

ВЫЯВЛЕНИЕ ГЛУБИННЫХ МЕХАНИЗМОВ ГОРООБРАЗОВАНИЯ КИРГИЗСКОГО ТЯНЬ-ШАНЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

И.В. Забелина, И.Ю. Кулаков, М.М. Буслов*

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

** Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

Выполнены исследования по региону Киргизского Тянь-Шаня методом сейсмической томографии на базе двух различных схем наблюдения. Первая схема основана на использовании времен прихода P и S сейсмических лучей от региональных землетрясений, зарегистрированных местными сейсмологическими сетями (локальная схема). На основании нелинейной томографической инверсии с использованием алгоритма LOTOS были построены трехмерные распределения скоростей P - и S -волн в коре под Киргизским Тянь-Шанем и уточнены положения землетрясений. Вторая схема использовалась для изучения структуры верхней мантии и базировалась на данных мировых сейсмологических каталогов (региональная схема). В этой схеме использовались все данные по лучам, которые хотя бы частично пробегают внутри изучаемого объема, включая (1) лучи от землетрясений в изучаемом регионе, зарегистрированные станциями мировой сети и (2) лучи по местным станциям от далеких землетрясений. Этот подход ранее использовался для расчета модели верхнемантийной структуры под Азией. Здесь мы используем фрагмент этой модели, соответствующий Тянь-Шаню и окружающим территориям. Для оценки разрешающей способности для обеих схем был выполнен ряд синтетических тестов. Результаты томографии показывают следы погружения мантийной части литосферы Тарима с юга на север. В северной части Тянь-Шаня на результатах локальной и региональной схем мы также наблюдаем следы погружения холодного вещества с севера на юг, однако в гораздо меньшем масштабе. Под горными системами Тянь-Шаня в верхах мантии наблюдаются низкие скорости, что говорит об утонении литосферы. На основании этих результатов предположено, что в зоне коллизии происходит отрыв мантийной части литосферы (деламинация) с обеих сторон коллизионного пояса. В результате процесса деламинации литосфера под Тянь-Шанем теряет прочность и начинает активно деформироваться, что приводит к интенсивному горообразованию.

Сейсмическая томография, горообразование, деламинация, сейсмическая структура коры и мантии, Тянь-Шань.

DEEP MECHANISMS IN THE KYRGYZ TIEN SHAN OROGEN

(from results of seismic tomography)

I.V. Zabelina, I.Yu. Koulakov, and M.M. Buslov

Seismic-tomography studies were conducted in the Kyrgyz Tien Shan using two different observation schemes. The first was based on the arrival times of P and S waves from regional earthquakes recorded with local seismological networks (local scheme). Nonlinear tomographic inversion with the LOTOS algorithm was used to construct the 3D distributions of P and S wave velocities in the crust beneath the Kyrgyz Tien Shan and to refine the earthquake locations. The second scheme was used to study the upper-mantle structure based on data from world earthquake catalogs (regional scheme). All the data on waves which at least partly travel within the volume studied were used here, including (1) those from regional earthquakes recorded at world seismic stations and (2) teleseisms recorded at the local stations. This approach was earlier applied to calculate the upper-mantle structure beneath Asia. We used a fragment of this structure beneath the Tien Shan and adjacent areas. A series of synthetic tests was performed to estimate the resolution provided by both schemes. The tomography shows traces of the delamination of the Tarim mantle lithosphere from south to north. Also, the local and regional schemes reveal evidence for cold-matter descent from north to south in the northern Tien Shan but on a much smaller scale. Low velocities in the upper mantle beneath the Tien Shan indicate lithospheric thinning. These data suggest that mantle lithosphere delamination is taking place underneath both the northern and the southern margins of the Tien Shan collision belt. Lack of the mantle lithosphere beneath the Tien Shan leads to lithospheric weakening and active deformation, thus causing intense orogeny.

Seismic tomography, orogeny, delamination, seismic structure of the crust and mantle, Tien Shan

ВВЕДЕНИЕ

Проблема механизма горообразования является одной из наиболее сложных в геодинамике, и она привлекает внимание многих специалистов в различных областях наук о Земле. Регион Тянь-Шаня, рассматриваемый в данной статье, входит в состав крупнейшего на Земле коллизионного Альпийско-Гималайского пояса, вдоль которого наблюдаются высочайшие горные комплексы. Во многих случаях исходным механизмом горообразования является коллизия — столкновение континентальных плит, которое приводит к смятию и утолщению коры. Однако конкретные детали этого процесса вызывают активные дискуссии. В частности, возникает вопрос, куда вытесняется мантийная литосфера в областях сжатия, как происходит и происходит ли вообще отрыв мантийной литосферы от коры. Существует ли континентальная субдукция и каков ее механизм? В данной работе эти вопросы рассматриваются на примере региона Киргизского Тянь-Шаня на базе изучения его глубинной структуры методом сейсмической томографии.

Для лучшего понимания глубинных механизмов региональных геологических процессов важно использовать информацию геофизических исследований о строении коры и мантии. Структура глубинных недр под изучаемым районом исследовалась ранее во множестве геологических и геофизических работ [Buslov et al., 2004; Roescker et al., 2009; Omuralieva et al., 2009], различных по масштабу и типу используемых данных. В настоящее время работы по исследованию Тянь-Шаня ведутся специалистами во всем мире. Ниже приводится обзор некоторых геофизических исследований по району Тянь-Шаня.

Одним из основных результатов работ методами магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования [Makarov et al., 2010] явилось то, что в Северо-Восточном Тянь-Шане на всех региональных профилях в средней и нижней частях коры выделен проводящий слой. Он оценивается как двумерный с субширотной осью однородности, а его суммарная продольная проводимость возрастает в южном направлении к Таримской плите. Северо-восточная часть корового проводника рассматривается как пластичная зона, сформированная в результате поддвигания Таримской плиты и вдавливания ее фундамента в средненижнюю часть земной коры Северо-Восточного Тянь-Шаня.

По данным ГСЗ [Гамбурцев, 1960], в районе Северного Тянь-Шаня горным областям (Джунгарский Алатау, Кунгай-Алатау, Заилийский Алатау и Киргизский хребет) соответствует поднятие поверхности базальтового слоя и увеличение его мощности по сравнению с областями депрессий. Исследования методом ГСЗ показали, что мощность земной коры Тянь-Шаня больше, чем на близлежащих плитах (Казахстанская плита, Таримский микроконтинент). Эта же закономерность была установлена и при изучении записей землетрясений и больших взрывов. Обнаружено было также, что мощность коры в пределах одного крупного региона может довольно сильно изменяться при переходе от одной структуры к другой. Изменчивы, как выяснилось, мощности гранитного и базальтового слоев. Например, мощность базальтового слоя в Тянь-Шане намного больше, чем гранитного.

В работе [Kumar et al., 2005], основанной на методе функции приемника, показана модель погружения Казахстанской плиты под Тянь-Шань до глубин 360 км. Методом функции приемника также пользовались Л.П. Винник и соавторы в своих работах [Vinnik et al., 2002, 2006] по изучению коры и мантии Тянь-Шаня.

В работах [Сабитова, 1996; Сабитова, Адамова, 2001] рассматривался вопрос о проявлении глубинных мантийных процессов в скоростной структуре земной коры и верхнемантийного слоя Тянь-Шаня, изученных методами локальной сейсмической томографии. В данной работе сделан вывод о том, что геодинамические процессы в Тянь-Шане, в том числе горообразование и сейсмичность, определяются как Индо-Евразийской коллизией, так и процессами плюм-тектоники.

Несмотря на большое количество публикаций и исследований, структура недр Киргизского Тянь-Шаня изучена далеко не до конца. Чтобы лучше понять механизм и природу горообразования, и разрешить некоторые противоречия, имеющие место между различными моделями, необходимо продолжать исследования. В нашей работе приведены результаты расчета двух сейсмических моделей: региональной и локальной. Выбор проведения двух разных по масштабу моделей обусловлен их взаимным дополнением.

Цель работы состоит в построении сейсмических моделей коры и верхней мантии под регионом Тянь-Шаня на базе двух различных схем сейсмической томографии и их использовании для объяснения механизма коллизии и горообразования Киргизского Тянь-Шаня.

ГЕОДИНАМИКА ТЯНЬ-ШАНЯ И ОКРУЖАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

Тянь-Шань является частью Центрально-Азиатского орогена, являющегося крупнейшей в мире внутриконтинентальной коллизионной структурой, которая протягивается более чем на 4 000 км от зоны столкновения Индии с Евразией [Molnar, Tapponnier, 1975]. Она прослеживается от Памира, Гималаев, Тибета на север через Тянь-Шань, включает горные пояса Казахстана, Южной Сибири и Байкаль-

скую рифтовую зону Восточной Сибири [Буслов, 2011]. Деформации за счет давления Индийской плиты распространялись на север, в направлении внутренних областей Азии, которая состоит из множества разновеликих докембрийских микроконтинентов гондванской группы, окруженных менее прочными складчатыми поясами [Зоненшайн и др., 1990; Моссаковский и др., 1993; Буслов, 2012]. Передача деформаций на дальнейшее расстояние происходила по «принципу домино» через жесткие структуры докембрийских микроконтинентов [Dobretsov et al., 1996; Buslov et al., 2004]. В результате сжатия складчатые зоны перерастали в горные системы, а микроконтиненты служили фундаментом для формирования кайнозойских бассейнов (Таримского, Таджикского, Джунгарского и др.).

Индийский континент столкнулся с Азией в эоцене. В олигоцен-четвертичное время деформациям был подвержен Тянь-Шань, на формирование структуры и геодинамики которого действовали два фактора: надвигание Памира и поддвигание Таримской плиты. Они создали различные структурно-геодинамические провинции, разделенные зоной Таласо-Ферганского разлома. На Памире и Западном Тянь-Шане, находившемся вблизи давления Пенджабского «индентора» [Molnar, Tapponnier, 1975], деформации проявились в форме сдвига надвигов, надвигов и складок северной вергентности. Восточнее Таласо-Ферганского правостороннего сдвига общее северное направление сжатия со стороны Тибета вызвало поднятие Тянь-Шаня преимущественно по надвигам и сдвига надвигам.

Деформации, связанные с давлением Индии, постепенно распространялись на север и около 5—3 млн лет назад достигли мощного упора Сибирской платформы. В связи с этим в коллизионных областях Центральной Азии почти одновременно начинают расти высокие горы. Пик роста горных систем за последние 5—3 млн лет на всей территории Центральной Азии особенно четко выявляется по данным трекового датирования по апатитам [De Grave et al., 2002, 2004, 2006, 2007; Буслов и др., 2008] и формированием моласс в межгорных бассейнах. Давление Памира привело к проникновению деформаций внутрь Азии с уменьшением амплитуды сдвигов, омоложением гор и грубообломочных коррелятных толщ в северном направлении. Расширение зоны сжатия и горообразования происходило последовательно «по принципу домино»: 1) вращение против часовой стрелки Ферганской микроплиты, опускание Таримской рамповой структуры, поднятие Южного Тянь-Шаня около 18—20 млн лет назад, затем Северного Тянь-Шаня около 10—8 млн лет назад; 3) формирование Джунгарской плиты (рамповой структуры), ее поддвигание под Алтай, 4) поднятие Алтая, Хангая, Юго-Западного Прибайкалья, оформление Байкальской сдвигорифтовой зоны [Dobretsov et al., 1996; Buslov et al., 2004, 2007; De Grave et al., 2011] (рис. 1). Большинство выводов данного раздела основано на анализе приповерхностных данных, интерпретация которых зачастую неоднозначна. В рамках настоящего исследования, используя результаты по глубинному строению коры и верхней мантии под Тянь-Шанем, мы уточняем и дополняем предложенные сценарии.

ЛОКАЛЬНАЯ СХЕМА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

В настоящем исследовании выполняются независимые расчеты по двум различным схемам сейсмической томографии. Данные подходы охватывают различные интервалы глубин, что позволяет результатам взаимно дополнять друг друга.

Первая схема основана на использовании данных по сейсмическим лучам, для которых и источники, и приемники расположены внутри изучаемой области (локальная схема). Данная схема требует одновременного определения скоростной структуры и локализации источников. Поскольку ожидаемые значения неоднородностей в земной коре достаточно высокие, в этом случае необходимо использование нелинейных подходов, согласно которым сейсмические лучи итеративным образом изменяют траектории в зависимости от изменения скоростной модели.

Данные, включавшие в себя времена прихода волн, сейсмостанции и их координаты, были предоставлены Институтом сейсмологии НАН КР. Около 260 сейсмических станций, работающих на протяжении года, зарегистрировали более чем 435 землетрясений (рис. 2). Всего использовалось 11163 луча, из них 6175 лучей, относящихся к *P*-волнам, и 4988 лучей — к *S*-волнам.

Алгоритм. Томографическая инверсия осуществлялась на базе нелинейного алгоритма пассивной сейсмической томографии LOTOS, теоретические основы и технические детали которого описаны в работе [Koulakov, 2009] и на Интернет-сайте www.ivan-art.com/science/LOTOS. Программа томографии LOTOS (Local Tomography Software) предназначена для одновременной инверсии *P* и *S* скоростных структур и координат источников. На основе программы LOTOS были проведены исследования в других работах [Кулаков и др., 2011; Яковлев и др., 2012].

На исходном этапе выполнения расчетов производится одновременная оптимизация наилучшей 1D скоростной модели и предварительной локализации источников. Распределение, обеспечивающее минимальное значение средней невязки, выбиралось в качестве референтной модели для дальнейшего томографического моделирования.

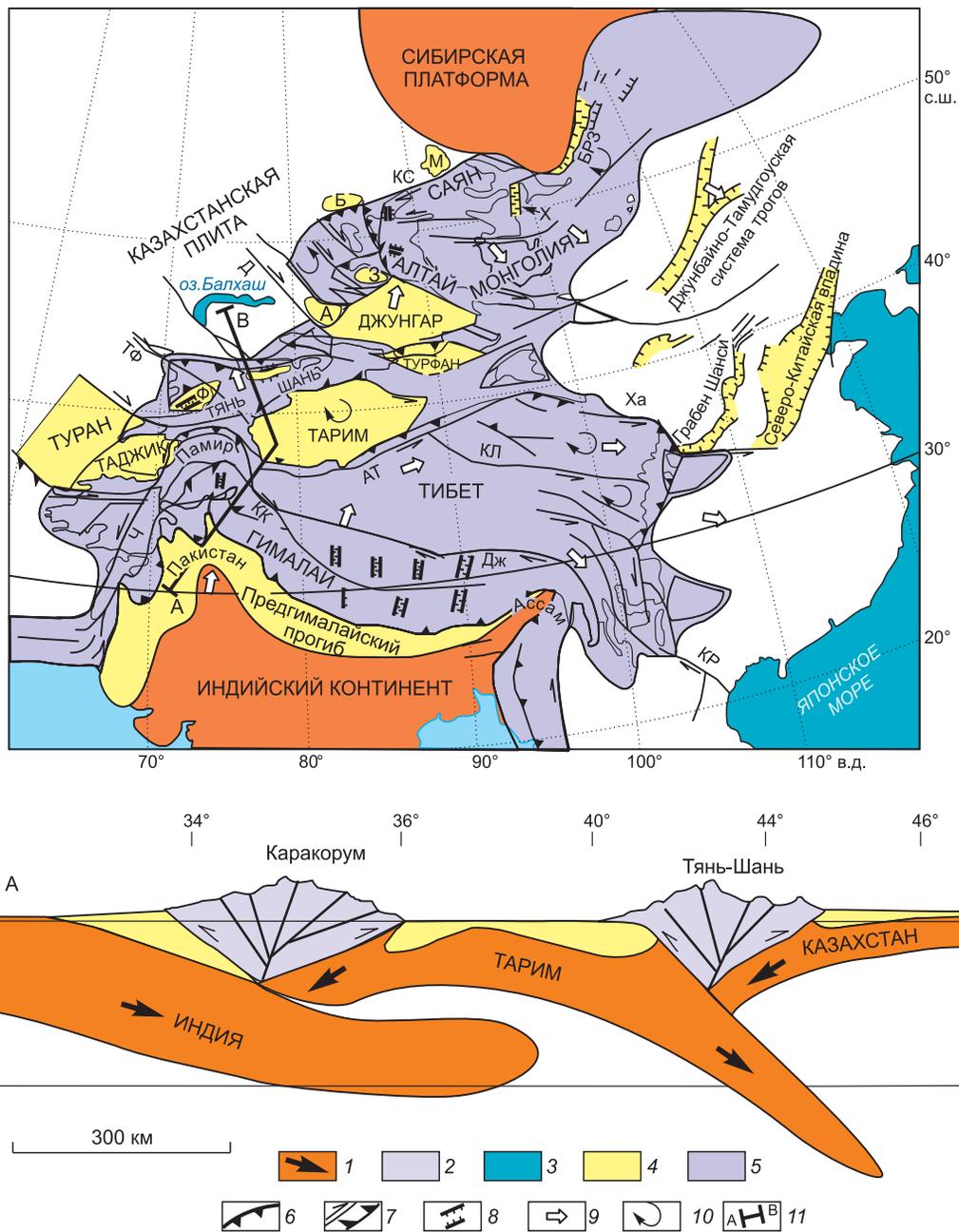


Рис. 1. Тектоническая схема Центральной Азии ([Dobretsov et al., 1996; Buslov, 2004] с дополнениями).

1 — крупные докембрийские континентальные блоки и направления их погружения; 2 — аккреционно-коллизонные зоны; 3 — акватории; 4 — кайнозойские бассейны: Ф — Фергана, М — Минуса, Х — Хубсугул, А — Алаколь, З — Зайсан, Б — Бийско-Барнаульский; 5 — поднятия; 6 — надвиги; 7 — направление смещения; 8 — сбросы; 9 — современная миграция плит и блоков; 10 — современное вращение блоков; 11 — геологический разрез; основные разломы: АТ — Алтын-Таг, Ч — Чаман, Д — Джунгар, Г — Герат, Дж — Джиали, КЛ — Кунь-Лунь, КК — Кара-Корум, КС — Курай-Саян, КР — Красная Река, ТФ — Таласс-Фергана, Ха — Хайан, Х — Хайшуйхе. БРЗ — Байкальская рифтовая зона.

Итеративная процедура начинается с этапа локализации источников в трехмерной модели (на первой итерации этот алгоритм реализуется для 1D референтной модели). Одной из особенностей данного алгоритма является трехмерное лучевое трассирование, которое основано на методе изгиба [Um, Thurber, 1987], использующем принцип Ферма минимизации функционала времени, описанный в [Koulikov, 2009]. Этот алгоритм используется на каждом шаге итеративной инверсии при выполнении локализации источников в полученной трехмерной модели среды.

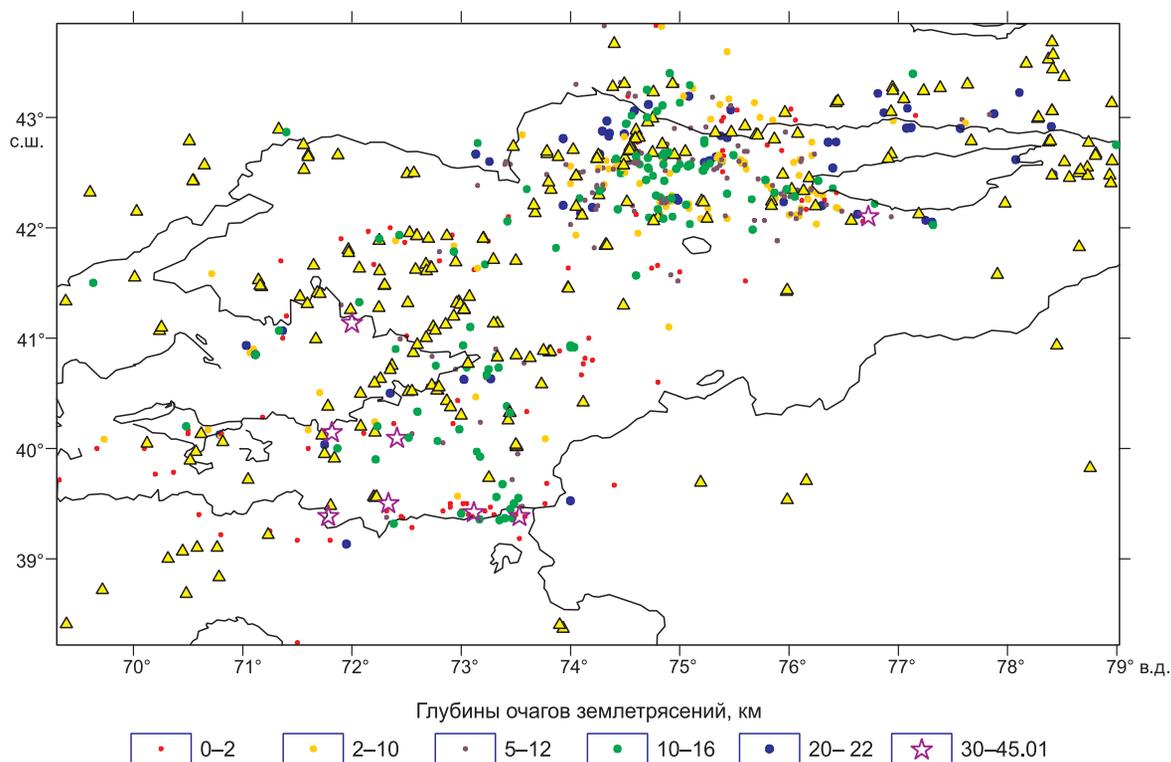


Рис. 2. Карта расположения системы наблюдения, использующейся в настоящей работе.

Матрица первых производных (матрица Фреше), помимо распределения P - и S -скоростей, включает в себя элементы, ответственные за коррекцию координат и времени в источнике (по 4 параметра в каждый источник) и станционные поправки. Инверсия матрицы осуществляется методом LSQR [Paige, Saunders, 1982; van der Sluis, van der Vorst, 1987].

При осуществлении инверсии возникает проблема взвешивания отдельных параметров различных размерностей (скоростных распределений, параметров источников и станционные поправки), а также определения параметров сглаживания. В данной работе эта процедура производится путем реализации синтетических тестов с реалистичным шумом в данных, обеспечивающих сходные условия инверсии, как в случае реальных данных.

Результаты локальной томографии. Главными результатами являются трехмерные модели P и S скоростных аномалий, представленные на горизонтальных и вертикальных сечениях на рис. 3 и 4. Первое и второе сечения проходят через интенсивную низкоскоростную аномалию в западной части изучаемой области, которая прослеживается до глубины 12 км. Это аномалия, скорее всего, относится к осадочному чехлу Ферганского бассейна. Наибольший интерес представляет профиль 3, проходящий по низкоскоростной аномалии на севере. Распределение сейсмических скоростей на этом вертикальном сечении показывает, что до глубин 40 км низкоскоростная аномалия погружается с севера на юг. Это может отражать общую направленность структур взаимодействия плит при коллизии и, скорее всего, свидетельствует о том, что на севере изучаемой области происходит погружение Казахстанской плиты под Тянь-Шань.

Чтобы понять природу скоростных аномалий, мы наложили границы основных геологических структур на карту аномалий P -волн на глубине 5 км (рис. 5). Можно видеть, что низкоскоростная аномалия на западе соответствует Ферганскому бассейну, а линейная низкоскоростная аномалия, находящаяся на северной политической границе, проходит вдоль разлома и находится на стыке Казахстанской плиты и Тянь-Шаня. Высокоскоростные аномалии, располагающиеся в центральной части Тянь-Шаня, имеют линейный характер с субширотным направлением. По-видимому, это определяется тектоническим сжатием коры Тянь-Шаня со стороны Индостана, которое приводит к субширотному чередованию структур в коре.

Верификация. Первым критерием верификации томографических моделей является сравнение аномалий P - и S -скоростей, полученных независимо. В нашем случае аномалии P - и S -скоростей имеют весьма схожую конфигурацию, что может свидетельствовать о надежности результатов инверсии (см. рис. 3).

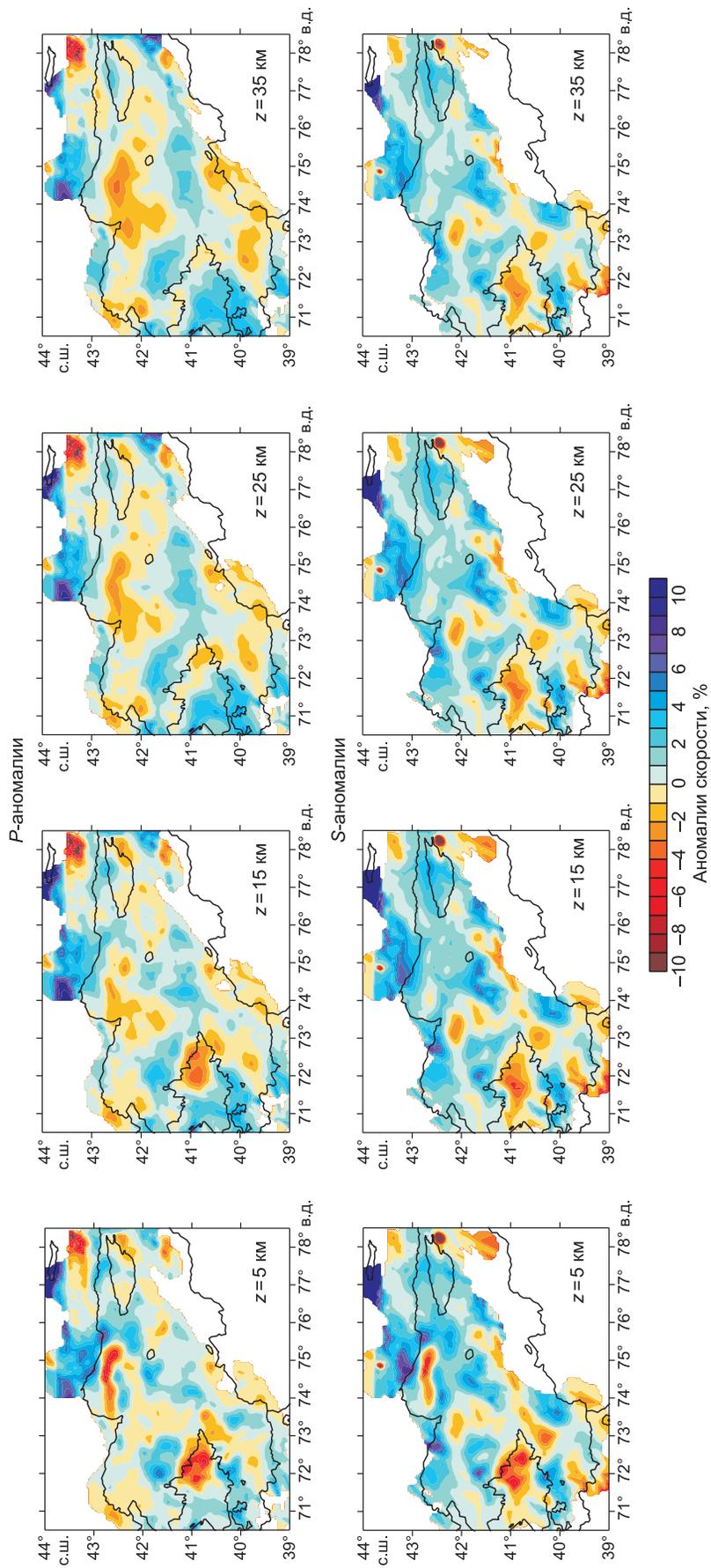


Рис. 3. Результат инверсии реальных данных.

Распределение аномалий P - и S -скорости на различных глубинах.

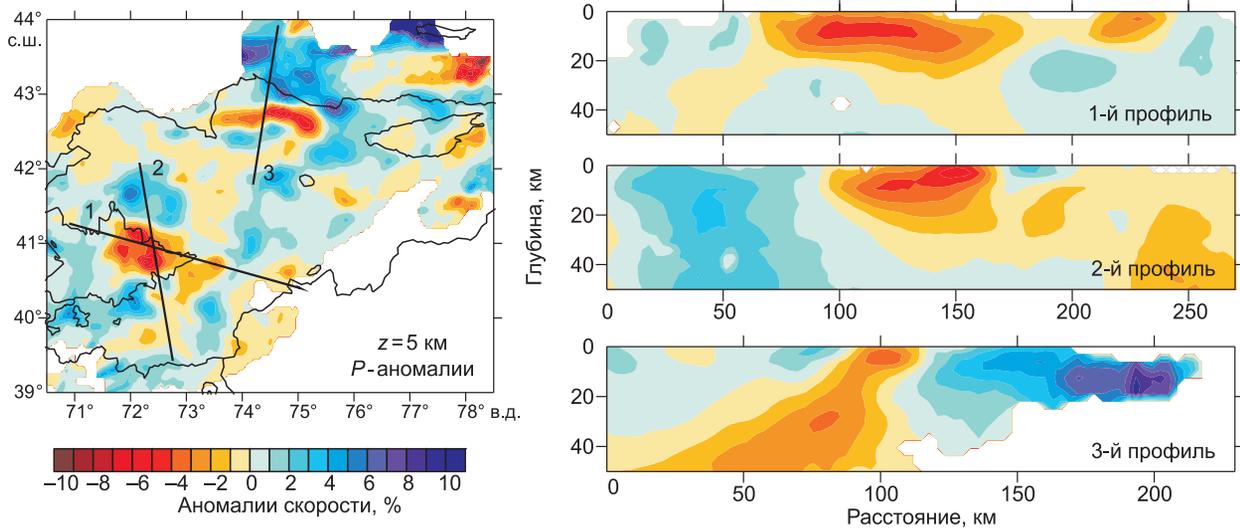


Рис. 4. Результат инверсии реальных данных.

Аномалии P -скоростей на вертикальных сечениях. На левом рисунке показано расположение профилей.

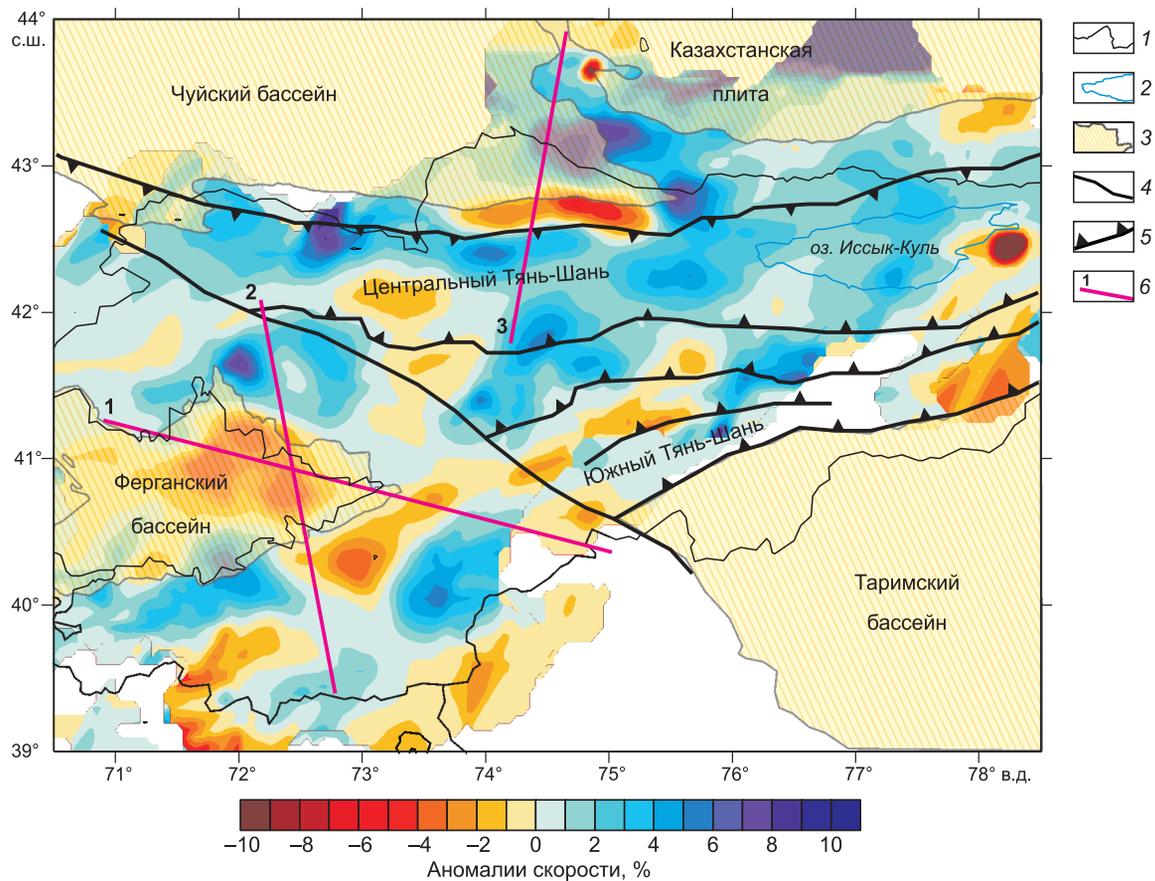


Рис. 5. Карта P -аномалий с нанесенными на нее тектоническими и геологическими элементами [Buslov, 2004].

1 — политические границы, 2 — водные границы, 3 — плиты и бассейны, 4 — разломы, 5 — надвиговые разломы (стрелки показывают направление падения разлома), 6 — профили.

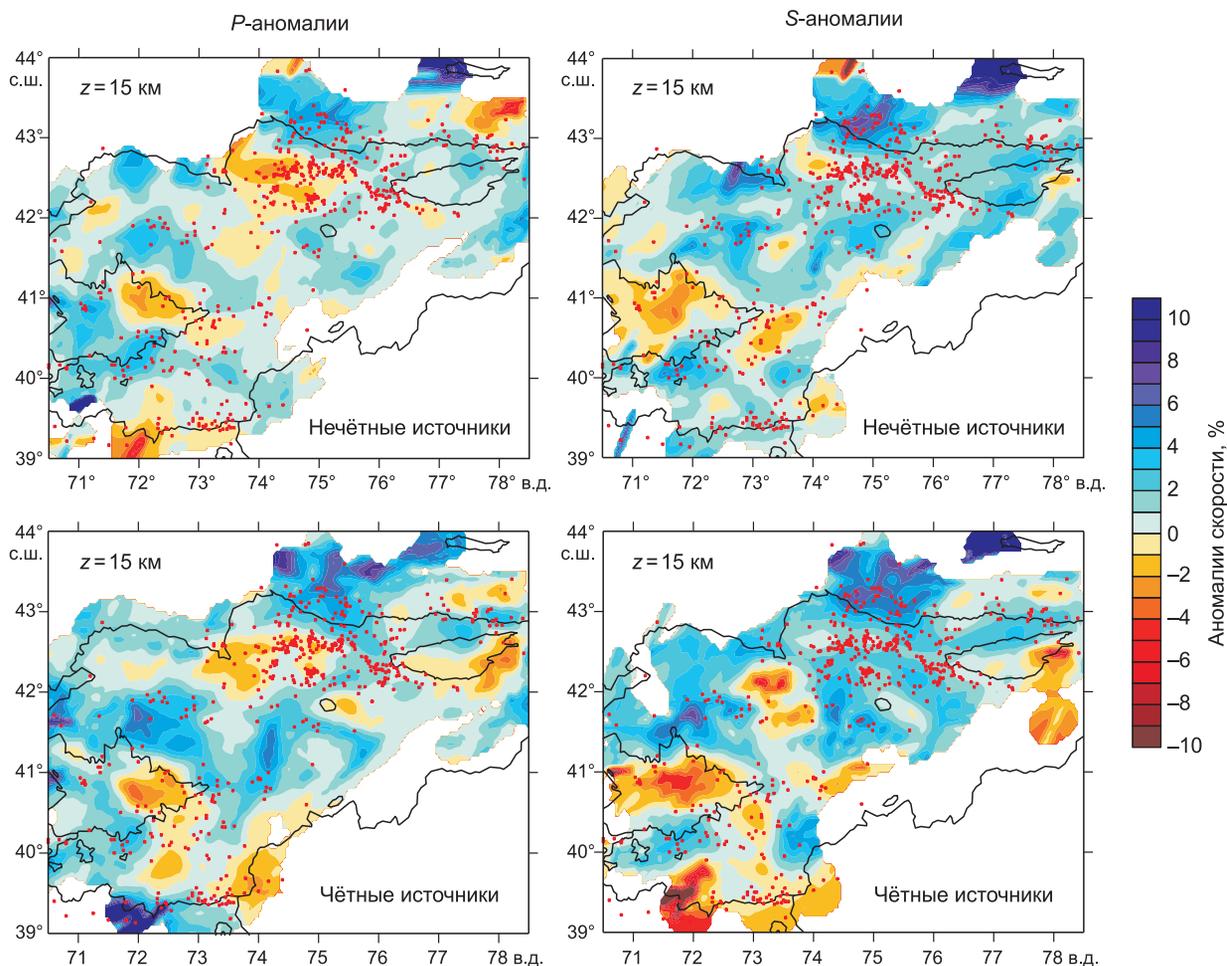


Рис. 6. Тест с четными и нечетными источниками.

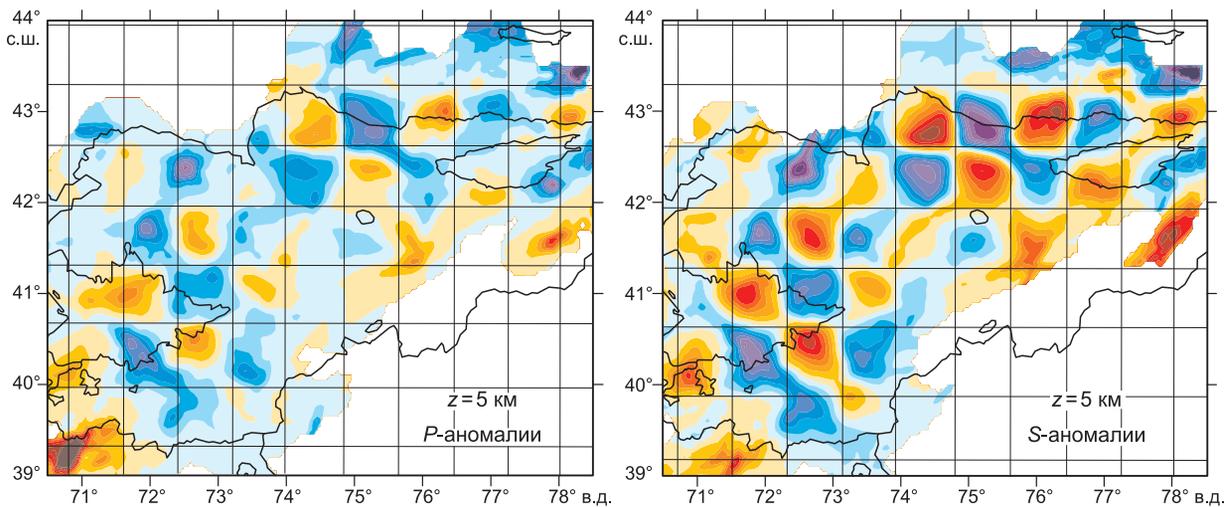


Рис. 7. Синтетический тест «Шахматная доска».

Результаты восстановления модели шахматной доски для P - и S -скоростей на глубине 5 км.

Вторым критерием достоверности является сопоставление результатов инверсии по двум независимым группам данных, что позволяет оценить влияние случайного шума в данных на результат. В этом тесте все данные разделяются на две равные группы: на данные с четными и нечетными номерами источников. Для этих групп производится полная инверсия с использованием тех же параметров и алгоритмов, что для полного набора данных. Результаты теста с четными и нечетными событиями в нашем случае показаны на рис. 6. Можно видеть, что все крупные аномалии выделяются достаточно надежно в обеих моделях, что указывает на их достоверность. Остальные, более мелкие аномалии, по которым наблюдаются отличия, скорее всего, являются результатом случайного фактора и рассматриваться в интерпретации не должны.

Чтобы оценить пространственное разрешение модели используют синтетический тест «Шахматная доска». В данной работе задана синтетическая модель с периодически чередующимися прямоугольными положительными и отрицательными аномалиями с латеральным размером 60×60 км. Через эту модель мы проводим те же лучи, что использовались при инверсии реальных данных. На рис. 7 можно заметить, что структура «шахматной доски» хорошо просматривается как на P -, так и на S -волнах в квадратах $71.5\text{—}74.0$ и $74.5\text{—}76.5$ по долготе и $40\text{—}42$ и $42.0\text{—}43.5$ по широте. Это объясняется тем, что в этих квадратах плотность лучей высокая, и восстановление ячеек «шахматной доски» осуществляется достаточно надежно.

РЕГИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ТОМОГРАФИИ

Вторая схема использовалась для изучения структуры верхней мантии и базировалась на данных мировых центров (региональная схема). В этой схеме использовались все данные по лучам, которые хотя бы частично пробегает внутри изучаемого объема по двум схемам: (1) лучи от землетрясений в изучаемом регионе, зарегистрированные станциями мировой сети и (2) лучи по местным станциям от далеких землетрясений. В этом случае томографическая инверсия производилась по линейаризованной схеме. В силу того, что данные для региональной томографии содержат огромное количество информа-

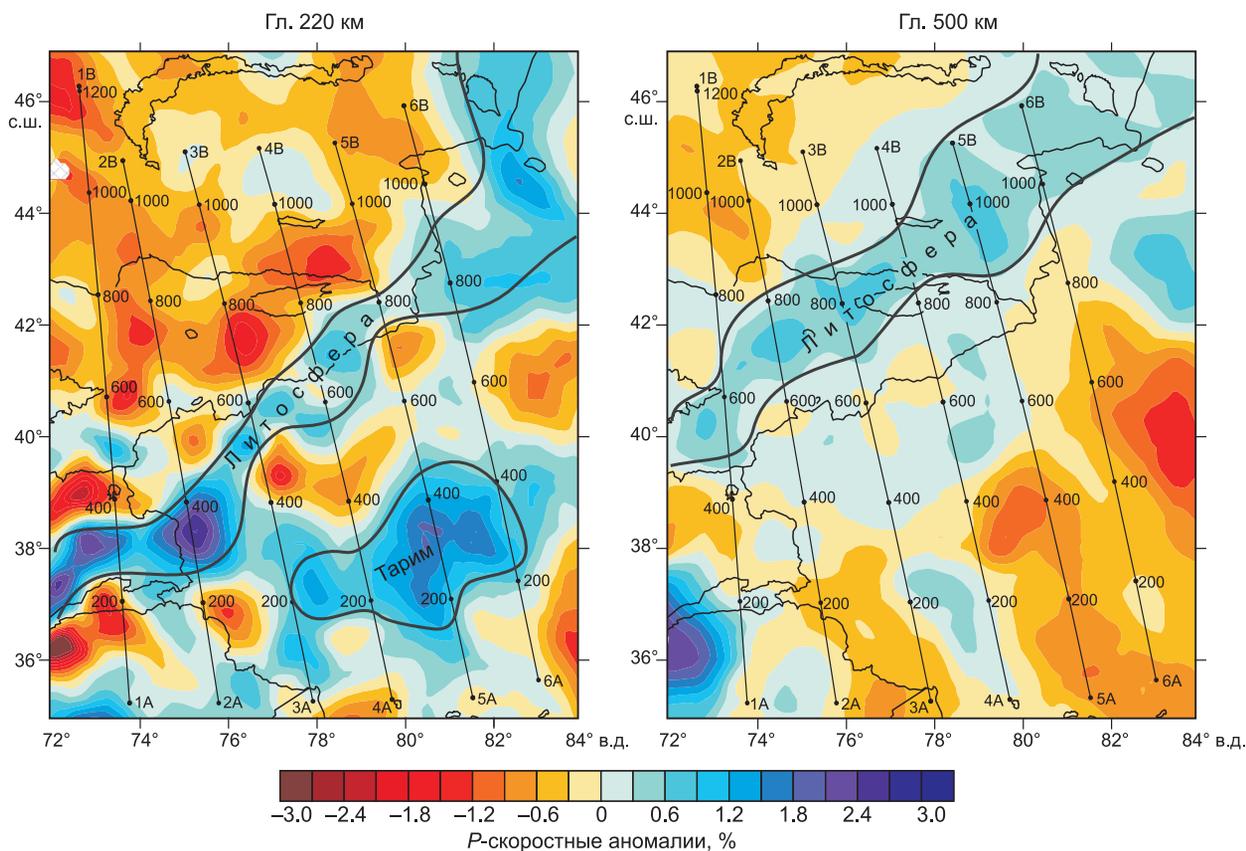


Рис. 8. Аномалии P -скорости в региональной модели [Koulakov, 2011] на глубинах 220 км и 500 км.

Показано положение вертикальных сечений, приведенных на рис. 9. Возможное положение утолщенной литосферы Тарима и погружающейся литосферы под Тянь-Шанем выделены контуром.

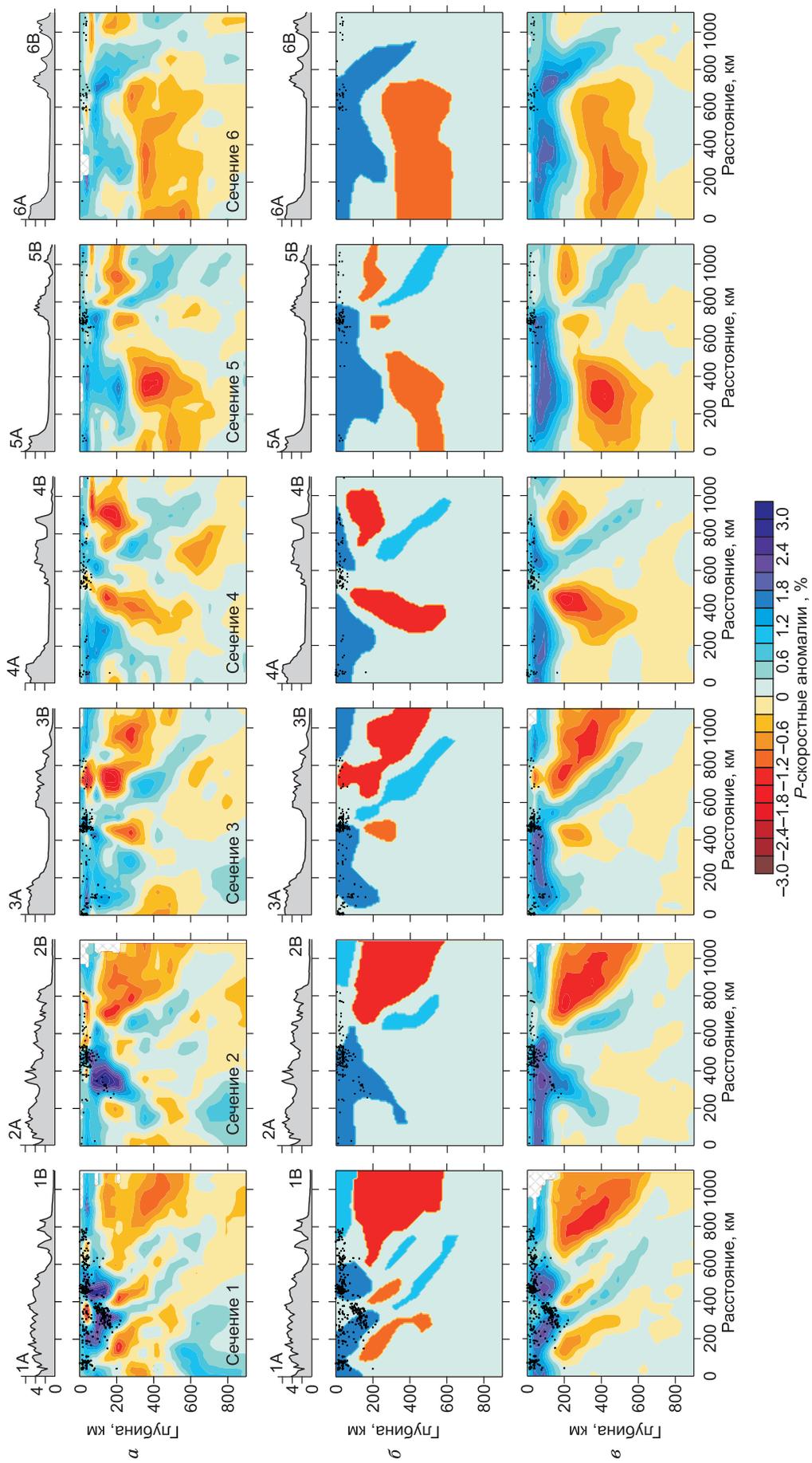


Рис. 9. Результаты инверсии реальных и синтетических данных на вертикальных сечениях.

а — P -аномалии вдоль шести вертикальных профилей, полученные в результате инверсии реальных данных. Расположение профилей представлено на рис. 8; точки — положения землетрясений вокруг профилей; над профилями указаны вариации рельефа дневной поверхности; *б* — сечения синтетической модели, построенной на базе результатов реальной инверсии; *в* — результаты восстановления синтетической модели.

ции, итеративный пересчет лучей путем 3D трассирования, как это было выполнено в алгоритме локальной томографии, является трудно выполняемой задачей. При этом слабый нелинейный эффект при наличии малых амплитуд аномалий (2—3 %) в мантии не оправдывал бы столь существенные затраты.

Описание модели. Здесь мы используем фрагмент модели для района Тянь-Шаня из ранее опубликованной работы [Koulakov, 2011], в которой представлена структура сейсмических аномалий под Азией в пределах $35^{\circ}\text{E}—140^{\circ}\text{E}$, $12^{\circ}\text{N}—57^{\circ}\text{N}$. В этой модели *P*- и *S*-аномалии в верхней мантии под Азией были построены на базе томографической инверсии по данным ISC каталога за 1964—2004 годы с использованием алгоритма, описанного в работе [Koulakov, Sobolev, 2006]. Для получения модели Азии в работе [Koulakov, 2011] инверсия была выполнена независимо в 32 перекрывающихся друг друга круговых окнах, охватывающих всю изучаемую территорию. Независимая настройка параметров инверсии в каждом окне дает более корректное использование входных данных по сравнению с глобальной инверсией. Для анализа региональных структур, как в настоящем исследовании, такой подход предоставляет больше полезной информации, чем глобальные модели.

Результаты региональной томографии. Региональная модель для района Тянь-Шаня представлена аномалиями *P*-скорости на двух горизонтальных сечениях на глубинах 220 и 500 км (рис. 8), а также на шести вертикальных сечениях (рис. 9, а).

В дополнение к опубликованным результатам нами было проведено синтетическое моделирование (см. рис. 9, б, в) с аномалиями реалистичной формы с целью оценить разрешающую способность используемой нами модели в интересующем нас регионе. В данном тесте аномалии в синтетической модели повторяли контуры аномалий, полученных в результате инверсии реальных данных (см. рис. 9, б). На рис. 9, в представлен результат восстановления синтетической модели, который показывает, что аномалии, которые мы определили выше, в целом надежно восстанавливаются, что подтверждает достоверность основных особенностей, наблюдаемых при инверсии реальных данных. При этом следует отметить, что на глубинах до 200 км происходит «размазывание» аномалий, что не позволяет четко определить, связана ли наклонная высокоскоростная аномалия в мантии с менее глубинными аномалиями или отделена. Это надо учитывать при интерпретации.

При описании результатов инверсии реальных данных (см. рис. 8, 9) в первую очередь стоит выделить высокоскоростную аномалию под Таримом, которая доходит до глубин около 200 км. Известно, что литосфера Тарима имеет большую мощность и является жесткой, что не позволяет Тариму деформироваться под действием перемещения Индийской плиты.

Также стоит выделить плоскую наклонную аномалию под Тянь-Шанем мощностью около 100 км, которая погружается под Тянь-Шань в северо-западном направлении под углом $\sim 45^{\circ}$. Эта аномалия отчетливо видна на вертикальных и горизонтальных сечениях. В зоне сочленения этой аномалии с Таримской литосферой наблюдается повышенная сейсмичность. Связь этой наклонной высокоскоростной аномалии с Таримским микроконтинентом и ее роль в горообразовании Тянь-Шаня будет описана в следующем разделе.

Под Киргизским Тянь-Шанем на глубинах до 300 км сейсмическая структура представляется сильно неоднородной. Вместе с тем наблюдается преобладание низкоскоростных структур.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сейсмическая модель коры, полученная в результате инверсии локальных данных, показывает, что в северной части изучаемой области аномалии на вертикальном сечении наклонены в южном направлении, что, возможно, отражает погружение Казахстанской плиты под Тянь-Шань. Аналогичные выводы можно сделать при рассмотрении региональной модели верхней мантии. Так, на вертикальном сечении 3 (рис. 10) на расстоянии около 900 км по профилю видны следы погружения высокоскоростной аномалии в южном направлении до глубины около 150 км в районе сочленения Казахстанской плиты и Тянь-Шаня. Сходные особенности были обнаружены по результатам телесеismicкой томографии [Makarov et al., 2010] и функции приемника [Kumar et al., 2005]. Все эти данные могут свидетельствовать о погружении Казахстанской плиты под Тянь-Шань и ее существенном проникновении в мантию.

Наиболее важные выводы настоящей работы касаются выявления сценария коллизии литосферы Тарима с Тянь-Шанем. Плоская наклонная аномалия в верхней мантии под Тянь-Шанем, достоверность которой доказана посредством синтетического моделирования, представляется связанной с литосферой Тарима. Эта аномалия отчетливо видна как на вертикальных, так и на горизонтальных сечениях. По-видимому, эта аномалия отражает положение литосферы, которая под действием движения Индостана в северном направлении, погружается под литосферу Тянь-Шаня. При этом данная аномалия, возможно, соответствует литосфере переходного типа от океанического к континентальному.

На основании анализа полученных результатов можно предположить сценарий горообразования Тянь-Шаня и окружающих областей. После начала коллизии континентальной части Индостана с Азией

Рис. 10. Схема горообразования Тянь-Шаня.

1 — Индийская плита; микроконтиненты: 1 — Тарим, 2 — Казахстан.

в эоцене происходит последовательное сжатие коры Центральной Азии с юга на север. На первых этапах максимальное сжатие произошло в Тибете, что привело к воздыманию огромной территории и образование толстой коры, мощность которой превосходит 70 км. Дальнейшее сжатие Тибета представляется невозможным, так как сила сжатия, оказываемая Индостаном, компенсируется силой «растекания» утолщенной коры. При достижении этого баланса, дальнейшее сжатие Центральной Азии перешло на более северные территории.

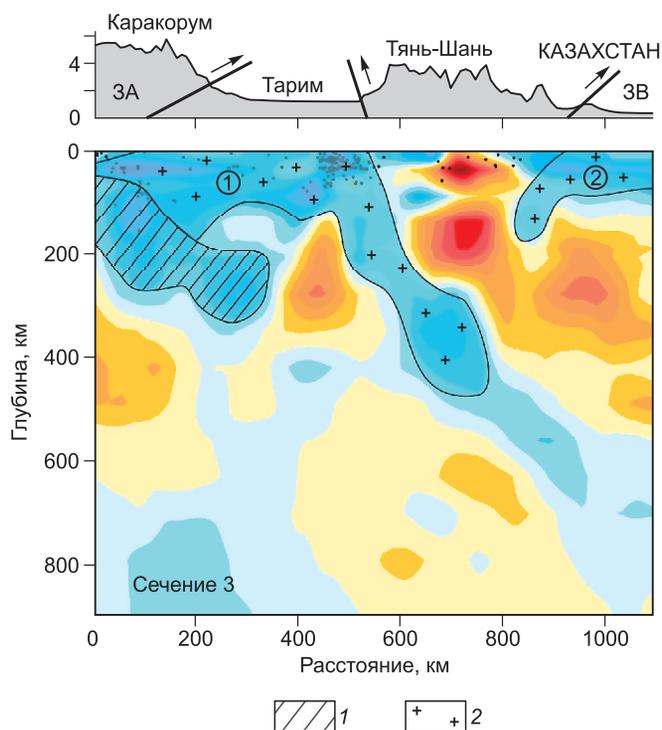
Некоторые авторы полагают, что примерно 20 млн лет назад Таримский и Таджикский блоки представляли собой единое целое [Tumpel, Sobolev, 2011]. После завершения этапа сжатия Тибета сокращение Центральной Азии происходит за счет коллизии Таримско-Таджикской плиты с более северными микроплитами. По-видимому, 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. В более позднее время Таджикский и Таримский блоки были разделены Памирско-Гиндукушским выступом, который привел к вторичному горообразованию.

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 результатах как локальной, так и региональной томографии. Сжатие северной части Тянь-Шаня началось примерно 7 млн лет назад. Именно там сосредоточены наиболее разрушительные исторические землетрясения [Литовченко, 2005].

За 34 млн лет Индийский континент был вдавлен в Азию на расстояние около 800 км по поверхности Земли [Aithison et al., 2007]. 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. Если принять среднюю скорость конвергенции Индии с Евразией за 5 см/год (современная скорость), то за 34 млн лет Индийский континент должен погрузиться под Евразию на расстояние около 1 700 км. С учетом расстояния смещения на 800 км к северу границы столкновения, то расстояние его погружения может составлять около 900 км, что соответствует геофизическим данным. На томографическом разрезе (см. рис. 10) видна только часть Индийского континента, которая просматривается на глубинах до 350 км под Таримом.

По данным GPS [Зубович и др., 2001; Wang et al., 2008], скорость конвергенции Таримского континентального блока с Тянь-Шанем и Тянь-Шаня с Казахской плитой составляет соответственно около 1.0 и 0.5 см/год. Учитывая времена конвергенции 20 и 11 млн лет соответственно, расстояние погружения континентальной коры Тарима может составлять около 200 км, а континентальной коры Казахской плиты около 55 км. Приведенные расчеты хорошо согласуются с положением перечисленных континентальных блоков под Тянь-Шанем по данным сейсмотомографии (см. рис. 10).

Следует уделить особое внимание проблеме погружения континентальной литосферы в мантию. Вопрос о возможности континентальной субдукции является объектом для активных обсуждений. Континентальная литосфера, которая состоит из толстой легкой коры и мантийной части литосферы, в сумме является недостаточно плотной для того, чтобы погружаться в мантию. Для обеспечения погружения мантийной части литосферы, плотность которой несколько выше, чем у подстилающей астеносферы,



необходимо обеспечить ее отрыв от континентальной коры. Одним из механизмов, которым можно объяснить погружение континентальной литосферы, является деляминация, которая была предложена [Bird, 1978] и далее исследована на модельных примерах [Кай, Кай, 1993; Sobolev et al., 2006]. Согласно этому механизму, континентальная коллизия приводит к существенному утолщению коры. Нижняя, базальтовая часть коры под воздействием большого давления и температуры претерпевает трансформации и превращается в высокоплотный эклогит [Sobolev et al., 2006]. После достижения некоторой критической массы, капли эклогита начинают быстро погружаться, обеспечивая отрыв кусков мантийной литосферы и их затягивание в мантию. Эклогитизация является своего рода триггером, который запускает и активизирует процесс деляминации в областях континентальной коллизии. Деляминация может происходить как в виде отрыва изометрических капель, как в Карпатах [Koulakov et al., 2010] и Памире [Koulakov, 2011], так и в виде плоской полосы, напоминающей субдукцию. Именно последний случай может отражать ситуацию, которая происходит на сочленении Тарима и Тянь-Шаня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены результаты томографической инверсии на двух масштабных уровнях, которые успешно дополняют друг друга. В первом случае использование местных данных позволило построить структуру коры под Киргизским Тянь-Шанем. Во втором — с использованием глобальных данных удалось получить распределение сейсмических скоростей в верхней мантии. Для обеих схем был выполнен ряд тестов, которые выявляют разрешающую способность и степень достоверности полученных результатов.

На базе полученных сейсмических моделей сделаны следующие выводы, касающиеся характера коллизии литосферных плит в районе Тянь-Шаня.

1. На северной границе Тянь-Шаня происходит погружение с севера на юг Казахстанской плиты под Тянь-Шань. Это следует из общей направленности аномалий в коре по локальной томографии и наличия высокоскоростной аномалии, погружающейся с севера под Тянь-Шань до глубины примерно 150 км на результатах региональной томографии.

2. Неоднородная сейсмическая структура с преобладанием низких скоростей в мантии под Киргизским Тянь-Шанем, по-видимому, указывает на малую толщину или отсутствие мантийной части литосферы. Это подтверждается низкой жесткостью литосферы в этой части, которая проявляется в активном горообразовании. С другой стороны, низкие скорости на верхних сечениях региональной модели могут быть также связаны с утолщением коры.

3. Выделяемая на результатах региональной томографии плоская высокоскоростная аномалия, которая погружается на юг вкост границы между Тянь-Шанем и Таримом до глубины примерно 500 км, скорее всего, представляет собой оторвавшуюся мантийную часть литосферы Тарима, которая опускается в мантию под Тянь-Шанем вследствие деляминации. Именно отрыв этой части литосферы привел к низкой жесткости литосферы Тянь-Шаня и ее активной деформации, что вызвало быстрый рост гор на этом участке коллизии.

4. На полученной картине глубинной сейсмической структуры выделяется часть Индийской плиты, которая наблюдается под Таримом в виде наклонной высокоскоростной аномалии мощностью около 150 км, проходящей до глубин более 300 км. Этот результат хорошо согласуется с глубинным разрезом по этому региону [Dobretsov et al., 1996; Buslov, 2004], построенный на основании геологических источников.

Авторы благодарны рецензентам В.А. Верниковскому и В.А. Чеверде за конструктивные замечания, а также Н.Л. Добрецову за плодотворные дискуссии по существу работы.

Работа выполнена в рамках междисциплинарных проектов СО РАН № 90, № 76 и проекта ОНЗ РАН 7.3.

ЛИТЕРАТУРА

Буслов М.М. Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса: роль позднепалеозойских крупноамплитудных сдвигов // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (1), с. 66—90.

Буслов М.М. Геодинамическая природа Байкальской рифтовой зоны и ее осадочного выполнения в мел-кайнозойское время: эффект дальнего воздействия Монголо-Охотской и Индо-Евразийской коллизии // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (9), с. 1245—1255.

Буслов М.М., Кох Д.А., де Граве И. Мезозойско-кайнозойская тектоника и геодинамика Алтая, Тянь-Шаня и Северного Казахстана по результатам трекового датирования апатитов // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (9), с. 862—870.

Гамбурцев Г.А. Глубинное сейсмическое зондирование земной коры на Северном Тянь-Шане // Избранные труды. М., АН СССР, 1960, 316 с.

- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М.** Тектоника литосферных плит территории СССР. 1990, М., Недра, т. 2, 334 с.
- Зубович А.В., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Мосиенко О.И., Щелочков Г.Г., Рыбин А.К., Баталёв В.Ю.** Поле деформации, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (10), с. 1634—1640.
- Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В.** Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (6), с. 830—851.
- Литовченко И.Н.** Соотношение сейсмичности с новейшими морфоструктурами Тянь-Шаня // Проблемы эволюции открытых систем. Вып. 7, 2005, Print-S, т. 2, с. 79—84.
- Моссаковский А.А., Руженцев С.В., Самыгин С.Г., Хераскова Т.Н.** Центрально-Азиатский складчатый пояс: геодинамическая эволюция и история формирования // Геотектоника, 1993, № 6, с. 3—33.
- Сабитова Т.М.** Глубинное строение земной коры Тянь-Шаня и выделение зон возможных очагов землетрясений: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Бишкек, Илим, 1996, 62 с.
- Сабитова Т.М., Адамова А.А.** Сейсмотомографические исследования земной коры Тянь-Шаня (результаты, проблемы, перспективы) // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (10), с. 1543—1553.
- Яковлев А.В., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л.** Структура верхней мантии Арктического региона по данным региональной сейсмотомографии // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (10), с. 1261—1272.
- Aitchison J.C., Ali J.R., Davis A.M.** When and where did India and Asia collide? // *J. Geophys. Res.*, 2007, v. 112, B05423, doi:10.1029/2006JB004706.
- Bird P.** Finite element modeling of lithosphere deformation: the Zagros collision orogeny // *Tectonophysics*, 1978, v. 50, p. 307—336, doi:10.1016/0040-1951(78)90140-3.
- Buslov M.M., De Grave J., Bataleva E.V.** Cenozoic tectonics and geodynamic evolution of the Tien Shan mountain belt // *Himalayan J. Sci.*, 2004, v. 2, p. 106—107.
- De Grave J., Van Den Haute P.** Denudation and cooling of the Lake Teletskoye Region in the Altai Mountains (South Siberia) as revealed by apatite fission-track thermochronology // *Tectonophysics*, 2002, v. 349, p. 145—159.
- De Grave J., Buslov M.M., Van Den Haute P.** Intercontinental deformation in Central Asia: distant effects of India—Eurasia convergence revealed by apatite fission-track thermochronology // *Himalayan J. Sci.*, 2004, v. 21, № 41 (special issue), p. 121—122.
- De Grave J., Buslov M., Van Den Haute P., Metcalf J., Batalev V.** From Palaeozoic Eurasian assembly to ongoing Indian indentation: multi-chronometry of the northern Kyrgyz Tien Shan batholith // *J. Asian Earth Sci.*, 2006, v. 26 (2), p. 133.
- De Grave J., Buslov M.M., Van Den Haute P.** Distant effects of India—Eurasia convergence and Mesozoic intracontinental deformation in Central Asia: constraints from apatite fission-track thermochronology // *J. Asian Earth Sci.*, 2007, v. 29, p. 194—213.
- De Grave J., Glorie S., Buslov M.M., Izmer A., Fournier-Carrie A., Batalev V., Vanhaecke F., Elburg M., Van Den Haute P.** The thermo-tectonic history of the Song-Kul plateau, Kyrgyz Tien Shan: constraints by apatite and titanite thermochronometry and zircon U/Pb dating // *Gond. Res.*, 2011, v. 20, № 4, p. 745—763.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D., Berzin N.A., Ermikov V.D.** Meso- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: effects of lithospheric plate interaction and mantle plume // *Intern. Geol. Rev.*, 1996, v. 38, p. 430—466.
- Kay R.W., Kay S.M.** Delamination and delamination magmatism // *Tectonophysics*, 1993, v. 219, p. 177—189.
- Koulakov I.** LOTOS code for local earthquake tomographic inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms // *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 2009, v. 99, № 1, p. 194—214, doi: 10.1785/0120080013.
- Koulakov I.Yu.** High-frequency *P* and *S* velocity anomalies in the upper mantle beneath Asia from inversion of worldwide traveltimes // *J. Geophys. Res.*, 2011, v. 116, B04301, doi:10.1029/2010JB007938.
- Koulakov I., Sobolev S.V.** A Tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir Hindukush region // *Geophys. J. Int.*, 2006, v. 164, p. 425—440.
- Koulakov I., Zaharia B., Enescu B., Radulian M., Popa M., Parolai S., Zschau J.** Delamination or slab detachment beneath Vrancea? New arguments from local earthquake tomography, G-cubed, 2010, v. 10, Q03002, doi:10.1029/2009GC002811.

Kumar P., Yuan X., Kind R., Kosarev G. The lithosphere-asthenosphere boundary in the Tien Shan-Karakoram region from S receiver functions: evidence for continental subduction // *Geophys. Res. Lett.*, 2005, v. 32, L07305. Doi:10.1029/2004GL022291.

Makarov V.I., Alekseev D.V., Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Belyaev I.V., Bragin V.D., Dergunov N.T., Efimova N.N., Leonov M.G., Munirova L.M., Pavlenkin A.D., Roeckerg S., Roslov Yu.V., Rybin A.K., Shchelochkov G.G. Underthrusting of Tarim beneath the Tien Shan and deep structure of their junction zone: main results of seismic experiment along MANAS profile Kashgar-Song-Kol // *Geotect. Engl. Transl.*, 2010, v. 44 (2), p. 102—126, doi:10.1134/S00168521100200202.

Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision // *Science*, 1975, № 189, p. 419—426.

Omuralieva A. Three-dimensional seismic velocity structure of the crust beneath the central Tien Shan, Kyrgyzstan: implications for large- and small-scale mountain building // *Tectonophysics*, 2009, v. 465, p. 30—44.

Paige C.C., Saunders M.A. LSQR: an algorithm for sparse linear equations and sparse least squares // *ACM trans. Math. Soft.*, 1982, v. 8, p. 43—71.

Roecker S.W., Li Zhiwei, Li Zhihai, Wei Binb, Wang Haitao, Schelochkov G., Bragin V. Tomographic image of the crust and upper mantle beneath the western Tien Shan from the MANAS broadband deployment: possible evidence for lithospheric delamination // *Tectonophysics*, 2009, v. 477, p. 49—57.

Sobolev S.V., Babeyko A.Y., Koulakov I., Oncken O. Mechanism of the Andean orogeny: insight from the numerical modeling, in the Andes: active subduction orogeny, *Frontiers in Earth Sciences*, v. 1, 2006, New York, Springer, p. 513—535.

Tympel J., Sobolev S.V. 2D numerical modeling of lithospheric deformation in the Himalaya-Tibet-Pamir-Tien Shan Orogen, abstract T43F-2462, American Geophysical Union, Fall Meeting 2011, San Francisco, Calif., 2011.

Um J., Thurber C.H. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing // *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 1987, v. 77, p. 972—986.

van der Sluis, van der Vorst. Numerical solution of large, sparse linear algebraic systems arising from tomographic problems // *Seismic Tomography*, 1987, p. 49—83.

Vinnik L.P., Aleshin I.M., Kaban M.K., Kiselev S.G., Kosarev G.L., Oreshin S.I., Reigber Ch. Crust and mantle of the Tien Shan from data of the receiver function tomography // *Fiz. Zemli*, 2006, v. 42 (8), p. 14—26.

Vinnik L.P., Roecker S., Kosarev G.L., Oreshin S.I., Koulakov I. Crustal structure and dynamics of the Tien Shan // *Geophys. Res. Lett.*, 2002, v. 29, № 22.

Wang J., Ye Z.-R., He J.-K. Three-dimensional mechanical modeling of large-scale crustal deformation in China constrained by the GPS velocity field // *Tectonophysics*, 2008, v. 446, p. 51—60.

*Рекомендована к печати 26 декабря 2012 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию 18 мая 2012 г.,
после доработки — 20 декабря 2012 г.*