глава 2 «МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ»** посвящена обзору методов сейсмической томографии, используемыми в исследованиях соискателя. Приведено краткое описание алгоритма локальной сейсмической томографии LOTOS и алгоритма региональной томографии. Имеются замечания по этой главе.

- Методика исследований должна включать краткое математическое описание моделей. Это необходимо для понимания того, как (1) проводился анализ, (2) решалась обратная задача, (3) выбирался параметр регуляризации, (4) проводилось тестирование и т.п.
- На рис. 2.1 результатами исследований являются распределения скоростей продольных и поперечных волн и координаты источников (?)
- Уравнение (10) на стр. 49 записано неверно.
- На стр. 52: «параметра сетки»



**Глава 3** «РЕЗУЛЬТАТЫ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕГИОНОВ КИРГИЗСКОГО ТЯНЬ-ШАНЯ И КАВКАЗА» посвящена описанию результатов сейсмической томографии, а именно изображению (с помощью скоростей сейсмических волн) глубинной структуры коры и мантии под Кавказом и Киргизским Тянь-Шанем. Имеются замечания по этой главе.

- На стр. 52 утверждается, что «Согласно полученной модели распределения сейсмических скоростей Р и S-волн, низкоскоростная аномалия прослеживается до глубин 40 км и характеризуется наклоном с севера на юг. Это может свидетельствовать о наличии погружения Казахстанской плиты под Тянь-Шань на севере изучаемой области.» Обычно свидетельством возможного наличия более плотного вещества, способного погружаться в менее плотное, являются высокоскоростные аномалии сейсмических волн.
- На стр. 63, в разделе «Результаты региональной томографии», региональная модель представлена на трех (а не двух) горизонтальных профилях.
- На стр. 63 (снизу) отмечено, что «на глубинах до 200 км происходит размытие аномалий, что не позволяет четко определить, связана ли наклонная высокоскоростная аномалия в мантии с менее глубинными аномалиями или отделена. Эта особенность учитывается при интерпретации.» Как это учитывается?
- На рис. 3.8. представлены результаты вдоль шести вертикальных профилей. Однако расположение профилей не показано. Это затрудняет понимание трехмерной интерпретации результатов. Также указано, что «точки — положения землетрясений вокруг профилей». Гипоцентры землетрясений спроецированы на профили? Если так, то в какой окрестности профилей?
- На стр. 66 приводится утверждение, что «литосфера Тарима имеет большую мощность и является жесткой». Откуда это известно? Приведите ссылки на работы и опишите характер жесткости. Он определяется визуально по отсутствию землетрясений на Тариме?
- Стр. 66. Здесь неувязка с изложением материала на стр. 52. Теперь автор говорит о высокоскоростной аномалии на вертикальном сечении. «Модель сейсмических скоростей коры, полученная в результате инверсии локальных

данных, показывает, что в северной части изучаемой области высокоскоростная аномалия на вертикальном сечении характеризуются наклоном в южном направлении, что, возможно, отражает погружение Казахстанской плиты под Тянь-Шань.» Скорее всего описка на стр. 52.

- На стр. 67 я предлагаю исправить текст так: «Плоская наклонная высокоскоростная аномалия в верхней мантии под Тянь-Шанем, возможность существования которой показана с помощью синтетического моделирования ...». Томографическая модель ничего не доказывает, а предполагает.
- На стр. 67 автор замечает, что «наиболее важные выводы работы по исследованию Киргизского Тянь-Шаня касаются механизма коллизии литосферы.» Однако далее описывается геодинамическая эволюция Индийско-Азиатской коллизии с эоцена, которая не имеет прямого отношения к результатам исследования. Автор должен четко отделить то, что продемонстрировано в диссертационной работе, и то, что известно из других исследований, в частности по геодинамике региона, и привести ссылки на соответствующие работы.
- На стр. 67 автор пишет, что «активный рост гор и утолщение коры в южном Тянь-Шане привели к некоторому критическому состоянию, после которого дальнейшее сжатие коры стало невозможным». Почему? При медленном сжатии более пластичное вещество нижней коры может растекаться по мере утолщения коры и не приводит к критическому состоянию (хорошо бы объяснить, что такое критическое состояние). Далее автор пишет, что «после этого область сжатия сместилась на север в район границы Тянь-Шаня и Казахстанской плиты.» Приведите ссылки на соответствующие работы.
- Стр. 70. Что такое «бракованные данные»?
- На стр. 79 автор утверждает, что «вариации толщины коры отражаются в скоростных аномалиях на глубинах 30–40 км (толстая кора - низкие скорости и наоборот).» Объясните почему низкие скорости (и на какой глубине?) говорят о толщине коры?

- Таблица 3.3 практически ничего не говорит без математического описания обратной задачи (сказано также выше) и вызывает вопросы. Например, как автор решал некорректную задачу при нулевом уровне регуляризации?
- Стр. 89. Я бы предостерег соискателя от громких слов относительно «важнейшего открытия». *На основании имеющихся сейсмических результатов можно предположить, что скорости мантийной части литосферы под зоной коллизии между Аравийской и Европейской плитами в районе Кавказа понижены.* Далее идет интерпретация (без привлечения других убедительных свидетельств) об отсутствии литосферы (???) и деламинации.
- Было бы правильнее в данной главе привести только результаты томографических исследований, а интерпретацию изложить в следующей главе.

**Глава 4** «ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КИРГИЗСКОГО ТЯНЬ-ШАНЯ И КАВКАЗА» научно обосновывает причину для исследований и сравнения двух регионов и далее подробно сравнивает различные характеристики регионов, а именно, (1) наличие низкоскоростных аномалий под зоной горообразования и (2) наличие высокоскоростных аномалий, которые могут свидетельствовать о наличии останков погружившейся литосферы. Описываются факторы, ведущие к деламинации, такие как фазовые переходы (эклогитизация), адвекция и субдукция. Показаны отличия глубинного строения двух регионов, связанных с характером и размерами погружения высокоскоростных аномалий. Хотя существенных замечаний к содержанию этой главы нет, автор должен четко отделить результаты работы от интерпретаций самого автора и других исследователей.

Замечаний к «**Заключению**» диссертационной работы не имеются.

## **Рекомендации по практическому использованию материалов диссертации.**

Результаты диссертации И.В. Медведь будут полезны специалистам в области региональной геодинамики и тектоники, а также в области сейсмической томографии. Результаты работ могут быть включены в лекционные курсы по сейсмологии (в частности, по совместному анализу локальной и региональной томографии) и по региональной тектонике и геодинамике (на примерах Кавказа и Тянь-Шаня) и читаться в Новосибирском университете и других российских вузах. Материалы диссертации рекомендуются использовать в научных институтах РАН (напр., Сибирского и Уральского отделений).

## **Заключение**

Диссертационная работа И.В. Медведь является завершенным научным исследованием на актуальную тему и выполнена на высоком научном уровне. Диссертация содержит оригинальное решение задачи по совместной разномасштабной сейсмической томографии с применением к двум регионам Альпийско-Гималайского сейсмического пояса. Диссертация является высококвалификационной работой, автореферат отражает основные этапы и содержание работы, суть исследования и отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842. Представленная диссертационная работа также полностью удовлетворяет требованиям этого Постановления по новизне, актуальности, личному вкладу, практическому значению и достоверности основных положений и выводов.

**Ирина Викторовна МЕДВЕДЬ заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.03 - геотектоника и геодинамика.**

Официальный оппонент

ИСМАИЛ-ЗАДЕ Али Тофик оглы, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук (ИТПЗМГ РАН).

Адрес: 117997, РФ, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32. Тел: (495) 333-4513; Факс: (495) 333-4124; E-mail: [aismail@mitp.ru](mailto:aismail@mitp.ru)

Я, ИСМАИЛ-ЗАДЕ Али Тофик оглы, даю свое согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

14 ноября 2018 г.

Подпись А.Т. Исмаил-Заде

заверяю

Главный специалист отдела кадров

С.В. Удалова



М.П.