



МЕДВЕДЬ Ирина Викторовна

**ГЛУБИННЫЕ МЕХАНИЗМЫ КОЛЛИЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В РЕГИОНАХ КАВКАЗА И КИРГИЗСКОГО ТЯНЬ-ШАНЯ НА
ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕГИОНАЛЬНОЙ И ЛОКАЛЬНОЙ
СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ**

Специальность 25.00.03 - Геотектоника и геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и геофизики имени А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Кулаков Иван Юрьевич,
чл.-корр. РАН, профессор РАН,
доктор геолого-минералогических наук,
зам. директора ИНГГ СО РАН,
зав. лабораторией сейсмической томографии
ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск)

Официальные оппоненты:

Мордвинова Валентина Владимировна
д.г.-м.н., ведущий научный
сотрудник ИЗК СО РАН (г. Иркутск)

**Исмаил-Заде
Али Тофик оглы**
д. ф.-м. н, главный научный сотрудник
ИТПЗ РАН (г. Москва)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН РАН
(г. Москва)

Защита диссертации состоится «5» декабря 2018 года в 9-00 часов на заседании Диссертационного совета Д.003.022.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИЗК СО РАН и на сайте http://www.crust.irk.ru/newsfull_174.html

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета к.ф.- м.н. А.А. Добрыниной по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, или e-mail: dobrynina@crust.irk.ru

Автореферат разослан «4» октября 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 003.022.03, кандидат
физико-математических наук

А.А. Добрынина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Исследование глубинных структур и механизмов коллизионных процессов представляет особый интерес для геотектоники и геодинамики в связи с их недостаточной изученностью. Если в зонах субдукции океанических плит очевидным и хорошо изученным сценарием является погружение океанической плиты под континентальную за счет ее высокой плотности и массы, то процессы, происходящие в зонах столкновения континентальных плит, до сих пор вызывают активные споры. Основной причиной споров является поведение мантийной части литосферы. Она является менее плотной, чем подстилающая астеносфера, поэтому не может погружаться на глубину, однако существует ряд работ, которые показывают, что это происходит [например, Kay and Kay, 1993; Faccenda, Minelli, Gerya, 2009; Ueda et. al., 2012; Bijwaard. et. al., 1998]. Всегда ли мантийная часть литосферы погружается в мантию или же растекается латерально, как описано в работах [Глубинная геодинамика, 2001; Bird, 1991; Schmeling and Marquart, 1991 и др.]? Чтобы приблизиться к ответам на эти вопросы, было решено изучить несколько зон коллизии, а именно регионы Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня, с помощью разномасштабных методов сейсмической томографии.

Существуют десятки глобальных и региональных томографических моделей, покрывающих отдельные участки Альпийско-Гималайского пояса. Вместе с тем, модели, основанные на использовании различных типов данных, во многих случаях не согласуются или противоречат друг другу. Если для Европы отличия между моделями представляются незначительными, то для большинства районов Азии существенные несогласия связаны с неравномерным распределением данных и их низким качеством. Таким образом, недостаточная изученность глубинного строения Альпийско-Гималайского региона определяет актуальность новых томографических исследований данного региона.

Качество томографической модели во многом зависит от используемого алгоритма. В настоящее время имеется ряд алгоритмов для исследований локального или регионального масштабов. 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. Совместное использование локальных и региональных данных требует особого многоуровневого подхода к параметризации, который подразумевает использование разномасштабных сеток.

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.

Научные задачи исследований

1. Построение моделей аномалий сейсмических скоростей в коре и верхней мантии под Кавказом и Киргизским Тянь-Шанем путем томографической инверсии данных времен 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.

Личный вклад соискателя состоит в проведении всех работ по построению моделей сейсмической томографии, а именно: в подборе параметров для томографических моделей, построении и тестировании стартовой модели, получении трехмерных скоростных моделей, верификации результатов инверсии с помощью синтетического моделирования и интерпретации полученных результатов. Автором проведена детальная интерпретация полученных результатов сейсмической томографии, на основе которой была предложена новая точка зрения на процессы взаимодействия литосферных плит под коллизионными зонами Кавказа и Тянь-Шаня. При этом автором был задействован широкий комплекс геолого-геофизических методов и проведена большая работа по обзору и анализу существующих исследований.

Методология, методы исследования

Исследования коллизионных зон выполнены двумя методами пассивной сейсмической томографии на базе локальных и региональных данных.

Алгоритм локальной томографии LOTOS, разработанный И.Ю. Кулаковым в ИНГГ СО РАН [Koulakov, 2009], основан на использовании времен пробега продольных и поперечных волн от местных землетрясений, зарегистрированных станциями в исследуемом регионе. Программа LOTOS позволяет изучать структуру земных недр в масштабах от первых километров до сотен километров. Ключевым моментом при реализации томографической инверсии по локальным данным является одновременное определение структуры аномалий скоростей P и S волн и параметров источников (координаты и время). При этом вычисления производятся итеративно: на каждом шаге происходит переопределение параметров источников на базе трехмерного лучевого трассирования с учетом результатов инверсии скоростей предыдущей итерации.

Региональная томографическая схема базируется на данных по временам пробега сейсмических волн из глобальных сейсмических каталогов (ISC). Для исследования отдельного региона используются все сейсмические лучи, которые, хотя бы частично, проходят через изучаемый объем. Эти данные могут включать лучи от землетрясений в изучаемом регионе, зарегистрированные станциями мировой сети, а также данные по далеким событиям, зарегистрированные станциями в изучаемой области. В настоящей

работе использован алгоритм томографической инверсии таких данных, разработанный И.Ю. Кулаковым [Koulakov and Sobolev, 2006].

Научная новизна

В научном мире существует множество работ, нацеленных на изучение коллизионных зон, однако они часто представляют результаты для одного региона или, в отдельных случаях, для разных регионов, но с помощью какого-то одного метода. Новизна данной диссертации заключается в ее комплексном подходе. Автором диссертации проделана большая работа по исследованию регионов Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня с помощью разномасштабных методов сейсмической томографии. Впервые был произведен сравнительный анализ скоростных моделей двух разных коллизионных зон. Впервые выявлены похожие черты глубинного строения Киргизского Тянь-Шаня и Кавказа, а именно, погружение мантийной части литосферы плит, участвующих в коллизии, и низкоскоростная аномалия под коллизионной зоной. Выводы данной диссертации были сделаны, основываясь не только на сейсмической томографии, но также и на результатах, полученных на базе комплекса геолого-геофизических методов. Было произведено сравнение с существующими работами по другим геолого-геофизическим методам, математическому моделированию, геодинамическим построениям и т.д. По результатам исследования соискателем были предложены механизмы процесса погружения мантийной части литосферы под коллизионными зонами.

Теоретическая и практическая значимость работы

Соискателем были задействованы разномасштабные методы сейсмической томографии для детального изучения коры и верхней мантии под регионами Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня. Это позволило получить более полные знания о глубинном строении среды под коллизионными зонами.

В пределах исследуемых регионов сравнительная характеристика скоростных моделей совместно с комплексной интерпретацией различных геофизических и геологических исследований позволила понять, что природа погружения мантийной части литосферы в зонах континентальной коллизии может носить различный характер. Создание глубинной модели, подкрепленной комплексом геолого-геофизических методов, является актуальной задачей, которая ранее не была реализована. Это является важным шагом на пути к решению такой сложной геодинамической проблемы, как выявление глубинных процессов в коллизионных зонах.

Способ сравнения сейсмических моделей двух разных регионов был применен впервые. В дальнейшем он может послужить для решения фундаментальных научных проблем, связанных с геологической интерпретацией результатов геофизических исследований.

Степень достоверности полученных научных результатов определяется:

1. большим количеством синтетических тестов для проверки полученных с помощью сейсмической томографии скоростных моделей;
2. использованием апробированных и уже хорошо зарекомендовавших себя программных средств построения моделей сейсмических структур: локальной (LOTOS) [Koulakov, 2009] и региональной [Koulakov and Sobolev, 2006] томографии;
3. высоким качеством данных (для каждого из регионов был использован каталог с плотным покрытием станций и большим количеством землетрясений);
4. сопоставлением с результатами других ученых, которые использовали различные геофизические методы.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. В соответствии с полученными результатами сейсмической томографии, 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 Казахской плитами – аномалии повышенных скоростей мощностью 100–150 км, характеризующиеся наклоном в сторону Тянь-Шаня до глубин ~500 км.
2. Согласно полученным трехмерным моделям аномалий сейсмических скоростей P- и S- волн, 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.
3. Глубинные механизмы коллизионных процессов в регионах Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня обусловлены процессом даламинации, 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.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Настоящая диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.03 - «Геотектоника и геодинамика», так как представляет собой исследование глубинного строения под коллизионными зонами Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня. Результаты основаны на исследованиях произведенных на основании различных методов сейсмической томографии, однако алгоритмы были использованы автором как инструмент, и главную роль в работе играют именно полученные результаты и их интерпретация. На основании полученных с помощью сейсмической томографии знаний о современном строении регионов, совместно с большим обзором и анализом существующих работ по различным геологическим дисциплинам, была

предложена интерпретация, объясняющая закономерности глубинных процессов, влияющих на геодинамику исследуемых регионов. Таким образом, настоящая работа соответствует пункту 5 «Неотектоника, изучающая тектонические явления новейшего этапа развития литосферы и использующая для этого свои специфические методы исследования», пункту 6 «Историческая геотектоника – исследование основных этапов и стадий развития литосферы и ее отдельных структурных единиц», пункту 9 «Региональная геотектоника, основанная на выделении и изучении тектонических объектов того или иного региона, страны, континента, океанического или морского бассейна».

Апробация работ. Основные результаты работы были представлены автором на российских и международных научных симпозиумах и конференциях: международная научная студенческая конференция (МНСК) «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2011, 2012, 2013), The 6th International Siberian Early Career GeoScientists Conference: Proceedings of the Conference (Новосибирск, 2012), General Assembly of the European Seismological Commission and Young Seismologist Training Course (Москва, 2012), XLIV Тектоническое совещание «Осадочные бассейны и геологические предпосылки прогноза новых объектов, перспективных на нефть и газ» (Новосибирск, 2012), EGU General Assembly (Вена, Австрия, 2012 и 2016), VI и VII Международные симпозиумы «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (Киргизия, г. Бишкек, 2014 и 2017), Уральская молодежная научная школа по геофизике (Екатеринбург, 2018).

Публикации. По теме диссертации самостоятельно и в соавторстве опубликовано 16 работ, из которых 5 в ведущих научных журналах, входящих в перечень рецензируемых изданий, определенных ВАК.

Объем и структура работы. 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.

ГЛАВА №1. ОБЗОР МИРОВЫХ ЗНАНИЙ О СТРОЕНИИ И МЕХАНИЗМАХ КОЛЛИЗИОННЫХ ЗОН КАВКАЗА И КИРГИЗСКОГО ТЯНЬ-ШАНЯ.

Основное внимание в данной диссертации уделяется Кавказской и Тянь-Шаньской коллизионным зонам, которые относятся к Альпийско-Гималайскому складчатому комплексу, образовавшемуся в результате закрытия океана Тетис, отделявшего Гондвану от Лавразии [Хаин, Ломизе, 2005].

В эволюции Киргизского Тянь-Шаня было несколько крупных этапов различного типа деформационных процессов. В палеозойское время происходило закрытие океанических и окраинных бассейнов [Бакиров, 1999; Бакиров, 2001, Максумова 1996]. К концу палеозоя – началу мезозоя во всем пространстве Тянь-Шаня была сформирована единая гетерогенная покровно-складчатая структура, которая представляла собой мозаику разновозрастных

континентальных блоков, составлявших Евразийский континент. К пермскому времени структура Тянь-Шаня была полностью сформирована и начался её внутриплитный этап развития, который, вплоть до эоцена, сопровождался процессами пенеппенизации. Тектоническая активность в Тянь-Шане в кайнозойское время возникла вследствие столкновения Индии с Евразийским континентом 52–35 млн. лет назад [Molnar and Tapponnier, 1975, 1977; Cobbold and Davy, 1988]. 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. Казахстанская плита испытывает сопротивление распространению деформаций, поэтому кора между Таримской и Казахстанской плитой смялась и произошло образование горных хребтов Киргизского Тянь-Шаня.

Эволюция Кавказа отличается от эволюции Киргизского Тянь-Шаня, не смотря на общую принадлежность к Альпийско-Гималайскому складчатому комплексу. В позднем протерозое, палеозое, мезозое и раннем кайнозое Кавказский регион 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 её 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].

Обзор геологических и геофизических исследований Тянь-Шаня

Тянь-Шань простирается более чем на 2500 км [Буртман, 2012] и представляет собой систему хребтов и впадин, согласованных с формой древнего покровно-складчатого основания. Эти структурные формы представляют собой кулисообразно устроенные ряды, которые содержат в себе зоны поднятий и прогибов антиклинорного и синклинорного строения. По наличию субмеридианально ориентированной системы разломов, их типу

(в основном, надвиги) и характеру фокальных механизмов можно судить о том, что в регионе преобладает механизм сжатия коры [Burtman and Molnar, 1993]. Тянь-Шань зажат Таримской плитой на юге и Казахстанской плитой на севере. Индийская плита движется на север со скоростью ~ 50 мм/год. Значительная часть этой деформации передается району Тянь-Шаня (10–15 мм/год) [Avouac et al., 1993; Зубович и др., 2001]. Согласно исследованиям различными геофизическими методами (сейсмическая томография, ГСЗ, МТЗ), происходит погружение Таримской плиты с юга и Казахстанской плиты с севера под Тянь-Шань [Lei and Zhao, 2007; Xu et al., 2002, 2007; Li et al., 2009; Koulakov, 2011; Zabelina et al., 2013]. Также, многие исследователи определяют низкоскоростную аномалию сейсмических волн под горными хребтами Тянь-Шаня. Средняя мощность земной коры Тянь-Шаня около 55 – 60 км [Vinnik et al., 2004].

Обзор геологических и геофизических исследований Кавказа

Кавказский регион зажат между Черным и Каспийским морями на западе и востоке соответственно. Кавказ состоит из горных цепей Большого и Малого Кавказа, простирающихся с северо-запада на юго-восток, разделенными Транскавказским массивом. Севернее Кавказского региона располагается Скифская плита, южнее Малого Кавказа располагается Аравийская плита, которая выполняет роль индентора, двигаясь в северном направлении со скоростью ~ 18 мм/год [McClusky et al., 2000]. Фокальные механизмы землетрясений свидетельствуют о том, что коллизия Скифской и Аравийской плит вызывает чистое сжатие на Кавказе [Таумаз et al., 1991]. В Малом и Большом Кавказе присутствуют провинции кайнозойского вулканизма, происхождение которых ученые в основном связывают с предшествовавшей субдукцией.

Согласно сейсмическим данным:

- В Аравийско-Евразийской коллизионной зоне от Большого Кавказа до Аравийской плиты и от Анатолии до Иранского блока преобладают пониженные скорости поверхностных волн, где проявлен кайнозойский вулканизм. Это может свидетельствовать о повышенных температурах верхней мантии и о малой мощности литосферы. Однако, результаты свидетельствуют также о повышенной мощности коры [Sarker and Abers, 1998; Gök et al., 2003; Gök et al., 2011].

- Мощность коры Кавказа не превышает 45 км [Pasyanos et al., 2001; Zor, 2003].

- Высокоскоростные аномалии мощностью от 100 до 200 км, связанные с холодными высокоплотными континентальными плитами (Скифская, Аравийская и Евразийская) [Piomallo and Morelli, 1997; Bijwaard et al., 1998].

- Ряд авторов выявляет аномалию пониженной скорости под коллизионной зоной Кавказа и Загроса [Hearn and Ni, 1994; Al-Lazki et al., 2004; Phillips et al., 2007].

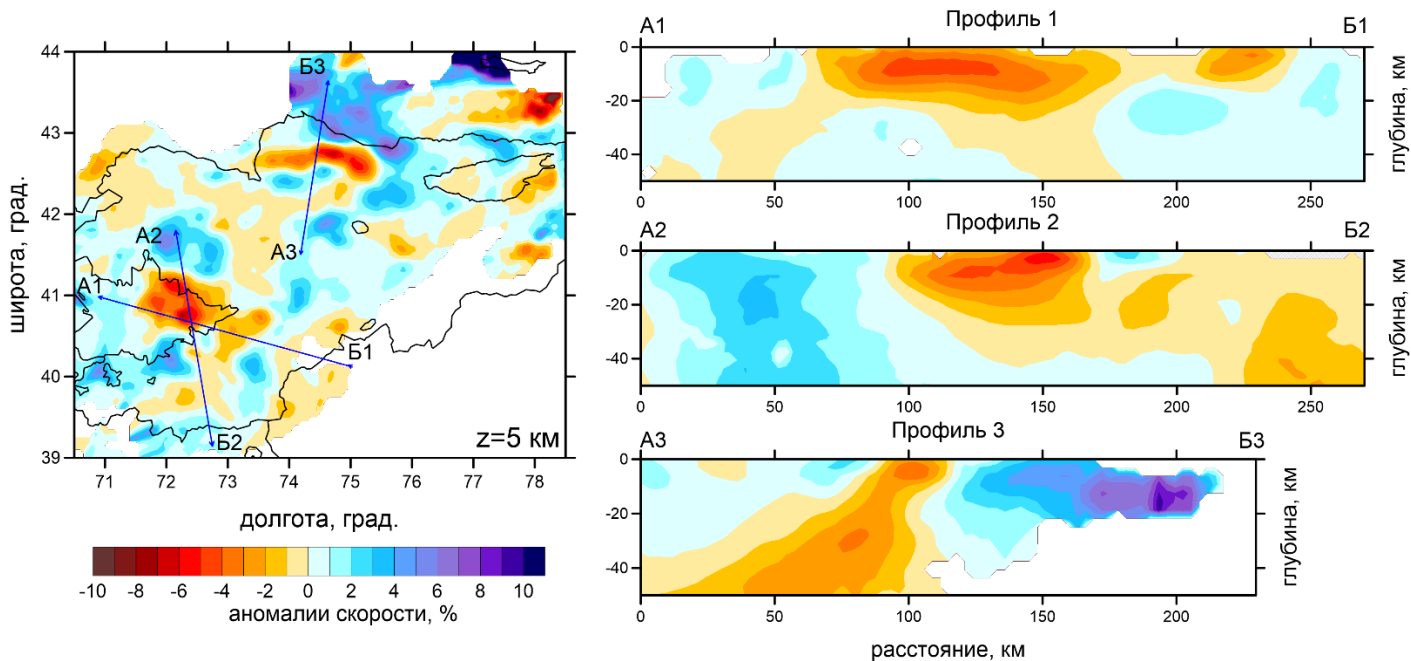


Рис.1. Результат инверсии реальных данных. Аномалии скоростей P-волн на вертикальных сечениях. На левом рисунке показано расположение профилей.

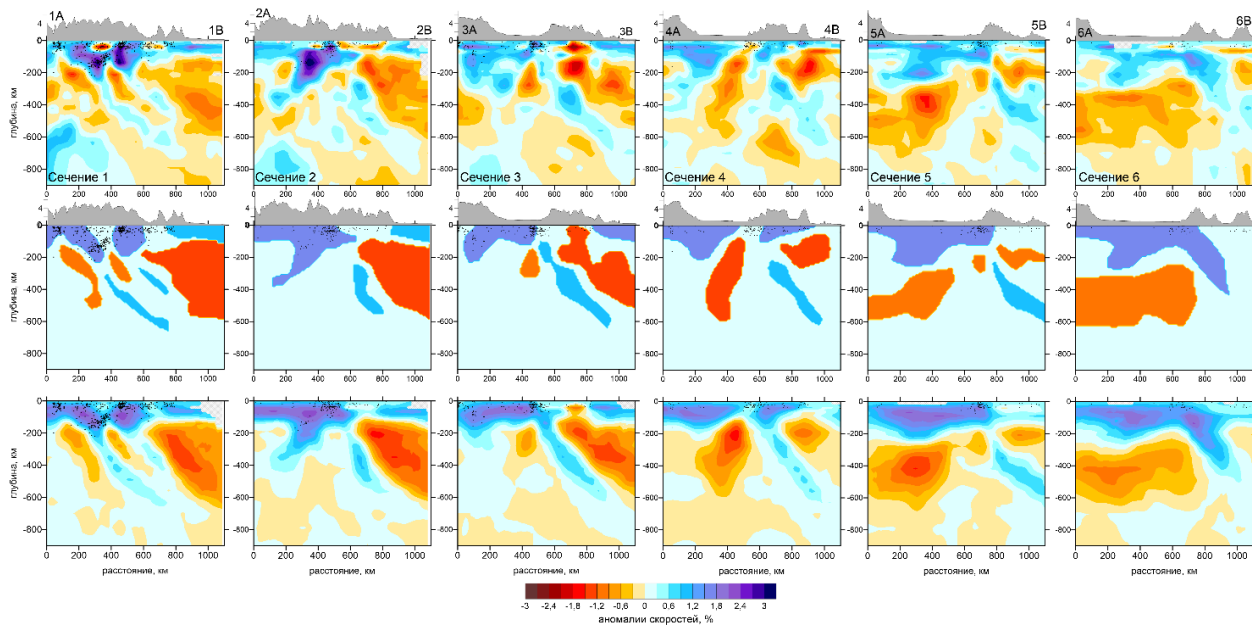


Рис.2. Результаты инверсии реальных и синтетических данных на вертикальных сечениях. Верхний ряд: Аномалии Р-волн вдоль шести вертикальных профилей, полученные в результате инверсии реальных данных. Точки — положения землетрясений вокруг профилей; над профилями даны схемы рельефа дневной поверхности; средний ряд: сечения синтетической модели, построенной на базе результатов реальной инверсии; нижний ряд: результаты восстановления синтетической модели.

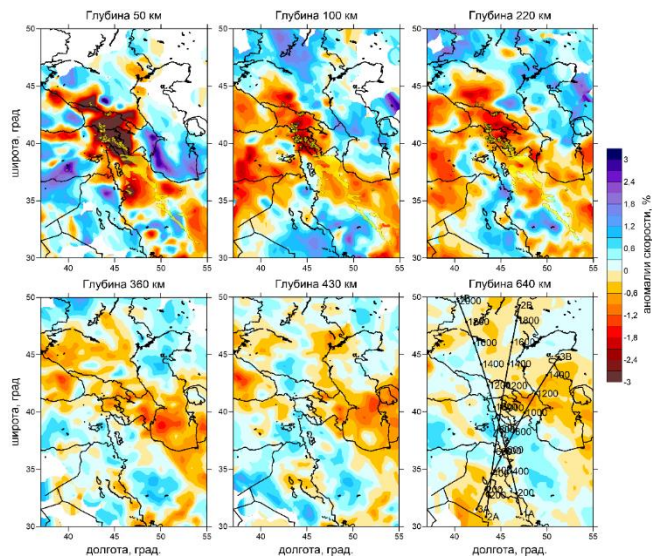


Рис. 3. Аномалии скоростей *P*-волн на 6 горизонтальных сечениях, желтые звезды и области обозначают вулканы и вулканические области на Кавказе и сопредельных территориях.

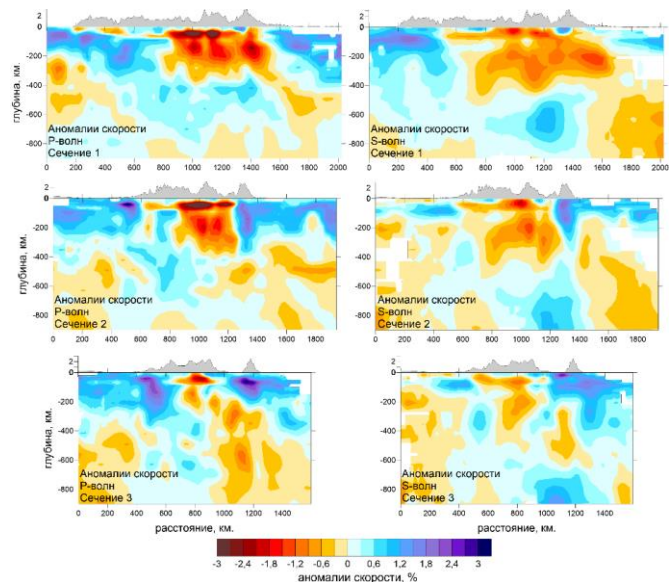


Рис. 4. Аномалии скоростей для *P*-волн (слева) и *S*-волн (справа) на трех вертикальных разрезах. Расположение профилей показано на рис 3.11а и 3.11б. Рельеф поверхности показан над каждым разрезом.

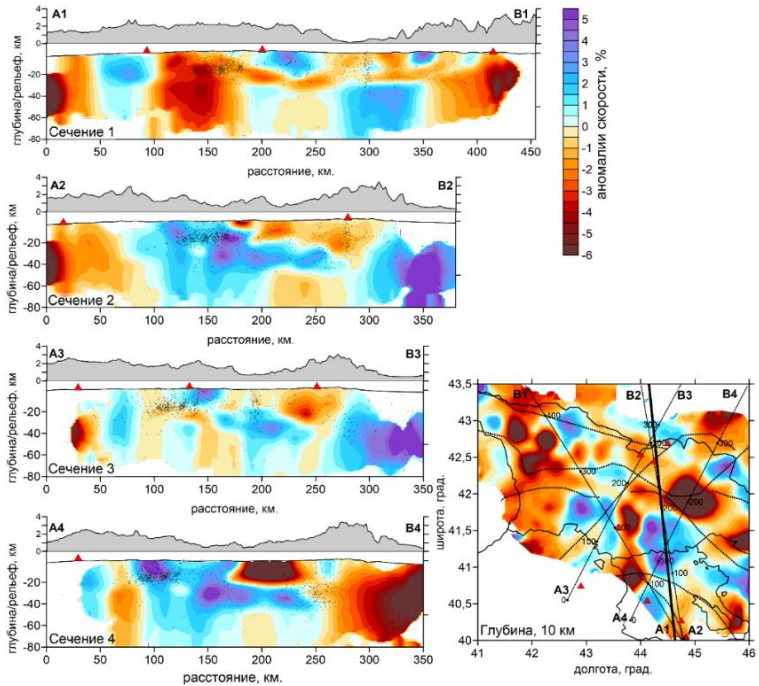


Рис. 5. Вертикальные сечения скоростных аномалий *P*-волн. Расположение профилей показано на горизонтальном сечении справа. Реальный рельеф показан над профилями. Обозначения: точки - землетрясения до глубины 100 км, красные треугольники - крупные вулканы, жирная черная линия на карте - расположение регионального Сечения 2 (2АВ), показанного на (рис 2).

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе изучения регионов были использованы два алгоритма сейсмической томографии для разных масштабов исследований. 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.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕГИОНОВ КИРГИЗСКОГО ТЯНЬ-ШАНЯ И КАВКАЗА

В настоящей работе представлены изображения глубинной структуры коры и мантии двух разных частей Альпийско-Гималайского складчатого комплекса: Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня. Модели построены с помощью двух схем томографической инверсии: локальной и региональной.

Чтобы выявить насколько достоверны полученные модели, было произведено несколько этапов тестирования, а именно:

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

Только после проведения комплекса верификации, тестирования и синтетического моделирования была произведена интерпретация достоверных аномалий.

1.1. Результаты томографического исследования коры и мантии Киргизского Тянь-Шаня.

Результаты локальной томографии. Для алгоритма локальной томографии LOTOS были использованы данные, предоставленные Институтом сейсмологии НАН КР. Эти данные включают в себя времена прихода волн от 435 землетрясений и координаты 260 сейсмических станций, отработавших в течение года. Для построения сейсмических моделей было задействовано 11163 лучей, из них 6175 от Р-волн и 4988 от S-волн.

Главными результатами данного исследования являются трехмерные модели скоростных аномалий Р- и S-волн, представленные на горизонтальных и вертикальных (рис.1, вкладка) сечениях. Первый и второй профили проходят через низкоскоростную аномалию в западной части Киргизии. Эта аномалия прослеживается до глубины 12 км и относится к осадочному чехлу Ферганского бассейна. Наибольший интерес представляет профиль 3, расположенный перпендикулярно линейной низкоскоростной аномалии на севере изучаемого региона. Согласно полученной модели распределения сейсмических скоростей Р- и S-волн, низкоскоростная аномалия прослеживается до глубин 40 км и характеризуется наклоном с севера на юг. Рассматриваемая аномалия проходит вдоль разлома и находится на стыке

Казахстанской плиты и Тянь-Шаня. Это может свидетельствовать о наличии погружения Казахстанской плиты под Тянь-Шань на севере изучаемой области. Высокоскоростные аномалии, располагающиеся в центральной части Тянь-Шаня, имеют линейную форму с субширотным направлением. Аномалии, как правило, указывают на неоднородности в структурах коры, вызванные тектоническим сжатием Тянь-Шаня со стороны Индийской плиты. Сжатие региона с юга на север приводит к субширотному чередованию структур в коре.

Результаты региональной томографии. Для изучения верхней мантии под Киргизским Тянь-Шанем в настоящей диссертации использован фрагмент модели [Koulakov, 2011] для района 72° – 84° в.д. и 35° – 47° с.ш. Аномалии скоростей Р- и S- волн в работе [Koulakov, 2011] были построены по данным ISC каталога за 1964–2004 годы с использованием алгоритма, описанного в работе [Koulakov and Sobolev, 2006].

Региональная модель для района Тянь-Шаня представлена аномалиями скоростей Р-волн на двух горизонтальных профилях на глубинах 220 и 500 км, а также на шести вертикальных профилях (верхний ряд на рис.2, вкладка).

При описании результатов инверсии (рис. 2, вкладка) в первую очередь стоит выделить высокоскоростную аномалию под Таримской плитой, которая доходит до глубин около 200 км.

Известно, что литосфера Тарима имеет большую мощность и является жесткой, что не позволяет Тариму деформироваться под действием от перемещения Индийской плиты. Также стоит выделить плоскую высокоскоростную аномалию под Тянь-Шанем мощностью около 100 км, которая характеризуется наклоном в сторону Тянь-Шаня в северо-западном направлении под углом $\sim 45^{\circ}$. Эта аномалия отчетливо видна на вертикальных и горизонтальных сечениях. В зоне сочленения этой аномалии с литосферой Таримской плиты наблюдается повышенная сейсмичность.

На глубинах до 300 км под Киргизским Тянь-Шанем сейсмическая структура сильно неоднородна, вместе с тем, наблюдается преобладание низкоскоростных структур. Также выделяется аномалия низких скоростей непосредственно под Тянь-Шанем, размеры которой составляют 200 км по латерали и глубине.

Интерпретация результатов. Наиболее важные выводы работы по исследованию Киргизского Тянь-Шаня касаются механизма коллизии литосферы. После столкновения Индии с Азией в эоцене происходит последовательное сжатие коры Центральной Азии с юга на север.

На первых этапах максимальное сжатие происходило в Тибете, что привело к поднятию огромной территории и образованию коры большой мощности ~ 70 км. Дальнейшее сжатие Тибета представляется невозможным, так как сила давления, оказываемая Индийской плитой, компенсируется силой сопротивления. Это вызывает «растекание» утолщенной коры. При достижении баланса сил дальнейшее сжатие Центральной Азии начало

распространяться на более северные территории. После завершения этапа сжатия Тибета, сокращение центральной Азии происходит за счет коллизии Таримской плиты с более северными микроплитами. По-видимому, здесь происходит погружение мантийной части литосферы в северном направлении с одновременным утолщением континентальной коры, которая формирует горы Тянь-Шаня. Линейная высокоскоростная аномалия, которая прослеживается в верхней мантии под всем Тянь-Шанем, вероятно, является следом погружившейся мантийной литосферы.

Активный рост гор и утолщение коры в южном Тянь-Шане привели к некоторому критическому состоянию, после которого дальнейшее сжатие коры стало невозможным (аналогично тому, что ранее произошло на Тибетском плато). После этого область сжатия сместилась на север в район границы Тянь-Шаня и Казахской плиты. При этом сокращение поверхности формируется за счет погружения Казахской плиты в южном направлении под Тянь-Шань. Следы этого погружения мы видим на моделях, построенных методами, как локальной, так и региональной томографии.

Результаты томографического исследования коры и мантии Кавказа

Результаты региональной томографии. Исследование региональной томографии Кавказа основано на анализе скоростных моделей Р- и S-волн до глубины 1000 км, полученных в работе [Koulakov, 2011]. Томографическая модель была построена с помощью данных, включающих в себя времена прихода сейсмических волн и координат землетрясений из глобального каталога ISC за период с 1964 по 2007 года. Для выбранной области было использовано ~300000 лучей.

Полученные результаты инверсии данных по Кавказу и близлежащих регионов для аномалий Р-волн представлены на горизонтальных (рис. 3, вкладка) и на вертикальных сечениях (рис.4, вкладка). На горизонтальных сечениях четко прослеживаются высокоскоростные аномалии Р- и S-волн. На вертикальных профилях видно, что толщина этих высокоскоростных структур, достигает 150-200 км.

Существует явная связь между аномалиями и жесткими континентальными Аравийской и Европейской плитами. На вертикальных сечениях видно, что все центры современного вулканизма точно совпадают с низкоскоростными аномалиями. На вертикальных сечениях можно видеть, что под коллизионной зоной Кавказа находится крупная низкоскоростная аномалия, которая достигает размеров ~450 км по латерали с юга на север и глубины ~300 км. Под южным краем зоны коллизии высокоскоростные аномалии приобретают сложную форму, чередуясь с локальными аномалиями противоположного знака и погружаясь в виде капель на большие глубины. Под коллизионной зоной наблюдаются дугообразные высокоскоростные аномалии, которые прослеживаются до глубин 600–700 км. Вероятно, высокоскоростные аномалии соответствуют холодным структурам мантии, которые погружаются на глубину в виде капель.

Локальная томография. В качестве источника данных был использован сейсмологический каталог (1970–1990 гг.), предоставленный Центром сейсмического мониторинга Ильинского Государственного Университета (Грузия, Тбилиси). База данных представляет собой географические координаты 67 станций и времена прихода P- и S-волн от 1374 местных землетрясений. Всего использовалось 42803 лучей, из них 22090 от P-волн и 20713 от S-волн.

Основными результатами локальной инверсии являются модели распределения скоростей P- и S-волн до глубин 60 км. Также были построены вертикальные сечения до глубины ~80 км для P- (рис. 5, вкладка) и для S-волн.

На горизонтальных сечениях скоростных моделей P- и S-волн прослеживаются низкоскоростные аномалии в области осадочного бассейна Куры в восточной части Кавказа. На вертикальном сечении 3 (рис. 5., вкладка) видно, что низкоскоростная аномалия под Курой прослеживается почти до 20 км. Также, низкоскоростные аномалии можно наблюдать в местах скопления вулканов. На вертикальных сечениях (рис.5, вкладка) видно, что низкоскоростные аномалии доходят до глубин 40 км. Вдоль юго-западного склона горного хребта Большого Кавказа наблюдается линейная низкоскоростная аномалия, которая совпадает с местоположением крупных разломов (рис.5, вкладка).

Также стоит обратить внимание на высокоскоростную аномалию, расположенную в Транскавказском массиве. Эта аномалия проходит между Большим и Малым Кавказом, на вертикальных сечениях и просматривается до глубин более 40 км, а также имеет наклонный характер.

Интерпретация результатов. Для наиболее наглядного комплексного представления полученных результатов, было решено наложить вертикальный разрез, полученный с помощью локальной томографии на вертикальный разрез, построенный по региональным данным (рис 6).

В моделях, полученных с помощью локальной инверсии, высокоскоростные аномалии соответствуют Скифской плите и жесткому блоку в Транскавказском массиве. В результатах, полученных по региональным данным, высокоскоростные аномалии мощностью 150–200 км по периферии коллизионной зоны соответствуют Аравийской платформе на юге и Скифской плите на севере. Низкоскоростные аномалии в обеих моделях в верхней части разреза (первые десятки километров) находятся под зонами четвертичного вулканизма Большого и Малого Кавказа. В Транскавказском массиве, где наблюдается наклонная высокоскоростная аномалия, отсутствует вулканическая активность. Возможно, этот блок – останец субдуцированной океанической плиты, который остался здесь после закрытия субдукционной зоны.

Важнейшим открытием данного исследования является наличие крупной низкоскоростной аномалии под коллизионной зоной Кавказа, которая, скорее всего, связана с разуплотнением материала мантии в зоне стыка континентальных плит.

На основании результатов можно предположить, что мантийная часть литосферы под зоной коллизии между Аравийской и Европейской плитами в районе Кавказа практически отсутствует. Это объясняет слабую прочность литосферы, которая способствует активному горообразованию в зоне коллизии.

ГЛАВА 4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КИРГИЗСКОГО ТЯНЬ-ШАНЯ И КАВКАЗА

После получения результатов по исследуемым регионам было произведено их сравнение, так как они относятся к одному складчатому коллизионному комплексу и имеют схожую эволюции. Как видно из рис. 6, полученные результаты позволяют утверждать, что регионы Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня имеют общие черты, а именно:

- наличие низкоскоростной аномалии непосредственно под зоной горообразования, что свидетельствует о частичном или полном отсутствии мантийной части литосферы под коллизионной зоной;
- погружение мантийной части литосферы плит, участвующих в коллизии, которая прослеживается в виде высокоскоростных аномалий.

Автор связывает особенности строения исследуемых коллизионных зон, наблюдаемые с помощью полученных сейсмических моделей, с процессом деляминации. Деляминация - это процесс отслоения мантийной части литосферы и ее погружение в астеносферу на глубину [Kau and Kau, 1993]. Существует ряд факторов, выступающих триггерами при процессе деляминации: (1) критический уровень сжатия (скорость сжатия и наличие флюида), (2) эклогитизация, (3) адвекция астеносферы, (4) субдукция.

Основные различия скоростных неоднородностей регионов заключаются в характере погружения высокоскоростных аномалий, относящихся к мантийным частям литосферы, а также в размерах низкоскоростных аномалий непосредственно под коллизионной зоной.

Сейсмические изображения глубинных структур исследуемых регионов отличаются из-за характерных особенностей эволюции. Так, процессы субдукции в регионе Тянь-Шаня последний раз происходили еще в палеозое, после чего регион пережил пенеплен, который длился весь мезозой, далее в кайнозое начался активный орогенез, который продолжается по сей день. В то время как субдукция на Кавказе последний раз происходила в миоцене [Cowgill et al., 2016]. В Кавказском регионе весь фанерозой происходили сложные процессы эволюции, которые сопровождались различными взаимодействиями континентальных и океанических блоков. Можно предложить, что более широкое раскрытие низкоскоростного «окна» (~450 км), а также вертикальное каплевидное погружение мантийной части литосферы под Кавказом могло дополнительно провоцироваться относительно недавним закрытием зоны субдукции, которая находилась между Большим и Малым Кавказом. Останец океанической плиты в

Транскавказском массиве наблюдается между горными хребтами до сих пор, о чем свидетельствуют результаты, описанные в статье [Rolland, 2017]. Также, Кавказ, в отличие от Тянь-Шаня, обладает активным современным вулканизмом. Есть работы, которые указывают на то, что Кавказский вулканизм частично относится к субдукционному [Tutberidze, 2011; Keskin, 2003] и частично к коллизионному типу [Pearce et al., 1990]. Возможно, за счет большого раскрытия низкоскоростного «окна» вулканизм на Кавказе дополнительно подпитывается от горячей астеносферы, которая заняла место погрузившейся мантийной части литосферы.

Существуют исследования, которые гласят о том, что мощность коры Тянь-Шаня составляет более 60 км [Vinnik et al., 2004] и базальтовый слой, из которого состоит мафическая кора, гораздо больше гранитного [Гамбурцев, 1960]. Эти факторы могут указывать на существование процессов эклогитизации в коре Киргизского Тянь-Шаня.

Таким образом, все вышесказанное в совокупности с полученными нами данными дает возможность предполагать, что процесс деляминации в исследуемых регионах происходил по-разному сценарию: в Кавказском регионе триггером погружения мантийной части литосферы выступило закрытие относительно недавней субдукционной зоны, а в Киргизском Тянь-Шане – эклогитизация и, возможно, плюмовая ячейка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены модели скоростей Р и S-волн, полученные с помощью локальной и региональной томографии. Локальная томография регионов позволила получить сейсмическую структуру коры, а региональная томография позволила изучить верхнюю мантию исследуемых коллизионных зон. После получения скоростных структур регионов, они были сопоставлены друг с другом, что производилось впервые. В процессе работы, были уточнены размеры уже известных аномалий, а также была предложена интерпретация глубинных структур регионов и механизм их образования. На основании полученных результатов, а также по данным материалов по геологии, геофизике и геохимии, опубликованных для исследуемых регионов в последние годы, было обосновано наличие различных сценариев деляминации под Кавказом и Киргизским Тянь-Шанем.

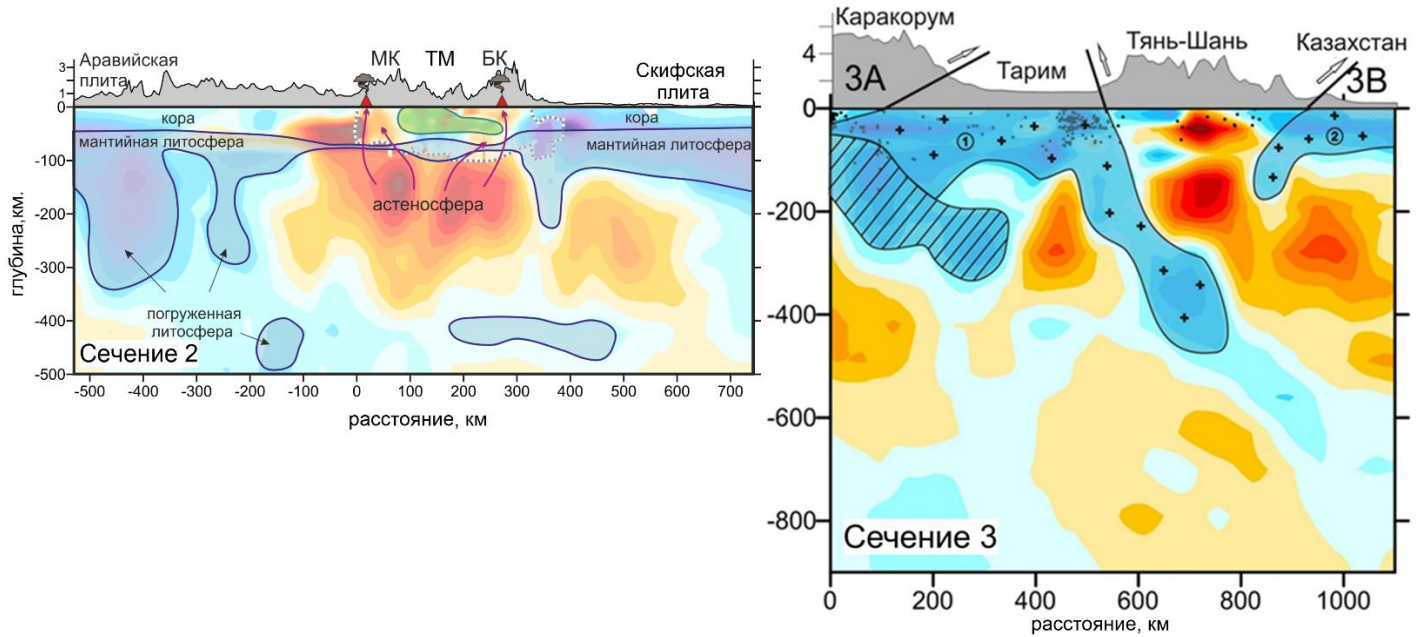


Рис. 6. Скоростные модели глубинного строения Кавказа (слева) и Киргизского Тянь-Шаня (справа).

**Список статей, опубликованных по теме диссертации в
журналах, рекомендованных ВАК:**

1. Koulakov, I., **Zabelina, I.**, Amanatashvili, I., Meskhia, V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography // *Solid Earth*. 2012. №3. p. 327–337.
2. **Zabelina, I.**, Koulakov I., Buslov M. Deep mechanisms in the Kyrgyz Tien Shan orogen (from results of seismic tomography) // *Russ. Geol. Geophys.* 2013. №54. p. 695–706.
3. **Zabelina I.**, Koulakov I., Amanatashvili I., Khrepy S., Nassir A. Seismic structure of the crust and uppermost mantle beneath Caucasus based on regional earthquake tomography // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. №119. p. 87–99.
4. Кулаков И., **Забелина И.** Глубинные источники вулканизма на Кавказе // *Природа*. 2016. № 4. с. 73–75.
5. Sychev I., Koulakov I., Sycheva N., Koptev A., **Medved I.**, El Khrepy, S., Al-Arifi, N. Collisional processes in the crust of the northern Tien Shan inferred from velocity and attenuation tomography studies // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018. №123 (2). P. 1752–1769.

Список основных докладов и тезисов:

1. **Медведь И.В.** Изображения коллизионных зон Кавказа и Киргизского Тянь-Шаня с помощью методов сейсмической томографии // Уральская молодежная научная школа по геофизике (Екатеринбург, 2018).
2. Сычев И.В., Кулаков И.Ю., Сычева Н.А., **Медведь И.**, Томографические исследования скоростей и затухания сейсмических волн в земной коре Северного Тянь-Шаня // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Тезисы докладов VII Международного симпозиума, Бишкек, ИС РАН, 2017, С. 331-331.
3. **Zabelina I.**, Koulakov I., Kayal J.R., Singh A.P., Kumar S., Kukarina E., Amanatashvili I. Different stages of collision zones on examples of Gujarat province (India) and Caucasus // *Geophysical Research Abstracts*. European Geosciences Union General Assembly. 2016. T. 18. C. 6610.
4. Буслов М., Баталев В., Гравэ И. Де., **Забелина И.** Особенности тектоники и геодинамики мезозойских и кайнозойских коллизионных орогенов Азии // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Тезисы докладов Шестого международного симпозиума. 2014. С. 20-22.
5. **Забелина И.**, Кулаков И. Природа орогенеза и вулканизма Кавказа по данным региональной томографии // Студент и научно-технический прогресс. Геология: Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции. 2013. С. 45.
6. **Забелина И.** Сейсмическая структура Кавказа по данным региональной и локальной томографии // Материалы 50-й Международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс": Геология. 2012. С. 107-107.

7. **Забелина И.**, Кулаков И., Буслов М. Механизмы горообразования Киргизского Тянь-Шаня по данным региональной и локальной сейсмотомографии // Осадочные бассейны и геологические предпосылки прогноза новых объектов, перспективных на нефть и газ: Материалы XLIV Тектонического совещания. 2012. С. 146-147.

8. Amanatashvili I., Adamia Sh., Lursmanashvili N., Sadradze N., Meskhia V., Koulakov I., **Zabelina I.**, Jakovlev A. Tectonics, Deep-Seated Structure and Recent Geodynamics of the Caucasus // Geophysical Research Abstracts. 9th EGU General Assembly. 2012. Т. 14. С. 13854.

9. Koulakov I., **Zabelina I.** Mantle processes beneath collisional areas of Eurasia based on regional tomography models // Book of Abstracts 33-rd General Assembly of the European Seismological Commission and Young Seismologist Training Course. 2012. С. 68.

10. **Zabelina I.**, Koulakov I., Adamia Sh., Amanatashvili I. Tectonics, Deep-Seated Structure and Recent Geodynamics of the Caucasus // The 6th International Siberian Early Career GeoScientists Conference: Proceedings of the. 2012. С. 160.

11. **Забелина И.** Сейсмическая структура коры Киргизии по данным сейсмической томографии // Материалы XLIX Международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс": Геология. 2011. С. 50.