

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОРЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ  
ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЕТИ KNET  
Ю.Л. Ребецкий, Н.А. Сычева\*, В.Н. Сычев\*, С.И. Кузиков\*, А.В. Маринин**

*Институт физики Земли РАН, 123995, Москва, ул. Б. Грузинская, 10, Россия*

*\* Научная станция РАН в г. Бишкек, 720042, Бишкек, 49, Кыргызстан*

Представлен детальный анализ поля природных напряжений в коре Северного Тянь-Шаня в масштабе осреднения 10—15 км, полученного по сейсмологическим данным локальной сети KNET. Трансформация данных о механизмах очагов землетрясений в параметры тензора напряжений осуществлялась на основе метода катакластического анализа разрывных смещений, разработанного в ИФЗ РАН Ю.Л. Ребецким. Результаты в виде ориентации осей главных и величин редуцированных напряжений представлены для четырех глубинных уровней коры. Установлено, что кроме геодинамического типа напряженного состояния горизонтального сжатия, встречающегося преимущественно в коре центральной части Северного Тянь-Шаня, имеется также большое число участков с режимом горизонтального сдвига со сжатием и растяжением и даже с чистым горизонтальным растяжением (для верхних слоев восточной части Чуйской котловины, в Суусамырской впадине и ее ближнем окружении, в срединной части Киргизского хребта). Выделено несколько крупных участков повышенного и пониженного уровня эффективного всестороннего давления, определяющего согласно закону Кулона — Мора и соответствующий уровень девиаторных напряжений. Установлено, что относительно сильные землетрясения тяготеют к участкам коры пониженного уровня эффективного давления, где на разрывах действуют меньшие по величине силы сопротивления хрупкому разрушению — напряжения кулонового трения. Показано, что один из участков субширотного разлома северного склона Киргизского хребта протяженностью около 60 км формирует в своем окружении закономерное распределение напряжений, отвечающее правосдвиговой компоненте смещения его бортов.

*Тектонические напряжения, механизмы очагов землетрясений, геодинамический режим, внутриконтинентальный ороген.*

**THE STRESS STATE OF THE NORTHERN TIEN SHAN CRUST BASED  
ON THE KNET SEISMIC NETWORK DATA**

**Yu.L. Rebetsky, N.A. Sycheva, V.N. Sychev, S.I. Kuzikov, and A.V. Marinin**

In this study we present a detailed analysis of natural stresses in the Northern Tien Shan crust averaged in a window of 10–15 km obtained from seismological data of the local KNET network. The transformation of focal mechanism data into the parameters of the stress tensor was based on the method of cataclastic analysis of rupture dislocations elaborated by Yu.L. Rebetsky (Institute of Physics of the Earth, Moscow). The results, including the orientation of the principal stress axes and the reduced stresses, are presented for four depth layers. It was shown that the central part of the study area is dominated by horizontal compression, while multiple domains characterized by horizontal shear and superimposed compression or pure horizontal shear are also present (uppermost layers in the eastern part of the Chuya depression, Suusamy depression and adjoining regions, in the central part of the Kyrgyz Range). There are also several large domains of high and low effective confining pressure, which defines the corresponding deviator stress, according to the Coulomb–Mohr law. It was shown that relatively strong earthquakes are correlated with zones with low levels of effective pressure where the ruptures are characterized by lower resistance to brittle fracturing, i.e., Coulomb friction stresses. It was also shown that a distinct segment of the ~60 km E–W striking fault on the northern slope of the Kyrgyz Range generates a uniform distribution of stresses, corresponding to a dextral slip along of its edges.

*Tectonic stresses, earthquake focal mechanisms, geodynamic regime, intracontinental orogen*

**ВВЕДЕНИЕ**

М.В. Гзовский рассматривал проблему тектонофизического изучения закономерности распределения напряжений в земной коре в качестве ключевой при выявлении механизмов формирования геологической структуры. В рамках этой концепции в настоящей статье выполняется исследование напряженного состояния в коре Северного Тянь-Шаня. Цель работы состоит в установлении взаимосвязи внутрикорового напряженного состояния с морфологией и неотектоникой района исследований.

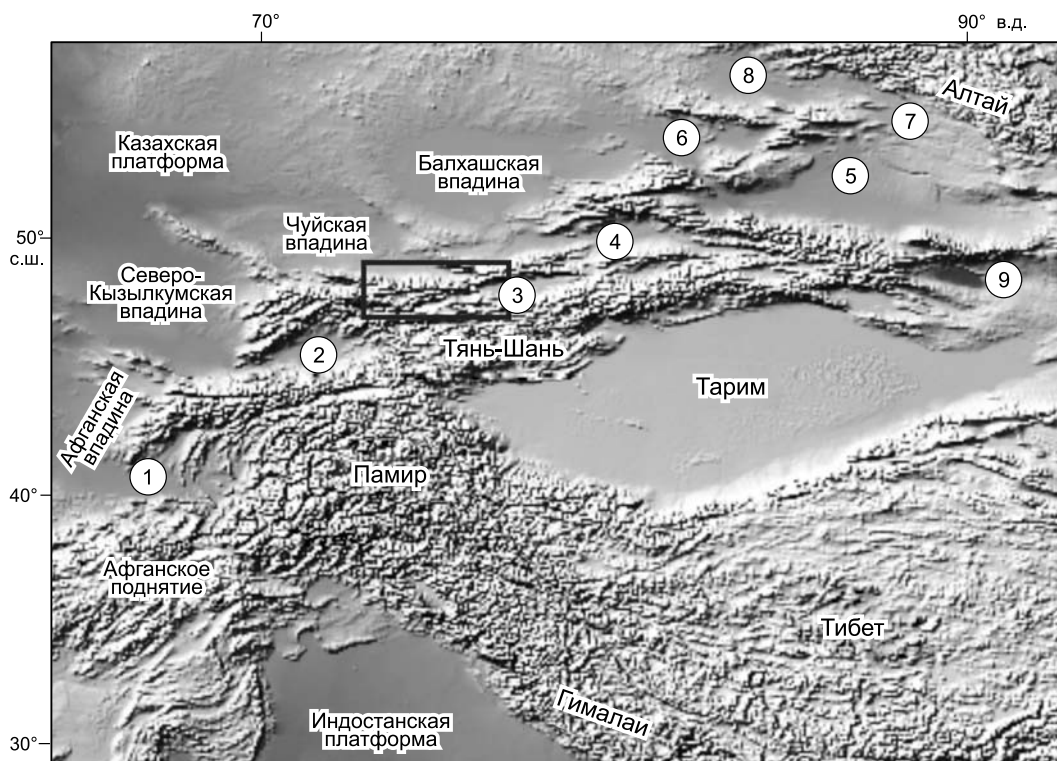
Ранее в работе [Ребецкий и др., 2013] для коры Алтае-Саян и Высокой Азии (Памир, Тибет, Гималаи, Куньлунь) был выявлен ряд закономерных взаимосвязей между усредненными для сейсмоактивной верхней части коры напряжениями и формами рельефа (горные поднятия, впадины). Было показано, что в коре поднятий в виде хребтов, как правило, имеет место субгоризонтальная ориентация осей максимального сжатия, а для коры крупных внутригорных и межгорных впадин субгоризонтальные оси максимального девиаторного растяжения (минимального сжатия). В следующей работе [Ребецкий, Алексеев, 2014] было установлено, что в поднятиях типа плато (часть Памира, Тибет) в коре субгоризонтальны оси минимального сжатия, т. е. здесь наблюдаются геодинамические типы напряженного состояния в виде горизонтального растяжения и горизонтального сдвига.

Следует отметить, что ранее в работе [Rebetsky et al., 2012] частично были показаны результаты анализа современных напряжений в коре Северного Тянь-Шаня, относящиеся к самому верхнему сейсмогенному слою коры (глубины до 10 км). В настоящей статье будут представлены результаты исследований в полном объеме, относящиеся ко всему сейсмогенному слою до глубин 25 км.

### КРАТКИЙ ОБЗОР РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

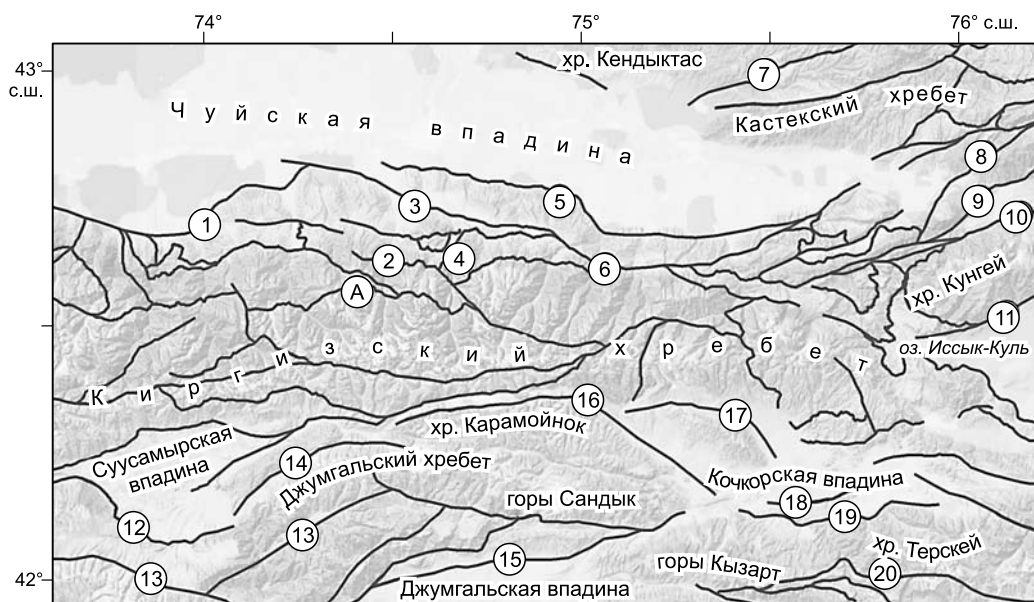
**Геология.** Рассматриваемый регион расположен в Тянь-Шаньской области Урало-Монгольского складчатого пояса между двумя микроплитами — Таримской на юге и Джунгарской на севере (Казахская платформа). Эта горная область находится на территории Киргизии, Казахстана, Узбекистана, Таджикистана и Китая, протягиваясь в субширотном направлении более чем на 2500 км (рис. 1). В составе Тянь-Шаньской складчатой области выделяются каледонская Северо-Тяньшаньская система, герцинская Южно-Тяньшаньская система и промежуточная каледоно-герцинская система Среднего Тянь-Шаня [Милановский, 1996]. К югу от Тянь-Шаньской складчатой области расположены структуры уже Памиро-Гималайского сегмента Средиземноморского подвижного пояса, отделяющие изучаемый регион от Индостанской платформы.

На мезозойском этапе развития (или даже с позднепермского времени) Тянь-Шаньская складчатая область выступала в качестве относительно стабильной области с платформенным режимом развития, позволившем сформироваться поверхности пенеплена. В позднем кайнозое Тянь-Шаньская область испытала сильную тектоническую активизацию, в результате которой приобрела резко контрастный рельеф с высокогорными и среднегорными хребтами в окружении межгорных и предгорных впадин.



**Рис. 1. Расположение района исследований в общей структуре района Высокой Азии.**

Впадины: 1 — Таджикская, 2 — Ферганская, 3 — Иссык-Кульская, 4 — Илийская, 5 — Джунгарская, 6 — Алакульская, 7, 8 — Зайсанская, 9 — Турфанская.



**Рис. 2. Топография и главные разломы (по [Кузиков, Мухамедиев, 2010]) Северного Тянь-Шаня в районе Научной станции РАН (г. Бишкек).**

Разломы: 1 — Аксуйский, 2 — Чонкурчакский, 3 — Байтикский, 4 — Аламединский, 5 — Иссыкатынский, 6 — Шамсинский, 7 — Каракунзский, 8 — Заилийский, 9 — Северо-Кеминский, 10 — Южно-Кеминский, 11 — Тогуз-Булакский (Северо-Иссык-кульский), 12 — Араминский, 13 — Кызыллойский, 14 — Каракульский, 15 — Улунбулакский (Узунбулак-Ойкаинская зона), 16 — Каракольский, 17 — Ортокский, 18 — Акчопский, 19 — Южно-Кочкорский, 20 — Каракурджурский. А — разлом Верховой, выделенный по результатам тектонофизической реконструкции напряжений.

Общепринято, что структура Тянь-Шаня развивалась в условиях меридионального горизонтального укорочения начиная с олигоцена [Макаров, 1977; Николаев, 1988]. С неоген-четвертичным этапом развития Тянь-Шаньской складчатой области связывают утолщение до 50—60 км земной коры под горными хребтами (при относительном сокращении до 40—45 км под крупными впадинами), а также формирование значительных гравитационных и тепловых аномалий.

Регион Северный Тянь-Шань (рис. 2) включает в себя северные участки Центрального Тянь-Шаня, который отделен от Юго-Западного Тянь-Шаня зоной Талассо-Ферганского разлома (на рис. 2 не показан). Орография Северного Тянь-Шаня представлена хребтами и депрессиями, образовавшимися в результате развития складчатости и взбросовой тектоники и вытянутым преимущественно в широтном направлении [Чедия, 1986; Макаров, 2012]. Основными тектоническими структурами исследуемого района на неотектоническом этапе являются Киргизская мегантиклиналь (Киргизский хребет) и находящаяся севернее Чуйская впадина. Южнее Киргизского хребта располагаются Суусамырская, Кочкорская и Джумгалская впадины, разделенные небольшими хребтами. Западнее находятся хребты Таласский, Большой и Малый Каратау, а восточнее — хребты Кунгей-Алатау и Терскей-Алатау с разделяющей их Иссыккульской межгорной впадиной.

Хребты сложены преимущественно рифейско-палеозойскими образованиями (метаморфические, осадочные, вулканогенные и интрузивные), а впадины заполнены в основном кайнозойскими осадочными континентальными отложениями. В настоящее время пенеплен, формировавшийся на доорогенной «платформенной» стадии развития Тянь-Шаньской области, опущен на глубину до 5—10 км во впадинах и приподнят на высоту 6—8 км в высокогорных хребтах [Шульц, 1948; Чедия, 1986]. Амплитуды относительных современных движений по активным разрывам составляют до 5 мм/год. Средняя скорость воздымания гор за олигоцен—квартер ниже, чем за квартер и за поздний плейстоцен—голоцен, что говорит об ускорении роста гор в современную эпоху [Крестников и др., 1979; Чедия, 1986; Трифонов и др., 2012; Артюшков, 2012]. Присутствие в структуре всего новейшего Тянь-Шаня продольных зон сдвиговых деформаций (shear zones) с проявлением как правого, так и левого сдвигов [Макаров, 1977; Cobbold, Davy, 1988; England, Molnar, 1997; Buslov et al., 2003] позволяет рассматривать его как транспрессию.

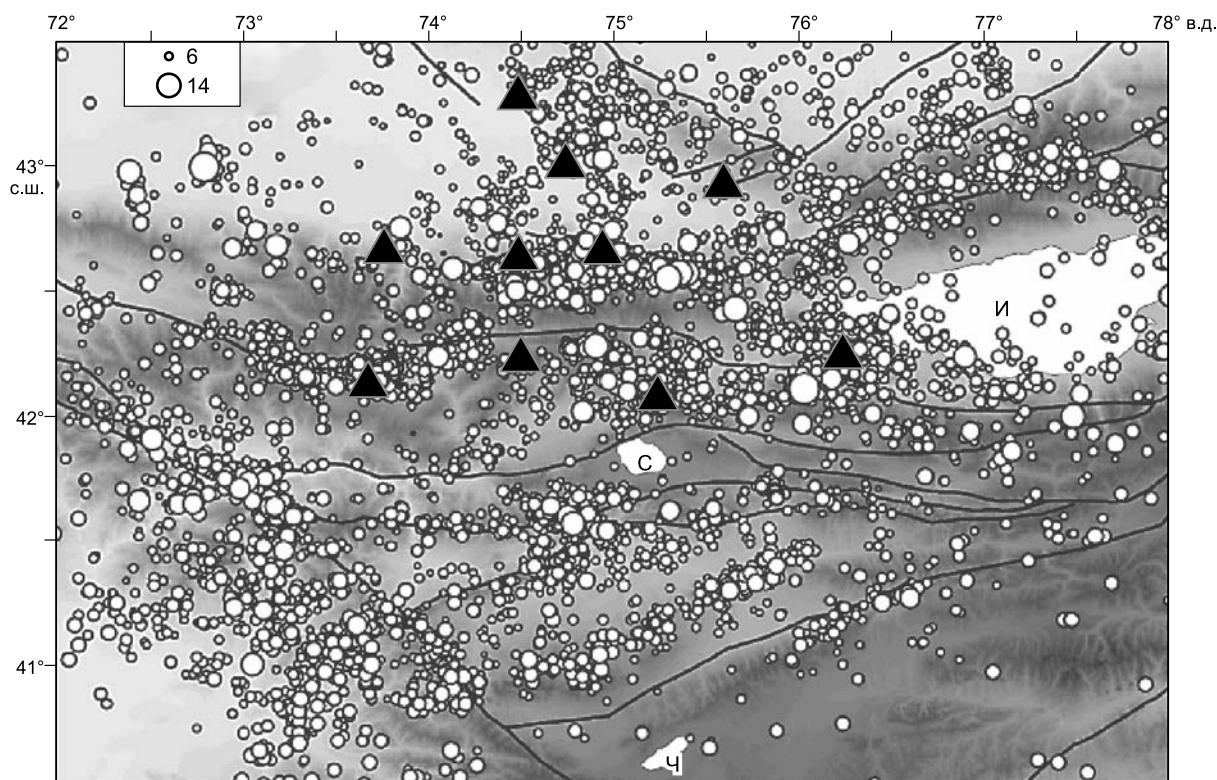
**Сейсмичность.** Особенность сейсмического режима Северного Тянь-Шаня обусловлена геологическим строением, интенсивностью протекающих здесь геодинамических процессов и связана с древ-

ними глубинными разломами — Северо-Тяньшаньским, Кеминским и Кунгейским (рис. 3). На его территории произошли такие разрушительные землетрясения, как Чиликское  $M = 8.3$  1889 г., Жаланаш-Тюпское  $M = 6.8$  1978 г., Сарыкамьшское  $M = 6.8$  1970 г., Верненское  $M = 7.3$  1887 г., Кеминское  $M = 8.2$  1911 г., Баласагунское  $M = 6.4$  1475 г., Беловодское  $M = 6.9$  1885 г., Суусамырское  $M = 7.3$  1992 г. [Геодинамика..., 2009]. Данные, показанные на рис. 3, охватывают большую область, чем рассматриваемый в работе регион, и поэтому дают возможность увидеть характер сейсмичности Северного Тянь-Шаня в соотношении ко всему Центральному Тянь-Шаню.

Относительно меньшей энергией землетрясений характеризуются сейсмогенные структуры, приуроченные к областям с устойчивым воздыманием на протяжении всего новейшего этапа. Сейсмически спокойными, или асейсмогенными, являются участки впадин, где движения отрицательного знака еще не сменились на положительные за счет захвата этих зон разрастающейся вширь областью воздымания [Базавлук, Юдахин, 1993]. Внутри Северо-Тяньшаньской зоны очаги группируются в пределах Кемино-Чиликского или Северо-Иссыккульского (хр. Кунгей), Сарыкамьшского (на рис. 2 не показан), Южно-Иссыккульского (хр. Терскей) и Южно-Чуйского участков с примерно одинаковым уровнем активности.

Сейсмичными структурами являются, как правило, краевые разломы или их отрезки. При этом эпицентры большинства землетрясений Северного Тянь-Шаня лежат в довольно узкой полосе, которая простирается вдоль северного склона Киргизского хребта, далее протягиваясь на восток до восточного погружения Кунгейского хребта и расположенного к северу Заилийского хребта (см. рис. 3). Несмотря на высокую плотность эпицентров, все же просматривается тенденция их группировки на малых площадях. Землетрясения Северного Тянь-Шаня являются «коровыми», их очаги располагаются в верхней части земной коры, а точнее в домезозойском основании.

Анализ данных о распределении глубин очагов землетрясений в пределах рассматриваемого региона показал, что очаги землетрясений в диапазоне глубин 0—5 км и 5—10 км расположены почти равномерно на всей территории исследований. С увеличением глубины очагов наблюдается все большая приуроченность землетрясений к определенным зонам. Фактически все сильные землетрясения Северо-Иссыккульской зоны приурочены к зоне хребтов Заилийского и Кунгейского Алатау, где глубины очагов достигают 30 км и более. Аналогичный вывод будет справедлив и для Сарыкамьшского и Каджисайского сейсмоактивных участков Южно-Иссыккульской зоны с глубиной очагов до 25—30 км.



**Рис. 3. Распределение сейсмических событий по данным сети KNET за 1994—2012 годы (7720 событий).**

Треугольники — станции сети KNET. Вверху слева показан масштаб магнитуд землетрясений. Озера: И — Иссык-Куль, С — Сон-Кель, Ч — Чатыр-Кель.

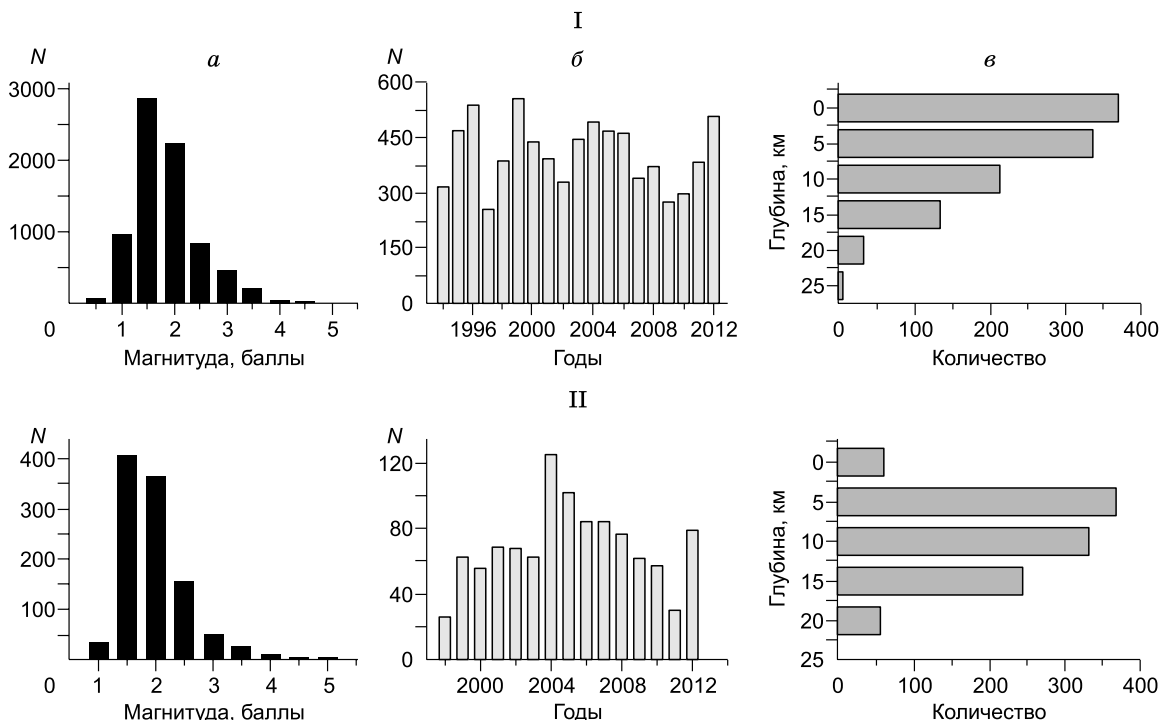
Исключением является западное погружение Терской хребта той же зоны, где очаги сильных землетрясений почти отсутствуют [Юдахин, 1983].

Сеть KNET (см. рис. 3) была создана в 1991 г. и включает в себя 10 цифровых широкополосных станций STS-2 (сейсмометры типа Streckeisen). Для определения параметров гипоцентра используются программа Нуросентер [Lienert et al., 1986] и скоростная модель литосферы [Roecker et al., 1993]. Эта программа позволяет определять координаты эпицентра, глубину и энергетический класс события, а также создает ARC-файл (файл архива фаз) с данными для дальнейшего его использования при расчете фокальных механизмов. Погрешность в определении времен вступления фронтов *P*-волн в среднем составляет 0.2—0.3 с, что соответствует неопределенности координат эпицентров 1200—1800 м. Ошибка определения глубины событий, происходящих внутри расположения станций сети KNET, не превышает 5 км [Сычева, Кузиков, 2012].

На рис. 4 представлены диаграммы (Ia, IIa) распределения числа землетрясений в разных диапазонах магнитуд для общего каталога землетрясений и для каталога фокальных механизмов. Представительность землетрясений первого каталога ограничена магнитудным уровнем в 1.5, а второго 2. Среднее годовое число событий, фиксируемых сетью KNET, достигает 350—400 (см. рис. 4, Ib). Пик наибольшего числа зафиксированных сетью KNET землетрясений приходится на 1996 и 1999 гг. Большинство землетрясений происходит в верхних 5 км, глубже 25 км землетрясения практически отсутствуют (см. рис. 4, Iv). Данные о механизмах очагов землетрясений получены в основном для глубин более 5 км (см. рис. 4, Iv), и среднее их число в год составляет около 80.

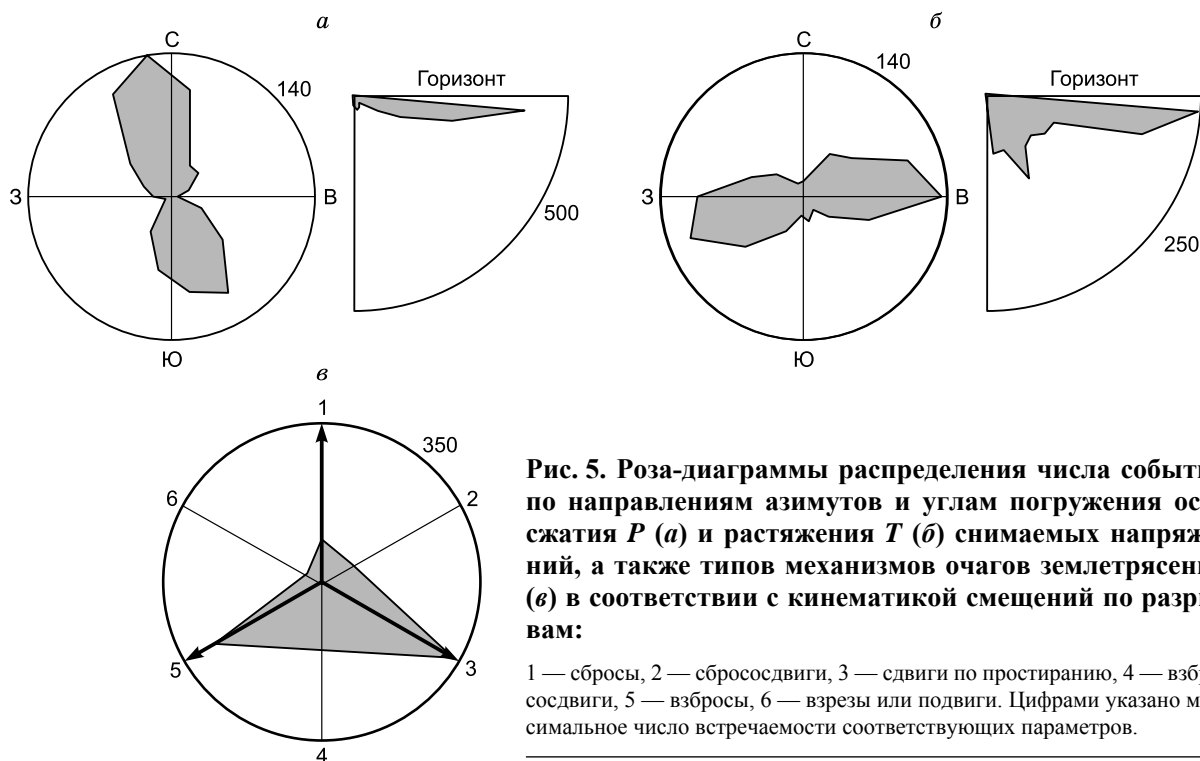
Поскольку одним из условий надежного определения фокального механизма сейсмического события является полное окружение эпицентра пунктами наблюдений, то рассматривается территория, ограниченная координатами расположения крайних станций сети: 42—43° по широте и 73.75—76.00° по долготе. Для расчета фокальных механизмов используется программа *Fpfit* [Reasenber, Oppenheimer, 1985]. Полученный за период наблюдения 1994—2012 гг. каталог фокальных механизмов включает в себя более 1056 сейсмических событий с магнитудами от 1.16 до 5.40 [Сычева и др., 2003, 2005, 2009]. В 1994, 1995 и 1996 гг. определений механизмов очагов было получено мало: соответственно 2, 2 и 9 событий, а в 1997 г. они вообще отсутствуют. Наиболее эффективно сеть KNET начала работать с 1998 г.

**Каталог механизмов очагов землетрясений.** Для Северного Тянь-Шаня характерно достаточно большое разнообразие типов механизмов очагов землетрясений. Как видно из данных рис. 5, а, ось сжа-



**Рис. 4. Характеристики сейсмичности по данным сети KNET.**

Каталог землетрясений: Ia — распределение по магнитудам; Ib — распределение во времени; Iv — распределение по глубинам. Каталог механизмов очагов землетрясений: IIa — распределение по магнитудам; IIб — распределение во времени; IIв — распределение по глубинам.

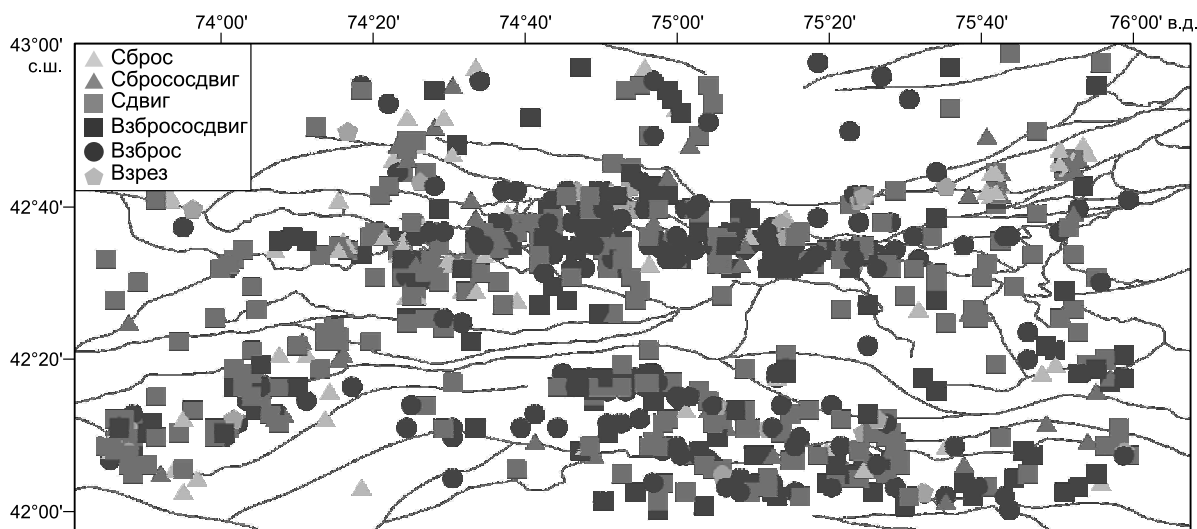


**Рис. 5. Роза-диаграммы распределения числа событий по направлениям азимутов и углам погружения осей сжатия  $P$  (а) и растяжения  $T$  (б) снимаемых напряжений, а также типов механизмов очагов землетрясений (в) в соответствии с кинематикой смещений по разрывам:**

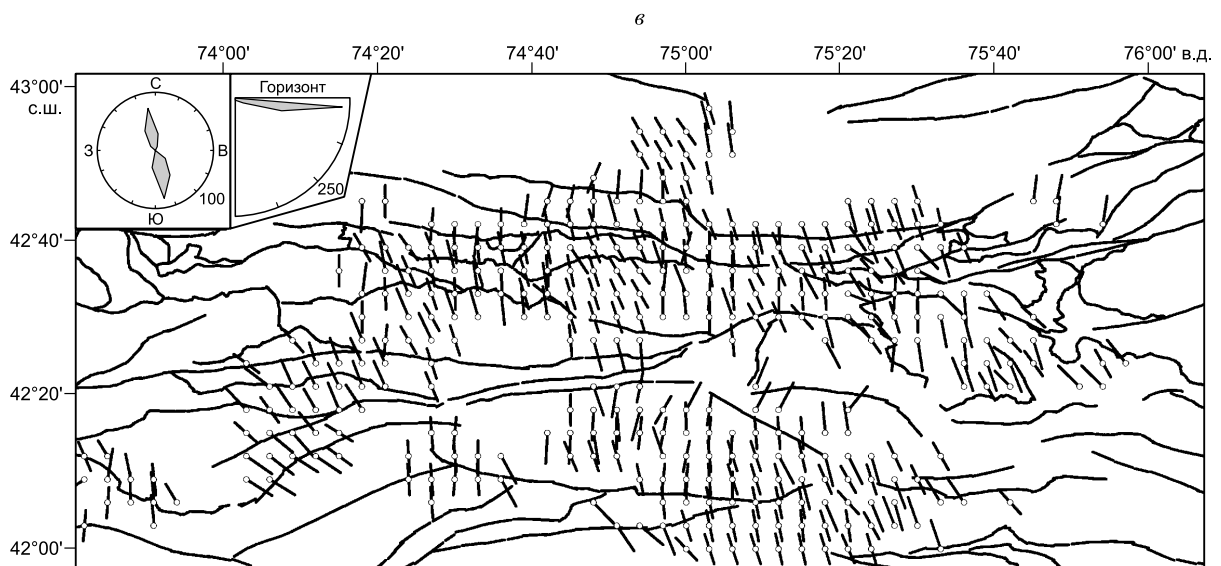
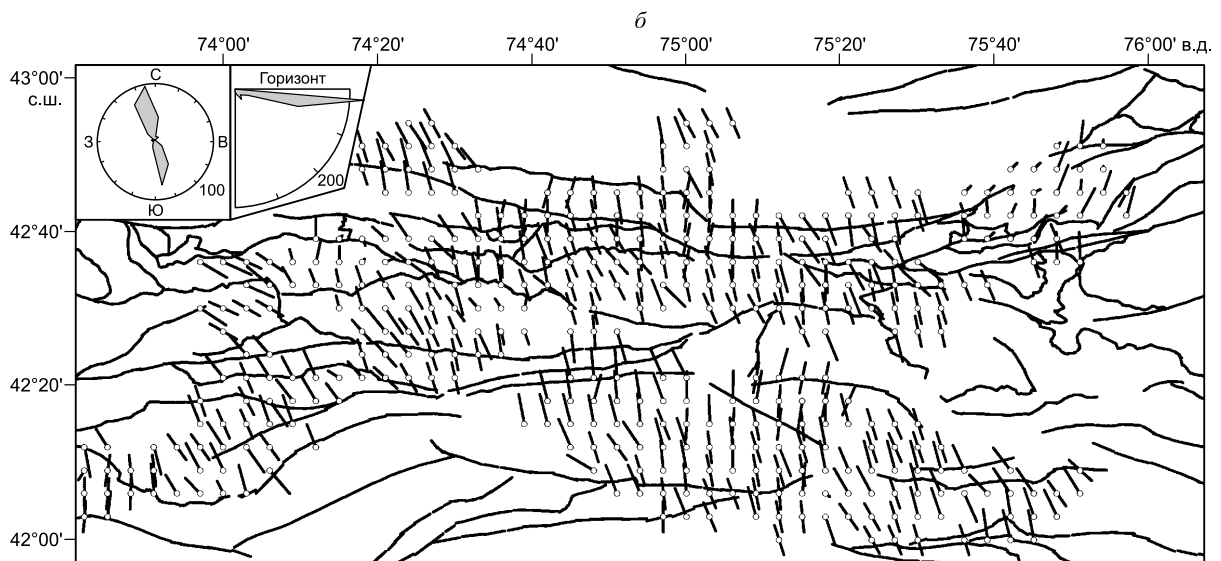
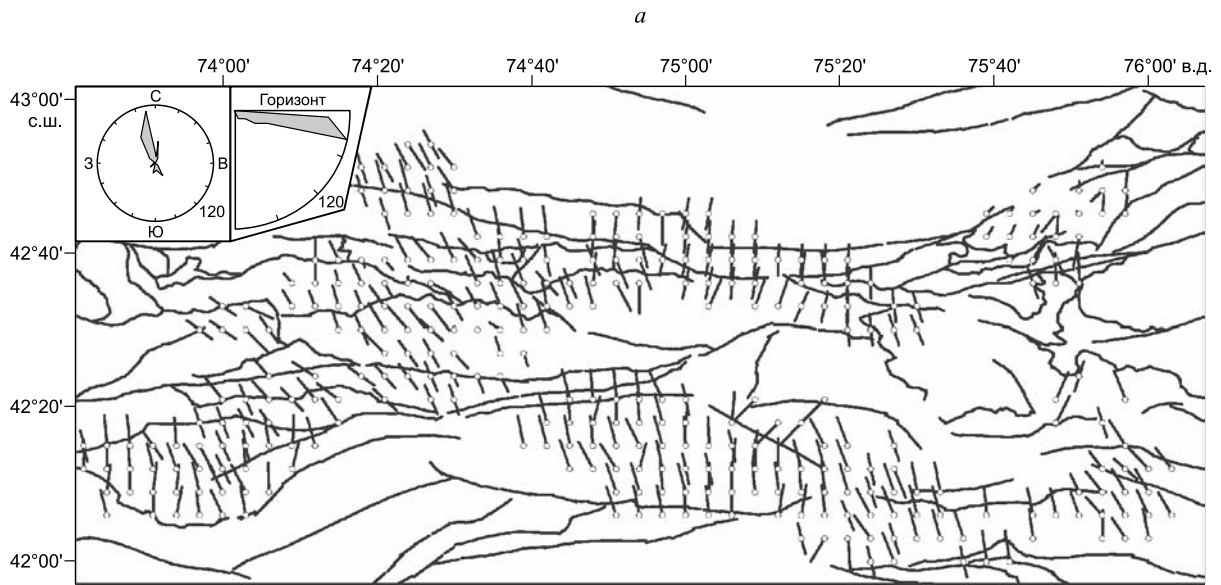
1 — сбросы, 2 — сбрососдвиги, 3 — сдвиги по простиранию, 4 — взбрососдвиги, 5 — взбросы, 6 — взрезы или подвиги. Цифрами указано максимальное число встречаемости соответствующих параметров.

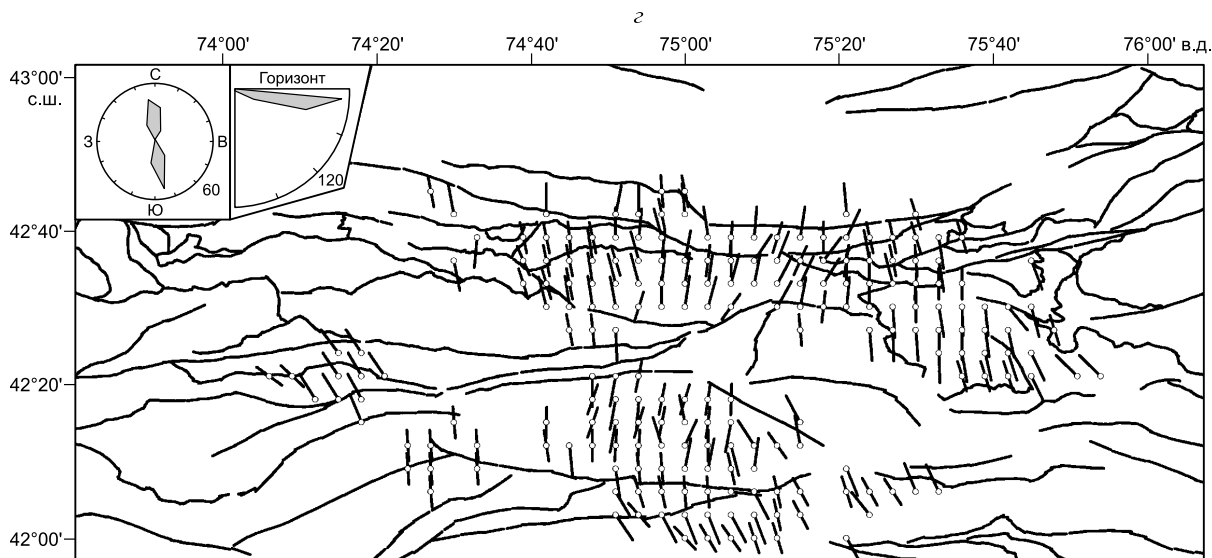
тия  $P$  снимаемых напряжений в очагах землетрясений для основной части событий субгоризонтальна и лишь около 10 % событий имеют углы погружения этой оси большие  $55^\circ$ . Ось растяжения  $T$  снимаемых напряжений (см. рис. 5, б) также имеет ярко выраженную представительность пологого погружения, но здесь достаточно много и событий с большими углами погружения (33 %).

Выполнив деление механизмов очагов землетрясений на шесть кинематических типов [Ребецкий, 2007а], замечаем, что в коре Северного Тянь-Шаня преобладающими являются три разновидности механизмов. В первом из них ось сжатия  $P$  субгоризонтальна и ориентирована в северо-восточном направлении, а ось растяжения  $T$  субвертикальна. Этот тип очагов характеризуется взбросовыми движениями (см. рис. 5). Второму типу отвечает субгоризонтальная ось растяжения  $T$ , ориентированная в северо-восточном направлении, а ось сжатия  $P$  круто наклонена на юго-восток, что свидетельствует о сбрососдвиговом характере движений. Для третьего типа механизмов характерно то, что обе оси субгоризонтальны, но ось сжатия ориентирована в северо-западном направлении, а растяжения — в северо-восточном, что указывает на сдвиговые движения в очагах. Как следует из данных рис. 5, в, взбросы, сдвиги и взбрососдвиги преобладают в коре исследуемого региона и составляют от общего числа соот-



**Рис. 6. Районирование коры Северного Тянь-Шаня по типам механизмов очагов землетрясений.**





**Рис. 7. Проекция на горизонтальную плоскость погружения осей главных напряжений  $\sigma_3$ .**

Глубинные уровни реконструкции напряжений: *a* — 0—10 км; *b* — 5—15 км; *в* — 10—20 км; *г* — 15—25 км. Случаи, когда кружок посередине оси, отвечает субгоризонтальной ориентации (угол погружения менее 7.5°). В верхнем левом углу показаны роза-диаграммы, определяющие представимость различных диапазонов простирания (через 20°) и погружения (через 10°) осей этого напряжения.

ответственно около 27.8, 34 и 15.6 %. Сбросы и сбрососдвиги составляют около 10 и 8.5 %, а взрез около 3.9 %.

На рис. 6 показано пространственное распределение в коре различных типов механизмов очагов землетрясений. Из приведенного рисунка видно, что практически повсеместно наблюдаются вариации кинематических типов механизмов. Взбросы часто сочетаются со взбрососдвигами, а иногда и с чистыми сдвигами. Землетрясения с механизмами в виде взбросов и взбрососдвигов наблюдаются в коре практически всего региона. Сбросы, хотя и в меньшем количестве, но также достаточно часто встречаются. Согласно данным рис. 6, сбросы и сбрососдвиги более представлены в восточной и западной частях коры исследуемого региона. В центральной его части эти механизмы иногда встречаются, но здесь очевидное преимущество имеют механизмы типа взбросов и взбрососдвигов.

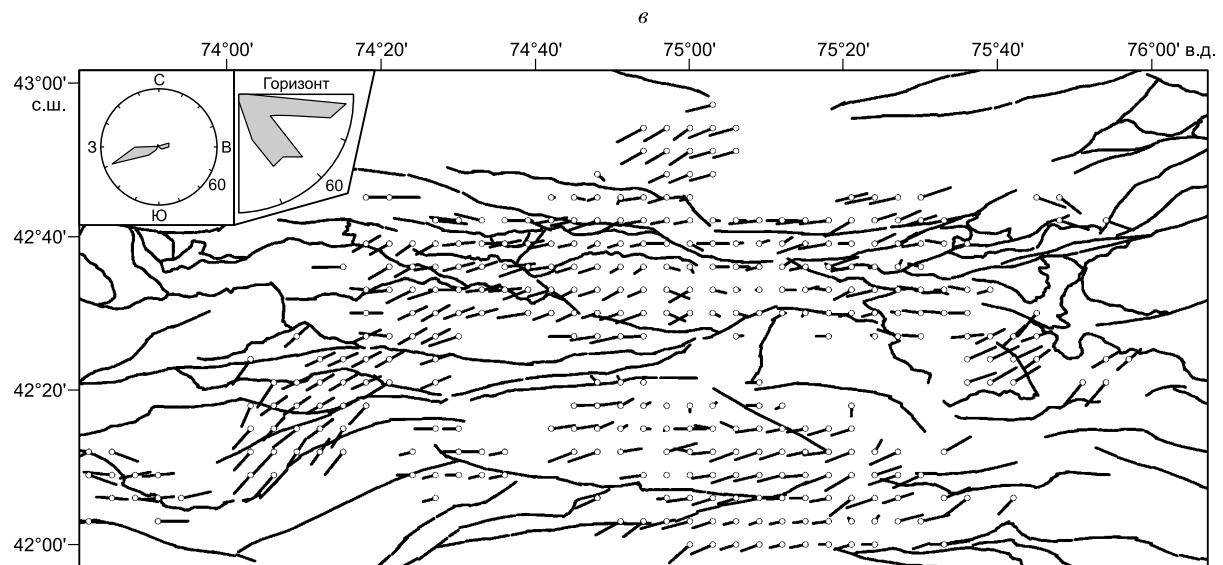
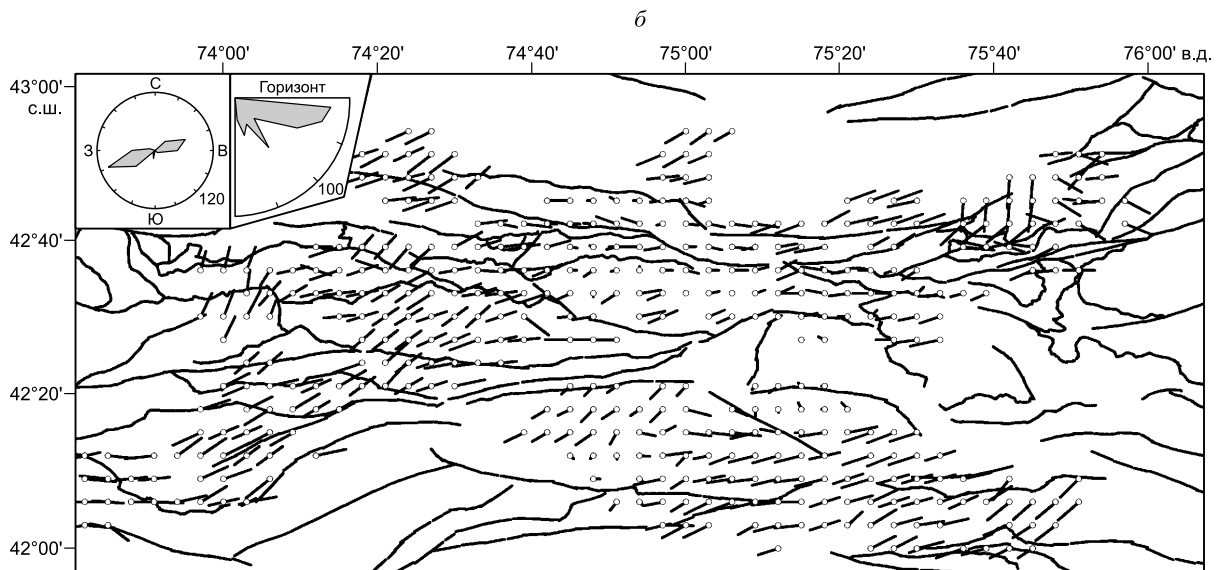
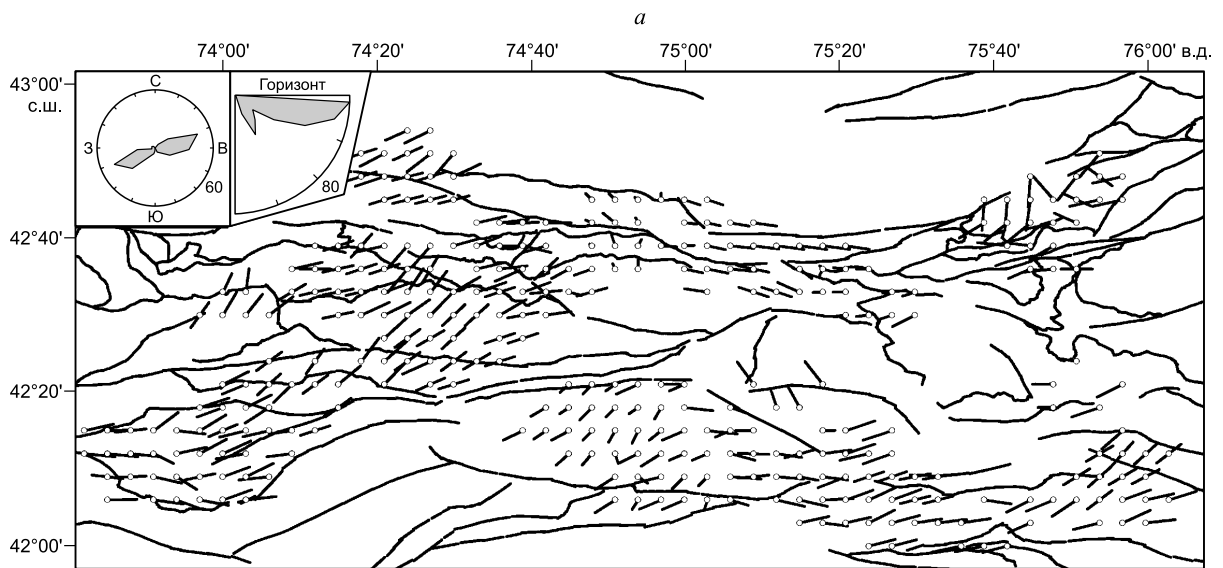
При реконструкции напряжений использованы механизмы очагов землетрясений в магнитудном диапазоне от 1.5 до 3.5, что привело к получению данных о напряжениях регионального масштаба.

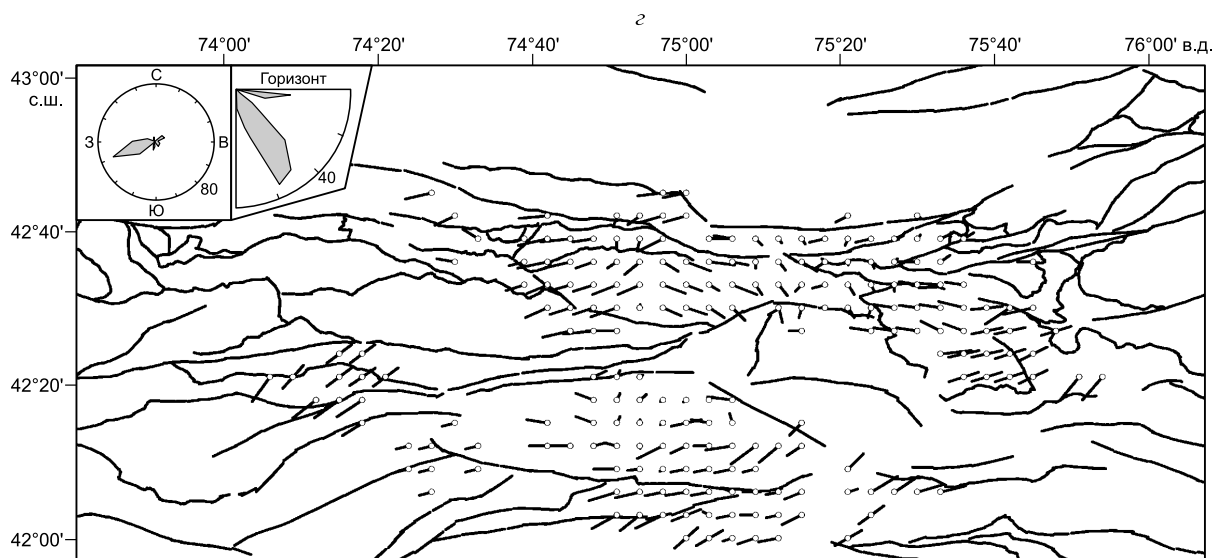
## РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

**Идеология реконструкции напряжений в коре Тянь-Шаня.** Для реконструкции природных напряжений по сейсмологическим данным о механизмах очагов землетрясений нами использовался развиваемый в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН метод катакластического анализа (МКА) разрывных смещений [Ребецкий, 1999, 2003, 2005, 2007а, 2009а,б,в; Rebetsky et al., 2012]. Этот метод позволяет определять не только параметры эллипсоида напряжений (ориентацию трех главных осей и коэффициент Лоде—Надаи), но и полные компоненты тензора напряжений, привлекая для этого в качестве дополнительных данных обобщение результатов экспериментов по разрушению горных пород [Byerlee, 1978; и др.], а также данные о величине сброшенных напряжений, о рельефе поверхности и плотностях пород основных слоев земной коры. В данной статье были использованы процедуры МКА только первых его двух этапов, позволяющих определять параметры эллипсоида напряжений и редуцированные величины максимальных касательных напряжений и эффективного давления.

Анализ плотности распределения и диапазона магнитуд очагов землетрясений (1056 событий) из каталога механизмов показал, что линейный масштаб осреднения реконструируемых напряжений может соответствовать 10—15 км. Поэтому реконструкция напряжений выполнялась по сетке  $0.05 \times 0.05^\circ$  в латеральном направлении. По глубине расчеты выполнялись для горизонтальных полос мощностью 10 км, середины которых находились на глубинах 5, 10, 15 и 20 км (т. е. полосы расчета напряжений пересекались по глубине). По результатам расчетов были получены данные о параметрах напряжений для 286, 467, 407 и 142 доменов, соответствующих глубинам 5, 10, 15 и 20 км.







**Рис. 8. Проекция на горизонтальную плоскость погружения осей главных напряжений  $\sigma_1$ .**

Глубинные уровни реконструкции напряжений: *a* — 0—10 км; *б* — 5—15 км; *в* — 10—20 км; *г* — 15—25 км. В верхнем левом углу показаны роза-диаграммы, определяющие представительность различных диапазонов простирания и погружения осей этого напряжения.

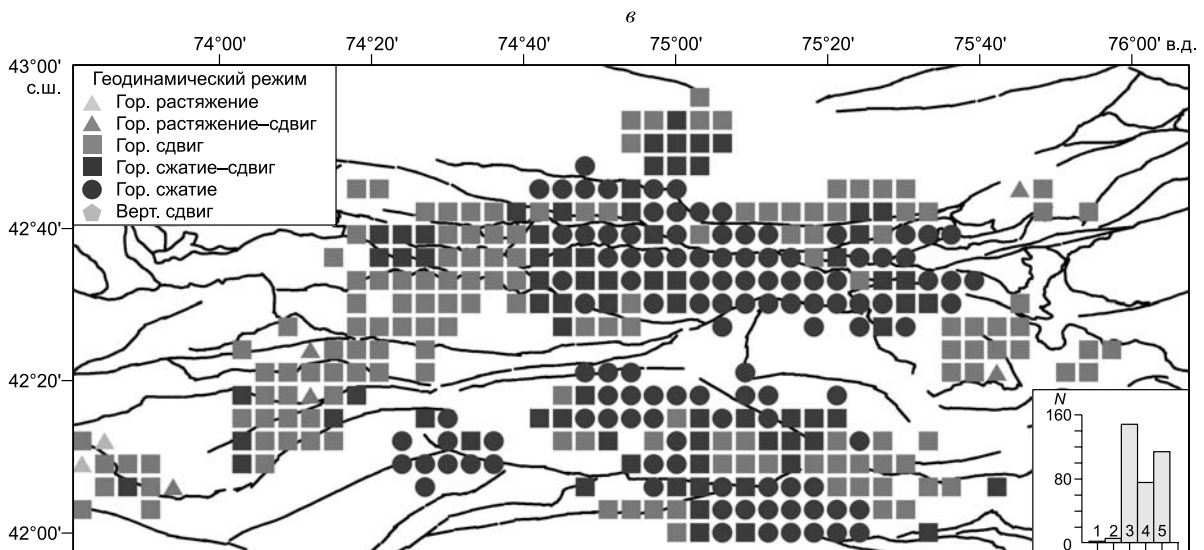
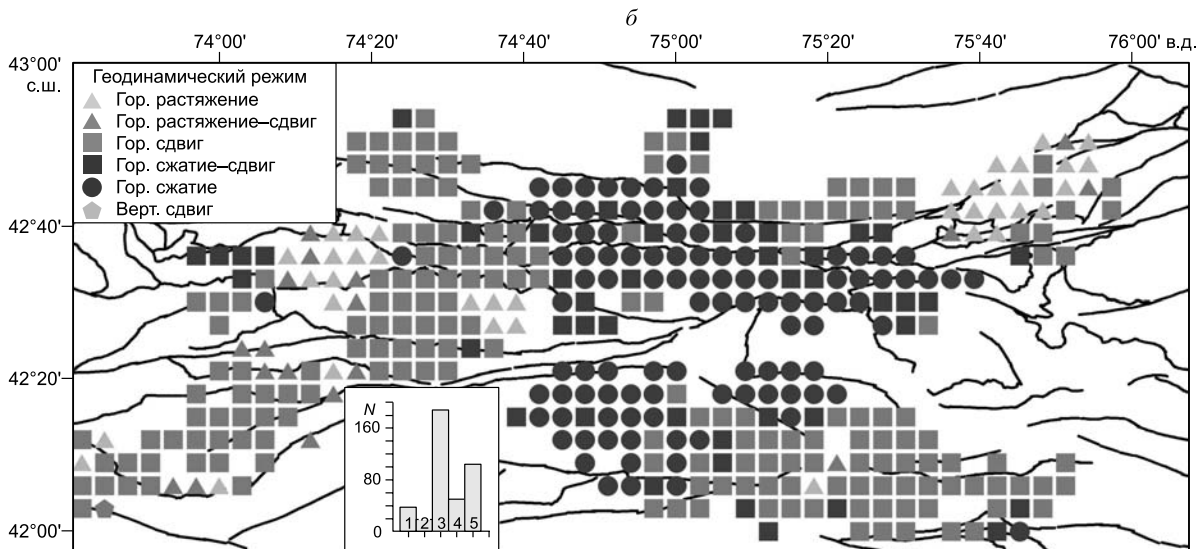
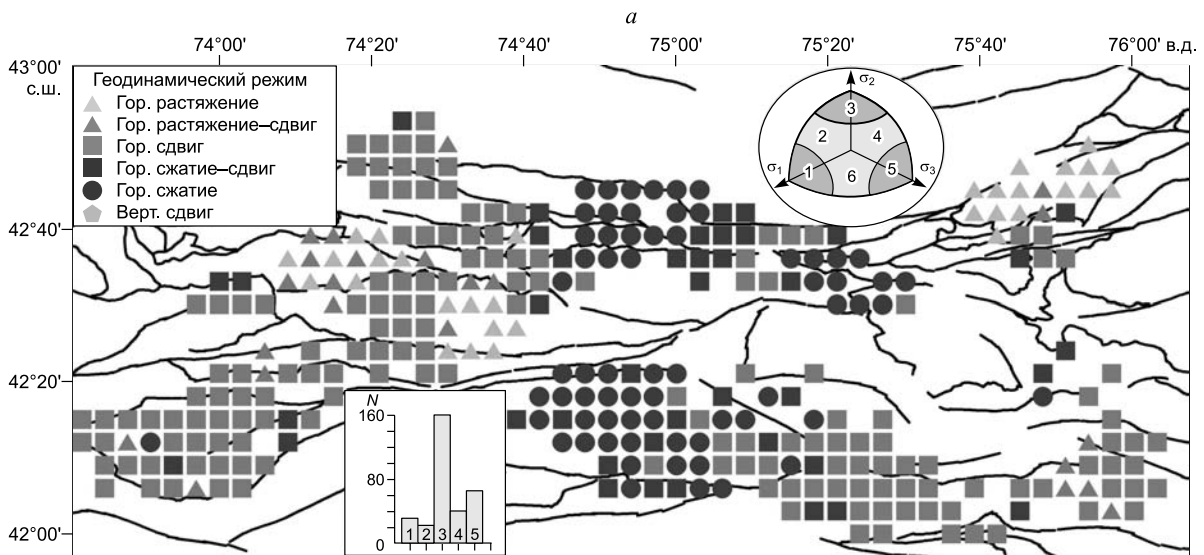
Однородные выборки механизмов очагов землетрясений содержали не менее шести событий, что позволяло в основном выдерживать точность определения осей главных напряжений в 10—15° и коэффициента Лоде—Надаи, характеризующего вид тензора напряжений, не хуже 0.2. Созданные на первом этапе реконструкции параметров эллипсоида напряжений (ориентация трех главных осей и коэффициент Лоде—Надаи) однородные выборки механизмов очагов землетрясения позволяют на втором этапе расчета МКА определять относительные величины напряжений.

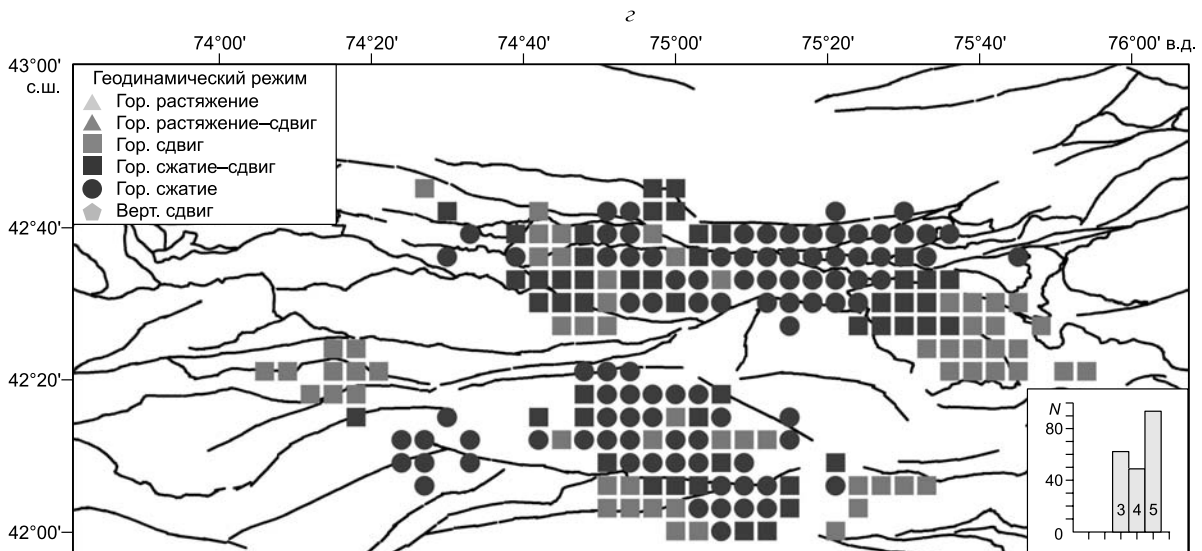
Следует особо отметить, что в статье приводятся новые результаты, несколько отличающиеся от опубликованных ранее в работах [Ребецкий и др., 2009, 2010; Rebetsky et al., 2012]. Ранее реконструкция выполнялась по данным каталога механизмов очагов землетрясений за период с 1998 по 2008 г., насчитывавший 889 событий, что дало возможность для четырех слоев коры получить данные в 283, 384, 328 и 176 доменах соответственно. Увеличение числа механизмов очагов землетрясений (почти на 9 %) позволило, с одной стороны, несколько расширить область коры, для которой получены данные о напряженном состоянии (это особенно касалось средних слоев коры). С другой стороны, что являлось более важным, удалось выполнить реконструкцию с более жесткими требованиями к формированию однородных выборок землетрясений и с меньшим окном усреднения напряжений. Так, если в предыдущем расчете минимальное значение событий в однородной выборке допускалось равное 5, то в расчете, выполненном в данной работе, минимальное число событий было 6. Опыт реконструкции напряжений показывает, что увеличение событий в однородной выборке механизмов очагов землетрясений дает возможность получать параметры напряженного состояния с меньшей пространственной вариабельностью.

**Параметры эллипсоида напряжений.** Реконструкция показала, что оси алгебраически минимального главного напряжения (максимального сжатия)  $\sigma_3$  имеют субмеридиональное простирание 330—360°N и 150—180°S (рис. 7, *a*). На глубине 0—10 км погружение осей этого главного напряжения практически везде на север и северо-запад. С увеличением глубины появляется достаточно большое число (около 30 %) доменов коры с осью  $\sigma_3$ , погружающейся на юг. Погружение этих осей в основном пологое (погружению в 0—20° отвечают около 50 % определений). Для самого верхнего слоя на роза-диаграммах, изображенных в верхнем левом углу карт, наиболее хорошо проявляется и субвертикальная ориентация этих осей (до 10 % доменов). Подобные домены в меньшем числе существуют и для глубинного уровня 5—15 км и полностью исчезают для глубин 10—20 и 15—25 км.

Области верхней части коры, где оси  $\sigma_3$  имеют субвертикальное направление, приурочены к восточному сегменту Чуйской впадины, северному и южному склонам Киргизского хребта к северо-востоку от Суусамырской впадины.

Оси алгебраически максимального напряжения  $\sigma_1$  (минимального сжатия или максимального девиаторного растяжения) имеют несколько большую вариабельность ориентации, чем напряжения макси-





**Рис. 9. Геодинамический тип напряженного состояния.**

Глубинные уровни реконструкции напряжений: *a* — 0—10 км; *б* — 5—15 км; *в* — 10—20 км; *г* — 15—25 км. Для рисунка *a* показано деление квадранта, построенного на осях главных напряжений, на 6 зон. Попадание оси на зенит в каждую из зон определяет соответствующий геодинамический тип напряженного состояния: 1 — горизонтальное сжатие, 2 — горизонтальное сжатие со сдвигом, 3 — сдвиг в горизонтальной плоскости, 4 — горизонтальное растяжение со сдвигом, 5 — горизонтальное растяжение, 6 — сдвиг в вертикальной плоскости. Внизу диаграмма, характеризующая представительность каждого типа геодинамического режима.

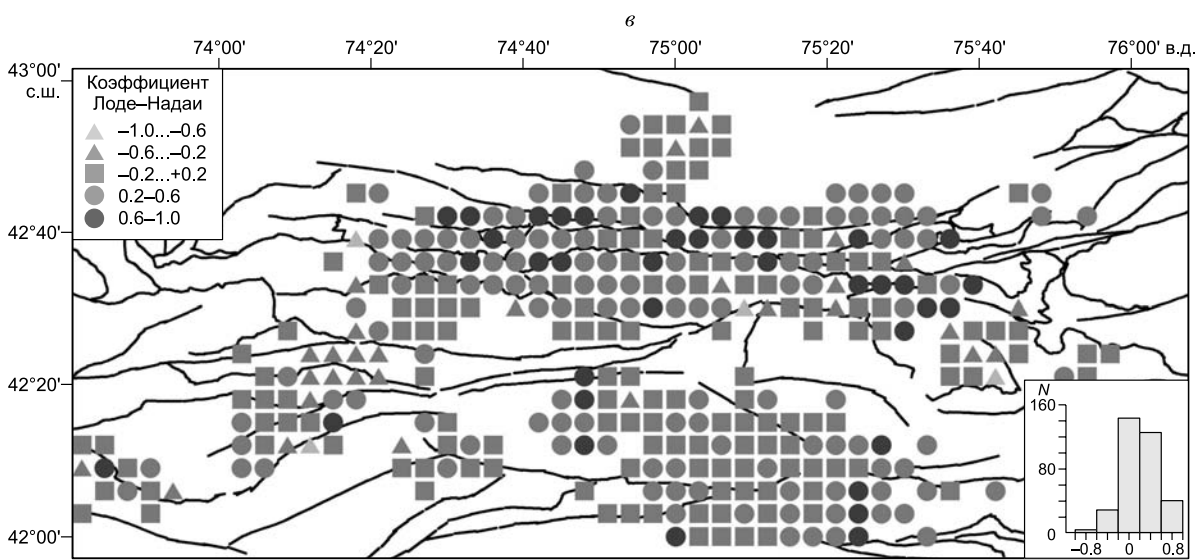
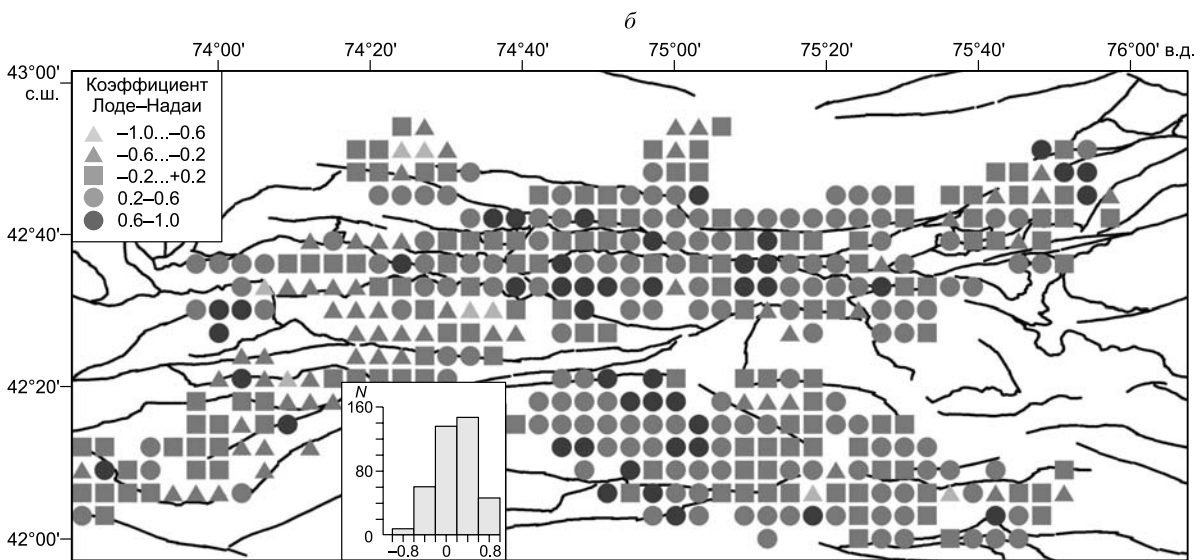
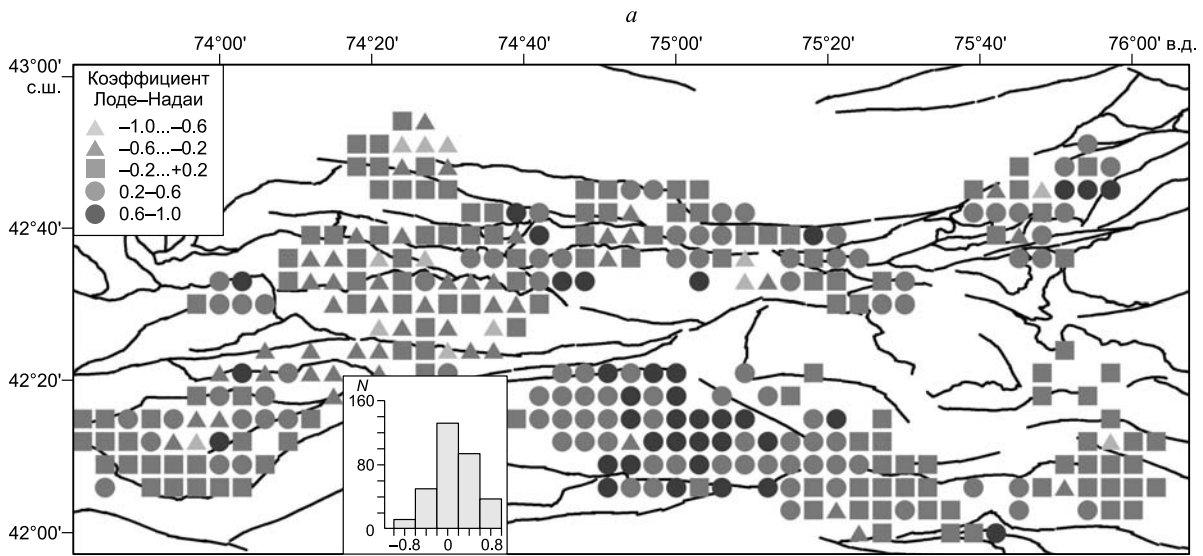
мального сжатия, и в двух верхних слоях в основном направлены субширотно  $240\text{--}270^\circ\text{W}$  и  $60\text{--}90^\circ\text{E}$  (рис. 8, *a*, *б*). На глубинах 10—20 и 15—25 км (см. рис. 8, *в*, *г*) направления с погружением этих осей на запад имеют существенно большее преимущество. Для малых глубин расчета 0—10 и 5—15 км определений  $\sigma_1$  с пологим погружением (около  $20^\circ$ ) много больше, чем с крутым (углы погружения около  $50\text{--}70^\circ$ ). На больших глубинах наблюдаются два близких по представительности угла преимущественного погружения этой оси главного напряжения: пологое и достаточно крутое. Области с субвертикальной ориентацией осей  $\sigma_1$  наиболее интенсивно представлены на глубинах 10—20 и 15—25 км в центральной части региона. Причину изменения ориентации оси этого главного напряжения с субгоризонтального положения на субвертикальное скорее следует связывать с эволюцией рельефа кровли коры, чем с различием свойств пород.

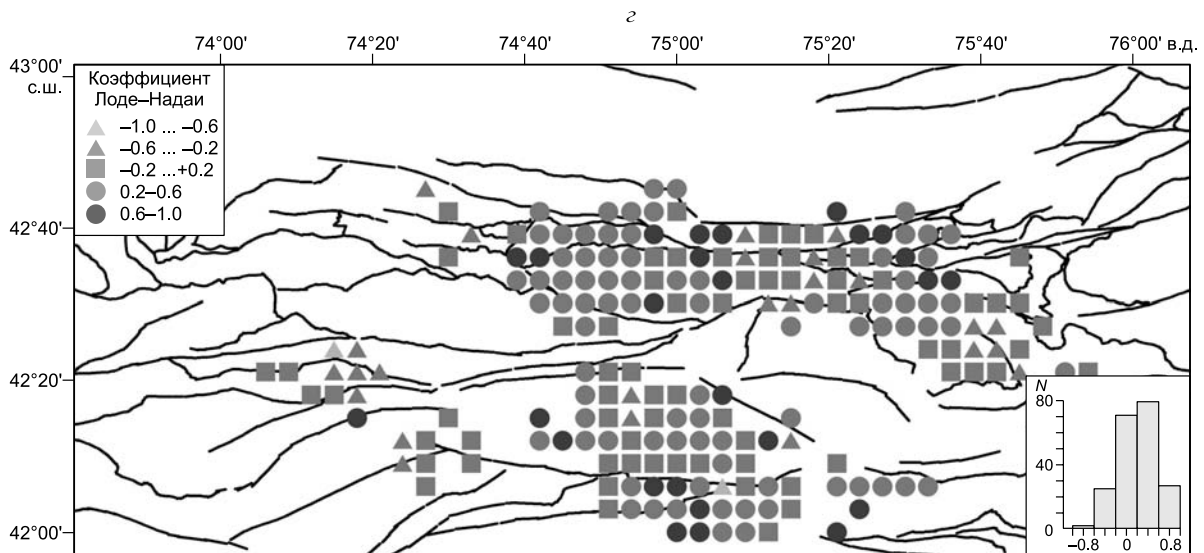
Анализ геодинамического типа напряженного состояния (рис. 9) показал, что большая часть региона имеет режим горизонтального сдвига при достаточно широком представительстве режима горизонтального сжатия. Однако кроме этих двух типов напряженного состояния выявляются три локальные области горизонтального растяжения, где оси максимального сжатия ориентированы субвертикально, а оси минимального сжатия субгоризонтальны. Две из них находятся в западном сегменте Киргизского хребта, а одна — в восточной части Чуйской впадины. Для первых двух участков коры оси максимального девиаторного растяжения ориентированы в восток — северо-восточном направлении, а для третьего — в субширотном.

В целом геодинамический тип напряженного состояния горизонтального сжатия в субмеридиональном направлении наблюдается в коре центральной части Северного Тянь-Шаня. Со всех сторон эта зона окружена корой, где имеет место горизонтальный сдвиг и его сочетание со сжатием и растяжением.

Результаты расчетов коэффициента Лоде—Надаи показали, что в земной коре Северного Тянь-Шаня основной вид тензора напряжений отвечает чистому сдвигу со значениями коэффициента, изменяющимися от  $-0.2$  до  $0.2$  (рис. 10). При этом существует достаточное число доменов, где величина этого коэффициента близка к  $+1$  и  $-1$ . Здесь имеет место соответственно одноосное сжатие и растяжение.

**Характерные параметры напряженного состояния в географической системе координат.** Как выше уже отмечалось, реконструкции природных напряжений по алгоритму первого этапа МКА позволяют получить данные о параметрах эллипсоида напряжений. Если этот эллипсоид рассечь горизонтальной плоскостью, то наибольшая и наименьшая оси полученного в сечении эллипса будут показывать направления наибольших и наименьших сжимающих напряжений (в некоторых случаях растя-





**Рис. 10. Значения коэффициента Лодэ—Надаи.**

Глубинные уровни реконструкции напряжений: *a* — 0—10 км; *б* — 5—15 км; *в* — 10—20 км; *г* — 15—25 км. Внизу диаграмма, характеризующая представительность разных диапазонов значений коэффициента Лодэ—Надаи ( $-1 \leq \mu_0 \leq 1$ ).

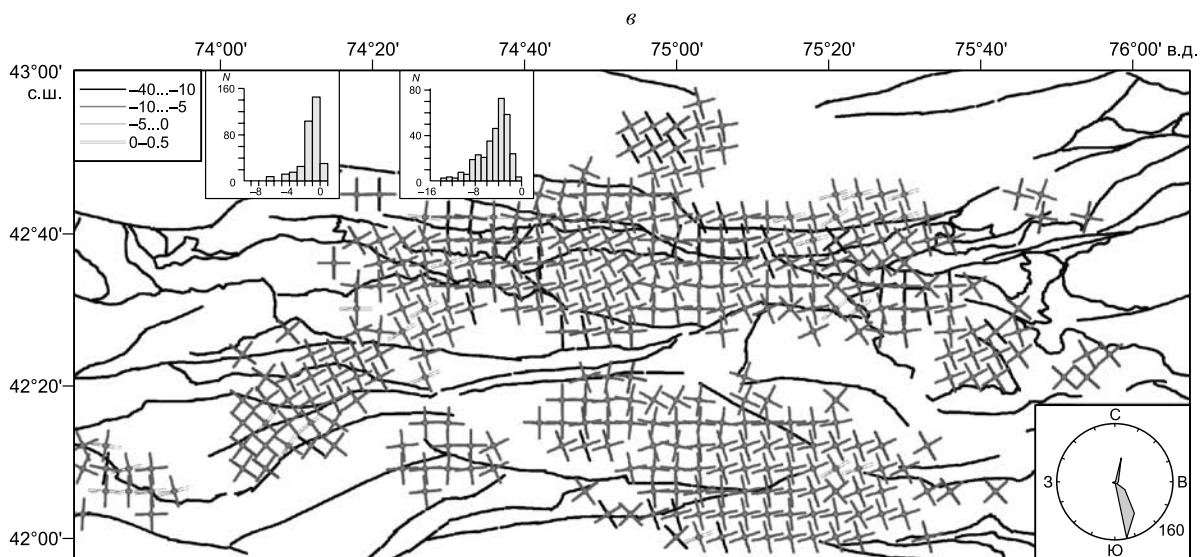
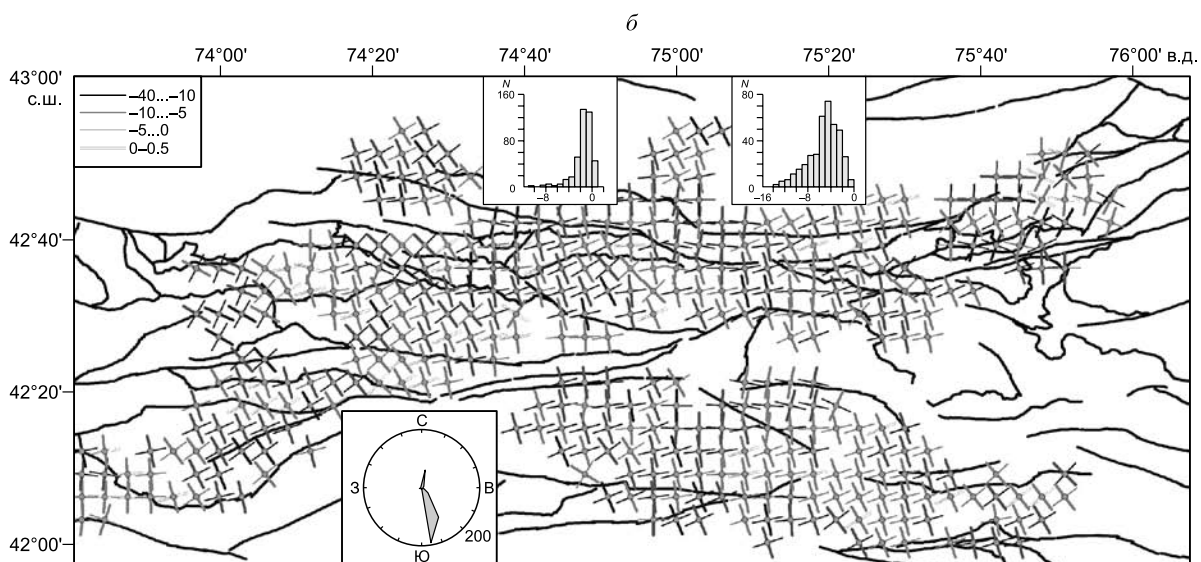
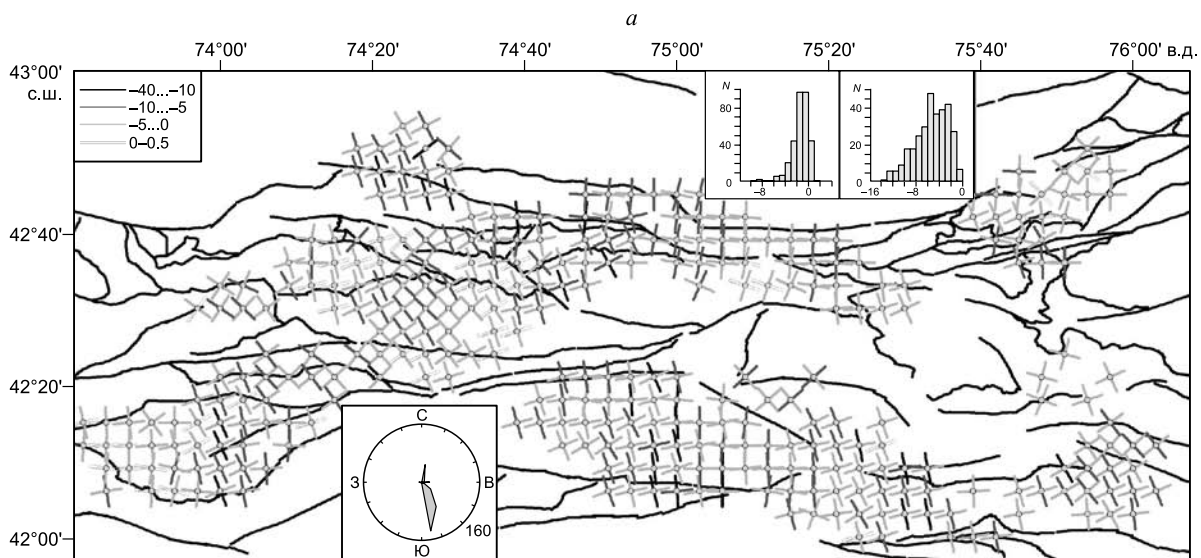
гивающих напряжений), действующих в горизонтальном направлении. В работах Л.М. Зобак [Zoback, 1992] эти оси именуется  $SH_{max}$  и  $SH_{min}$  (максимальное и минимальное горизонтальное сжатие). Поле ориентации этих осей лучше сопоставляется с полем деформаций, которые можно получить из данных GPS геодезии.

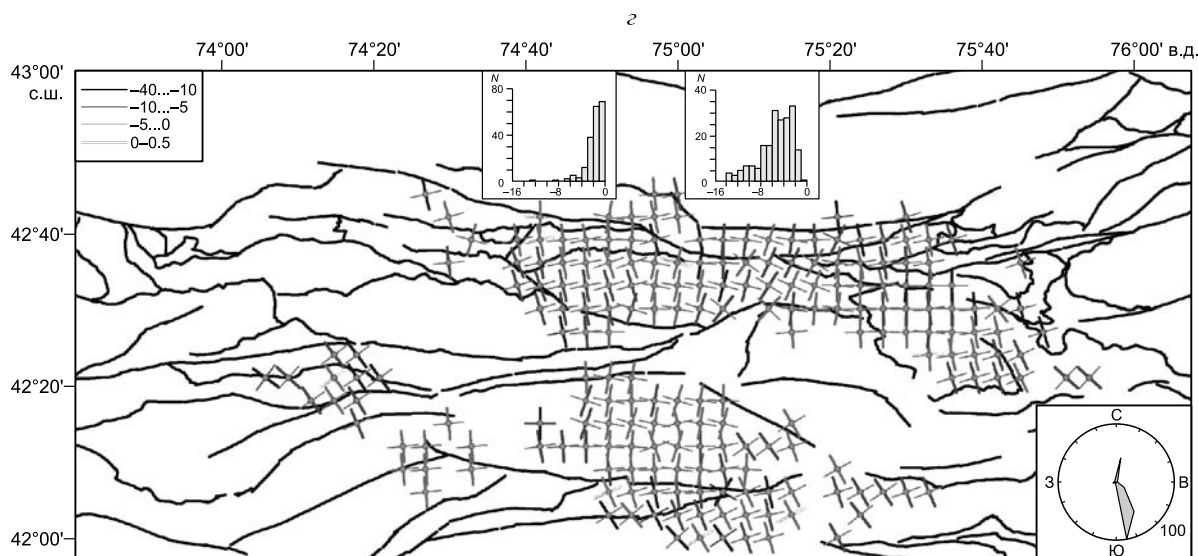
Как следует из результатов, представленных на рис. 11, оси максимального горизонтального сжатия наиболее часто дают субмеридиональную ориентацию с простираем в диапазоне  $150—170^\circ S$  или эквивалентное ему  $330—350^\circ N$ . Наиболее часто отклонения от этого правила имеют место в верхнем слое 0—10 км. При этом субширотные простираения осей максимального горизонтального сжатия наблюдаются в коре Чуйской впадины не только в верхнем слое 0—10 км, но и при расчете для глубины 5—15 км.

Данные рис. 11 можно использовать в дополнение к данным о геодинамических типах напряженного состояния (см. рис. 9). По ним можно сказать, в каком направлении для участков с горизонтальным сжатием должны наблюдаться максимальные деформации укорочения или для участков с горизонтальным растяжением — деформации максимального удлинения или минимального укорочения.

В географической системе координат также удобно представить деформирующее воздействие на кору со стороны мантии, выражающееся в различии по глубине горизонтальных движений. Если кора и мантия имеют разные скорости горизонтальных смещений, то между ними должны возникать сдвиговые напряжения. Эти напряжения будут в наибольшем виде проявляться на субгоризонтальных площадках. Величина этих касательных напряжений будет отражать больший или меньший уровень разности скоростей движения в горизонтальном направлении слоев коры и мантии, а направления действия этих касательных напряжений будут показывать направление относительного смещения слоев коры или коры в целом относительно мантии. Поскольку такие движения должны отражаться в появлении поддвиговых разрывов сплошности, то касательные напряжения, действующие на горизонтальных площадках, можно также именовать поддвиговыми касательными напряжениями.

На рис. 12 показаны направления и относительные значения поддвиговых касательных напряжений для горизонтальных площадок, нормали к которым направлены к центру Земли. Видно, что эти направления имеют достаточно мозаичное распределение. Число доменов с ориентацией таких касательных напряжений на север остается минимальным на всех глубинных уровнях реконструкции напряжений. Наиболее выдержано направление действия поддвиговых касательных напряжений для верхнего слоя 0—10 км. Здесь, за небольшим исключением, нижние слои коры смещаются относительно верхнего слоя на юг (другой вариант интерпретации: верхний слой смещается относительно нижних слоев коры на север). В более глубоких слоях больше всего представлено юг—юго-западное направление смещения. Однако здесь разброс в их ориентации увеличивается, появляется все больше доменов, для которых направления этих касательных напряжений субширотное (на восток или на запад). На глуби-





**Рис. 11. Ориентация осей максимального (утолщенные линии) и минимального сжатия (тонкие линии) в горизонтальной плоскости.**

Глубинные уровни реконструкции напряжений: *a* — 0—10 км; *b* — 5—15 км; *c* — 10—20 км; *z* — 15—25 км. Внизу роза-диаграмма представительности простирания осей максимального горизонтального сжатия, вверху диаграммы, характеризующие редуцированные значения этих напряжений (слева  $Sh_{min}$ , а справа  $Sh_{max}$ ). Оттенки серого для осей  $Sh_{max}$  (утолщенные) и  $Sh_{min}$  (тонкие) отражают интенсивность редуцированных значений эффективных напряжений (нормировка на прочность сцепления  $\tau_c$ ).

нах 10—20 км число доменов с направлениями действия касательных напряжений на восток, юг и запад практически выравнивается. На глубине 15—25 км вновь преимущество получает направление на юг при достаточной представительности направления на запад. Подобные глубинные изменения показывают, что главный концентратор неоднородности горизонтальных движений должен находиться где-то на уровне средней коры и его влияние с глубиной должно затухать.

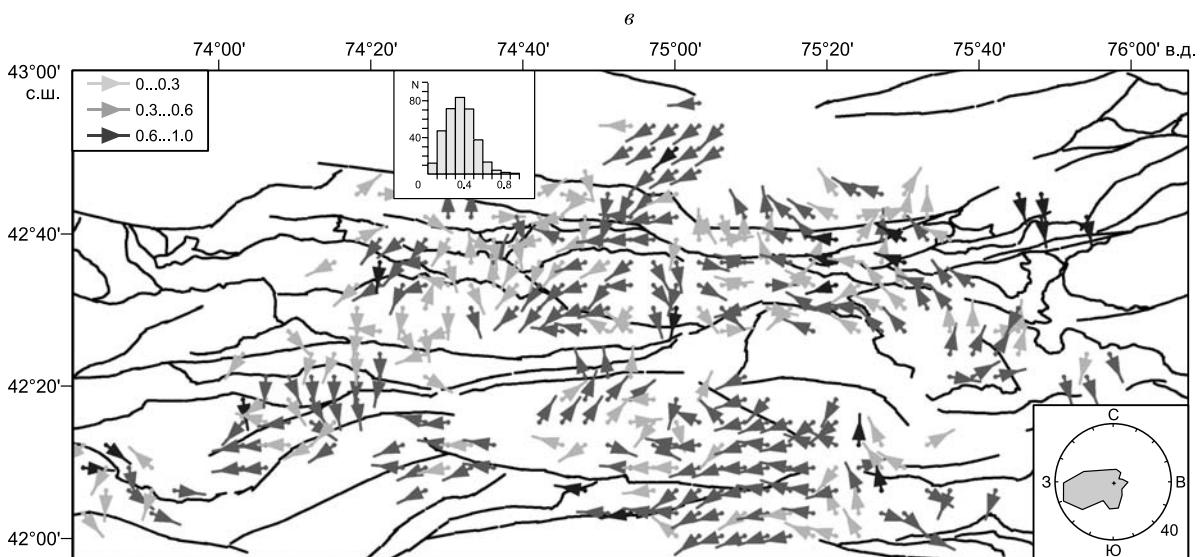
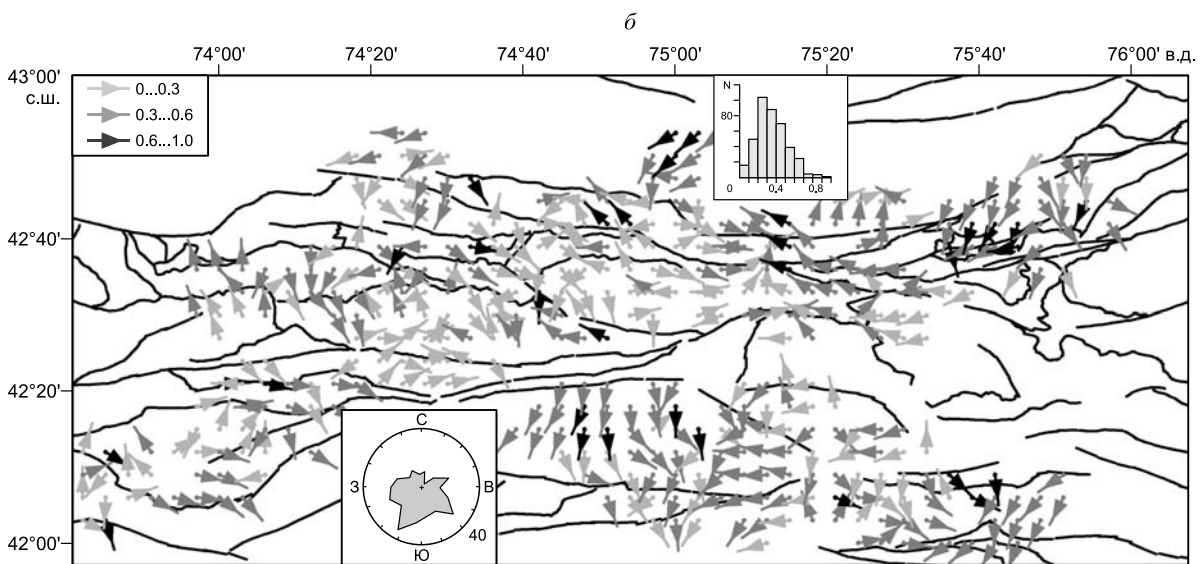
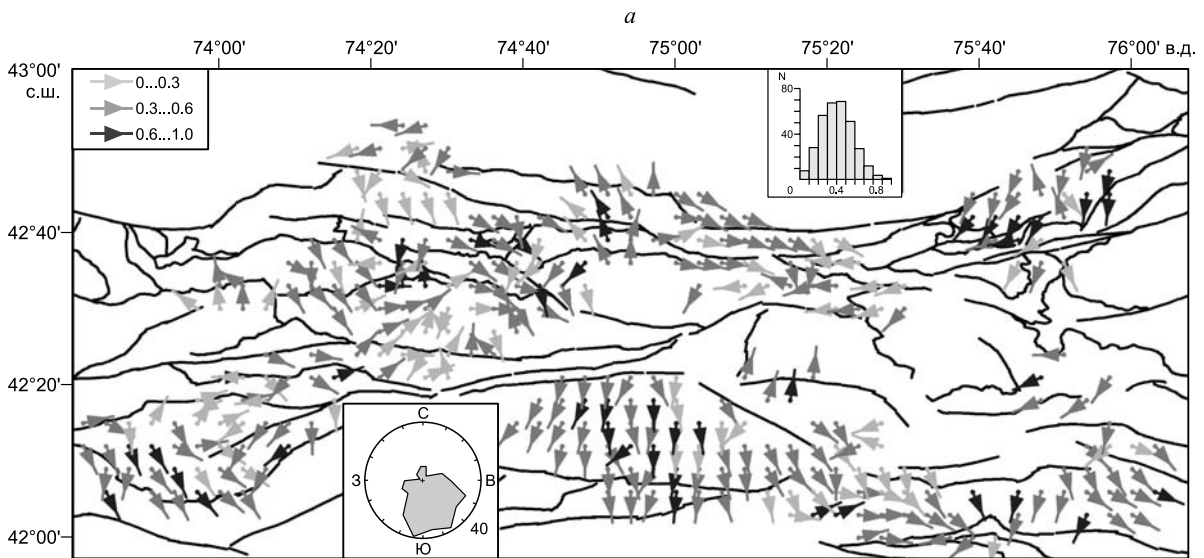
Точность определения ориентации касательного напряжения, действующего на горизонтальной площадке, зависит от близости этой площадки к плоскости действия максимального касательного напряжения. В данных рис. 12 наименее точно определены ориентации касательных напряжений, имеющие наиболее светлую заливку.

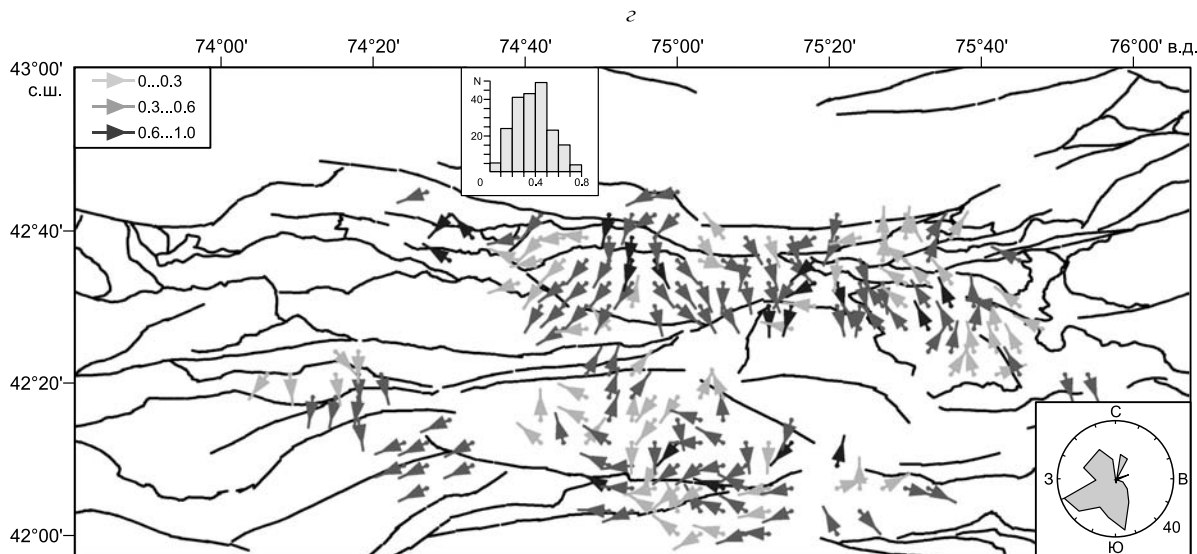
Следует отметить, что при определенном преимуществе южного и юг—юго-западного направлений действия поддвиговых касательных напряжений поле этих векторов не выглядит таким единообразным, как это имеет место для зон субдукции [Ребецкий, Маринин, 2006а,б; Ребецкий, 2009в; Rebetsky, Tatevossian, 2013]. Совершенно очевидна его фрагментированность — блочность. Выделяется много отдельных участков, имеющих восточную, западную и даже северную направленность анализируемых касательных напряжений. Эта особенность поля не сохраняется во всем диапазоне глубин.

Выделенная основная направленность поддвиговых касательных напряжений может быть интерпретирована следующим образом. Первый вариант: кора Северного Тянь-Шаня под воздействием субмеридионального давления Памира смещается на север относительно более стабильной мантии, что и создает поддвиговые касательные напряжения с направлением на юг по границе коры и мантии, сопротивляющейся этому движению. Второй вариант: в мантии со стороны Евразии действуют субмеридионально (на юг) ориентированные мантийные потоки, которые увлекают за собой кору Северного Тянь-Шаня, накатывая ее на более стабильный Памир. Наши данные не позволяют идентифицировать, какой из механизмов воздействия существует в реальности. Сейчас даже не совсем ясно, какой дополнительный тип данных должен быть привлечен для установления единственности в этом вопросе.

Результаты выполненной реконструкции относятся к коре только Северного Тянь-Шаня, на которую распространяются оба рассматриваемых выше варианта нагружения. Если теперь эту интерпретацию результатов реконструкции напряжений сопоставить с горизонтальными движениями поверхности коры, полученным по данным GPS-геодезии [Костюк, 2009; Кузиков, Мухамедиев, 2010; Zubovich et al., 2010], то можно заключить, что оба варианта имеют право на существование. Так, рис. 13, *a* отражает движения поверхности, удовлетворяющие первому варианту интерпретации напряженного состояния коры Тянь-Шаня, когда его кора под воздействием давления со стороны Памира смещается на север

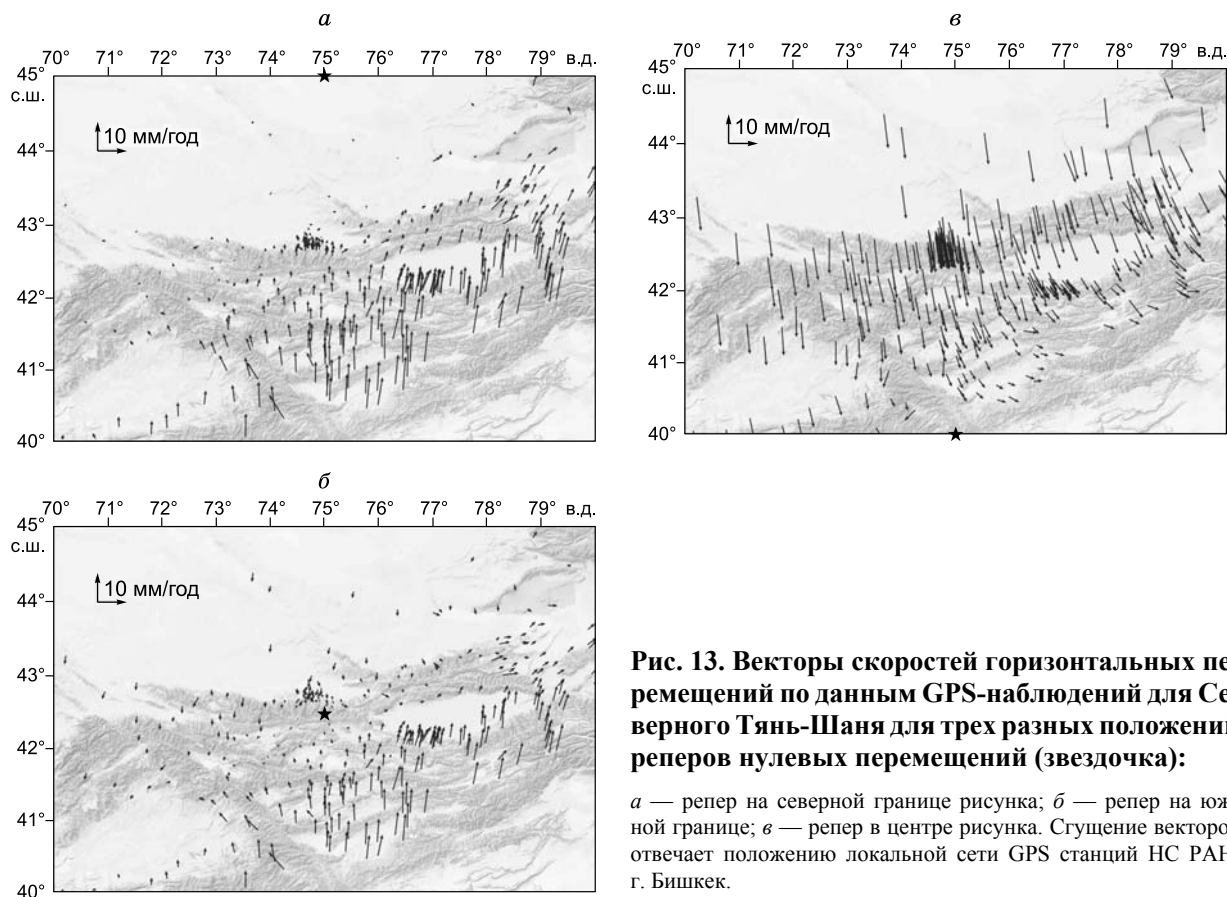






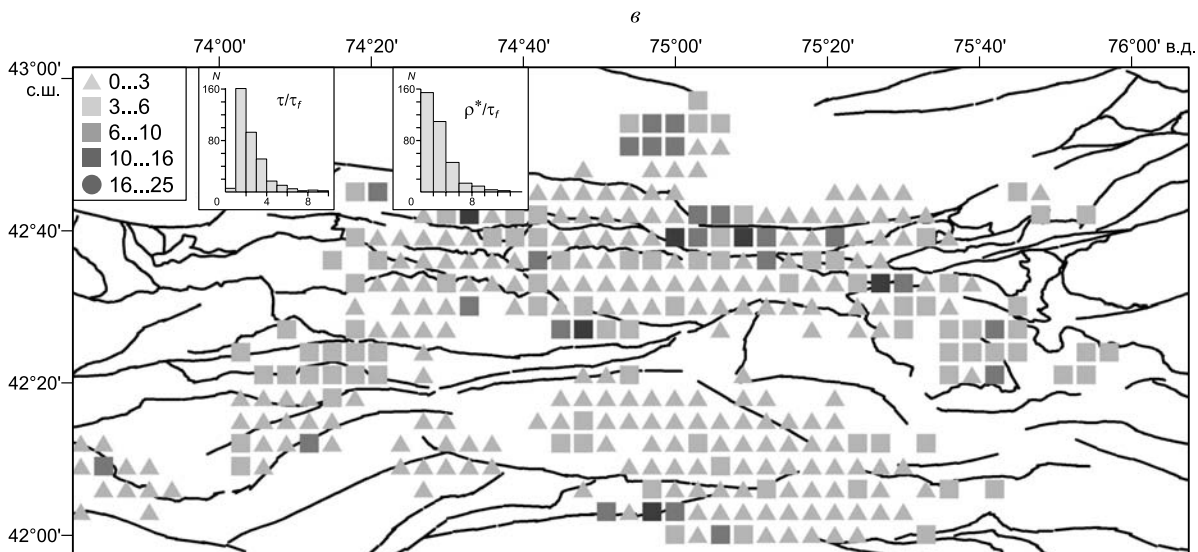
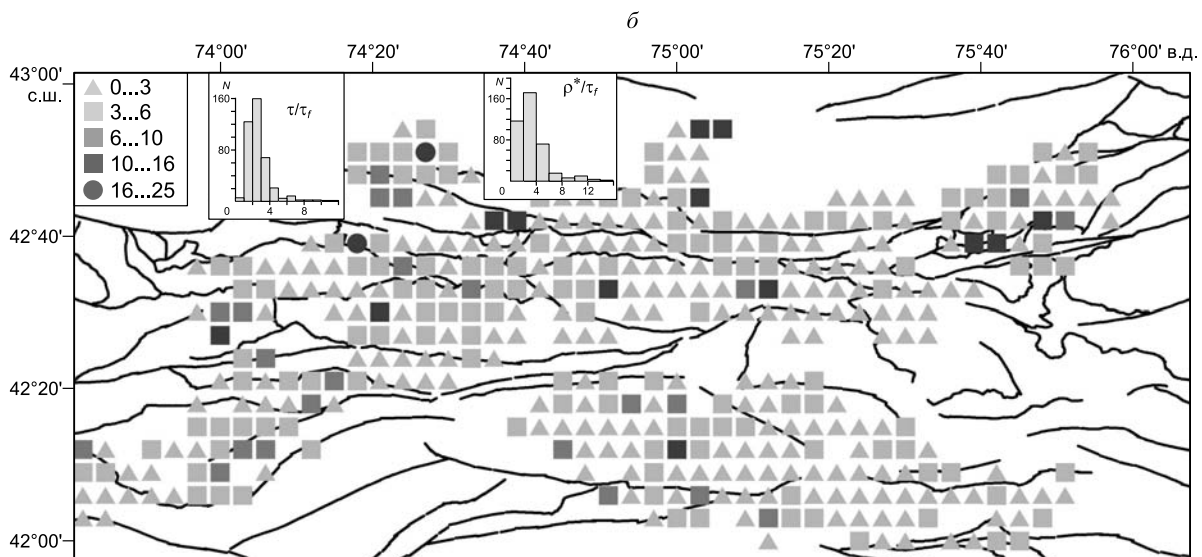
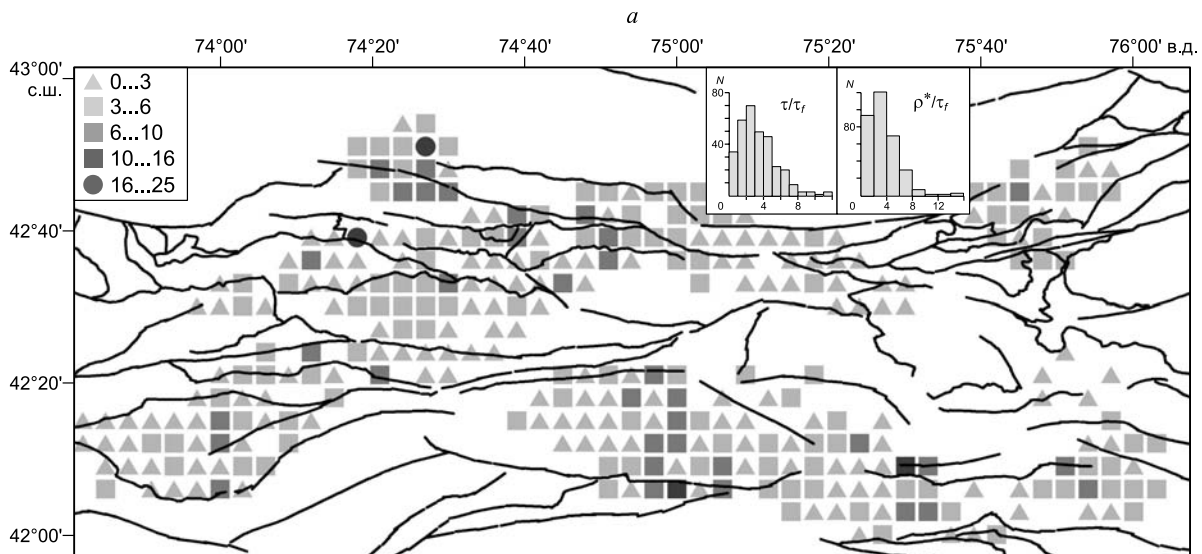
**Рис. 12. Ориентация подвиговых касательных напряжений  $\tau_z$ .**

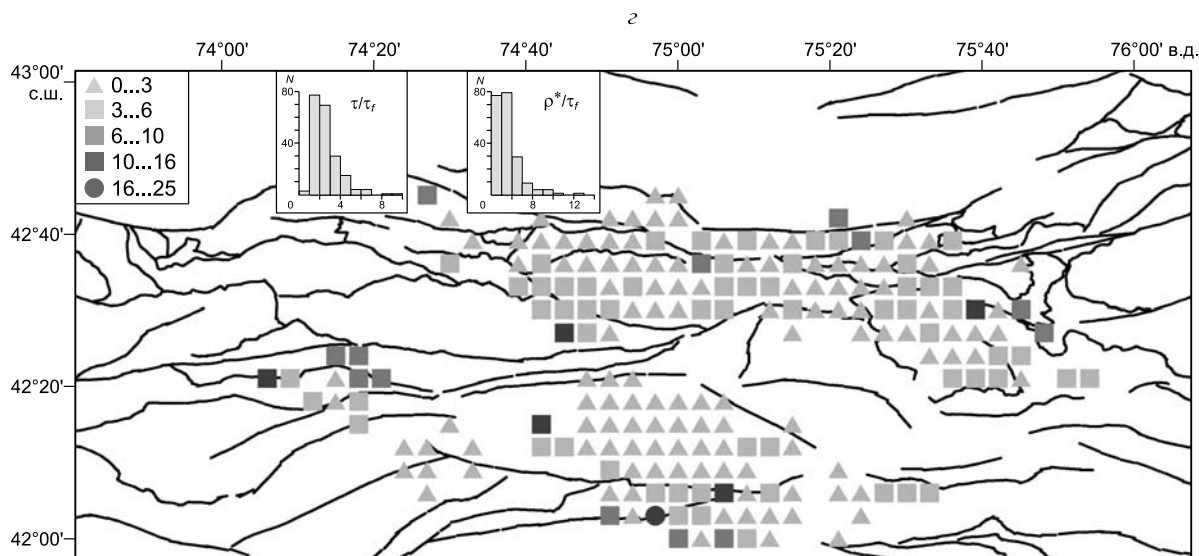
$\tau_z$  построены на горизонтальных площадках с нормалью к центру Земли, и их относительная величина, показанная стрелками с разным оттенком серого цвета (нормировка на величину максимальных касательных напряжений  $\tau_z / |\tau|$ ). Глубинные уровни реконструкции напряжений: *a* — 0—10 км; *b* — 5—15 км; *в* — 10—20 км; *г* — 15—25 км. Внизу роза-диаграмма представительности определений с разными азимутами для оси максимального горизонтального сжатия, вверху диаграмма представительности значений  $\tau_z / |\tau|$ .



**Рис. 13. Векторы скоростей горизонтальных перемещений по данным GPS-наблюдений для Северного Тянь-Шаня для трех разных положений реперов нулевых перемещений (звездочка):**

*a* — репер на северной границе рисунка; *b* — репер на южной границе; *в* — репер в центре рисунка. Сгущение векторов отвечает положению локальной сети GPS станций ИС РАН, г. Бишкек.





**Рис. 14.** Распределение по площади относительной компоненты эффективного давления, нормированной на внутреннее сцепление  $p^*/\tau_f$ .

Глубинные уровни реконструкции напряжений: *a* — 0—10 км; *b* — 5—15 км; *в* — 10—20 км; *г* — 15—25 км. Нормировка эффективного давления  $p^*$  на прочность сцеплений  $\tau_f$ . Вверху диаграммы, определяющие представимость значений  $\tau/\tau_f$  и  $p^*/\tau_f$ .

относительно стабильной мантии. Здесь реперной точкой (нулевые горизонтальные смещения), относительно которой строится поле векторов скоростей перемещений, является точка, расположенная на Казахской платформе (северная граница, см. рис. 13, *a*). Если же векторы скоростей перемещений поверхности коры перестроить, связав реперную точку с южными границами Центрального Тянь-Шаня (см. рис. 13, *b*), то максимальные смещения в южном направлении будут уже наблюдаться для северных границ Тянь-Шаня. Эти скорости смещения будут затухать по мере продвижения к южным границам Тянь-Шаня. Этому случаю соответствует второй вариант интерпретации данных рис. 12.

Поскольку оба варианта интерпретации геодезических данных равно возможны, то на их основе нельзя распознать генезис горизонтальных движений и установить причину полученного на рис. 12 поля векторов поддвиговых касательных напряжений.

Обратим внимание еще на один вариант интерпретации геодезических данных. Если нулевая реперная точка лежит внутри Северного Тянь-Шаня (см. рис. 13, *в*), то в этом случае векторы скоростей перемещений — наибольшие у северных и южных его границ и направлены навстречу друг другу. Подобный механизм деформирования противоречит направлению действия поддвиговых касательных напряжений в северной части коры Северного Тянь-Шаня (см. рис. 12) и поэтому может быть отвергнут (здесь векторы поддвиговых касательных напряжений должны были быть направлены с юга на север).

Отметим еще один момент, следующий из геодезических данных рис. 13. Скорости горизонтальных движений поверхности Северного Тянь-Шаня позволяют увидеть одну важную закономерность. Наибольшие их изменения связаны с внутригорными и межгорными впадинами. Это отвечает хорошо известному из геологических наблюдений факту о «набегании» горных поднятий на долины, приводящем в конечном итоге к их «схлопыванию» [Сорский, 1962; Белоусов, 1976].

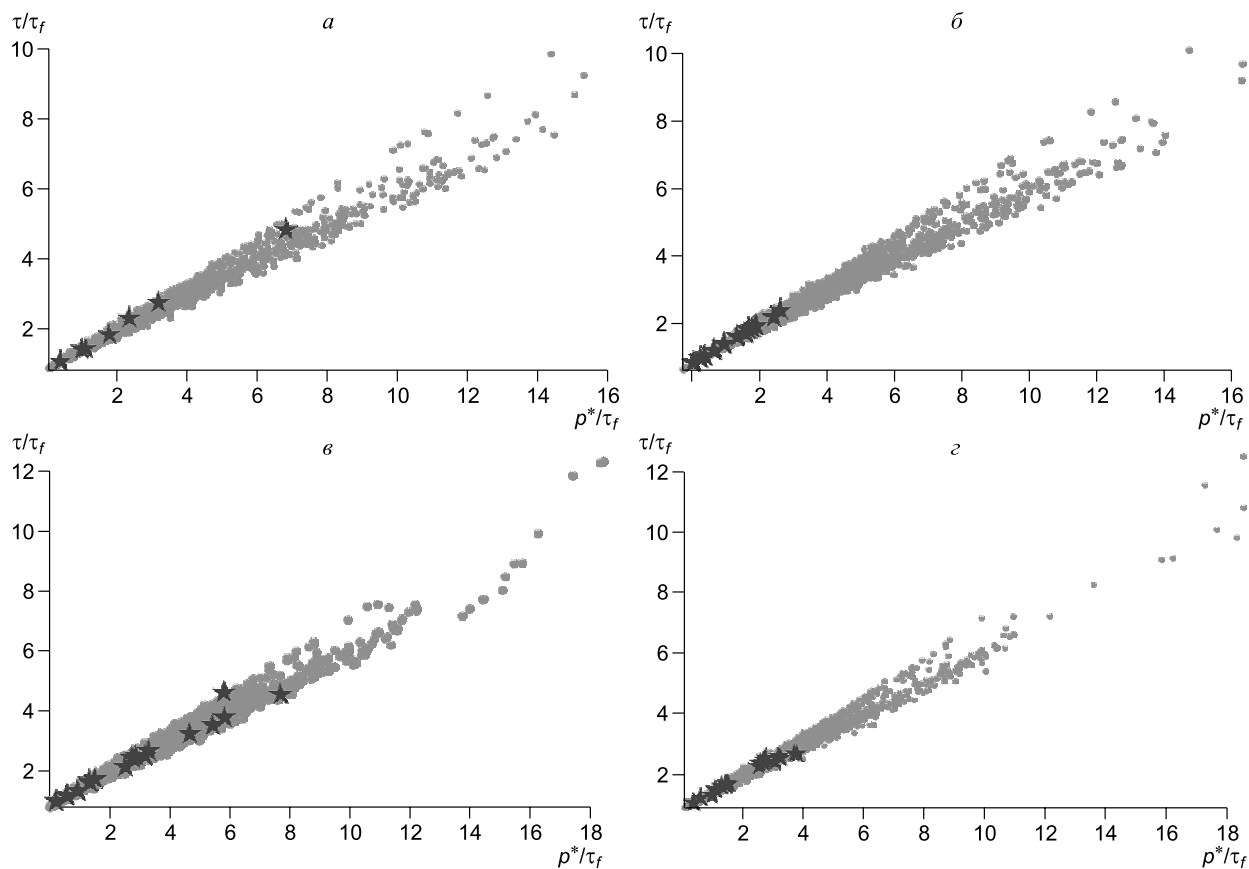
Следует заметить, что поле векторов скоростей перемещений (рис. 13) выглядит однородным по ориентации, в отличие от поля ориентаций осей напряжений, представленных на рис. 11. Но эта однородность обманчива. Сравнить с полем осей главных напряжений следует не поле векторов скоростей смещений, а поле осей главных приращений деформаций, по ним подсчитанное. Практические расчеты таких деформаций для Северного Тянь-Шаня, выполненные в работах [Костюк и др., 2006; Костюк, 2008], показывают, что при малых размерах окна усреднения ориентации осей главных приращений деформаций достаточно вариабильны. Рядом могут существовать области всестороннего латерального сжатия и растяжений.

**Редуцированные величины напряжений.** Результаты реконструкции второго этапа МКА для земной коры Северного Тянь-Шаня показали неравномерность распределения в исследуемом регионе относительных величин максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления (разность между давлением в горных породах и флюидным давлением трещинно-порового про-

странства  $p^* = p - p_{fl}$  при  $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ . Из рис. 14 видно, что значения редуцированного эффективного давления  $p^*/\tau_f$  ( $\tau_f$  — прочность сцепления массивов горных пород) имеют в коре исследуемого региона достаточно мозаичное распределение. Если для верхнего слоя 0—10 км области наиболее высокого уровня эффективного давления приурочены к коре хр. Карамойнок и южного склона центральной части Киргизского хребта (см. рис. 2), то с увеличением глубины эти области перемещаются к северу центральной части исследуемого региона (коре северного склона центральной части Киргизского хребта и под Чуйскую впадину).

Участки коры с повышенным уровнем эффективного давления площадью  $100 \times 100$  км соседствуют с участками, где его уровень может быть вдвое меньший. Установлено, что землетрясения наибольших магнитуд игнорируют области повышенных напряжений и тяготеют к областям среднего и низкого уровня эффективного давления.

Поскольку для горных пород предельное состояние определяется соотношением Кулона—Мора, связывающим между собой эффективные нормальные и касательные напряжения на плоскости хрупкого разрыва, то следствием этого является взаимосвязь значений эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений (рис. 15). Там, где наблюдаются повышенные значения  $p^*/\tau_f$ , существуют и повышенные значения  $\tau/\tau_f$ . В областях пониженных значений  $p^*/\tau_f$  пониженные значения имеют и  $\tau/\tau_f$ . Подобное распределение связано с имеющимся в рамках МКА предположением о близости напряженного состояния к предельному в областях повышенного сейсмического режима, а также с предположением малой изменчивости в пределах одного региона прочности сцепления  $\tau_f$ , усредненной в масштабах первых десятков километров. На рис. 15 представлены результаты мониторинга состояния в каждом из доменов земной коры, параметры напряжений которых показаны на рис. 6—11. Такой мониторинг позволяет в каждом из доменов получить данные о напряжениях, относящихся к разным временным интервалам. Поэтому число определений напряженных состояний на рис. 15 значительно больше, чем на предыдущих рисунках.



**Рис. 15. Соотношение редуцированных значений эффективного давления и максимальных касательных напряжений.**

Глубинные уровни реконструкции напряжений: *a* — 0—10 км; *б* — 5—15 км; *в* — 10—20 км; *г* — 15—25 км. Звездочками отмечены напряженные состояния доменов, где произошли сильные землетрясения с магнитудами больше 4.5.

Как видно из данных рис. 15, относительно сильные землетрясения с  $M_w \geq 4.5$ , как правило, наблюдаются в доменах с невысоким уровнем эффективного всестороннего сжатия и максимальных касательных напряжений [Ребецкий, Маринин, 2006а,б; Ребецкий, 2007б, 2009в; Rebetsky, Tatevossian, 2013]. В участках коры с таким напряженным состоянием действуют пониженные силы трения на разрывах, что обеспечивает большую эффективность хрупкого разрушения.

Говоря о величинах напряжений, следует вернуться к рис. 1, где кроме ориентации осей максимального и минимального сжатия эффективных напряжений (тектонические напряжения минус флюидное давление), действующих в горизонтальном направлении, показаны и их редуцированные значения, полученные в результате их нормировки на величину прочности сцепления (результаты второго этапа реконструкции). Из этих данных следует, что в верхнем слое (глубина расчета 0—10 км) наибольшему латеральному сжатию подвержена кора хр. Карамойнок и гор Сандык, где значения обоих напряжений наиболее высокие и близкие по величине. Наиболее неравномерно в горизонтальном направлении сжатие действует в коре Кочкорской впадины. Здесь значения напряжения максимального латерального сжатия намного превышают величины минимального сжатия. Для глубин расчета 10 и 15 км выделяется кора Киргизского хребта, где существует интенсивное практически одинаковое латеральное сжатие.

Если предположить, что прочность сцепления горных массивов не изменяется с глубиной, то анализ трехмерного поля редуцированных значений латерального сжатия показывает, что с глубиной возрастает средний и верхний уровень их значений. Таким образом, с глубиной возрастает дифференцированность латерального сжатия при нарастании общего сжатия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая выполненные исследования, заключаем, что напряженное состояние земной коры Северного Тянь-Шаня не выглядит таким простым, как это следовало бы из первичного анализа горизонтальных движений поверхности коры, получаемым по данным GPS-геодезии (см. рис. 13, а). Эта сложность напряженного состояния не выявляется, если анализировать только ориентацию осей главных напряжений максимального сжатия. Она здесь очень устойчивая (см. рис. 7), определяющая преимущественное направление погружения этих осей на север—северо-запад и юг—юго-восток, соответствующая ориентации векторов смещений по данным GPS. Сложность напряженного состояния коры изучаемого района проявляется в площадном распределении ряда важнейших параметров, характеризующих особенности деформирования горных массивов.

Установлено, что только в коре центральной части изучаемого региона преимущественный геодинамический тип напряженного состояния отвечает горизонтальному сжатию на фоне встречающихся доменов горизонтального сдвига со сжатием и просто горизонтального сдвига. К западу и востоку от этого участка коры основное представительство доменов коры соответствует геодинамическому типу напряженного состояния горизонтального сдвига, сдвига с растяжением и даже растяжению при редко встречающихся состояниях горизонтального сдвига со сжатием и чистого горизонтального сжатия (см. рис. 10).

Выяснение механизма генерации тектонических напряжений в земной коре горно-складчатых областей является критически важной темой исследований при разработке геодинамических моделей эволюции литосферы. Данные о напряжениях, «измеренных» в массивах в их естественном, природном состоянии, следует признать главным источником изучения способа нагружения литосферы и ее реакции на это нагружение. В настоящее время столь детальные исследования поля природных напряжений проведены для коры Алтая и Саян [Rebetsky et al., 2012; Ребецкий и др., 2013], а также для коры Высокой Азии [Ребецкий, Алексеев, 2014]. По результатам этих исследований было установлено, что существует определенная взаимосвязь типа напряженного состояния коры и морфологии ее рельефа (поднятия в виде хребтов, поднятия в виде плато или нагорья, впадины).

Результаты новой тектонофизической реконструкции, выполненной для Северного Тянь-Шаня, показали, что кора центральной части исследуемого района, для которой имеет место наиболее плотное сочленение высокогорных хребтов, представлена режимом горизонтального сжатия. Кора Суусамырской и Кочкорской впадин имеет режим горизонтального сдвига. Восточное окончание Чуйской впадины и западный сегмент Киргизского хребта представлены режимом горизонтального растяжения. Эти данные не противоречат полученному ранее результату.

Особо выделим две зоны коры Киргизского хребта в северо-западном сегменте исследуемого региона, для которых выявлен режим горизонтального растяжения (см. рис. 9, а). Эти зоны находятся в накрест лежащих секторах субширотного разлома, расположенного к югу от Чонкурчакского разлома и секущего с погружением на юг отроги северного склона Киргизского хребта. Данный разлом присутствует на многих региональных картах [Миколайчук, 2000; Кальметьева и др., 2009], но у него отсутствует название. Поскольку данный разлом пересекает верховья рек, то мы предлагаем ему дать назва-

ние «Верховой» (см. рис. 2). Размер этого участка разлома с ярко выраженной неоднородностью напряженного состояния составляет порядка 60 км. Поскольку при реконструкции напряжения усреднялись в масштабе около 15 км, то при длине активного разлома 60 км существует возможность выявить неоднородность напряженного состояния.

Ориентация осей главных напряжений в коре вблизи разлома Верховой (см. рис. 7, а; рис. 8, а) показывает, что данный разлом может испытывать правый сдвиг. Это согласуется с данными о правой компоненте взбросовдвигового смещения вдоль крупного субширотного разлома, секущего южный склон Киргизского хребта, представленного на рис. 11 работы [Кальметьева и др., 2009], и погружающегося также на юг, как и разлом Верховой.

Согласно работе Д.Н. Осокиной [1987], вблизи концевых участков разлома со сдвигом по простиранию должны наблюдаться два сектора всестороннего сжатия (в данном случае последним отвечают области горизонтально сдвига) и два сектора всестороннего растяжения или меньшего всестороннего сжатия. Если такая интерпретация результатов реконструкции напряжений соответствует реальному процессу, то данный сегмент разлома можно рассматривать как активный, реализующий праводвиговое смещение либо за счет крипа, либо за счет сейсмотектонического течения.

Установленная преимущественная южная и юго-западная ориентация поддвиговых касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках, может быть объяснена давлением с юга на север на кору Северного Тянь-Шаня. Однако это объяснение не единственное и требует дополнительных исследований. Важно отметить наличие в коре исследуемого региона больших участков — блоков, испытывающих разное по ориентации воздействие со стороны мантии (поддвиговые касательные напряжения, см. рис. 12). Этот факт можно интерпретировать, как отсутствие однонаправленного сдвига коры вдоль границы М. Возможно имеет место определенное вращение блоков, создающее разные знаки и направления сдвигающих напряжений на субгоризонтальных плоскостях в глубине коры.

В коре Северного Тянь-Шаня выделено несколько крупных участков повышенного и пониженного уровня эффективного всестороннего давления. Установлено, что относительно сильные землетрясения тяготеют к участкам коры пониженного уровня эффективного давления. Этот результат согласуется с данными анализа современных напряжений для других сейсмоактивных областей [Ребецкий, 2007б].

Как выше уже отмечалось, данная реконструкция коровых напряжений является повторной [Rebetsky et al., 2012], выполненной после накопления за четырехлетний период дополнительных данных о механизмах очагов землетрясений в сейсмической сети KNET. Увеличение каталога механизмов очагов землетрясений позволило уточнить результаты предыдущей реконструкции напряжений и расширить область коры с данными о напряженном состоянии. Дальнейшая стабильная работа сети KNET обеспечивает возможность разработки алгоритмов уточнения прочностных параметров среды, развиваемых в рамках МКА.

Работа выполнена при поддержке грантов по программе № 6 ОНЗ РАН, РФФИ (гранты 13-05-00892а, 12-05-00550, 12-05-00234а).

## ЛИТЕРАТУРА

**Артюшков Е.В.** Новейшие поднятия земной коры как следствие инфильтрации в литосферу мантийных флюидов // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (6), с. 738—760.

**Базавлук Т.А., Юдахин Ф.Н.** Деформационные волны в земной коре Тянь-Шаня по сейсмологическим данным // ДАН, 1993, т. 329, № 5, с. 656—570.

**Белоусов В.В.** Геотектоника. М., Изд-во Моск. ун-та, 1976, 328 с.

**Геодинамика** Таласо-Ферганского разлома Тянь-Шаня и стихийные бедствия на территории Центральной Азии / Ред. К.Е. Абдрахматов. Бишкек, Арашан-Дом печати, 2009, с. 229.

**Кальметьева З.А., Миколайчук А.В., Молдобеков Б.Д., Мелешко А.В., Жантаев М.М., Зубович А.В.** Атлас землетрясений Кыргызстана. Бишкек, Изд-во Бишкек-ЦАИИЗ, 2009, 73 с.

**Костюк А.Д.** Деформационные изменения земной коры Северного Тянь-Шаня по данным космической геодезии // Вестник КРСУ, 2008, т. 8, № 3, с. 140—144.

**Костюк А.Д.** Деформация земной коры по данным GPS-измерений в пределах сейсмосети KNET // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы Первой молодежной тектонофизической школы-семинара (21—24 сентября 2009 г., ИФЗ РАН, г. Москва). М., ИФЗ РАН, 2009, с. 83—92.

**Костюк А.Д., Sagia T., Зубович А.В.** Сравнение распределения сейсмичности и поля деформаций // Вестник КРСУ, 2006, т. 6, № 3, с. 64—70.

**Крестников В.Н., Белоусов Т.П., Ермилин В.И., Чигарев Н.В., Штанге Д.В.** Четвертичная тектоника Памира и Тянь-Шаня. М., Наука, 1979, 116 с.

- Кузиков С.И., Мухамедиев Ш.А.** Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS сети // *Физика Земли*, 2010, № 7, с. 33—51.
- Макаров В.И.** Новейшая тектоническая структура Центрального Тянь-Шаня. М., Наука, 1977, 172 с.
- Макаров В.И.** Межгорные и внутригорные впадины Тянь-Шаня: формационные, структурные и геодинамические различия // *Геология и геофизика*, 2012, т. 53 (4), с. 476—488.
- Миколайчук А.В.** Структурная позиция надвигов в новейшем орогене Центрального Тянь-Шаня // *Геология и геофизика*, 2000, т. 41 (7), с. 961—970.
- Милановский Е.Е.** Геология России и ближнего зарубежья (Северной Евразии). М., Изд-во Моск. ун-та, 1996, 436 с.
- Николаев Н.Н.** Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М., Недра, 1988, 492 с.
- Осокина Д.Н.** Взаимосвязь смещений по разрывам с тектоническими полями напряжений и некоторые вопросы разрушения горного массива // *Поля напряжений и деформаций в земной коре*. М., Наука, 1987, с. 120—135.
- Ребецкий Ю.Л.** Методы реконструкции тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // *ДАН*, 1999, т. 365, № 3, с. 392—395.
- Ребецкий Ю.Л.** Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // *ДАН*, 2003, т. 388, № 2, с. 237—241.
- Ребецкий Ю.Л.** Оценка относительных величин напряжений — второй этап реконструкции по данным разрывных смещений // *Геофизический журнал*, 2005, т. 27, № 1, с. 39—54.
- Ребецкий Ю.Л.** Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М., Академкнига, 2007а, 406 с.
- Ребецкий Ю.Л.** Напряженное состояние, благоприятное для крупномасштабного хрупкого разрушения горных пород // *ДАН*, 2007б, т. 416, № 5, с. 106—109.
- Ребецкий Ю.Л.** Третий и четвертый этапы реконструкции напряжений в методе катакластического анализа сдвиговых разрывов // *Геофизический журнал*, 2009а, т. 31, № 2, с. 93—106.
- Ребецкий Ю.Л.** Оценка величин напряжений в методе катакластического анализа разрывов // *ДАН*, 2009б, т. 428, № 3, с. 397—402.
- Ребецкий Ю.Л.** Напряженное состояние земной коры Курил и Камчатки перед Симуширскими землетрясениями // *Тихоокеанская геология*, 2009в, т. 28, № 5, с. 70—84.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.** Поле напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // *Геология и геофизика*, 2006а, т. 47 (11), с. 1192—1206.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.** Напряженное состояние земной коры западного фланга Зондской субдукционной зоны перед Суматра-Андаманским землетрясением 26.12.2004 // *ДАН*, 2006б, т. 407, № 1, с. 106—109.
- 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. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0127>.
- Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Сычева Н.А.** Метод катакластического анализа разрывных нарушений и результаты расчетов современного напряженного состояния в коре вблизи границ плит и для внутриплитных горно-складчатых орогенов // *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Материалы Всероссийской конференции 13—17 октября 2008 г. М., ИФЗ РАН, 2009, т. 1, с. 340—366.*
- Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Кузиков С.И., Костюк А.Н.** Тектонические напряжения, сеймотектонические и общие тектонические деформации земной коры Центрального Тянь-Шаня // *Проблемы сейсмологии в Узбекистане № 7. Материалы Международной конференции «Современные проблемы сейсмологии, гидрогеологии и инженерной геологии»*. Ташкент, Изд-во Нац. унив. Узб., 2010, т. 1, с. 268—274.
- Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В.** Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской горной области // *Геология и геофизика*, 2013, т. 54 (2), с. 271—291.
- Сорский А.А.** Об условиях формирования полной складчатости в осевой зоне Восточного Кавказа // *Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования*. М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 9—41.
- Сычева Н.А., Кузиков С.И.** Анализ скоростных моделей литосферы Тянь-Шаня и метод двойных разностей при определении положения гипоцентров землетрясений по данным сейсмологической сети KNET // *Геофизические исследования*, 2012, т. 13, № 2, с. 5—22.



**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.

**Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадиева В.А.** Сейсмоструктурные деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) // Физика Земли, 2005, № 11, с. 62—78.

**Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Юнга С.Л.** Геоинформатика в статистическом подходе к расчетам сейсмоструктурных деформаций // Геоинформатика, 2009, № 1, с. 33—43.

**Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н.** О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума // Физика Земли, 2011, № 3, с. 55—71.

**Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Сычева Н.А.** О суточной квазипериодичности и случайной составляющей в потоке сейсмических событий // Тихоокеанская геология, 2012, т. 31, № 6, с. 68—78.

**Трифонов В.Г., Иванова Т.П., Бачманов Д.М.** Эволюция центральной части Альпийско-Гималайского пояса в позднем кайнозое // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (3), с. 289—304.

**Чедия О.К.** Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня. Фрунзе, Илим, 1986, 315 с.

**Юдахин Ф.Н.** Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. Фрунзе, Илим, 1983, 246 с.

**Шульц С.С.** Анализ новейшей тектоники и рельеф Тянь-Шаня // Записки ВГО, Новая серия. Т. 3. М., Географиздат, 1948, 222 с.

**Buslov M.M., Klerkx J., Abdarakhmanov K., Devaux D., Batalev V.Yu., Kuchai O.A., Dehandschuter B., Muraliev A.** Recent strike slip deformation of northern Tien Shan / Eds. F. Storti, R.E. Holdsworth, F. Salvini // Intraplate strike-slip deformation belts. Geological Society of London, Special Publication, 2003, v. 210, p. 53—64.

**Byerlee J.D.** Friction of rocks // Pure App. Geoph., 1978, v. 116, p. 615—626.

**Cobbold P., Davy P.** Indentation tectonics in nature and experiment. 2. Central Asia // Bull. Geol. Inst. Uppsala, 1988, v. 144, p. 143—182.

**England P., Molnar H.** Active deformation of Asia: from kinematics to dynamics // Science, 1997, v. 278, № 5338, p. 647—650.

**Lienert Barry R., Berg E., Frazer L. Neil.** Hypocenter: an earthquake location method using centered, scaled, and adaptively damped least squares // Bull. Seismol. Soc. America, 1986, v. 76, № 3, p. 771—783.

**Reasenber P.A., Oppenheimer D.** FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions // U.S. Geol. Surv. Open-File Report, 1985, p. 85—739.

**Rebetsky Y.L., Tatevossian R.E.** Rupture propagation in strong earthquake sources and tectonic stress field // Bull. Soc. Geol. Fr., 2013, v. 184, № 4—5, p. 335—346.

**Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Kuchay O.A., Tatevossian R.E.** Development of inversion methods on fault slip data. Stress state in orogenes of the central Asia // Tectonophysics, 2012, v. 581, p. 114—131. 10.1016/j.tecto.2012.09.027.

**Roecker S.W., Sabitova T.M., Vinnik L.P., Burmakov Y.A., Golvanov M.I., Mamatkanova R., Munirova L.** Three-dimensional elastic wave velocity structure of the Western and Central Tien-Shan // J. Geophys. Res., 1993, v. 98, № B9, p. 15779—15795.

**Zobak M.L.** First and second order pattern of stress in lithosphere: The World stress map project // J. Geophys. Res., 1992, v. 97, № B8, p. 11703—11728.

**Zubovich A.V., Wang X.-q., Scherba Y.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V.I., Li J., Kuzikov S.I., Herring T.A., Hamburger M.W., Hager B.H., Dang Y.-m., Bragin V.D., Beisenbaev R.T.** GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions // Tectonics, 2010, v. 29, TC6014. doi:10.1029/2010TC002772.

*Рекомендована к печати 28 мая 2015 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию 20 марта 2014 г.,  
после доработки — 5 февраля 2015 г.*