

Утверждаю

Врио директора ИФЗ РАН  
чл.-корр. РАН



С.А. Тихоцкий

2018 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

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»,

представленную на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук по специальности:  
25.00.03 – Геотектоника и геодинамика

Диссертационная работа И.В. Медведь посвящена применению современных алгоритмов сейсмической томографии к реконструкции глубинной структуры коллизионных орогенов Кавказа и Тянь-Шаня.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Рукопись содержит 120 страниц текста и 43 рисунка. Рисунки отличного качества, и по необходимости они выполнены в цвете, что существенно улучшает восприятие материала. Список литературы насчитывает 217 наименований (список пронумерован), из которых около 25% приходится на период после 2010 года. Диссертация написана в хорошем стиле, понятным языком.

Введение диссертации состоит из 6 стр., и в нем представлены рубрики, в которых согласно требованиям ВАК обсуждаются вопросы актуальности работы, цели и задачи, новизна, вклад автора и другие важные показатели научной работы. Представлено три защищаемых положения. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, из которых 5 в соавторстве в рецензируемых изданиях ВАК. Две из пяти публикаций вышли в журналах, индексируемых в системе Web of Science, одна из которых в журнале Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2018. Различные разделы диссертации докладывались на

российских и международных конференциях. Все требования по опубликованию материалов исследований И.В. Медведь выполнены со значительным превышением.

**Заявленными целями исследования является** выявление закономерностей формирования континентальных зон коллизии Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня на основе изучения глубинного строения коры и верхней мантии методами сейсмической томографии. Исследования включают в себя следующие задачи:

1. Построение моделей сейсмических скоростей коры и верхней мантии под Кавказом и Киргизским Тянь-Шанем по данным о временах прихода продольных и поперечных волн от локальных и региональных землетрясений.
2. Выявление механизмов взаимодействия литосферных плит в коллизионных зонах Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня с учетом результатов сейсмической томографии, а также комплекса существующих работ по геофизике, геологии, геохимии и геодинамике

Заявленные задачи являются важными с точки зрения развития геодинамики, их решение может внести существенный вклад в понимание современной глубинной тектоники исследуемых регионов и позволит дать интерпретацию эволюции их развития.

**Актуальность темы** выполненной работы для исследуемых орогенов связана с совершенствованием алгоритмов сейсмической томографии и накоплением новых данных о временах прихода сейсмических волн от землетрясений для региональных сетей сейсмических станций. Это дает возможность проводить более обоснованные расчеты с целью изучения неоднородности строения коры и верхней мантии крупных тектонических объектов континентальной литосферы, к которым прежде всего относятся внутриконтинентальные орогены.

**Научная значимость** результатов диссертационных исследований, полученных автором, связана с решением фундаментальных научных проблем в области разработки модели глубинного строения современных коллизионных орогенов. Следует отметить, что в представляемой работе автор не ограничивается только полученной моделью глубинного строения Кавказа и Тянь-Шаня, но и делает попытку дать обоснование механизмов эволюции и деформирования этих орогенов. При этом первые два результата работы, выносимых автором на защиту, относятся к результатам сейсмотомографического расчета, определяющего *коровую и верхнемантийную тектонику* исследуемых регионов, а третья отражает интерпретацию модели строения орогенов с позиции общих положений *геодинамики*.

Таким образом, выполненная работа соответствует требованиям, *к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности: 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика.*

**Новизна работы** связана с применением для анализа глубинной структуры комплекса сейсмотомографических методов, развиваемых в ИНГГ СО РАН, позволяющих на основе разномасштабного анализа получать данные не только о строении мантии, но и коры.

**Защищаемые положения** диссертации подкреплены фактическим материалом.

**Содержание исследований.** Первые две главы диссертации представляют собой описание современных взглядов на эволюцию коллизионных зон, развивающихся с позиций новой глобальной тектоники литосферных плит. Здесь дается состояние региональных исследований по Кавказу и Тянь-Шаню, а также в краткой форме излагаются методические основы применяемых алгоритмов сейсмотомографии.

Следует отметить, что изложенные в первой главе самые общие взгляды на эволюцию коллизионных зон включают наиболее радикальные идеи [Harris et al., 1986] о возможности затягивания легкой континентальной коры в верхнюю мантию. Представления об эволюции Альпийско-Гималайского складчатого пояса основаны на работе [Хаин, Ломизе, 2005].

При анализе геологической эволюции исследуемых регионов использовалось достаточно большое число современных работ (после 2010 года). И.В. Медведь использует в обосновании особенностей эволюции орогенов Центральной Азии идею Н.Л. Добрецова о последовательной передаче «деформаций сжатия» от индийского индентора к Памиру, затем к орогену Тянь-Шаня и далее к Алтаю (принцип домино). В рамках этих взглядов начало коллизии относится к периоду около 10 млн. лет назад и считается, что происходило погружение Таримской и Казахской плит под Тянь-Шань, соответственно с юга и север. Отметим, что в этом разделе не уточняется, ограничилось ли это погружение только океанской плитой или также были вовлечены в этот процесс и континентальные плиты. Имея в виду радикальную концепцию по этому вопросу, изложенную в первой части первой главы, отсутствие такого уточнения *является явным упущением работы.*

Описание тектоники регионов выполнено достаточно формально и базируется на широко известных работах В.С. Буртмана, М.М Буслова. Описание особенности складчатых структур автору удалось сделать буквально в трех предложениях! Более подробного описания удостоены разломы (чуть больше одной странички и 1 рисунок), но это касается только трех: Талассо-Ферганского, Куруктагского и Джунгарского разломов. *Ошибочно*

указано (стр. 24), что основные разломы имеют субмеридиональную ориентацию (правильно – субширотную, кроме Талласо-Ферганского в Западном Тянь-Шане и разломов в Восточном Тянь-Шане).

Взгляды И.В. Медведь на эволюцию Кавказа также в основном опираются на исследования российских и грузинских ученых (советская школа плэйт-тектонистов). Считается, что образование Кавказских гор началось 12 млн. лет назад, а коллизия на Кавказе около 3-4 млн. лет назад, после достаточно продолжительной стадии субдукции океанских плит с севера и юга (между Черным и Каспийским морями). Здесь также не уточняется, происходило ли после коллизии затягивание континентальной коры в верхнюю мантию.

*Представления на геологическое строение Кавказа дано еще более скупо, чем Тянь-Шаня.* Описание складчатых структур полностью отсутствует. Даны самые общие представления только об основных разломах Кавказа и ограничивающих его с юга Анатолийского блока и Аравийской плиты, ничего не говорится о кинематике разломов. Более подробно представлена вулканическая активность Кавказа, описание которой опирается на широкий спектр работ, вышедших в самое последнее время. Эти данные авторы приведенных в диссертации исследований используют для датировки периодов субдукции в регионе.

Описание глубинного строения исследуемых регионов *выполнено несколько более качественно, но все равно далеко не полно.* Для литосферы Тянь-Шаня использованы известные исследования, представленные в монографии [Современная геодинамика, 2005], результаты разреза МОВ-ОГТ по профилю MANAS [Макаров и др., 2010], а также работ по методу функции приемника (Л.П. Винника), методу затухания волн, локальной и региональной томографии [Roeker et al., 1993]. То же самое имеет место и в отношении геофизических данных по Кавказу. К недостаткам этого раздела можно отнести крайне ограниченное число приведенного графического материала (один профиль по Тянь-Шаню). Также достаточно скупо даются выжимки из результатов, приводимых в диссертации публикаций.

В главе 2 дается краткое описание методики расчета при помощи алгоритма локальной томографии LOTOS (автор И.Ю. Кулаков). Эта методика ориентирована на расчёт аномалий скоростей в верхней части литосферы – коре и предусматривает задание начальной одномерной скоростной модели, при этом источники и приемники сейсмических волн находятся в одном регионе. Последнее условие является главным отличием применения методики локальной сейсмотомографии от метода региональной сейсмической томографии. Таким образом, алгоритм расчета и формирования баз данных сейсмических лучей обоих методов одинаков.

Третья глава содержит описание исходных сейсмологических данных и результатов томографических исследований для Центрального Тянь-Шаня и Кавказа. Для выполнения локальной томографии в коре (глубины до 40 км) Тянь-Шаня было использовано более 11000 времен прихода от 435 землетрясений, записанных на 260 сеймостанциях. Полученная 3D модель аномалий скоростного поля и субмеридиональный разрез, приведенный на рис. 3.3. позволили И.В. Медведь на стр. 57 сделать вывод о наличии погружения Казахской плиты под Тянь-Шань. *На самом деле, этот вывод достаточно спорный.* Скорее, приведенные на профиле результаты говорят об очень сильной локальной 10-15 км неоднородности в коре Казахской плиты. Она приурочена к западной оконечности озера Балхаш и в геологических поверхностных структурах совершенно не выражена. Возможно, что данный результат является артефактом, связанным с какими-то систематическими ошибками. Такой вывод можно сделать, основываясь на том факте, что расположение этой области находится далеко за основным расположением эпицентров землетрясений. Поскольку ближайшие землетрясения расположены на дистанциях более 100 км (основная масса 150 км), то трассы лучей от этих землетрясений (их глубины 10-25 км) на три сейсмические станции вблизи о. Балхаш должны быть достаточно пологими.

Другой вывод сделан на стр. 60, о том, что аномалии в плане имеют линейную, субширотную вытянутость. Здесь сказано «Аномалии, как правило, указывают на неоднородности в структурах коры, которые определяются тектоническим сжатием Тянь-Шаня со стороны Индийской плиты». *Этот набор слов не понятен.* Из геофизических данных о глубинном строении Тянь-Шаня, полученных в работах других авторов [Юдахин, 1978, 1983; Кнауф и др. 1976; Юдахин и др., 1990; Блинов, Тарасенко, 1990; Современная геодинамика..., 2005], следует, что сейсмические скорости в коре хребтовых поднятий ниже скоростей в коре впадин и передовых прогибов. Этому положению удовлетворяют данные для Чуйской впадины, а также с определенной степенью приближения для Кочкорской и Суусамырской впадин. Ярко выраженная зона пониженных скоростей соответствует срединной части Киргизского хребта и хребтов к северу от Иссык-Куля. Из этого ряда выбивается кора Ферганской впадины, которой в результатах томографии отвечает область пониженных скоростей.

Похожий результат показала и локальная томография Кавказа. Отрицательные аномалии скорости тяготеют к коре хребтовых поднятий, а положительные (высокоскоростные аномалии) к коре внутригорных и межгорных впадин. При этом отмечаются и отклонения от этого правила (кора осадочного бассейна Куры представлена низкоскоростной аномалией). *Автор работы факт взаимосвязи типа скоростной аномалии в коре и топо-*

*графию не отметила*, а лишь указала, что крупная низкоскоростная аномалия совпадает с положением крупных разломов, а ряд других расположены под вулканами.

Следует специально отметить ряд тестов, выполненных автором для проверки результатов расчетов («шахматная доска» и разделение данных на две группы). Они показали, что результаты расчетов имеют достаточно высокую степень качества. Однако несмотря на то, что тест «шахматная доска» является общепринятым и необходимым для работ по сейсмической томографии, он не является достаточным для обоснования достоверности выполненной инверсии. Это связано с тем, что обратная задача метода лучевой сейсмической томографии нелинейна и свойства решения (единственность, устойчивость, разрешающая способность) зависят не только от конфигурации системы наблюдения, но и от фактического распределения скорости в среде. Поэтому необходимо проводить исследование единственности результатов инверсии не только для стандартной «шахматной доски», но и для модели, имитирующей полученный результат. Поскольку такого теста не проведено, однозначно говорить о достоверности результатов и сделанных на их основе геодинамических выводов нельзя. Это является одним из существенных недостатков работы. Кроме того, необходимо исследовать влияние волновых эффектов на результаты лучевой инверсии, для чего необходимо выполнять полноволновое моделирование. Этого также не сделано, однако данный недостаток, к сожалению, присущ большинству работ по лучевой томографии и вряд ли может быть поставлен в вину автору.

Результаты региональной сейсмотомографии для Тянь-Шаня позволили выявить ряд очень важных особенностей глубинной структуры мантии: высокоскоростная аномалия в южном направлении со стороны Казахстанской плиты и в северном со стороны Тарима.

Для Кавказа автор отмечает иную структуру неоднородности в верхней мантии, напоминающую капли, которые приурочены к стыкам континентальных плит. Отмечается также наличие под Малым и Большим Кавказом на глубинах более 100 км низкоскоростного тела и более холодных, высокоскоростных тел до глубин 150-200 км под Скифской и Аравийской плитами.

**Общее заключение о работе** положительное и связано, прежде всего, с тем, что дальнейшее продвижение в геодинамике невозможно без получения все более детальных и достоверных данных о строении литосферы и верхней мантии. В рецензируемой диссертационной работе для исследуемых регионов подобные данные получены.

Главным научным достижением выполненных исследований является выделение на основе результатов региональной сейсмической томографии наклонных зон повышенных скоростей под Тянь-Шанем как с севера с глубиной проникновения до 500 км (Казахская плита), так и с юга с глубиной до 200 км (Тарим). При этом непосредственно под Тянь-

Шанем наблюдается крупная зона пониженных скоростей с глубинами до 300 км. Такая же крупная зона пониженных скоростей располагается и под Кавказом, которая соседствует с каплевидными участками повышенных скоростей в верхней подлитосферной части мантии.

Отмеченные достижения работы вошли в первые два защищаемых положения диссертации, которые не вызывают принципиальных возражений, с учётом сделанных выше замечаний.

Третье защищаемое положение связано с обоснованием механизма формирования исследуемых орогенов. Автор считает, что он обусловлен процессом деламинации, о чём свидетельствуют отсутствие мантийной части литосферы у взаимодействующих плит непосредственно под горными областями и следы её погружения в краевых частях исследуемых регионов. Это положение, скорее, носит характер научной гипотезы. Предметом научного обсуждения здесь могут являться особенности процесса деламинации, т.к. помимо облегчения литосферы (после отрыва тяжелой её части) и её утонения необходимо обосновать и механизм утолщения коры до мощностей 50-60 км.

Другим достижением проведенных исследований являются результаты, полученные по данным локальной сейсмической томографии для коры Кавказа и Тянь-Шаня. Выявлены зоны повышенных и пониженных скоростей, которые в определенной части подтверждают известные для коры Тянь-Шаня выводы по данным МОВ-ОГТ и МТЗ (см. работы [Юдахин, 1978, 1983; Кнауф и др. 1976; Юдахин и др., 1990; Блинов, Тарасенко, 1990; Современная геодинамика..., 2005]).

Следует отметить, что результаты получаемых расчетов методами сейсмической томографии в виде моделей глубинного строения не должны рассматриваться как истина в последней инстанции, особенно в части их интерпретации. Помимо указанных выше ограничений самого метода лучевой сейсмотомографии следует иметь в виду обеспечение достоверного перехода от приращения скоростей сейсмических волн к плотностям и упругим модулям, на который влияет не только температура и давление, но и степень насыщенности глубинных объектов водным и др. флюидом. Последний фактор в верхней мантии может играть важную роль не только как агент, меняющий скоростные и вязкостные свойства среды, но и снижающий порог начала процесса плавления пород.

При этом, конечно, геофизические методы МОВ-ОГТ и МТЗ, дающие нам сейсмические и геоэлектрические глубинные профили коры, всегда будут рассматриваться как представляющие наиболее достоверные данные о строении коры и мантийной части литосферы. Но в силу значительной стоимости подобных исследований и двумерности результа-

тивного материала сейсмотомографические методы представляются альтернативным и малозатратным подходом, требующим дальнейшего развития.

**Помимо указанных выше имеются следующие существенные замечания к работе:**

Крупным недостатком работы является плохой обзор региональных геологических работ. Если рассматривать регион Тянь-Шаня в этом отношении, то здесь за длительное время исследований накоплена большая литература, среди основных авторов которой можно назвать Я.А. Беккера, В.С. Буртмана, А.Ф. Грачева, М.Л. Коппа, В.И. Макарова, В.А. Николаева, Н.И. Николаева, С.А. Несмеянова, И. Садыбакасова, В.Г. Трифонова, О.К. Чедию, С.С. Шульца, С.Л. Юнгу, Ф.Л. Яковлева. Только часть работ этих авторов упомянута в связи с формированием палеозойских структур пост-герцинской платформы, или в связи с современным строением региона по геофизическим данным, а также – с мобилистическими интерпретациями всех этих данных. Основная информация о формировании горного сооружения, полученная именно по данным неотектонических исследований (специальность 25.00.03), никак не рассмотрена, основные проблемы и основные предлагаемые в современной литературе механизмы формирования структур не раскрыты.

Та же неудовлетворительная схема рассмотрения литературного материала использована в описании истории развития и механизмов формирования складчатого и горного сооружения региона Кавказа. Здесь важно отметить, что существует значительная разница между двумя исследуемыми регионами – Кавказом и Тянь-Шанем. Первый регион является пост-складчатым орогеном, основное формирование коры которого завершилось вследствие сокращения пространства около 15 млн. лет назад, поднятие которого началось с сарматского века, второй является пост-платформенным орогеном, в котором складчатости и большого сокращения мезозойского платформенного чехла не наблюдается, поднятие и сокращение пространства началось с олигоцена.

Для складчатых сооружений, возникших на заключительной стадии геотектонического цикла, в случае Большого Кавказа – на альпийском этапе, важным источником данных, позволяющих проводить исследования по геодинамике, является складчатая структура. Оценка величины сокращения пространства при формировании коллизионных зон в пределах Большого Кавказа, в частности, целиком или по частям структуры может использовать только структурно-геологические данные, в нашем случае – детальные структурные профили. Для Большого Кавказа такие профили были построены следующими исследователями: Т.В. Гиоргобиани, Е.А. Рогожиным, В.Н. Шолпо, А.М. Шурыгиным, Ф.Л. Яковлевым.

Что касается самого обзора работ, в котором используются представления тектоники плит для той или иной геодинамической интерпретации, например, альпийских событий в ходе развития Кавказа, то автор диссертации не дает достаточно информации о количестве существующих таких схем развития, чем они отличаются у разных авторов, и на основании каких исходных (наблюдаемых в природе) геологических данных автор диссертации принял именно ту схему, которая приводится в диссертации.

Продолжая замечания по месту выполненных исследований по отношению к другим работам, заметим, что раздел «Актуальность исследования» написан таким образом, как будто никаких других исследований кроме сейсмической томографии на тему освещения механизмов формирования коллизионных зон не проводилось и проводиться не могло. Основной тезис гласит «Исследование глубинных структур и механизмов коллизионных процессов представляет особый интерес для геотектоники и геодинамики в связи с их недостаточной изученностью». Далее дается информация о качестве томографических исследований и моделей, лежащих в их основе. Никакая информация о геологических или геоморфологических данных, или соответствующих методах исследования в разделе актуальности работы и постановки проблемы не дана.

Обращаем внимание на тот факт, что описание защищаемых положений в том виде как они представлены в диссертации (аномалий сейсмических скоростей как свойства коры и мантии) плохо соотносится с паспортом специальности. Их следует записывать в геологических терминах.

В третьем защищаемом положении в качестве решения проблемы механизма коллизионных процессов предлагается процесс деламинации. Процесс деламинации представляет собой известную модель гипотетического расслоения верхней мантии с отделением и последующим погружением более плотных и холодных слоев мантии. На освобождающееся место между слоями мантии, согласно имеющимся предположениям, поступает разогретый материал мантийных плюмов. В диссертационной работе не проведен полный анализ литературы по данному процессу, не выявлены отличия во взглядах на него у разных исследователей, не показано, каким образом полученные материалы по сейсмической томографии позволяют уточнить существующие воззрения на указанный гипотетический процесс. В этом отношении нет возможности считать, что участие данного процесса в формировании структуры является доказанным. Остался также неясен личный вклад автора в разработку представлений о процессе.

Указание в третьем защищаемом положении на то, что предлагаемые механизмы в числе прочего основаны на материалах «геологии, геофизики и геохимии», опубликован-

ных для исследуемых регионов в последние годы, не находит подтверждения в тексте диссертации.

**Следующий набор замечаний не столь существенный**, но соискателю следует обратить на них внимание в дальнейших научных исследованиях.

Замечание к названию работы, в котором используется термин политической карты, – Киргизский Тянь-Шань. На самом деле изучалась кора региона (см. рис. 1.4), который захватывает не только Кыргызстан, но и Казахстан (Казахская плита) и Узбекистан (Ферганская долина), т.е. речь идет обо всём Тянь-Шане за исключением его Восточной части.

В работе достаточно часто говорится о погружении в мантию различных плит и не оговаривается, о чем идет речь: погружение океанской части плиты или континентальной (стр. 19 «Погружение Таримской плиты под Тянь-Шань привело к смятию земной коры со скоростью ~10–15 мм/год, тогда как движение Индийской плиты на север составляет около 50 мм/год»). Из рис. 1.3 также не ясно, какие части литосферных плиты испытывают погружения. На странице 14 опять говорится о том, что на завершающем этапе коллизии кора погружается на глубину. Поскольку из описания второго этапа следует, что он целиком отвечает стадии столкновения континентальных плит и океаническая кора уже погружена под литосферу континента, то значит здесь речь идет о погружении в мантию континентальной коры. На странице 67 находим «По геофизическим данным [Wang, Ye, 2008] континентальная кора Индийского континента погружена под Евразию на расстояние до 900 км по горизонтали и до 200–350 км по глубине».

Возможность погружения легкой континентальной окры в мантию всегда вызывала споры между физиками (см. работы Магницкого, Артюшкова и др.) и геологами (Хаин и др.). Простые оценки показывают, что для этого необходимо приложить дополнительные напряжения порядка 150–200 МПа. При этом имеющиеся тектонофизические оценки напряжений, полученные из сейсмологических данных [Rebetsky, BSGF, 2012; Ребецкий, Геодинамика и тектонофизика, 2015], показывают, что в зонах субдукции средний уровень дополнительного бокового сжатия составляет около 10–15 МПа. Именно этот уровень бокового стресса также будет действовать в зонах коллизии.

Стр. 26. Написано – «согласно распределению вертикальной компоненты, почти вся территория Киргизского Тянь-Шаня испытывает воздымание». Вероятно, речь идет о вертикальной компоненте скорости смещения.

Стр. 22 – Написано «Согласно геодезическим данным Тетис закрылся...». Вероятно, речь идет о геологических данных. Насколько известно, во времена закрытия Тетиса геодезические наблюдения не проводились.

Стр. 25 – Написано «Преобладание горизонтального сжатия в регионе также подтверждается анализом изображений со спутника [например, Trifonov, 1978; Tarronnier and Molnar, 1979]». Вероятно, речь идет о горизонтальном сокращении пространства, выраженного в геологических структурах. Обычно слова «сжатие» или «растяжение» применяются, когда говорят о напряжениях. Для деформаций правильнее было бы употребление терминов «укорочения» и «удлинения». В конкретном разделе речь идет о Памирской дуге, для которой сегодня сейсмологические данные показывают разный тип напряженного состояния: западная и северная части Памира испытывают напряженное состояние горизонтального сжатия, а восточная – горизонтальный сдвиг и горизонтальное растяжение [Ребецкий, Алексеев, 2014]. Это подтверждают данные GPS-деформаций [Мансуров, дисс., 2018].

Здесь же сказано «можно сделать вывод о движении Памирской дуги на север относительно Центрального Тянь-Шаня» и даются ссылки на работы, например [Trifonov, 1978; Tarronnier and Molnar, 1979]. При этом не упоминаются хорошо известные геологические исследования М.Г. Леонова, в которых говорится об отсутствии давления со стороны Памира на Тянь-Шань.

На стр. 26 говорится, что значительная часть субмеридионального движения Индийской плиты (50 мм/год) реализуется в виде горизонтального сокращения в районе Тянь-Шаня (10-15 мм/год). На самом деле, больше всего изменение скорости смещения наблюдается при переходе от Гималаев к Тибету. Так, в пределах Гималаев скорости сокращения коры около  $4-5 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$ , а в Тибете сразу к северу от рек Брахмапутра и Инд эти скорости деформаций резко снижаются до  $1-1.5 \cdot 10^{-8}$ .

На стр. 27 для коры Тянь-Шаня автор пытается сделать вывод о характере деформаций коры на основе данных о поле векторов скоростей перемещений (рис. 1.6). Здесь следует заметить, что такие выводы необходимо делать, используя данные о горизонтальных деформациях [Мансуров, дисс., 2018].

На стр. 43 имеется утверждение «Фокальные механизмы землетрясений свидетельствуют о том, что коллизия Евразийской и Аравийской плиты вызывает чистое сжатие на Кавказе». Если под термином «чистое сжатие» понимать геодинамический режим горизонтального сжатия, то уже на следующей странице находим противоречие. Здесь указано, что согласно работе [McClusky et al., 2000], «Блоки коры Кавказа вытесняются на запад и восток в сторону Черного моря и Южно-Каспийского бассейна соответственно». Подобный стиль деформаций при сокращении в субмеридиональном направлении отвечает режиму горизонтального сдвига. Вероятно, автор имел в виду, что ось напряжения максимального сжатия действует субгоризонтально.

На стр. 43 также говорится, что в восточной Турции наблюдается «чистый правосторонний сдвиг». Здесь также проявляется путаница автора в терминах. Термин «правосторонний сдвиг» - это термин структурной геологии, употребляемый к описанию кинематики разлома. В геодинамике есть термин режим горизонтального сдвига, когда речь идет о характере деформаций региона в горизонтальной плоскости. Термин «чистый сдвиг» - это термин механики, характеризующий особое состояние тензора напряжений и деформаций, при котором нет изменения объема и среднего поворота этого объема.

В работе практически повсеместно, когда речь идет о характеристике глубинных полей физических параметров, не уточняется, что речь идет о коре или литосфере. Например, «Скорости волн  $P_n$  имеют близкое соотношение с топографией. Обычно, горы с высоким рельефом имеют низкие скорости, в то время как моря, бассейны и долины с низким рельефом имеют высокие скорости» (стр. 45). Правильнее написать об упругих волнах, распространяющихся в коре горных регионов и морей.

В разделах, относящихся к результатам локальной сейсмической томографии коры Тянь-Шаня, не приводятся данные скоростной модели, для которой получено начальное положение гипоцентров землетрясений. В разных разделах диссертации говорится о том, что начальными данными для локальной томографии являются: 1) координаты станций, 2) времена прихода продольных и поперечных волн от местных землетрясений. Ничего при этом не говорится о начальной скоростной модели, для которой можно получить положения очагов землетрясений. Отсутствие в диссертации сведений о такой модели следует рассматривать как серьезный недостаток. Для коры Кавказа такая начальная одномерная скоростная модель (3 коровых слоя и 2 – мантийных) представлена табл. 3.1. Если с ее помощью интерпретировать результаты для Кавказа на глубине 20 км, то максимальный перепад скоростей Р-волн здесь составит 6.1-6.8 км/сек.

Результаты локальной томографии для Тянь-Шаня имеют амплитуды отклонений в аномалиях до 10%, без данных начальной и оптимизированной скоростной модели коры исследуемого региона трудно интерпретировать результаты аномалий скоростей, представленные на рис. 3.2. Если использовать усредненную скоростную модель коры Тянь-Шаня вдоль субмеридионального профиля «Иссыккуль – Тескенсу – Балхаш» (Современная геодинамика, 2005, рис. П.5.3), то для глубин 20 км здесь характерна скорость Р волн 6.5-6.8 км/сек. Если взять для них отклонения в 10%, то тогда результаты локальной томографии Тянь-Шаня для глубин 15 и 25 км (рис. 3.2. диссертации) дают в коре Чуйской впадины скорости в 6.1 и 7.3 км/сек. Последние значения близки к скоростям на Мохо. Если за средние скорости на глубине 20 км взять скорости 5.9-6.4 км/сек (профиль Ош-

Музкол, Современная геодинамика, 2005, рис. П.5.), то тогда перепад скоростей для данных рис. 3.2 составит 5.6-6.8 км/сек, что вызывает меньше вопросов.

Непонятен вывод, сделанный на стр. 60 «сжатие региона с юга на север приводит к субширотному чередованию структур в коре». Здесь более разумным выглядит заключение, что результаты локальной сейсмической томографии, показывающие большее распространение зон пониженных скоростей к коре горных хребтов, а повышенных к коре внутригорных и межгорных впадин, что совпадает с результатами МОВ-ОГТ и ГСЗ для Тянь-Шаня.

На стр. 67 утверждается, что сжатие в Тибете привело к увеличению мощности его коры до 70 км. При этом подразумевается, что сокращение пространства происходило весь период после жесткого столкновения с индийским индентором (35-50 млн. лет назад) более менее с одинаковой скоростью. Однако палеонтологические и геологические данные показывают, что еще 3-5 млн. лет назад высоты на Тибете составляли около 1-1.5 км (Zheng et al., *Geology*, 2000; Wang et al., *Geology*, 2006; Nie et al., 2008; Shackleton, Chang Chenfa, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1988; Zhang Benxing, *Z. Geomorph*, 1989). В этом случае, используя современные данные о скоростях горизонтального сокращения Тибета (GPS-деформации -  $1-2 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$ ), получим за времена в 5 млн. лет возможность увеличения мощности коры только на 5-10%, а высоты рельефа увеличатся на 500-1000 м. Т.е. за такие времена горизонтальным сжатием невозможно увеличить мощность коры Тибета до требуемых (70-75 км) значений.

Все приведенные выше замечания не относятся к сути защищаемых положений, что позволяет сделать вывод о работе как о завершённом научном исследовании.

В целом, диссертационная работа И.В. Медведь является завершённым исследованием, оформленным в соответствии с требованием ВАК и выполненным на хорошем уровне. Приведенные в работе результаты следует определить как новые, обоснованные и имеющие практическое и научное значение. Диссертация написана грамотно и хорошо изложена, аккуратно оформлена и проиллюстрирована качественным графическим материалом. В своей диссертации И.А. Медведь продемонстрировала хорошее знание региональной геофизики и сейсмологии, которые автор умело использовала для решения конкретных научных проблем геодинамики. В автореферате диссертации в достаточной для понимания форме изложено содержание всех глав диссертации. Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а её автор Ирина Викторовна Медведь заслуживает присуждения ей степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.03 «Тектоника и Геодинамика».

Отзыв заслушан на заседании объединенного семинара Лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга (202), Лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики (204) и Лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии (703) ИФЗ РАН и по результатам обсуждения одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации 16 ноября 2018 г.

Ребецкий Юрий Леонидович

Доктор физико-математических наук,

Заведующий лабораторией фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики (204) ИФЗ РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Адрес: 123242, Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр.1

Телефон: (499) 254-9350 e-mail: [reb@ifz.ru](mailto:reb@ifz.ru)

Собисевич Алексей Леонидович

член-корреспондент РАН,

доктор физико-математических наук,

Лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии (703) ИФЗ РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, адрес: 123242, Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр.1

Телефон: (499) 254-9350 e-mail: [reb@ifz.ru](mailto:reb@ifz.ru)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (сокращенное название – ИФЗ РАН), Адрес: 123242, Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр.1

Телефон: (499) 766-2656, факс: (499) 766-2654 e-mail: [direction@ifz.ru](mailto:direction@ifz.ru)

Руководитель: Врио директора ИФЗ РАН, чл.-корр. РАН Тихоцкий Сергей Андреевич.

Подписи д.ф.-м.н. Ю.Л. Ребецкого и чл.-корр. А.Л. РАН Собисевича заверяю.

Ученый секретарь ИФЗ РАН

к.ф.-м.н.



В.В. Погорелов