

УДК 551.24.03

## ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОРЫ ПАМИРА ПО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

© 2017 Р.С. Алексеев, Ю.Л. Ребецкий

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва; e-mail: rs.alekseev@physics.msu.ru*

Выполнена детальная (для нескольких глубинных уровней) тектонофизическая реконструкция современного напряженного состояния коры Памира и сопредельных с ним областей. Источником данных являлся сборный каталог механизмов очагов землетрясений разных авторов и сейсмологических центров за период с 1938 по 2016 гг. Реконструкция напряжений позволила установить ряд важных закономерностей латерального и глубинного изменения напряженного состояния. Показано, что платообразная часть Южного Памира имеет геодинамический тип напряженного состояния горизонтального растяжения, что резко его отличает от Северного Памира и Гиндукуша, где имеет место режим горизонтального сжатия. Установлено, что в коре южного ограничения Памира напряженное состояние соответствует взглядам о поддвиге под Памир со стороны Идийской плиты. Для коры северного ограничения Памира напряженное состояние соответствует поддвигу под Гиссаро — Алай и Южный Тянь-Шань.

*Ключевые слова: тектонофизика, механизмы очагов землетрясений, напряжения, условия деформирования коры.*

### ВВЕДЕНИЕ

Существует целый ряд моделей, описывающих геодинамику Памира и его окраин с позиции роли Индийского индентора. В работе (Буртман, 2012) предлагается модель встречной субдукции континентальной литосферы на южной и северной границах Памир — Пенджабского синтаксиса. Движущей силой в этой модели служат конвекционные процессы в мантии. В исследованиях, использовавших данные сейсмического зондирования (Schneider et al., 2013), в коре Памира выделяется низкоскоростной слой, в котором происходит наибольшее число землетрясений, что характерно для зон океанической субдукции и участков внутриконтинентального поддвига. Авторы этой работы приходят к выводу, что материал, находящийся в этом низкоскоростном слое, имеет континентальное происхождение. В этом утверждении они опирались на работу (Yin, Harrison, 2000), где говорится, что закрытие океана Тетис произошло не позднее 40 млн лет назад, а также данные (Schwab et al., 2004) об отсутствии кайнозойского вулканизма. Дополнительным фактором этого предположения является сопоставление глубин

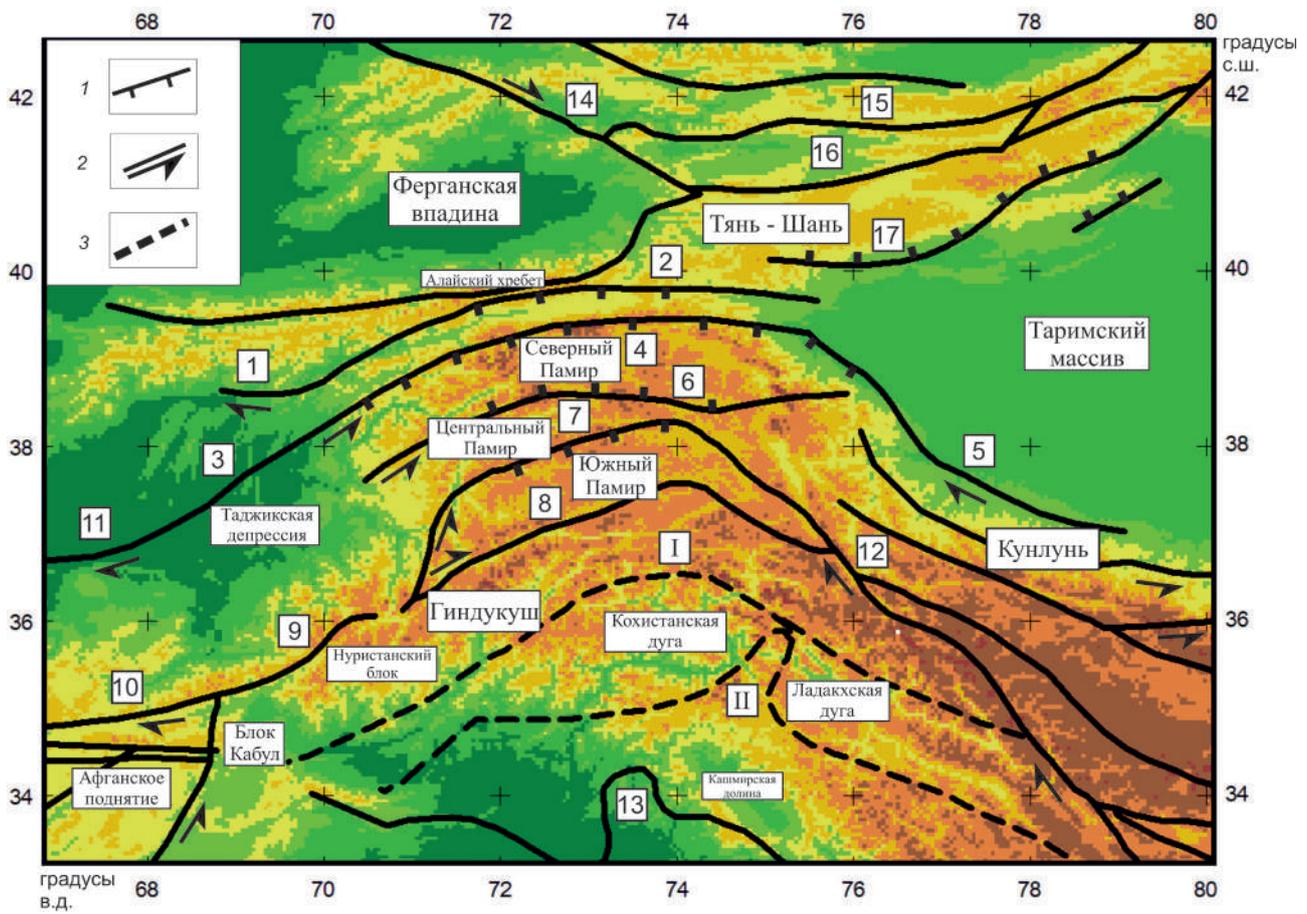
границы Мохоровичича (Мохо) для Памира (~65 км) и его окружения (~50 км). Отсюда следует, что часть континентальной коры должна быть переработана в мантию.

В работе (Molnar, Tarronnier, 1978) предлагается концепция формирования поднятия за счет горизонтального сокращения, движущей силой которого является мантийная конвекция, с дальнейшим формированием тяжелого литосферного корня, отрывом и заполнением пространства более легким астеносферным материалом (England, Molnar, 1997). В результате сила плавучести выталкивает вверх Памир. В работе (Tarronnier et al., 2001) рассматривается множественная субдукция океанических плит с севера Евразийской плиты под Тибет и Памир, которая с юга дополняется вначале субдукцией океанической, а затем коллизией континентальной Индийской плиты.

В работе (Иванова, Трифонов, 2005) предлагается модель, в которую входит две стадии эволюции исследуемого региона. Первая из них выражена интенсивным гранитным магматизмом, метаморфизмом, расслоением нагретой литосферы с большим градиентом механических свойств горных пород. В условиях различно

ориентированного сжатия и при наличии давления со стороны Индийской плиты отдельные отслоенные участки имели горизонтальное перемещение. Первая стадия длилась от позднего эоцена до позднего миоцена. Вторая стадия характеризуется прекращением магматической активности и перемещениями сформировавшихся крупных блоков в коре под действием давления со стороны Индийской плиты. Быстрое воздымание горных сооружений в этот период связано с изостатической компенсацией ранее возникших гравитационных неоднородностей. В этой модели роль давления со стороны Индийской плиты не является главным фактором формирования. Более того, в работе (Трифонов и др., 2012) отмечается, что скорости поднятия в орогнеах Высокой Азии увеличились вдвое, а местами и втрое в последние 2–4 млн лет. В исследованиях М.Г. Леонова (2017) указывается на отсутствие геологических признаков давления Памира на Гиссаро — Алай и говорится о наличии каплевидной структуры в строении верхней мантии Памира на глубинах >50 км.

Памир, расположенный на северо-западе от Гималайского Синтаксиса, считается состоящим из того же набора континентальных террейнов, что и Тибет, которые были смяты после начала индо-евразийской коллизии, произошедшей ~50 млн лет назад (Shackleton, Chenfa, 1988). Основными геологическими провинциями на Памире являются Северный, Центральный и Южный Памир. Северный Памир состоит из внутренней и внешней тектонических зон (рис. 1). Внутренняя зона надвинута на внешнюю зону по Каракульскому (Северо-Памирскому) надвигу. На западном крыле Памирской дуги Каракульский надвиг сменяется Дарвазским левым сдвигом, а на восточном — переходит в Момукский надвиг. Эта система из трех разломов известна как Главный Памирский разлом (ГПР). Иногда ГПР обозначают как надвиг, но надвигом является только северная его часть, причем даже здесь есть и сдвиги по простиранию (Li et al., 2012; Schwab et al., 2004). Северная зона



**Рис. 1.** Структурный план и топография Памира с ближайшим окружением. 1 — надвиги; 2 — сдвиги; 3 — сuture (I — Шиок, II — Инд-Цангпо). Основные разломы: 1 — Южно-Гиссарский, 2 — Вахш-Заалайский, 3 — Дарвазский, 4 — Каракульский, 5 — Момукский, 6 — Танымасский, 7 — Рушан-Пшартский, 8 — Пандшерский, 9 — Зебак-Мунджанский, 10 — Бандитуркестанский, 11 — Альбурс-Мормульский, 12 — Памир-Каракорумский, 13 — Главный Граничный, 14 — Талассо-Ферганский, 15 — Северо-Налатийский, 16 — Северо-Тяньшаньский, 17 — Южно-Тяньшаньский. Кинематика разломов по данным (Буртман, 2013; Molnar, Tapponier, 1975).

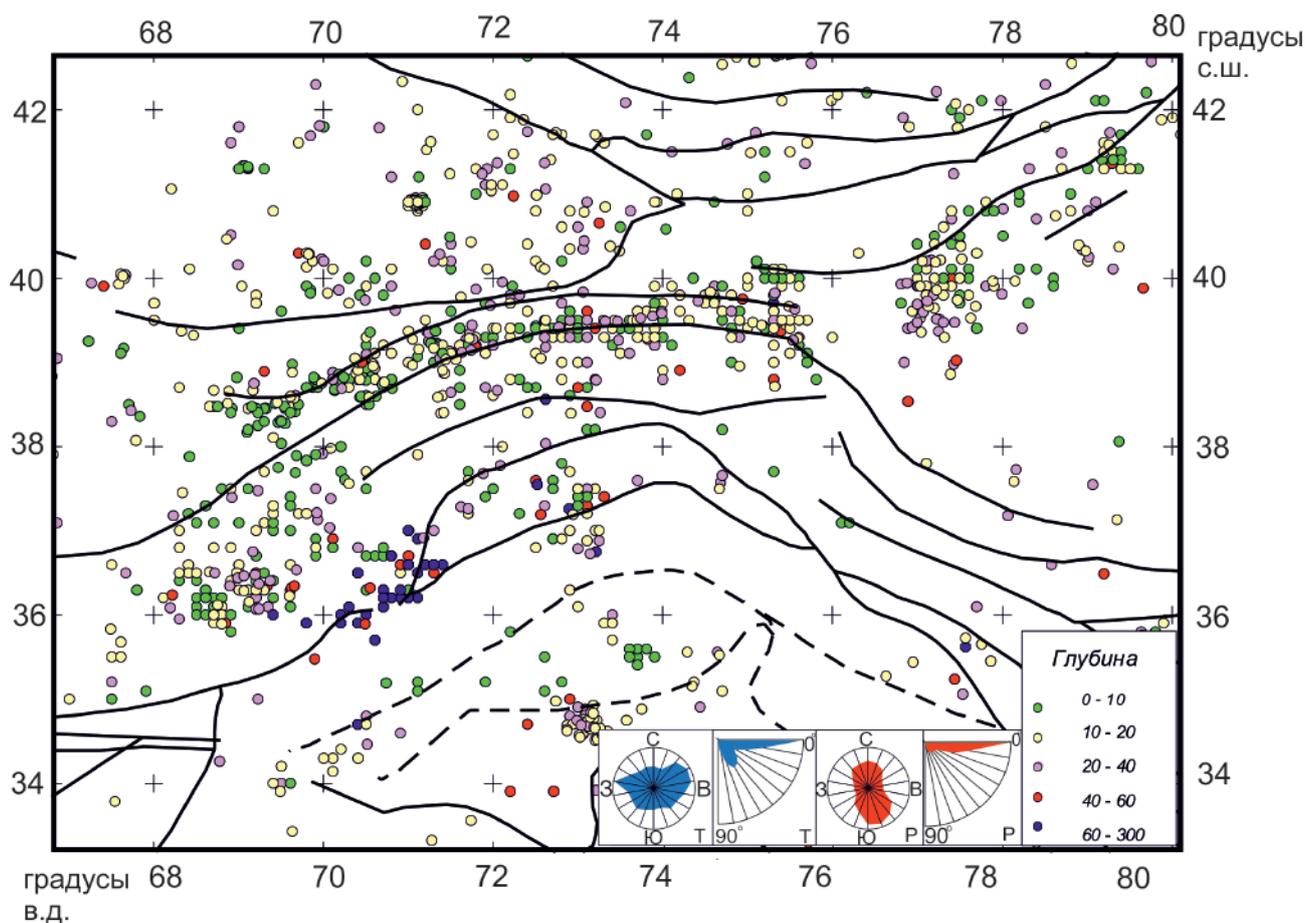
Памира сложена интенсивно смятыми в складки мезозойскими и кайнозойскими породами. Во внутренней зоне Северного Памира, образованной палеозойскими и более древними породами, находятся позднекайнозойские впадины, простирающиеся субмеридионально (Буртман, 2012).

В современных представлениях Памир рассматривается как место с возможным поддвигом континентальной коры. Это обосновывается, в частности, анализом соотношения Памирских и Тибетских поясов и шовных зон. Структуры на Памире были смещены на север примерно на 300 км по отношению к Тибету, и это дает повод сделать предположение, что кора, соединяющая Таджикский и Таримский бассейны, поддвигается вдоль фронта деформации Памира, который сегодня ограничивается ГПП (Burtman, Molnar, 1993; Hamburger et al., 1992; Sobel et al., 2013).

Сильная сейсмичность в верхней мантии в зоне коллизии также является косвенным показателем наличия зоны поддвига континентальной коры. На северной границе Памира гипоцентры землетрясений в большинстве своем приурочены к ГПП и имеют небольшие глубины

до 40–60 км (рис. 2). Фокальные механизмы указывают на преобладание сжатия (взбросов), что характерно для всего региона в целом, но с пододвиганием к югу (или надвиганием к северу). В зоне сочленения Нуристанского блока и Гиндукуша глубина гипоцентров достигает наибольших значений (рис. 2) в Центральной Азии — 160–240 км, что можно рассматривать как погружение к северу Индийской литосферной плиты. Заметим, что имеются и другие интерпретации этого факта. Фокальные механизмы для южной границы указывают на преобладание надвигания, которое на западе сопровождается локальными левосторонними сдвигами. Надвиги сопровождаются левыми сдвигами на западе и правыми на востоке.

Согласно сейсмическим профилям (Schneider et al., 2013) на восточном Памире наблюдается южная опускающаяся низкоскоростная зона 10–15 км, которая простирается от глубины 50 км у основания коры до глубины более 150 км с увеличением угла падения до субвертикального. Предполагается, что верхняя кора над этой зоной сокращена и включена в Памир, нижняя Евразийская кора отделяется и поддвигается.



**Рис. 2.** Карта распределения эпицентров землетрясений каталога механизмов очагов с выделением четырех диапазонов глубин. На круговых роз-диаграммах в нижней части рисунка показана представительность азимутов и углов погружения осей Т и Р механизмов очагов землетрясения.

Данные GPS показывают, что скорость сокращения коры в направлении север-юг от Индийской плиты до Казахского щита составляет около 35 мм/год (Zhou et al., 2016). При этом 35% сокращения наблюдается в области коры Гиндукуша (12 мм/год), другие 35% приходятся на Гиссаро — Алай. Данные, приведенные в работе (Зубович и др., 2007), показывают, что сокращение коры в зоне ГПР составляет около трети от общей скорости конвергенции Индийской и Евразийской плит. Морфология такого движения является предметом обсуждений.

Согласно расчетам деформаций по данным GPS измерений (Мансуров, 2017) установлено, что в Центральном Памире максимальное сокращение ориентировано с северо-запада на юго-восток, в западной части Памира и в районе Ферганской долины сменяется на субширотное, а в восточном Памире имеет субмеридиональную ориентацию. Максимальная интенсивность деформаций наблюдается в дуге Северного Памира, резко ослабевая к югу и северу. Восточный Памир имеет субширотные деформации удлинения, в 2–3 раза превосходящие субмеридиональное сокращение. Такое большое удлинение не может быть объяснено простым горизонтальным раздавливанием или растеканием под действием глубинной выталкивающей силы.

Многие исследователи сходятся на том, что существуют две зоны подвига: одна с погружением на север под Гиндукушем, а другая опускается на юг под Памиром (Burtman, Molnar, 1993; Negredo et al., 2007; Schneider et al., 2013). Гипоцентры землетрясений вырисовывают дугу, погружающуюся на юг в восточном Памире, которая выполаживается на восток под юго-западным Памиром. Сейсмическая зона под Гиндукушем представляет собой более сложную структуру, располагающуюся с востока на запад и погружающуюся на северо-запад. Проведен ряд исследований по определению параметров напряженного состояния как для субрегиональных структур (Сычева и др., 2005; Xu et al., 1992), так и для всего региона в целом (Буртман, 2012; Трифонов и др., 2002). Существует ряд методов реконструкций природных напряжений, каждый из них имеет свои преимущества и недостатки (Ребецкий, 2007). В большинстве работ по данному региону исследователями анализировались ориентации главных осей напряжений, действующих в коре, и осуществлялось сопоставление с тектоническими структурами рассматриваемых областей.

В нашей работе использовался метод катакластического анализа (МКА) разрывных смещений, разработанный Ю.Л. Ребецким (2007), являющийся развитием идей кинематического метода О.И. Гущенко (1975) и метода правых

квадрантов (right dihedral) Ж. Анжелье (Angelier, 1989), дополненный положениями, вытекающими из теории пластичности.

Одна из первых реконструкций напряжений для коры Юго-Восточной Азии, выполненная кинематическим методом О.И. Гущенко, была представлена в работе (Petrov et al., 1994). Для расчета параметров напряженного состояния авторами использовался каталог о механизмах очагов землетрясений, приведенный в работе (Mostyukov, Petrov, 1994) по данным о знаках первых вступлений волн Р. Позже эти данные были дополнены расчетами поля деформаций по данным GPS-измерений для Китая (Петров и др., 2008).

Еще одна реконструкция, выполненная в рамках дополненного кинематического метода, была произведена в работе (Rebetsky et al., 1997) для мегарегиона Юго-Восточной Азии и Океании. Основное отличие полученных результатов в сравнении с результатами реконструкции, представленными в работе (Petrov et al., 1994), связано с выбором данных о механизмах очагов. Для расчета напряжений по обзору публикаций был собран каталог, состоящий из 15 региональных каталогов и дополненный данными глобального каталога сейсмологической обсерватории Гарвардского университета, все собранные данные прошли предварительное тестирование и выверку. Расчеты напряжений производились на нерегулярной сетке, отвечающей латеральным координатам эпицентров очагов относительно сильных землетрясений, и глубине 20 км. В той работе также были получены данные только об эллипсоиде напряжений. По данным реконструкции 1997 г. (Rebetsky et al., 1997), дополненной реконструкцией по данным о механизмах очагов землетрясений за период по 2010 г., в работе (Ребецкий, Алексеев, 2014) были получены более достоверные данные об ориентации осей и виде эллипсоида напряжений, которые позволили уточнить представления о характере деформационной взаимосвязи коры с мантией.

В проекте «World stress map» (Zobak, 1992), в котором построены ориентации осей главных напряжений для всех сейсмоактивных областей мира, использован метод расчета квазиглавных (частных) напряжений В.Д. Парфенова (1984), который, в свою очередь, близок к методу Ф.Д. Тернера (Turner, 1953). В работе (Кучай, Бушенкова, 2009) изучалось напряженно-деформированное состояние большого участка коры, включающего области Тянь-Шаня, Таримского массива, Тибета, Памиро-Каракурума, Кунлуны. Для оценки деформирования объемов горных масс на разных глубинах за счет землетрясений использовалась методика Б.В. Кострова (1975).

Использованный для реконструкции природных напряжений МКА состоит из четырех этапов и позволяет определять не только параметры эллипсоида напряжений, но и величины напряжений. Исходными данными в МКА являются механизмы очагов землетрясений. Кроме этого в МКА для оценки величин напряжений привлекается обобщение результатов экспериментов по разрушению горных пород в виде полосы хрупкого разрушения на диаграмме Мора, а также используются данные о динамических параметрах очагов наиболее сильных в регионе землетрясений и уравнение сохранения импульса силы в вертикальном направлении. В этом методе для каждого узла расчетной сетки создается однородная выборка землетрясений, главным критерием создания которой является положительность рассеяния — диссипация упругой энергии после каждого сдвигового разрывного смещения на искомом тензоре напряжений. Данное положение заменяет постулат Валлеса — Ботта (Bott, 1959; Wallace, 1951), на котором построены методы О.И. Гущенко (1975) и Ж. Анжелье (Angelier, 1989). Постулат Валлеса — Ботта определяет, что на плоскости каждой трещинки направления смещения и касательных напряжений должны совпадать. МКА допускает несовпадение этих векторов при требовании острого угла между ними. Последнее и означает, что в результате смещения по трещине упругая энергия среды уменьшается.

На первом этапе реконструкции выполняется определение ориентации главных осей тензора напряжений и значение коэффициента Лоде — Надаи, что характеризует эллипсоид напряжений. Осуществляется создание однородной выборки механизмов очагов землетрясений, характеризующей квазиоднородный домен земной коры, которому приписываются результаты расчета напряжений. В МКА для однородной выборки рассчитывается тензор приращений сейсмоструктурных деформаций (СТД). Методика расчета СТД близка к методу среднего механизма С.Л. Юнга (1990), хотя теоретическая основа расчета у этих методов разная. Данные о параметрах СТД используются для получения единственного решения в виде параметров эллипсоида напряжений. На втором этапе МКА на основе редуцированной диаграммы Мора рассчитываются нормированные значения максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления (разность между тектоническим давлением и давлением флюида в трещинно-поровом пространстве).

В настоящей работе представлены результаты реконструкции напряжений, основой которой является каталог механизмов очагов землетрясений, использованный в работе (Rebetsky et al., 1997), содержащий данные о событиях за период с 1938 г. по 1994 г. Источниками данных для этого каталога являлись решения международного центра данных в Москве, механизмы очагов, опубликованные в журналах Землетрясения в СССР (за все годы), в монографии китайского сейсмологического центра, в публикациях А. Дзевонского с 1977 по 1996 гг., а также в публикациях следующих авторов: В.Н. Аверьянова (1968), Ю.В. Ризниченко (1968), С.Л. Юнга (1990), (Мострюков, Петров, 1994), (Wicknes, Hodgson, 1967).

Этот сборный каталог (Rebetsky et al., 1997) был дополнен данными из глобальных каталогов Global CMT Project (Геологическая Служба США) 1976–2016 гг. Поскольку каталог Global CMT содержит данные с 1976 г, появилась необходимость каким-то образом отобрать пересекающиеся события из разных источников. Для этого каталоги Global CMT и А. Дзевонского были взяты за эталонные, а остальные выстраивались по рейтингу. В зависимости от близости решений автора данного каталога землетрясений к эталонным определялось его положение в рейтинге, который являлся одним из критериев фильтрации. В общей сложности для региона, ограниченного  $34\text{--}42^\circ$  с.ш. и  $68\text{--}90^\circ$  в.д., за временной период с 1938–2016 гг. и глубин 0–80 км для реконструкции было получено 1776 событий.

Основной глубинный диапазон каталога механизмов очагов землетрясений заключен в интервале 0–35 км (рис. 3). Наиболее представительным является диапазон магнитуд 5.0–6.5. В современном варианте реализации метода не ставятся ограничения на максимальную магнитуду. Наибольшее число событий приходится на 1980–1990 гг. Хорошо известны крупные землетрясения в этот период в данном регионе: 1983 г.,  $M = 7.4$  (Гиндукуш); 1985 г.,  $M = 7.4$  (Гиндукуш); 1985 г.,  $M = 7.0$  (Южный Тянь-Шань). Также в эти годы разворачивалась сейсмическая сеть на базе Научной Станции РАН в г. Бишкеке.

На круговых роз-диаграммах (рис. 2) показана представительность азимутальных простираний и погружений осей  $P$  и  $T$  для механизмов очагов из каталога землетрясений. Ориентация осей имеет достаточно большой разброс в определениях азимутов, но некоторые закономерности можно отметить. Оси  $P$  имеют преимущественное субмеридиональное простирание (на север и на юг) при среднестатистическом пологом погружении (углы погружения  $10\text{--}30^\circ$ ).

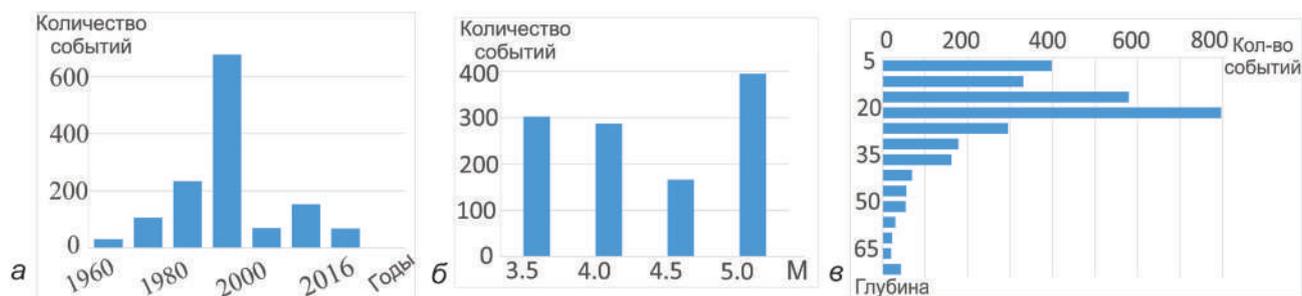


Рис. 3. Диаграммы распределения числа событий из каталога период 1932–2016 гг. по годам (а), по магнитудам (б) и глубинам (в).

На роз-диаграмме этой оси проглядывается небольшой пик значений, отвечающий крутому углу погружения (углы погружения  $60\text{--}80^\circ$ ). Оси  $T$  имеют в основном субширотное простирание, но также достаточно много определений с другими ориентациями. В качестве основных (по числу событий) можно выделить три направления: восточное, юго-восточное, северо-западное. На диаграмме погружения имеется два ярко выраженных пика значений, один из них отвечает пологому положению осей (углы погружения), а другой практически субвертикальному (углы погружения  $60\text{--}80^\circ$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

После обработки сейсмологических данных о решениях фокальных механизмов на первом этапе реконструкции были получены данные о параметрах эллипсоида напряжений для нескольких глубинных слоев, которые были отнесены к их середине. Количество точек расчета напряжений, отвечавших квазиоднородным доменам коры, зависело не только от числа землетрясений в каждом из слоев, но и от плотности распределения их эпицентров: 406 для 10 км, 361 для 20 км, 173 для 30 км, 296 для 40 км, 110 для 55 км. Первые четыре слоя реконструкции напряжений имели мощность 20 км (слои частично пересекались), последний — 30 км. Заметим, что достаточно частый глубинный шаг слоев в 10 км близок к точности определения глубин землетрясений. Подобный расчет вместе с взаимным пересечением расчетных слоев приводит к определенному сглаживанию глубинных изменений напряжений. Шаг сетки расчета по латерали составлял  $0.3 \times 0.3^\circ$ .

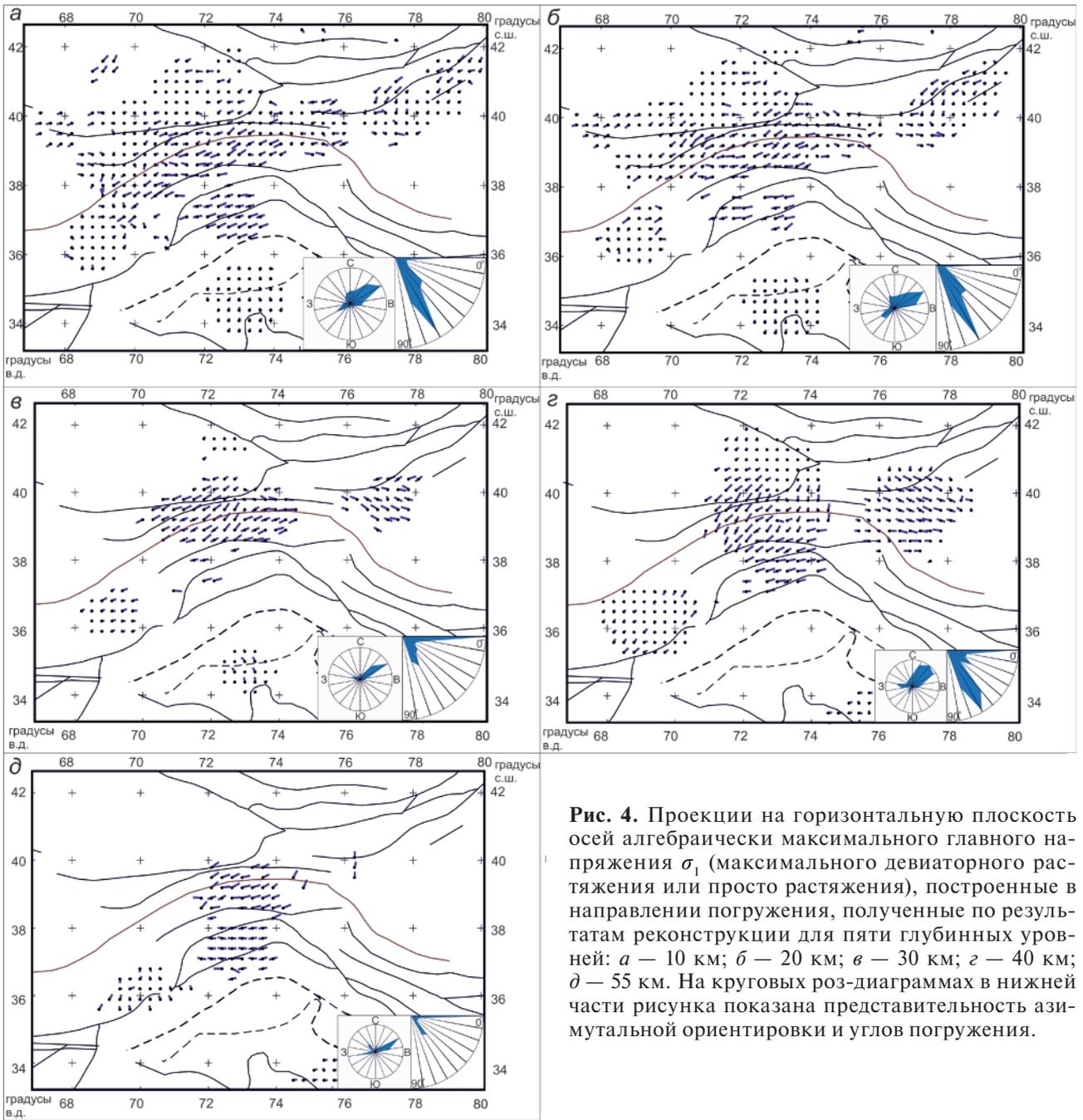
Для каждого из доменов рассчитывались средние за весь период наблюдений параметры тензора напряжений. На глубине 30 км наблюдалось локальное уменьшение числа доменов, в которых был произведен расчет. Это связано с двумя факторами: уменьшение числа событий, преобладание землетрясений с большой магнитудой ( $M > 5$ ). Небольшое число определений на

глубинах от 40–70 км объясняется малым количеством землетрясений с данными о фокальных механизмах. Существуют участки коры (западная часть Таримского блока, восточная часть Афганского нагорья), где удалось рассчитать напряжения только на глубинах 10–20 км.

Ориентации осей главных напряжений минимального и максимального сжатия (рис. 4, 5) практически на всех глубинах имеют преимущественное северо-западное — юго-восточное простирание. Такое радиально-концентрическое расположение осей характерно для всей области коллизии Индии и Евразии. Далее эти напряжения будем именовать напряжениями сжатия и растяжения, понимая под последними девиаторную составляющую алгебраически максимального главного напряжения.

Особо отметим область коры северного Гиндукуша и западной части Кохистанской дуги (восточный Гиндукуш), где предполагается наличие одной из зон подвига. Здесь ориентировка осей  $\sigma_3$  (максимальное сжатие) имеет отличное от всех северо-восточное — юго-западное азимутальное простирание, которое сохраняется вплоть до глубины 55 км. Погружение осей на всех глубинах достаточно пологое на юго-запад (рис. 5). Заметим, что современные данные о закономерности ориентации осей главных напряжений для зон субдукции (Ребецкий, Маринин, 2006а, 2006б; Ребецкий, Полец 2014; Rebetsky et al., 2016), которые можно рассматривать подобными зонам подвига на континентах, показывают, что оси максимального сжатия ортогональны простиранию этих зон и погружаются под углами  $25\text{--}35^\circ$  в направлении против их движения, под океанскую плиту (рис. 6). Таким образом, в области восточного Гиндукуша из данных об ориентации осей максимального сжатия следует, что пододвигание плиты должно быть северо-восточным.

Совершенно иная ситуация наблюдается для северной зоны рассматриваемого региона, где Евразийская плита должна по данным (Schneider et al, 2013) пододвигаться под Памир. Здесь оси максимального сжатия практически повсе-



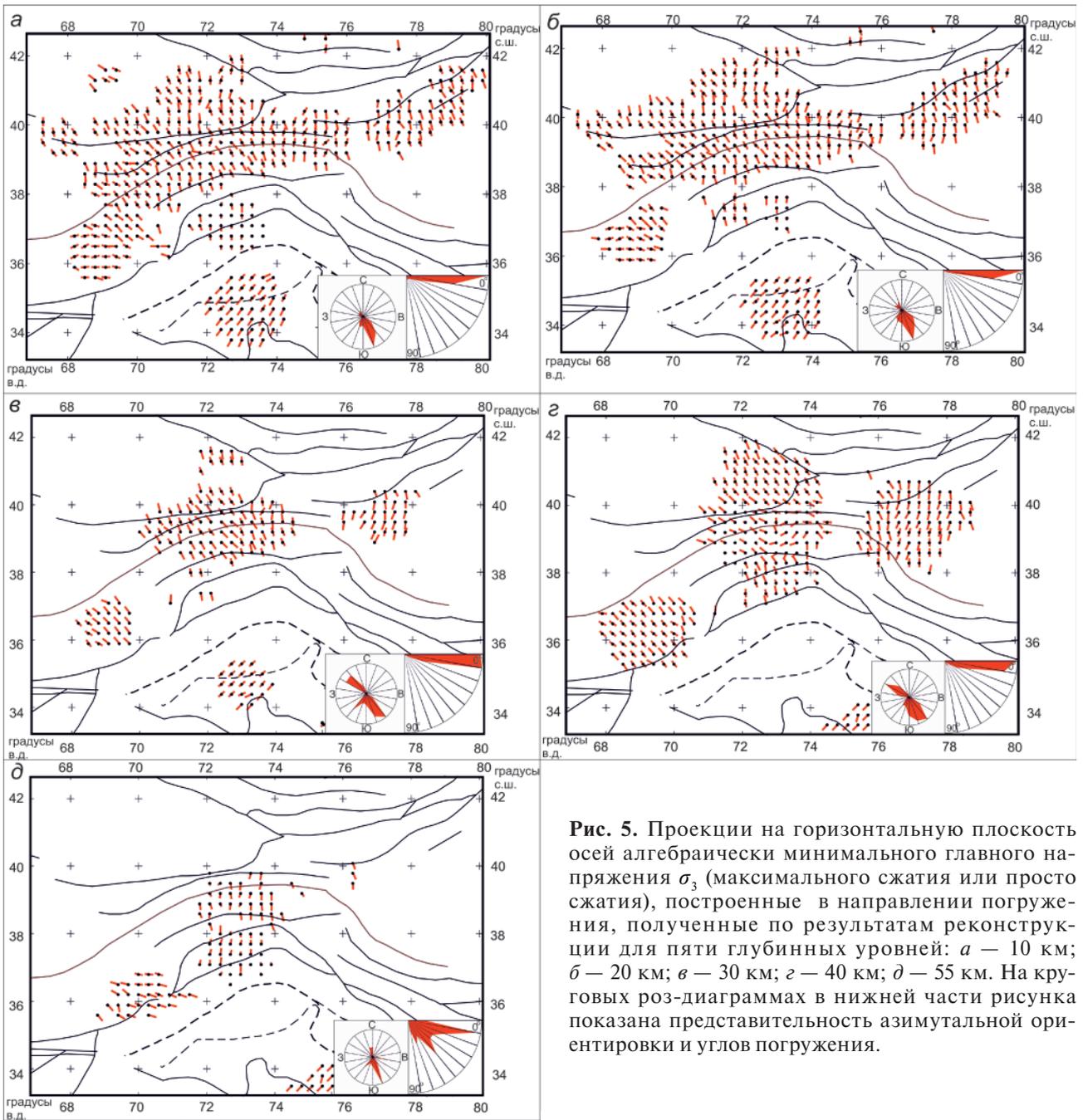
**Рис. 4.** Проекция на горизонтальную плоскость осей алгебраически максимального главного напряжения  $\sigma_1$  (максимального девиаторного растяжения или просто растяжения), построенные в направлении погружения, полученные по результатам реконструкции для пяти глубинных уровней: *a* — 10 км; *б* — 20 км; *в* — 30 км; *г* — 40 км; *д* — 55 км. На круговых роз-диаграммах в нижней части рисунка показана представительность азимутальной ориентировки и углов погружения.

местно либо субгоризонтальны, либо погружаются под Памир. Для соответствия подвигу с севера Евразийской плиты оси максимального сжатия должны были бы иметь погружение на север — в противоположную сторону от Памира.

Ориентировка осей главных напряжений максимального растяжения  $\sigma_1$  имеет большую дисперсию. Все окружение коры Памира имеет крутое погружение осей  $\sigma_1$ . В Северном и Центральном Памире имеет место обширная область с субширотной ориентировкой осей максимального растяжения. Начиная с 30 км и глубже, происходит переориентировка осей больше к северо-восточному простиранию. Такая их ориентация также противоречит версии о поддвиге Евразий-

ской плиты. На диаграммах погружения осей на всех глубинах имеются два основных пика — это 10 и 70–90 (рис. 4). В западной части Таримского массива с глубиной происходит выполаживание осей максимального девиаторного растяжения и разворот простирания осей на северо-запад — юго-восток. Выделяется зона коры Гиндукуша, где ориентировка осей имеет большие углы погружения (70–90°) и такая картина сохраняется на всех глубинах (поддвиг с юго-запада).

При районировании коры по геодинамическим типам напряженного состояния (рис. 7) использовалось деление на шесть типов, отвечающих различным углам оси на зенит в октанте, построенном на трех главных осях напряжений

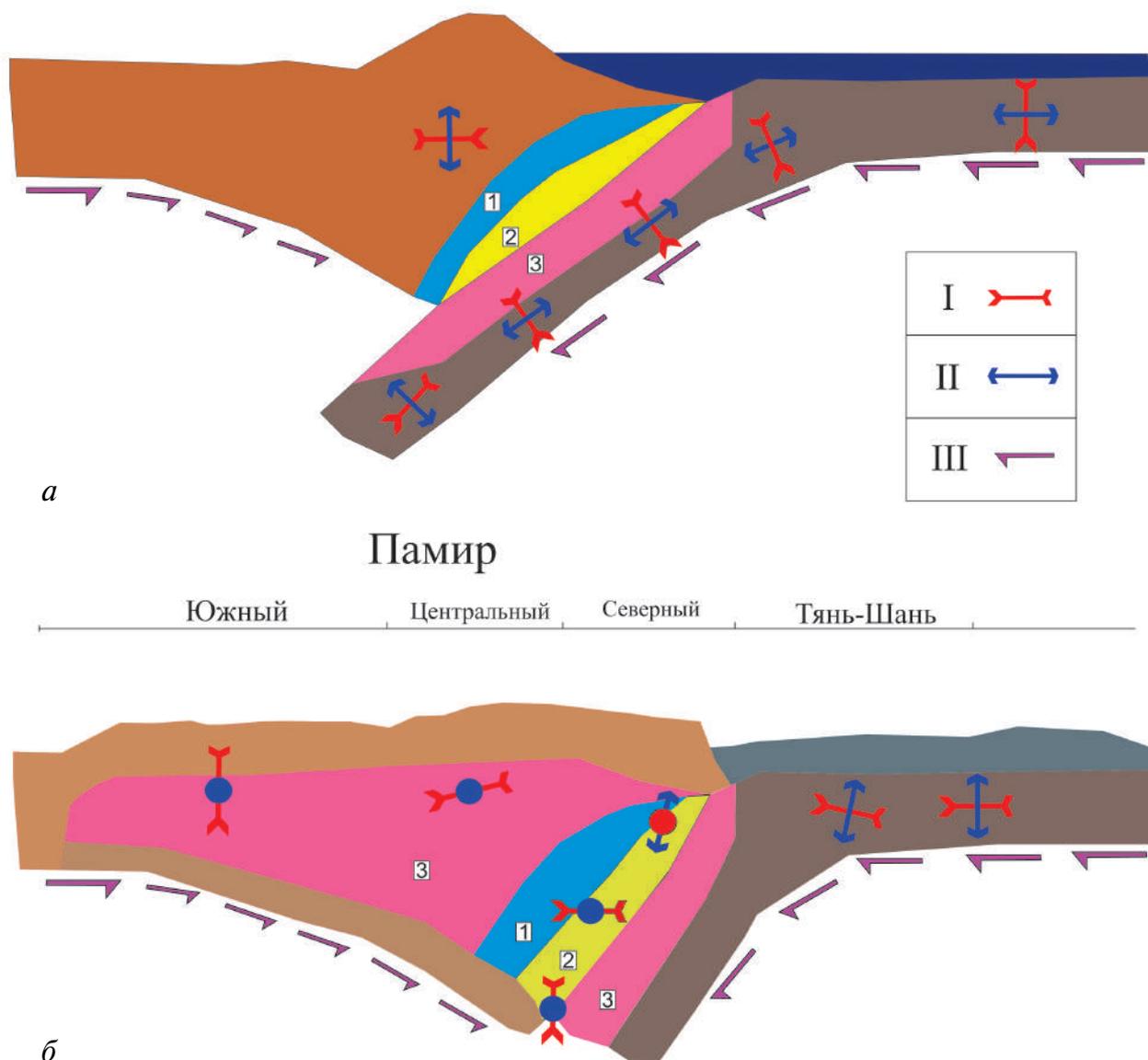


**Рис. 5.** Проекция на горизонтальную плоскость осей алгебраически минимального главного напряжения  $\sigma_3$  (максимального сжатия или просто сжатия), построенные в направлении погружения, полученные по результатам реконструкции для пяти глубинных уровней: *a* — 10 км; *b* — 20 км; *в* — 30 км; *г* — 40 км; *д* — 55 км. На круговых роз-диаграммах в нижней части рисунка показана представительность азимутальной ориентировки и углов погружения.

(Rebetsky, 2007). На глубинах 10 и 20 км наиболее четко видна осесимметричность напряженного состояния с радиальным делением на различные зоны. Первая — внешняя зона Памира, где преобладает режим горизонтального сжатия, и вторая — внутренняя, которая в основном определяется Южным Памиром, где преобладает режим горизонтального растяжения. Между этими зонами имеется переходная зона, где преобладает режим горизонтального сдвига, а разделение по зонам происходит по ГПР.

Различные режимы напряженного состояния на этих глубинах наблюдаются и для западной и восточной частей Северного Памира. В центральной части преобладает

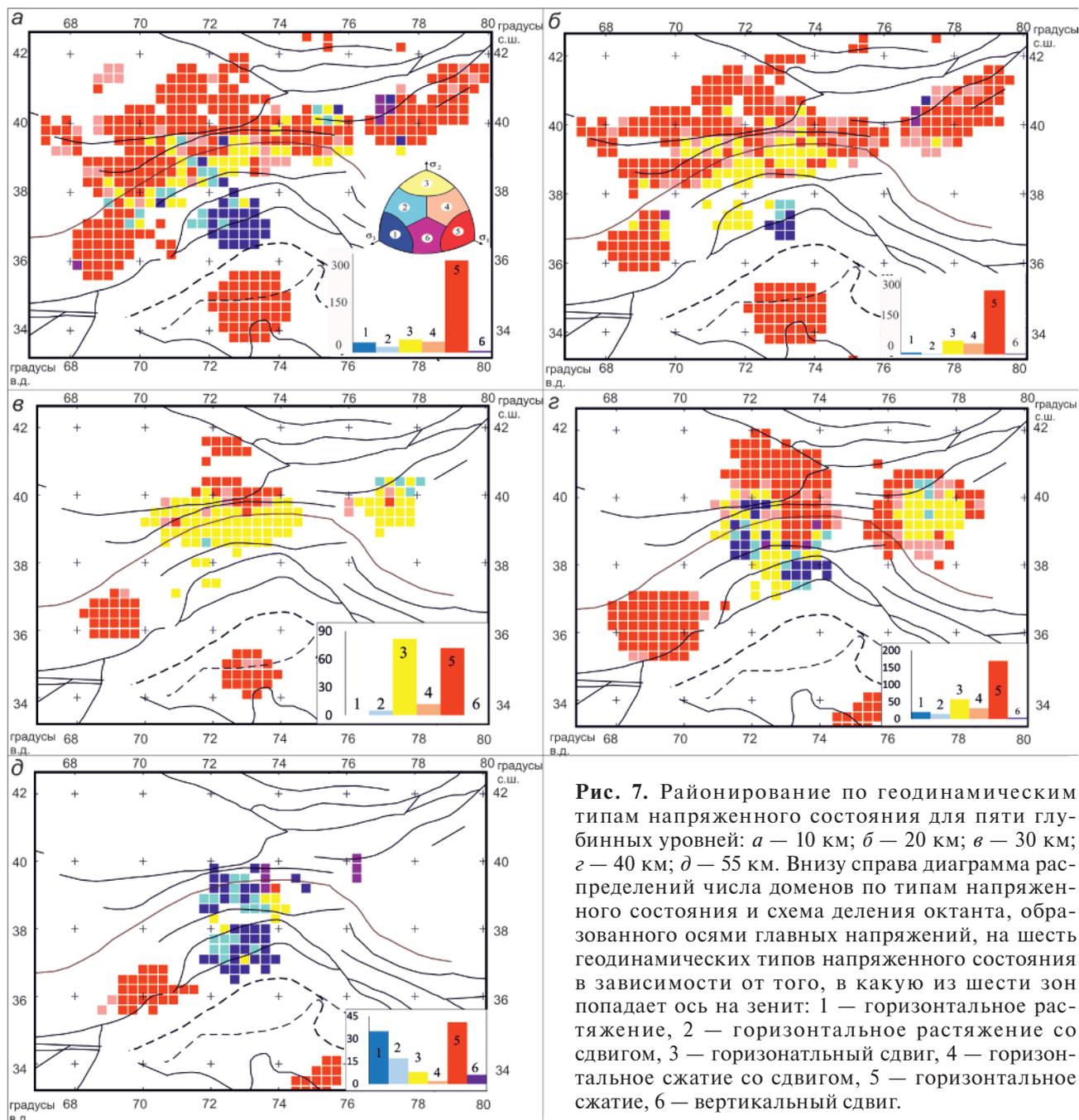
горизонтальное растяжение и сдвиг, тогда как для восточной преобладает горизонтальное сжатие. Результаты на глубине 30 км имеют отличия в сравнении с общей картиной по причинам, описанным выше. На этой глубине наблюдаются только два типа напряженного состояния: горизонтальное сжатие — для внешней зоны Памира, горизонтальный сдвиг — для внутренней зоны Памира и западной части Таримской плиты. На глубине 40 км еще более активно проявляются различия между центральным (и частично западным) и восточным Памиром. Зона с режимом горизонтального сжатия смещается (по отношению к меньшим глубинам) на север и на этой глубине занимает



**Рис. 6.** Схема вертикального сечения зоны субдукции: *a* — для коры Японской дуги по работе (Ребцкий, Полец, 2014); *б* — результаты реконструкции напряжений для участка северных областей Памира, Гиссаро — Алая и Южного Тянь-Шаня (субмеридиональный профиль), наложенные на схему субдукционной зоны. Распределение эффективного давления: 1 — пониженный уровень, 2 — средний уровень, 3 — высокий уровень. Оси главных напряжений: максимального (I) и минимального (II) сжатия, а также поддвиговые касательные напряжения (III) на горизонтальных площадках с нормалью к центру Земли.

часть Центрального Памира. В западной части Северного Памира проявляется режим горизонтального растяжения. На глубине 55 км преобладающим типом напряженного состояния становится и горизонтальное растяжение (рис. 7*д*). Подобное превалирование режима горизонтального растяжения, которому соответствует субвертикальное положение оси максимального сжатия, говорит в пользу наличия в глубине литосферы Памира выталкивающих сил — сил плавучести, определяющих продолжающийся рост гор и создающих соответствующий режим напряженного состояния.

В западной части Таримского массива на глубинах 10 и 20 км наблюдаются домены, в которых определено напряженное состояние типа вертикальный сдвиг (ось промежуточного главного напряжения субгоризонтальна, а два других главных напряжения имеют погружения, близкие к 45°). На глубинах 30, 40 км такие домены отсутствуют, а на глубине 55 км появляются вновь. Эти домены приурочены к Южно-Тяньшаньскому надвигу и говорят о кинематике разлома типа вертикальный взрез на этих глубинах. Такой же тип напряженного состояния наблюдается в северной части Памира на глубинах 40 и 55 км. Заметим,



**Рис. 7.** Районирование по геодинамическим типам напряженного состояния для пяти глубинных уровней: *a* — 10 км; *б* — 20 км; *в* — 30 км; *г* — 40 км; *д* — 55 км. Внизу справа диаграмма распределений числа доменов по типам напряженного состояния и схема деления октанта, образованного осями главных напряжений, на шесть геодинамических типов напряженного состояния в зависимости от того, в какую из шести зон попадает ось на зенит: 1 — горизонтальное растяжение, 2 — горизонтальное растяжение со сдвигом, 3 — горизонтальный сдвиг, 4 — горизонтальное сжатие со сдвигом, 5 — горизонтальное сжатие, 6 — вертикальный сдвиг.

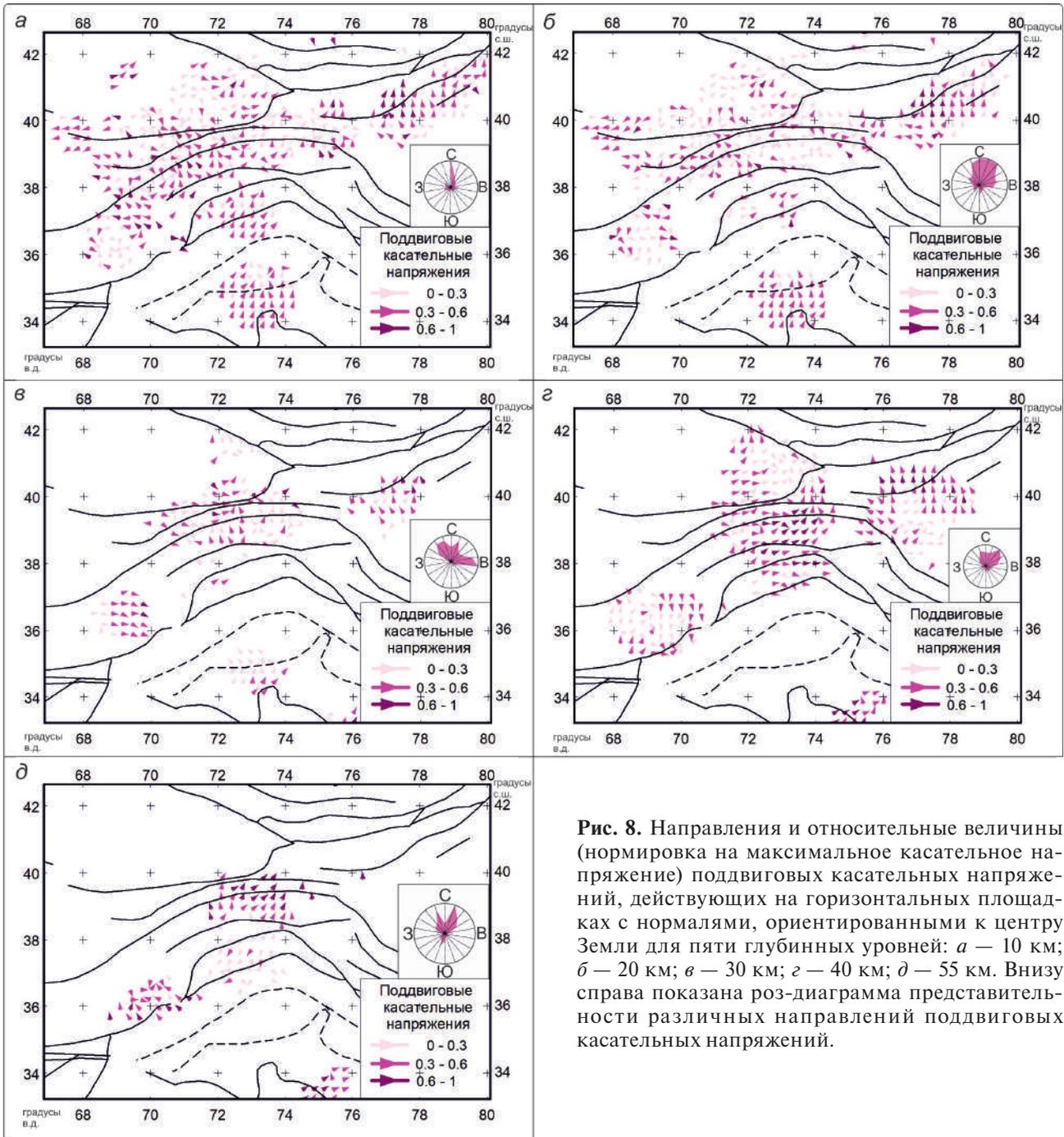
что такой тип напряженного состояния, как и режим горизонтального сжатия с менее крутыми углами погружения осей максимального сжатия, характерен для зон субдукции (Ребецкий, Полец, 2014; Rebetsky et al., 2016).

Рассмотрим область в южной части исследуемого региона, где проходят океанические сутуры Шиок и Инд-Цангпо. Для этой зоны имеется обширная область коры, где основным типом напряженного состояния является горизонтальное сжатие. При увеличении глубины эта область мигрирует по направлению на юго-восток вдоль ГПР (рис. 1).

Анализ данных о значениях коэффициента Лоде — Надаи показывает, что дуга Северного Памира на глубинах 10–20 км и частично на глубине 30 км (центральная часть) представлена формой эллипсоида напряжений, отвечающим промежуточному состоянию между чистым сдвигом и одноосным (осесимметричным) сжатием. Эти области со всех сторон оконтурены участками чистого сдвига. Южный Памир на глубине 10 км имеет форму эллипсоида напряжений, отвечающей состоянию чистого сдвига, которая на больших глубинах постепенно трансформируется в форму, приближающуюся к одноосному

растяжению. Поскольку на глубине 30 км для этого участка отсутствуют данные о напряжениях (очень мало сильных землетрясений), то, вероятно, на этой глубине происходит резкая перестройка напряженного состояния. Уже после первого этапа реконструкции в каждом из пяти слоев можно получить данные об ориентации и относительных значениях касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках с нормальными к центру Земли. Данные о касательных напряжениях отражают влияние мантии на литосферу, что является очень информативным элементом для зон субдукции.

Наиболее устойчивая ориентация касательных напряжений наблюдается в коре западной части Таримского массива на глубинах в интервале от 10 км до 55 км (рис. 8). Здесь уровень этих поддвиговых касательных напряжений наиболее близок к значениям максимальных касательных напряжений, а простирание на север является преимущественным. Таким образом, можно говорить, что Тарим поддвигается под Тянь-Шань. Это соответствует сделанному выводу из анализа погружения осей сжатия. Исходя из роз-диаграмм, показанных в правых частях рисунков (рис. 8), можно отметить, что на всех глубинах преимущественным является



**Рис. 8.** Направления и относительные величины (нормировка на максимальное касательное напряжение) поддвиговых касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках с нормальными, ориентированными к центру Земли для пяти глубинных уровней: *a* — 10 км; *б* — 20 км; *в* — 30 км; *г* — 40 км; *д* — 55 км. Внизу справа показана роз-диаграмма представительности различных направлений поддвиговых касательных напряжений.

северное и северо-восточное простирание касательных напряжений. Также для глубины 20 км можно выделить восточное простирание, а для 30 км характерными являются северо-западное и восточное направления касательных напряжений. Стабильным является участок, заключенный между сутурой Шиок и ГПР, для него в интервале глубин от 10 до 30 км касательные напряжения имеют северное простирание и средние относительные величины. Такая ориентировка поддвиговых касательных напряжений может говорить в пользу наличия более быстрого движения на север в верхней мантии.

Нужно отметить, что в коре северного Памира, приуроченной к ГПР, а также в коре, ограниченной ГПР и Вахш-Заалайским разломом, на всех глубинах имеется большое число доменов, в которых поддвиговые касательные напряжения ориентированы вдоль ГПР. Касательные напряжения в центральном и северном Памире при увеличении глубины испытывают разворот от северного простирания (для глубины 10 км), далее северо-восток (20–30 км) и восток (40 км), на глубине 55 км происходит переориентация, и основным становится юго-западное простирание.

В западном крыле Памира ориентация этих напряжений пространственно неустойчивая — мозаичная. Но и здесь можно выделить участок коры, где для всех глубин (кроме 30 км, где для этой области поддвиговые касательные напряжения имеют восточное простирание), имеется определенная закономерность. Касательные напряжения на этом участке концентрически расходятся относительно некоторой точки. Причем на глубинах 10 и 20 км имеет место «закручивание» против часовой стрелки, тогда как на глубине 40 км ситуация противоположная. Для остальной части западного крыла Памира (севернее описанной области) для интервала глубин от 10 до 20 км преобладающим является западное простирание поддвиговых касательных напряжений. Такую ориентацию можно рассматривать и как надвигание Памира на запад, и как пододвигание под Памир с запада. Мозаичность в ориентации осей поддвиговых напряжений, так же как и в ориентации главных осей напряжений, можно связывать с повышенной блочной делимостью коры этого региона.

На глубинах 40 и 55 км в коре Центрального и Северного Памира появляются касательные напряжения, относительные величины которых близки к максимальным. Для западной и центральной части Памира на глубине 40 км преимущественным простиранием касательных напряжений является восток, северо-восток с плавным разворотом на север (в центральной части), тогда как для восточной части Памира преимуще-

ственным направлением является северо-запад. На глубине 55 км поддвиговые касательные напряжения для коры Центрального и Северного Памира имеют преимущественно север — северо-восточное простирание, тогда как для южного Памира характерна ориентация на юго-запад.

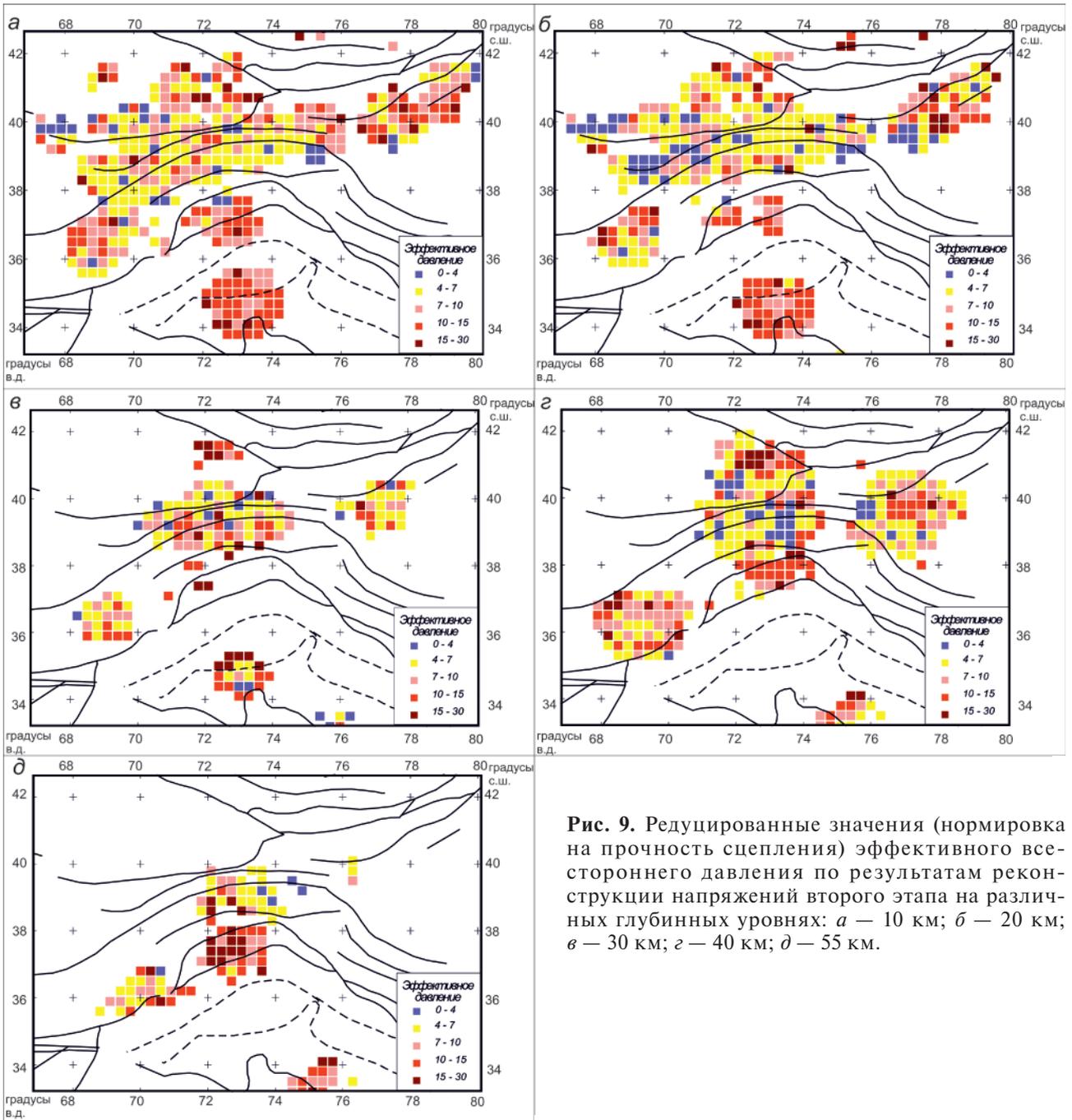
Для Ферганской впадины на всех глубинах, кроме 55 км, где расчеты не дали результатов, поддвиговые касательные напряжения имеют преимущественно восточное простирание, что может говорить либо о надвигании Ферганской впадины на Тянь-Шань, либо о пододвигании Тянь-Шаня на запад. Для коры Южного Тянь-Шаня (севернее Вахш-Заалайского разлома) характерна северная ориентация касательных напряжений.

Такое распределение поддвиговых касательных напряжений может говорить о наличии препятствия на пути движения Памира, которое заставляет изменять направление движения коровых масс. Также нужно учитывать гравитационное растекание Памира вне зависимости от давления со стороны Индийской плиты. Другая интерпретация таких результатов предполагает, что под Памир с запада, севера и востока происходит пододвигание коры Таджикской впадины, Ферганской впадины и Таримского массива соответственно. Отметим, что из данных роз-диаграмм (рис. 8) следует субмеридиональное пододвигание мантии под кору Памира, Гиссаро — Алая и Южного Тянь-Шаня. Этот результат не подтверждает подвиг со стороны Евразии под Памир.

#### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные об ориентации осей главных напряжений и значении коэффициента Лоде — Надаи, определенные после первого этапа МКА, вместе с исходными для них однородными выборками механизмов очагов напряжений позволяют на втором этапе МКА произвести расчет нормированных величин эффективного давления (изотропное давление в каркасе горных пород минус флюидное давление в трещинно-поровом пространстве) и максимального касательного напряжения (Ребецкий, 2003).

Для всех глубин можно наблюдать низкие значения эффективного давления (рис. 9) вдоль всего ГПР. Причем области пониженных значений наблюдаются как для внешней, так и для внутренней зоны Памира. В западном крыле Памира пониженные значения эффективного давления наблюдаются вдоль ГПР вплоть до Альбурс-Мормульского разлома, где на глубинах 10, 20, 40 и 55 км наблюдаются повышенные



**Рис. 9.** Редуцированные значения (нормировка на прочность сцепления) эффективного всестороннего давления по результатам реконструкции напряжений второго этапа на различных глубинных уровнях: *а* — 10 км; *б* — 20 км; *в* — 30 км; *г* — 40 км; *д* — 55 км.

значения эффективного давления. Можно предположить, что пониженный уровень эффективного давления приводит к ослаблению связей между блоками коры и это формирует повышенную мозаичность в ориентации главных напряжений (рис. 4, 5). На севере (восточная часть Ферганской долины) и востоке (западная часть Таримской плиты) для всех глубин прослеживаются повышенные значения эффективного давления. Эти области равноудалены от ГПР. Участки разломов, расположенные в зонах пониженного эффективного давления, можно трактовать как зоны повышенной их тектонической активности.

На глубине 20 км можно отметить градиентную зону от пониженных значений эффективного давления к повышенным, которая начинается в коре восточного Памира и заканчивается в западном крыле Таримского массива. На глубинах от 30 км и больше в коре Центрального Памира появляются домены, в которых определены повышенные значения эффективного давления. Причем на глубине 40 км имеется область сочленения максимальных и минимальных значений эффективного давления. Разделение происходит по Рушан-Пшарскому разлому с юга и по Вахш-Заалайскому с севера. Генезис пониженного эффективного давления на такой

глубине можно связать с повышенным флюидным давлением. В работе (Sass et al., 2014) показано, что на малых глубинах (от 7 до 25 км) для коры Южного и Северного Памира, Алайской долины характерно пониженное сопротивление. На глубине более 25 км пониженные значения электросопротивления сохраняются для коры Южного и Центрального Памира (в области Танымасского разлома). Для коры Южного Памира наблюдается отрицательная гравитационная аномалия, тогда как для Северного Памира — положительная (Tiwari et al., 2007).

Иная ситуация для коры Южного Памира. Для всех глубин наблюдаются повышенные значения эффективного давления. Только в слое 20–40 км для этого участка коры расчеты не дали результатов. Это также наблюдается для коры восточного Гиндукуша на всех глубинах. Обратим внимание на область в южной части исследуемого региона, ограниченную с севера швом Шиок, а с севера Главным Граничным разломом. Здесь на глубинах 10 и 20 км преобладают повышенные значения эффективного давления, на 30 км появляется зона, где домены с пониженными значениями эффективного давления окружены доменами с повышенными значениями.

Для коры Южного Памира на всех глубинах характерны повышенные значения эффективного давления, тогда как в Центральном и Северном Памире преобладают пониженные значения. При дальнейшем продвижении на юг давление повышается до максимальных значений в коре северного крыла Ферганской впадины и для коры Южного Тянь-Шаня. В последних исследованиях (Ребецкий, Полец, 2014; Rebetsky et al., 2016) было показано, что для зон субдукции характерно такое чередование значений эффективного давления. Область повышенных значений эффективного давления принадлежит зоне контакта желоба и континентальной коры (рис. 6). В нашем случае картина перехода от повышенных значений к пониженным и обратно наблюдается как в направлении с севера на юг, так и с юга на север. Это может означать, что погружаемая кора имеет крутое погружение в этой области. Нужно отметить, что по расчетным данным с увеличением глубины существует миграция повышенных значений эффективного давления для коры Южного Памира. На глубинах 10 и 20 км можно наблюдать, что области повышенного давления ограничены Пандшерским разломом, тогда как на глубинах 30 км и глубже повышенное давление появляется и в коре Центрального, а затем и Северного Памира. Такое смещение зоны повышенного давления может говорить о том, что здесь имеет место направление поддвига на север.

Результаты тектонофизического анализа параметров напряженного состояния показывают, что высоко поднятая кора Памира (средняя высота >4 км) испытывает гравитационное растекание. Это растекание происходит как в широтном направлении (на Ферганскую и Таджикскую впадины, а также на Тарим), так и на юг (Гиндукуш). В северном ограничении Памира напряженное состояние классифицируется как пододвигание под Гиссаро — Алай, а не под Памир. Это важный вывод, который не соответствует существующей концепции поддвига с севера под Тибет и Памир. Возможно, литосфера Тянь-Шаня служит препятствием, которое изменяет субмеридиональное направление тектонического течения подкорковых масс Памира, отклоняя его на запад (Буртман, 2012).

По данным GPS наблюдений (Мансуров, 2017; Мансуров, Рыбин, 2015), режим сжатия доминирует на территории Южного Тянь-Шаня, а максимальные величины скорости деформаций субмеридионального сжатия наблюдаются для Северного и Центрального Памира. Здесь выявлена соответствующая ориентация осей максимального сжатия и для напряжений. Резкому понижению интенсивности скорости деформаций субмеридионального сжатия, по данным GPS для Южного Памира, отвечает геодинамический режим горизонтального растяжения в напряженном состоянии на всем диапазоне глубин реконструкции. Эта часть Памира характеризуется резко отличающейся морфологией поверхности — платообразный рельеф.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена детальная тектонофизическая реконструкция современного напряженного состояния коры Памира и сопредельных с ним областей. Для реконструкции использован сборный каталог механизмов очагов землетрясений разных авторов и сейсмологических центров за период с 1938 по 2016 гг.

Результаты выполненной реконструкции показали различия в геодинамическом типе напряженного состояния Памира, связанные с особенностью морфологии его рельефа. Так, в коре платообразной части Южного Памира имеет место горизонтальное растяжение. В то же время для коры Северного Памира и Гиндукуша, где рельеф представлен высокими хребтами и мощными врезами (высокий уровень эрозии), имеет место режим горизонтального сжатия. Установлено, что в коре южного ограничения Памира напряженное состояние соответствует взглядам о поддвиге под Памир со стороны Индийской плиты. В то же время для коры

северного ограничения Памира напряженное состояние показывает возможность подвига не под Памир, а под Гиссаро — Алай и Южный Тянь-Шань.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-35-00475 и программы № 8 ОНЗ РАН.

#### Список литературы

- Аверьянова В.Н.* Детальная характеристика сейсмических очагов Дальнего Востока. М.: Наука, 1968. 191 с.
- Буртман В.С.* Тянь-Шань и Высокая Азия. Геодинамика в кайнозой. М.: Геос, 2012. 188 с.
- Буртман В.С.* Геодинамика Памир — Пенджабского синтаксиса // Геотектоника. 2013. № 1. С. 36–58.
- Гущенко О.И.* Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // ДАН. 1975. Т. 225. № 3. С. 557–560.
- Зубович А.В., Макаров В.И., Кузиков С.И. и др.* Внутриконтинентальное горообразование в Центральной Азии по данным спутниковой геодезии // Геотектоника. 2007. № 1. С. 16–29.
- Иванова Т.П., Трифонов В.Г.* Неотектоника и мантийные землетрясения Памиро-Гиндукушского региона // Геотектоника. 2005. № 1. С. 64–77.
- Костров Б.В.* Механика очага тектонического землетрясения // М.: Наука, 1975. 176 с.
- Кучай О.А., Бушенкова Н.А.* Механизмы очагов землетрясения Центральной Азии // Физическая мезомеханика. 2009. № 12. С. 12–24.
- Леонов М.Г., Гарецкий Р.Г.* Памирско-Гималайский и восточно-европейский геодинамические узлы как зоны взаимодействия разнонаправленных литосферных тектонических потоков // Седьмой международный симпозиум «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», Тезисы докладов, 19–24 июня 2017 г., г. Бишкек. ИС РАН. 2017. С. 33–36.
- Мансуров А.Н., Рыбин А.К.* Количественная оценка современных деформаций земной коры Памир-Гиссаро-Алайской зоны по данным GPS-наблюдений // Вестник КРСУ. 2015. Т. 15. № 3. С. 120–124.
- Мансуров А.Н.* Модели, алгоритмы и программные средства для исследования современных деформаций земной коры Памиро-Тяньшанского региона по данным космической геодезии // Автореф. дисс. канд. техн. наук. ИС РАН, г. Бишкек. 2017. 25 с.
- Мострюков А.О., Петров В.А.* Каталог механизмов очагов землетрясений, 1964–1990 гг. Материалы мирового центра данных. М.: 1994. 87 с.
- Петров В.А., Нью Анфу, Смирнов В.Б. и др.* Поле тектонических напряжений по механизмам очагов землетрясений и современные движения земной коры по данным GPS-измерений для территории Китая // Физика Земли. 2008. № 10. С. 101–112.
- Парфенов В.Д.* К методике тектонофизического анализа геологических структур // Геотектоника. 1984. № 1. С. 60–72.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // ДАН. 2003. Т. 3. № 2. С. 237–241.
- Ребецкий Ю.Л., Алексеев Р.С.* Тектоническое поле современных напряжений Средней и Юго-Восточной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. Вып. 1. С. 257–290.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.* Напряженное состояние земной коры западного фланга Зондской субдукционной зоны перед Суматра-Андаманским землетрясением 26.12.2004 // ДАН. 2006а. Т. 407. № 1. С. 106–109.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.* Поле тектонических напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология геофизика. 2006б. Т. 47. № 11. С. 1192–1206.
- Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю.* Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 // Геодинамика и тектонофизика 2014. Т. 5. Вып. 2. С. 469–506.
- Ризниченко Ю.В.* Энергетическая модель сейсмического режима // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1968. № 5. С. 3–9.
- Сычева Н.А., Аладьев А.В., Мухамадиева В.А., Юнга С.Л.* Изучение фокальных механизмов очагов по данным сети KNET // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. М.: 2003. С. 241–253.
- Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А.* Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизийного пояса. М.: ГЕОС, 2002. 224 с.
- Трифонов В.Г., Иванова Т.П., Бачманов Д.М.* Эволюция центральной части Альпийско-Гималайского пояса в позднем кайнозойе // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 3. С. 289–304.
- Юнга С.Л.* Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 190 с.

- Angelier J.* From orientation to magnitude in paleostress determinations using fault slip data // *Journal Structure Geology*. 1989. V. 11. № 1/2. P. 37–49.
- Bott M.H.P.* The mechanics of oblique slip faulting // *Geology Magazine*. 1959. № 96. P. 109–117.
- Burtman V.S., Molnar P.* Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir // *Special Paper Geological Soc. America Bull.* 1993. V. 281. doi:10.1130/SPE281-p1.
- England P., Molnar P.* Active deformation of Asia: From kinematics to dynamics // *Science*. 1967. V. 278 (5338). P. 647–650.
- Hamburger M.W., Sarewitz D.R., Pavlis T.L., Popandopulo G.A.* Intracontinental subduction in the Peter the First Range // *Geological Soc. America Bull.* 1992. V. 104. P. 397–408.
- Li T., Chen J., Thompson J.A. et al.* Equivalency of geologic with geodetic rates in contractional orogens: new insights from the Pamir Frontal Thrust // *Geophysical Researches Letters*. 2012. V. 39. L15305.
- Molnar P., Tapponnier P.* Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision // *Science*. 1975. V. 189. P. 419–426.
- Molnar P., Tapponnier P.* Active tectonics Tibet // *JGR*. 1978. V. 83. № B1. P. 5361–5375.
- Negredo A.M., Replumaz A., Villasenor A., Guillot S.* Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir – Hindu Kush region // *Earth Planetary Science Letters*. 2007. V. 259. 1–2. P. 212–225.
- Petrov V.A., Mostrukov A.O., Lykov V.I.* The recent field of tectonic stresses over territory of China // *Journal Earthquake Prediction Researches*. 1994. V. 3. № 4. P. 509–527.
- Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., Rosanova G.V., Fursova E.V. II.* Stress-monitoring: The modern field of regional stresses in South-East Asia and Oceania. Principles of quasiplastic deforming of fractured media // *Journal Earthquake Prediction Research*. Beijing. China. 1997. V. 6. № 1. P. 11–36.
- Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu., Zlobin T.K.* The state of stress in the Earth's crust along the northwestern flank of the Pacific seismic focal zone before the Tohoku earthquake of 11 March 2011 // *Tectonophysics*. 2016. V. 581. P. 114–131.
- Robinson A.C., Yin A., Manning C.E. et al.* Tectonic evolution of the northeastern Pamir: Constraints from the northern portion of the Cenozoic Kongur Shan extensional system, Western China // *Geological Soc. America Bull.* 2004. V. 1. № 116. P. 953–973.
- Sass P., Ritter O., Ratschbacher L. et al.* Resistivity structure underneath the Pamir and Southern Tian Shan // *Geophysical Journal Interial*. 2014. P. 1–16.
- Schneider F.M., Yuan X., Schurr B. et al.* Seismic imaging of subducting continental lower crust beneath the Pamir // *Earth Planetary Science Letters*. 2013. V. 375. P. 101–112.
- Schwab M., Ratschbacher L., Siebel W. et al.* Assembly of the Pamirs: age and origin of magmatic belts from the southern Tien Shan to the southern Pamirs and their relation to Tibet // *Tectonics*. 2004. V. 23. № 4. doi:1029/2003TC001583.
- Shackleton R.M., Chang C.* Cenozoic uplift and deformation of the Tibetan Plateau: the geomorphological evidence // *Philosophy Translate. Royal Soc. London*. 1988. V. A 327. P. 365–377.
- Sobel E.R., Chen J., Schoenbohm L.M. et al.* Oceanic-style subduction controls late Cenozoic deformation of the Northern Pamir orogeny // *Earth Planetary Science Letters*, 2013. V. 363. P. 204–218.
- Tapponnier P., Zhiqin Xu, Roger Fr. et al.* Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau // *Science*. 2001. V. 294. № 23. P. 1671–1677.
- Tiwari V.M., Rajasekhar R.P., Mishra D.C.* Gravity anomaly, lithospheric structure and seismicity of Western Himalayan Syntaxis // *Journal Seismology*. 2009. P. 13:363–13.370.
- Turner F.J.* Nature and dynamic interpretation of deformation lamellae in calcite of three marbles // *American Journal Seismology*. 1953. V. 251. P. 276–298.
- Wallace R.E.* Geometry of shearing stress and relation to faulting // *Journal Geology* 1951. V. 59. P. 18–130.
- Wicknes A.J., Hodgson J.H.* Computer Re-evaluation of Earthquake Mechanism Solutions. Publication Dominion Observation, 1967. Ottawa. V. 33. № 1. P. 1–535.
- Zobak M.L.* First- and second modern pattern of stress in lithosphere: The World stress map project // *JGR*. 1992. V. 97. № B8. P. 11703–11728.
- Zhou Y., He J., Oimahmadov I. et al.* Present-day crustal motion around the Pamir Plateau from GPS measurements // *Gondwana Research*. 2016. V. 35. P. 144–154.
- Zhonghuai Xu, Suyun W., Yurui H., Ajia G.* Tectonic stress field of China inferred from a large number of small earthquake // *JGR*. 1992. V. 97. № B8. P. 11867–11878.

АЛЕКСЕЕВ, РЕБЕЦКИЙ

**TECTONOPHYSICS ANALYSIS OF STRESS STATE OF THE PAMIR CRUST  
BASED ON THE SEISMOLOGICAL DATA**

**R.S. Alekseyev, Yu.L. Rebetsky**

*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

The article provides a detailed (for several depth's levels) tectonophysical reconstruction of the contemporary stress state of the crust within the Pamirs and the adjacent areas. The reconstruction is based on a mixed catalogue of earthquake focal mechanisms and seismological centres dated from 1938 to 2016. The tectonic stress reconstruction allowed revealing important patterns concerning lateral changes and changes in depth of the stress state. The article shows that a plateau-like part of the southern Pamirs has the level of horizontal tension (among three levels of geodynamic types formed by the stress state), which stands in contrast with the Northern Pamir and the Hindu Kush with their horizontal compression. The research revealed that the stress state on the crust of the southern boundary of the Pamir corresponds to the theory which states that the Indian plate is subducting beneath the Pamir. At the same time the research showed that the stress state on the crust of the Pamir northern boundary can possibly cause subduction beneath the Gissar — Alai and the southern Tien-Shan.

*Keywords: tectonophysics, mechanisms of foci of earthquakes, stresses, conditions of the crust deformation.*