### А. В. Маринин<sup>1</sup>, Л. А. Сим<sup>1</sup>, Н. А. Сычева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, marinin@ifz.ru <sup>2</sup>Научная станция РАН, Бишкек, Кыргызстан, nelya@gdirc.ru

## ТЕКТОНИЧЕСКИЕ СТРЕСС-ИНДИКАТОРЫ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

#### Аннотация

В результате проведенных в пределах Северного Тянь-Шаня полевых тектонофизических исследований получены подробные сведения по различным типам малых структурных форм, в которых запечатлены тектонические деформации. Геологические индикаторы деформаций использованы для реконструкции стресс-тензоров. Проведенные исследования основных параметров локальных позволили охарактеризовать напряженно-деформированное состояние земной коры Северного Тянь-Шаня на неотектоническом и более древних этапах развития. Для разных участков земной коры Северного Тянь-Шаня установлены различия по ориентации осей главных напряжений/деформаций и типу напряженного состояния, а также по структурно-хронологическим соотношениям и преобладающей кинематике разрывных систем. Большинство реконструированных локальных стресс-тензоров оказались близки по своим характеристикам к современному напряженно-деформированному состоянию региона и могут быть отнесены к его новейшему этапу развития. Другие обстановки, которые не находят своего отражения в современной сейсмичности и не могут быть увязаны со структурно-геологическим положением на неотектоническом этапе, могут нести информацию об эволюции напряженнодеформированного состояния или отражать изменение положения исследованных блоков земной коры.

## A. V. Marinin<sup>1</sup>, L. A. Sim<sup>1</sup>, N. A. Sycheva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS) <sup>2</sup>Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek

## TECTONIC STRESS INDICATORS AND STRESS-AND-STRAIN STATE OF THE NORTHERN TIEN SHAN

#### Abstract

As a result of field tectonophysical studies conducted within the Northern Tien Shan, detailed information on various types of small structural forms in which tectonic deformations are imprinted was obtained. Geological deformation indicators are used to reconstruct the main parameters of local stress tensors. The conducted research allowed to characterize the stress-and-strain state of the Earth's crust of the Northern Tien Shan at the neotectonic and more ancient stages of development. For different parts of the Northern Tien Shan crust, differences in the orientation of the principal stress/strain axes and the type of stress state, as well as structural and chronological relationships and the prevailing kinematics of fault systems were established. Most of the reconstructed local stress tensors were close in their characteristics to the modern stress-and-strain state of the region and can be attributed to its latest stage of development. Other conditions that are not reflected in modern seismicity and can not be linked to the structural and geological position at the neotectonic stage, can carry information about the evolution of the stress-strain state or reflect the change in the position of the studied blocks of the crust.

#### Введение

В 2009–2018 гг. сотрудниками лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН и лаборатории «изучения современных движений земной коры методами космической геодезии научной станции» РАН (г. Бишкек) проведены исследования древнего и современного напряженного состояния земной коры Северного Тянь-Шаня. Главные усилия были направлены на реконструкцию тектонических напряжений по сейсмологическим данным. Результаты этих реконструкций для Северного Тянь-Шаня недавно опубликованы [Rebetsky et al., 2012; Ребецкий и др., 2016, Сычева, Мансуров, 2017]. Другим направлением работ были полевые тектонофизические исследования, нацеленные на реконструкцию основных параметров локальных стресс-состояний в массивах горных пород Киргизского хребта по геологическим стресс-индикаторам. До недавнего времени напряженно-деформированное состояние Северного Тянь-Шаня не анализировалось с помощью полевых тектонофизических методов, использующих разнообразные геологические индикаторы деформаций, такие как зеркала скольжения,

отрывные и жильные структуры, тектоническая трещиноватость и т.д. Основную часть собранных нами в 2009–2018 гг. в ходе полевых исследований данных представляют замеры тектонических трещин со следами смещений и других малых структурных форм, для которых возможно определить геолого-кинематический тип (небольшие разрывы с определимым относительным смещением бортов, зеркала скольжения, отрывы и т.д.).

Первые результаты реконструкции палеонапряжений по полевым данным 2009 и 2011 гг. с применением кинематического метода изложены в серии публикаций [Сим и др., 2011, 2012, 2014]. В данной статье мы представляем результаты реконструкции с использованием метода катакластического анализа разрывных смещений применительно к геологическим данным [Ребецкий, 1999, 2003, 2007; Ребецкий и др., 2017]. При полевых работах нами проведены исследования в естественных и искусственных обнажениях Киргизского хребта (рис. 1) и расположенной к юговостоку от него Кочкорской впадины (рис. 13), а также в пределах небольшого участка на южном борту Иссык-Кульской впадины (рис. 18).



**Рис. 1.** Точки наблюдения на Киргизском хребте 2009–2016 гг. (маркированы цветом), в которых собраны данные по геологическим стресс-индикаторам и проведена реконструкция с использованием метода катакластического анализа

Fig. 1. Observation points on the Kyrgyz Range 2009–2016 (marked with color), which collected data on geological stress indicators and reconstructed using the method of cataclastic analysis

#### Геологическое строение района исследования

Район полевых исследований расположен в пределах большой Тянь-Шаньской горной области, входящей в свою очередь в Урало-Монгольский складчатый пояс [Милановский, 1996]. По времени проявления основных складчатых деформаций в ее составе выделяются каледонская Северо-Тяньшаньская система, герцинская Южно-Тяньшаньская система и промежуточная каледоногерцинская система Срединного Тянь-Шаня. Рассматриваемая в статье территория целиком принадлежит Северо-Тяньшаньской системе, в которой помимо основных складчатых деформаций каледонского этапа проявились и более поздние герцинские движения. Мезозойский этап развития характеризуется отсутствием активных тектонических движений, существованием относительно стабильной области с платформенным режимом развития и формированием поверхности пенеплена. Формирование высокогорного рельефа связывается с тектонической активизацией в позднем кайнозое. Мезокайнозойские структуры часто наследуют простирание крупных палеозойских тектонических элементов. Вместе с тем, влияние каледонских и герцинских складчатых структур слабо проявлено в неотектоническом плане деформаций и не проявлено в современной высотной дифференциации рельефа [Милановский, 1996].

На неотектоническом этапе основными тектоническими структурами исследуемого района являются Киргизская мегантиклиналь (Киргизский хребет), расположенная к юго-востоку от нее Кочкорская впадина и находящаяся севернее Чуйская впадина (см. рис. 1). К востоку от этих структур расположена впадина озера Иссык-Куль. Основные новейшие тектонические структуры вытянуты

преимушественно направлении, в широтном однако есть секушие северо-западного и субмерилионального простирания [Челия, 1986]. Киргизская мегантиклиналь, по мнению большинства исследователей, сформировалась как пологая складка (складка основания), которая осложнена взбросо-надвиговыми и сдвиговыми дислокациями, связанными с меридиональным субгоризонтальным сжатием. Среди серии этих дислокаций, отделяющих поднятие Киргизского хребта от смежной Чуйской впадины, наиболее известны Чонкурчакский, Шамсинско-Тюндюкский, Иссыкаттинский и Южно-Кеминский разломы [Чедия, 1986; Миколайчук, 2000; Миколайчук и др., 2003]. Амплитуды позднекайнозойских складчатых и разрывных дислокаций орогенного этапа оцениваются по деформациям поверхности пенеплена [Шульц, 1948; Чедия, 1986], которая в Чуйской впадине опущена на глубину до 5–10 км и приподнята на высоту более 3–4 км на Киргизском хребте.

#### История тектонофизических исследований в Тянь-Шаньской области

Михаил Владимирович Гзовский участвовал в тематических исследованиях по неотектонике, проводимых Институтом физики Земли АН СССР в Тянь-Шаньской области. Публикации затрагивают тектоническое строение, геофизику и сейсмическое районирование Тянь-Шаня [Гзовский и др., 1960; Гзовский, 1961], а одна из основополагающих работ М.В. Гзовского посвящена строению и тектонофизике Байджансайского антиклинория, расположенного западнее структур Северного Тянь-Шаня [Гзовский, 1959, 1963].

Наиболее полные сведения по ориентации осей главных нормальных напряжений изучаемого региона были получены в работах Ш.А. Мамбетова по определению направлений максимального сжатия методом разгрузки в массивах горных пород [Мамбетов, Ялымов, 1974; Мамбетов, 1978]. Проведенными исследованиями показано, что величины и направления главных напряжений в регионе Киргизского Тянь-Шаня весьма разнообразны, и их соотношения зависят от геологической структуры конкретного участка горного массива, тектонического поля напряжений и рельефа района [Мамбетов, 1978]. Определенные направления осей максимального сжатия варьируются от северо-западного до северо-восточного в разных точках измерения, сохраняя в целом субмеридиональный тренд.

Опубликованные недавно работы по реконструкции палеонапряжений с использованием кинематического метода дали в целом меридиональную ориентировку осей максимального сжатия, а в ряде районов Киргизского хребта предполагалась перестройка общего поля напряжений к условиям растяжения с субвертикальной ориентировкой оси максимального сжатия. Это связывалось с влиянием близрасположенных впадин [Сим и др., 2014], где, по данным реконструкции современных напряжений, преобладает обстановка горизонтального растяжения [Ребецкий и др., 2014]. Предполагалось, что самым молодым из фиксируемых здесь полевыми тектонофизическими методами геодинамических обстановок является режим горизонтального растяжения [Сим и др., 2012].

Детальный анализ поля природных напряжений в коре Северного Тянь-Шаня проведен в работе [Ребецкий и др., 2016] с использованием сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений (по записям локальной сейсмической сети КНЕТ). Для разных глубинных уровней земной коры получены данные об ориентации осей главных напряжений и величины редуцированных напряжений (отношение максимальных касательных напряжений и эффективного давления к прочности сцепления горных массивов). Выявлены геодинамические типы напряженного состояния горизонтального сжатия, горизонтального сдвига со сжатием и растяжением, а также горизонтального растяжения (срединная часть Киргизского хребта, Чуйская и Суусамырская впадина).

В последние несколько лет появилась серия работ по изучению напряженно-деформированного состояния земной коры Северного Тянь-Шаня с помощью полевых тектонофизических методов. Данные методы используют разнообразные геологические индикаторы тектонических деформаций, такие как: зеркала скольжения, отрывные и жильные структуры, тектоническая трещиноватость и другие разнообразные малые структурные формы. Несколькими группами исследователей в пределах Северного Тянь-Шаня проведена реконструкция с привлечением геологических индикаторов деформаций по районам Киргизского хребта [Маринин и др., 2013; Лаврушина и Пржиялговский, 2016; Маринин и др. 2016; Пржиялговский и Лаврушина, 2017], Кочкорской [Маринин и др., 2018] и Иссык-Кульской впадин [Delvaux et al., 2013, Маринин, Сычева, 2018].

#### Методы исследований

Обработка данных полевых замеров геологических стресс-индикаторов производилась с помощью метода катакластического анализа разрывных смещений (МКА) [Ребецкий, 2007; Ребецкий и др., 2017], который позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных

стресс-состояний: положение осей главных напряжений и коэффициент Лоде — Надаи. Метод опирается на общие энергетические положения современной теории пластичности и позволяет в едином режиме производить расчет как параметров тензора напряжений, так и тензора приращений квазипластических деформаций. МКА позволяет определять относительные величины шаровой и девиаторной компонент тензора напряжений. Полученный тензор напряжений в каждом исследуемом объеме (при полевых исследованиях это точка наблюдения) характеризует поле напряжения в данной точке — локальное стресс-состояние (или локальный стресс-тензор). Основное отличие МКА от близких методов дислокационного анализа [Гущенко, 1975; Angelier, 1979] состоит в параллельном расчете тензора сейсмотектонических деформаций и в нахождении ориентации главных осей тензора напряжений на основе принципа максимальной диссипации энергии совокупности сколов из однородной выборки.

Производимая реконструкция по данным о трещинах с установленным характером смещений базируется на тех же теоретических положениях метода катакластического анализа, что и алгоритм реконструкции современных напряжений по сейсмологическим данным о механизмах очагов землетрясений. Различия обусловлены характером исходных данных. Геологические данные позволяют определить пространственную ориентацию плоскости трещины и направление относительного перемещения её бортов, но отсутствует точная привязка по времени для каждого события. На одной площадке сбора данных (в одном обнажении) встречаются плоскости зеркал скольжения с несколькими направлениями штриховок (борозд скольжения), характеризующими в разных случаях или близкие по времени события, укладывающиеся в единый этап деформирования, либо хронологически разные фазы эволюции напряженного состояния. Применяемая для расчетов компьютерная программа *STRESSgeol* (разработанная Ю.Л. Ребецким в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН) использует принцип разделения колов на однородные выборки, определяющие временные фазы квазиоднородного деформирования макрообъема, для достижения максимальности суммарной энергии диссипации при минимальном количестве выделяемых фаз.

Для анализа статистических замеров ориентировок зеркал скольжения разного кинематического типа, сколовых трещин, жил, даек, трещин отрыва и других малых структурных форм нами использовался метод структурно-парагенетического анализа тектонической трещиноватости Л.М. Расцветаева [1987]. Получаемые сведения по направлению, амплитуде и характеру относительных перемещений по отдельным дизъюнктивным нарушениям или зонам их концентрации, а также данные по частным кинематическим диаграммам тектонической трещиноватости и мелким разрывам, позволяют при помощи данного метода выявлять разномасштабные структурнопарагенетические ассоциации для определения региональных и локальных обстановок тектонического развития территории.

#### Описание полученных полевых тектонофизических данных

В полевые сезоны 2009–2018 гг. нами собрана структурно-кинематическая информация о перемещениях на поверхности тектонических трещин в более чем ста точках наблюдения. Общее количество собранных замеров тектонической трещиноватости — более 4000 измерений, из них со структурно-кинематической информацией (определением направления перемещения на поверхности трещины) — 1837 измерений, а по отрывным структурам собрано более 300 измерений. Основное количество замеров было сделано в палеозойских осадочных и магматических породах. Лишь небольшая часть замеров в пределах Киргизского хребта проведена в кайнозойских отложениях. Кочкорская впадина и небольшой участок южного борта Иссык-Кульской впадины оказались хорошо охарактеризованы данными как по докайнозойским образованиям, так и по кайнозойским отложениям. В наиболее молодых четвертичных осадках фиксировались преимущественно трещины без кинематических признаков смещения.

Внесенные в базу данных сведения о типе и характеристике тектонических трещин конвертированы в формат, необходимый для дальнейшего расчета по алгоритму МКА. Произведена реконструкция локальных стресс-состояний и соответствующих им геодинамических типов напряженного состояния на основе собранных полевых тектонофизических данных с использованием программы *STRESSgeol*. Для Киргизского хребта в 83 точках наблюдения удалось реконструировать основные параметры 103 локальных стресс-состояний (по данным замеров 2009–2016 гг). В ходе расчетов получены основные параметры локальных стресс-состояний (ориентация осей главных напряжений, коэффициент Лоде — Надаи и др.). При этом в 83 точках реконструировано по одному

стресс-тензору, а в 20 точках определено по два стресс-тензора. В пределах Кочкорской впадины и ее бортов в 23 точках наблюдения определены основные параметры 24 локальных стресс-состояний. Для южного борта Иссык-Кульской впадины сделано 10 определений локальных стресс-тензоров.

В большинстве случаев не было возможным определить в поле хронологические взаимоотношения двух стресс-состояний в локальной точке. Однако в некоторых обнажениях нам удавалось зафиксировать смещение одних геологических стресс-индикаторов другими дизъюнктивными нарушениями, что позволяло определять относительную последовательность формирования рассматриваемых структур. Нами также тщательно фиксировались единые парагенетические сочетания тектонических трещин и малых структурных форм.

#### Тектонические стресс-индикаторы (малые структурные формы) Северного Тянь-Шаня

Проведенные исследования показали, что в пределах Северного Тянь-Шаня распространены разнообразные структурные индикаторы, отражающие тектонические деформации массива горных пород и дающие информацию об условиях формирования тектонической структуры в пределах изученных участков. Большинство собранных замеров, чуть менее половины от общего количества (примерно 46 %), представлены зеркалами скольжения с определенным на плоскости нарушения относительным перемещением крыльев (рис. 2). В количественном плане соотношение измеренных разных кинематических типов зеркал скольжения примерно одинаково при небольшом перевесе сбросовых и левосдвиговых нарушений. Около 15 % представляют замеры отрывных и жильных структур, а также даек. Треть замеров составляют тектонические сколы и трещины.



**Рис. 2.** Зеркала скольжения в ордовикских гранитах Киргизского хребта (слева) и неогеновых известковистых глинах Кочкорской впадины (справа)

Fig. 2. Slickensides in the Ordovician granites of the Kyrgyz Range (left) and Neogene calcareous clays of the Kochkor depression (right)

Распределение изученных стресс-индикаторов на каждом участке исследований достаточно уникально, но для рядом расположенных точек часто имеются сходные системы стресс-индикаторов. Для получения наиболее характерных направлений и ориентировок систем разнообразных структур изученного региона были построены частные кинематические диаграммы (рис. 3), на которых отражены плотностные максимумы для всех собранных нами малых структурных форм. Можно выделить следующие наиболее проявленные максимумы в пределах изученного региона. Взбросовые и надвиговые нарушения характеризуются широтным простиранием с падением плоскостей как на север, так и на юг, но более распространено падение плоскостей этих нарушений в южных румбах (особенно для пологих надвиговых структур). Сбросовые нарушения имеют широтное (до ВСВ) простирание с субвертикальным падением. Правые и левые сдвиги имеют максимумы субвертикальных нарушений с СЗ и СВ простиранием соответственно. Однако правые сдвиги имеют сходный максимум с левыми сдвигами СВ простирания. Тектоническая трещиноватость, сколовые трещины и небольшие разрывы имеют близкие к сдвиговым нарушениям максимумы, связанные с СВ

и C3 простиранием. Зоны дробления часто формируют субгоризонтальные тела нарушенных горных пород. Жилы и одна из систем отрывов имеют субмеридиональное простирание при субвертикальном положении. Другой максимум отрывных структур связан с CB (до BCB) простиранием. С таким же простиранием связано и небольшое количество измеренных даек. Большинство из рассмотренных максимумов тектонических индикаторов деформации можно связать с максимальным сжатием в субмеридиональном направлением.



**Рис. 3.** Круговые диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу) положения полюсов малых структурных форм разных кинематических типов, собранных при полевых исследованиях на Северном Тянь-Шане (2009–2017 гг.) и их плотностное распределение. Кинематический тип и суммарное количество использованных замеров показано над каждой из диаграмм. Плотностные максимумы полюсов окрашены в красные и желтые тона. Для построения диаграмм использовалась программа *Stereonet* 

**Fig. 3.** Stereoplots (upper hemisphere) of pole positions of small structural forms of different kinematic types collected during field studies in the Northern Tien Shan (2009–2017) and their density distribution. The kinematic type and total number of measurements used are shown above each of the diagrams. The density maxima of the poles are colored red and yellow. The program *Stereonet* was used to build stereoplots

### Результаты реконструкции напряженно-деформированного состояния горных пород в пределах Киргизского хребта

Основные наши усилия были направлены на реконструкцию напряженно-деформированного состояния горных пород Киргизского хребта. По результатам определения локальных стресссостояний составлена сводная таблица (табл. 1), построены карты ориентировки осей главных напряжений (рис. 4, 5), круговые диаграммы выходов осей главных напряжений (рис. 6), карта типов напряженного состояния для реконструированных локальных стресс-состояний (рис. 7) и диаграммы распределения типов напряженного состояния по областям Киргизского хребта (рис. 8).

# Реконструированные параметры палеонапряженного состояния (локальных стресс-тензоров) в пределах Киргизского хребта

## Reconstructed parameters of the local stress states of the Kyrgyz Range crust

	Номер	Координаты точек наблюления		Район	$\sigma_{l}$		σ <sub>2</sub>		σ <sub>3</sub>		Тип напряженного	
	точки	C III	вл	1 anon	Аз. Пл.	/	Аз. Пл. 🖊		Аз. Пл.	/	состояния	μσ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	14245	42° 25.61′	73° 48.22′	Кара-Балта	72	58	267	31	173	7	гор. сжатие	0,34
2	14220	42° 19.54′	73° 48.84′	Суусамыр	146	50	13	30	268	24	гор. сжатие	0,37
3	<b>14243</b> 42° 23.09′ 73° 49.37′ Кара-Бал		Кара-Балта	185	36	338	51	85	13	гор. сжатие со сдвигом	-0,11	
4	второе определение				82	18	208	62	345	22	гор. сдвиг	0,16
5	14242	42 23.17'	73° 50.41′	Кара-Балта	83	12	341	45	184	42	гор. растяжение со сдвигом	0
6	14246	42° 31.88′	73° 51.48′	Кара-Балта	113	47	237	28	345	30	гор. сжатие	0,07
7	14247	42° 32.42′	73° 51.68′	Кара-Балта	176	53	359	37	268	2	гор. сжатие со сдвигом	0,21
8		второе с	определение		312	11	178	74	44	11	гор. сдвиг	-0,44
9	14214-15	42° 39.63	73° 53.92	Сосновка	66	50	256	39	162	24	гор. сжатие со сдвигом	0,34
10	09008	42° 33.79	74° 00.57'	Ак-Суу	102	36	341	36	222	34	гор. сжатие со сдвигом	-0,16
11	11529	42 30.94	74 00.01	Ак-Суу	1/4	71	204	12	24	12	гор. растяжение	-0,2
12	11536	42º 36 31'	74º 00 38'	Arc Cyny	107	27	270	55	42	21		0,15
13	11531	42° 36 96'	74°00.58′	Ак-Суу Ак-Суу	185	48	87	7	351	<u>41</u>	слвиг в верт плоск	0,20
15	11530	42° 36 94′	74° 00.55′	Ак-Суу	179	17	270	2	5	73	гор растяжение	0
16	11532-33	42° 36.95′	74° 00.57′	Ак-Суу	171	40	267	7	5	49	слвиг в верт. плоск.	-0.02
17	11540	42° 36.85′	74° 00.57′	Ак-Суу	275	6	185	0	95	84	гор. растяжение	0.11
18		второе с	определение		95	72	354	4	262	18	гор. сжатие	-0,04
19	09009	42° 36.97'	74° 00.78'	Ак-Суу	185	48	61	27	315	30	гор. сжатие	-0,46
20	15733	42° 35.60′	74° 13.68′	Сокулук	163	21	253	1	347	69	гор. растяжение	-0,09
21	15731	42° 35.42′	74° 13.73′	Сокулук	260	35	70	55	167	5	гор. сдвиг	0,45
22	15730	42° 34.73′	74° 13.88′	Сокулук	141	55	248	12	346	32	гор. сжатие	-0,13
23	15729	42° 34.16′	74° 13.99′	Сокулук	68	77	208	10	300	8	гор. сжатие	-0,39
24	15740	42° 38.66′	74° 16.62′	Бурюлю	216	30	123	4	27	59	гор. растяжение	0,1
25	15739	42° 37.74′	74° 16.91′	Бурюлю	63	40	284	42	173	22	гор. сжатие со сдвигом	0,04
26	09010	42° 37.96'	74º 16.92'	Бурюлю	216	30	87	47	323	27	гор. сдвиг	0,07
27	09011	42° 37.72'	74° 16.96'	Бурюлю	217	54	308	1	39	36	сдвиг в верт. плоск.	0,05
28	15520	второе с	пределение	Б	54	27	315	16	199	58	гор. растяжение	0,18
29	15/38	42° 37.72	74° 16.98	Бурюлю	185	30	64 191	42	298	34	гор. сдвиг	-0,2
21	10450	42° 30.07	74° 17.79	Сокулук	242	21	161	60	252	21	Тор. сдвиг	0,02
31	11540	42 41.24	74 20.42	Джыламыш Дуд цама ин	343	21	225	20	233	1	гор. сдвиг	0,17
32	12069	42° 36 78′	74°20.71	Длыламыш Алы-Ариа	317	0	223	53	47	37	гор растяжение со сланом	0,24
34	09017	42° 37 22'	74° 35 82'	Чонкурчак	214	22	315	25	88	55	гор растяжение	0.02
35	11550	42° 38.56'	74° 36.28′	Чонкурчак	171	65	292	13	27	20	гор. сжатие	-0.03
36	09016	42° 38.40'	74° 38.26'	Чонкурчак	224	50	92	29	347	25	гор. сжатие	0.05
37	15737	42° 31.97′	74° 39.07′	Аламедин	287	6	27	60	194	30	гор. сдвиг	-0,22
38	12092	42° 40.74′	74° 39.16′	Кой-Таш	158	63	275	13	11	24	гор. сжатие	-0,08
39	16447	42° 29.67′	74° 39.25′	Аламедин	64	12	155	1	249	78	гор. растяжение	0,12
40	15743	42° 40.96′	74° 39.58′	Аламедин	13	48	208	42	112	8	гор. сжатие со сдвигом	-0,25
41	16448	42° 30.52′	74° 39.62′	Аламедин	130	69	350	17	256	13	гор. сжатие	-0,22
42	16450	42° 30.52′	74° 39.64′	Аламедин	119	40	286	50	23	18	гор. сжатие со сдвигом	-0,07
43	14240	42° 36.45′	74° 39.77′	Теп.Ключи	120	12	246	71	26	15	гор. сдвиг	-0,46
44	10001	второе с	пределение		35	6	168	82	304	6	гор. сдвиг	0,02
45	12091	42° 41.30	74° 39.81	Кой-Таш	146	16	244	27	29	58	гор. растяжение	0,11
46	14239	42° 35.00	74° 39.82	Аламедин	251	40	92	49	350	11	гор. сжатие со сдвигом	0,26
4/	12067	BTOPOE C	определение 749.20.09/	Тап Илани	50	46	150	15	259	41	сдвиг в верт. плоскости	0,04
40	12007	42 37.11	74 39.98	Родини ворото	95 256	52	25/	19	215	20		0,04
50	14230	42 40.92 42° 40.23′	74°40.34	Кой-Таш	159	33 77	61	19	331	13	гор. скатие	0,15
51	12071	42° 39 37'	74°41.01′	Кой-Таш Кой-Таш	57	35	171	30	291	41	гор растяжение	0.24
52	12071	42° 39.63′	74° 41.15′	Кой-Таш	53	6	233	84	143	0	гор. слвиг	0.29
53	11523 и 27	42° 40.77′	74° 41.33′	HCPAH	251	12	156	21	8	66	гор. растяжение	0.09
54	11524-26	42° 40.67′	74° 41.48′	HC PAH	144	11	236	8	0	77	гор. растяжение	-0,26
55		второе с	определение		231	17	133	24	352	60	гор. растяжение	0,12
56	09018	42° 40.70'	74° 41.50'	HC PAH	133	17	34	26	252	58	гор. растяжение	-0,02
57		второе с	определение		146	50	278	29	23	25	гор. сжатие	-0,04
58	16439	42° 40.74′	74° 41.50′	HC PAH	267	42	69	47	169	9	гор. сжатие со сдвигом	-0,19
59	16487	42° 40.69′	75° 41.79′	HC PAH	71	12	339	8	215	76	гор. растяжение	0,62
60	12084	42° 40.98′	74° 42.24′	HC PAH	30	27	292	16	175	58	гор. растяжение	0,4
61	12074	42° 39.93′	74° 46.81′	Таш-Пашат	62	24	173	39	309	41	гор. растяжение со сдвигом	-0,15
62	12075	42° 39.43′	74° 47.95′	Норус	207	21	81	57	307	24	гор. сдвиг	-0,06

## Окончание таблицы 1

Table	1	continued
Tuble	1	commueu

										14010-1-001	unnca	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
63		второе	определение		308	24	90	61	211	16	гор. сдвиг	-0,05
64	14254	42° 39.39′	74 50.34′	Алмалы	119	6	217	52	25	37	гор. растяжение со сдвигом	-0,33
65	14253	42° 39.15′	74 50.38'	Алмалы	269	18	137	64	5	18	гор. сдвиг	-0,2
66	12083	<b>12083</b> 42° 39.64′ 74° 50.40′		Алмалы	47	0	317	39	137	51	гор. растяжение со сдвигом	0,01
67		второе	определение		329	0	239	13	59	77	гор. растяжение	-0,11
68	12082	42° 40.53'	74° 51.18′	Алмалы	209	5	116	27	309	63	гор. растяжение	-0,03
69	14251	42° 39.92′	74° 51.28′	Алмалы	316	27	147	62	49	4	гор. сдвиг	0,14
70		второе	определение		77	11	187	гор. сдвиг	0,05			
71	14250	42° 39.96′	74° 51.38′	Алмалы	47	0	137	21	317	69	гор. растяжение	-0,01
72	14248	42° 40.01'	74° 51.47′	Алмалы	354	5	263	12	105	77	гор. растяжение	0,11
73		второе	определение		5	78	204	11	114	4	гор. сжатие	-0,07
74	14249	42° 40.00′	74° 51.47′	Алмалы	95	0	185	18	5	72	гор. растяжение	-0,27
75	11558	42° 39.68′	74° 54.54′	Иссык-Ата	199	34	326	43	87	29	гор. сдвиг	0,02
76	11555	42° 36.11′	75° 01.65′	Туюк	253	34	40	51	152	16	гор. сдвиг	-0,06
77	11556	42° 36.66'	75° 01.77′	Туюк	350	19	92	33	235	51	гор. растяжение	0,07
78	14223	42° 30.64'	75° 05.38′	Кегеты	261	29	128	51	6	24	гор. сдвиг	0,36
79	14222	42° 31.27′	75° 05.62′	Кегеты	257	6	361	68	165	21	гор. сдвиг	-0,19
80	14224	42° 31.28′	75° 05.67′	Кегеты	249	23	43	64	154	10	гор. сдвиг	0,09
81	14225	<b>14225</b> 42° 31.78′ 74° 06.07′		Кегеты	174	15	82	9	321	73	гор. растяжение	0,31
82	второе определение				298	58	60	19	159	25	гор. сжатие	0,06
83	14226	42° 33.32′	75° 06.74′	Кегеты	13	48	169	40	269	13	гор. сжатие со сдвигом	0,38
84	12076	42° 35.14′	75° 07.80′	Кегеты	181	4	359	86	91	0	гор. сдвиг	-0,18
85		второе с	определение		111	41	248	40	359	23	гор. сжатие со сдвигом	-0,12
86	12078	42° 35.41′	75° 08.39′	Кегеты	323	6	231	21	67	68	горизонтальное растяжение	0,1
87		второе	определение	•	57	17	286	66	153	17	гор. сдвиг	0,26
88	12079-80	42° 37.11′	75° 23.92′	Шамси	208	57	45	32	310	8	гор. сжатие	-0,21
89	12086	42° 34.71′	75° 48.28′	Боом	226	27	339	38	111	41	гор. растяжение со сдвигом	-0,24
90	15722	42° 32.87′	75° 48.88′	Боом	218	46	35	44	126	1	гор. сжатие со сдвигом	0,4
91	12085	42° 33.68′	75° 49.09′	Боом	359	23	193	87	92	5	гор. сдвиг	0,12
92		второе	определение		256	17	6	48	153	37	гор. растяжение со сдвигом	-0,16
93	09005	42° 43.87'	75° 49.89'	Джиль-Арык	207	10	314	58	111	30	гор. сдвиг	-0,01
94	09003	42° 43.13'	75° 49.90'	Джиль-Арык	218	46	9	40	112	15	гор. сжатие со сдвигом	-0,15
95		второе	определение		121	23	10	40	233	41	гор. растяжение со сдвигом	0,04
96	14227	42° 21.50′	75° 51.01′	Боом	323	0	233	68	53	22	гор. сдвиг	0,01
97	12088	42° 38.35′	75° 51.19′	Боом	299	0	29	85	209	5	гор. сдвиг	0,02
98	14230	42° 17.84′	75° 52.13′	Боом	281	6	188	30	21	59	гор. растяжение	-0,33
99	14228	42° 20.37′	75° 52.28′	Боом	214	22	35	68	304	0	гор. сдвиг	-0,09
100	12089	42° 39.25′	75° 52.89′	Боом	324	11	209	66	59	22	гор. сдвиг	-0,06
101		второе	определение		37	17	168	65	302	18	гор. сдвиг	-0,08
102	14238	42º 18.16'	76° 06.83′	Чу	21	19	180	70	288	6	гор. сдвиг	-0,05
103	03 второе определение						44	6	303	62	гор. растяжение	0,02

Примечание. В столбцах указаны номер и координаты точки наблюдения; название участка, в пределах которого располагается точка наблюдения; реконструированные ориентировки осей главных напряжений (σ<sub>1</sub> — минимальных (девиаторное растяжение), σ<sub>2</sub> — промежуточных и σ<sub>3</sub> максимальных сжимающих напряжений); тип напряженного состояния; коэффициент Лоде — Надаи μσ. Большинство точек наблюдения расположены в поле развития палеозойских образований, за исключением точек наблюдения № 09008, № 09009, №№ 11529-11532, № 09017 и № 11550, находящихся в кайнозойских отложениях.

Ориентировка осей главных напряжений. Данные проведенной реконструкции показывают, что область Киргизского хребта характеризуется разными типами напряженного состояния и значительными вариациями направлений главных напряжений. При первом взгляде на карты с проекциями осей, направленных по их погружению (см. рис. 4, 5), не вырисовывается четкой закономерности в положении осей главных напряжений в пределах Киргизского хребта. Вместе с тем, при статистической обработке выделяются плотностные максимумы распределения выходов этих осей (см. рис. 6). Сначала рассмотрим, как группируются оси главных напряжений для всех реконструированных нами локальных стресс-состояний (см. рис. 6, верхний ряд). Оси девиаторного растяжения образуют два основных направления погружения по азимутам ЮЗ 215° и СЗ 320°. Углы наклона большинства реконструированных осей растяжения близки к субгоризонтальным (от 0° до 25°), а при юго-западном азимуте погружения имеют угол до 50°. Промежуточная ось сжимающих напряжений (о2) характеризуется в пределах всего Киргизского хребта чаще субвертикальным положением, либо широтной горизонтальной ориентировкой. Значительно слабее проявлены оси с погружением по азимуту ЮЗ 230°, под углом 25°. Для осей максимальных сжимающих напряжений (σ<sub>3</sub>) хорошо выражены азимуты погружения в северных румбах с максимумом в северо-западном направлении (C3 340°). Меньше осей с погружением C3 300°

и широтных ориентировок. Угол наклона (погружения) близок к горизонтальному  $(0-25^{\circ})$ . Субвертикальное (с углом погружения от 50 до 80°) положение оси максимальных сжимающих напряжений приурочено, как правило, к районам перехода от структур Киргизского хребта к структурам смежной Чуйской впадины. Возможные причины данной закономерности будут далее рассмотрены. Определенные нами северо-западные и меридиональные азимуты погружения осей  $\sigma_3$  совпадают с полученными ранее ориентировками по сейсмологическим данным для верхних (до глубин 10 км) слоев земной коры [Ребецкий и др., 2016]. Вариации положения оси  $\sigma_3$  для разных локальных стресс-состояний, образующие в целом меридиональную (с широким отклонением до северо-западной), сходны и с распределением полученным методом разгрузки в массивах горных пород [Мамбетов, 1978].



**Рис. 4.** Ориентировка осей максимальных сжимающих напряжений в пределах Киргизского хребта. Стрелками показаны проекции осей ( $\sigma_3$ ) максимальных сжимающих напряжений. Направление стрелок в сторону погружения, а их длина указывает на угол наклона оси — при крутом погружении стрелки короткие, при пологом погружении — длинные, а при наклоне круче 60° знак — двойной кружок. Белым фоном показаны докайнозойские образования, а желтой заливкой кайнозойские отложения

Fig. 4. Orientation of axes of maximum compressive stresses of the Kyrgyz Range crust. The arrows show the horizontal projections of plunges of the principal axis  $\sigma_3$  (maximum compressive stresses). The direction of the arrows in the direction of dip, and their length indicates the angle of the axis — in a steep dive short arrows, with a gentle dip — long, and the slope steeper than 60 degrees sign — double club. White background shows pre-Cenozoic formations, and yellow fill Cenozoic sediments

Меньше вариаций ориентировок главных осей напряжений обнаруживается при рассмотрении территориально близких областей в пределах северного склона Киргизского хребта. В каждой локальной области часто преобладает определенный тип напряженного состояния. К примеру, вблизи НС РАН (селения Кой-Таш и Алмалы) реконструировано много локальных стресс-тензоров с субвертикальными ориентировками осей сжатия (обстановка горизонтального растяжения), в то время как между долинами рек Кегеты и Чу реконструированные оси сжатия полого погружаются в основном по азимутам ЮВ 150° и В 90°, а тип напряженного состояния часто отвечает здесь обстановке горизонтального сдвига.

Менее значительные изменения параметров наблюдаются на уровне отдельных участков (групп точек). Вместе с тем следует отметить, что и на этом локальном уровне вариации направлений главных напряжений и типов напряженного состояния на Северном Тянь-Шане существенно больше, чем мы видим, к примеру, на Северо-Западном Кавказе [Маринин, Тверитинова, 2016], где для групп близко расположенных точек часто характерны плавные изменения ориентировок осей главных напряжений по территории. Такое сложное распределение параметров локальных стресс-тензоров отражает более длительную структурную эволюцию Тянь-Шаня. Структурные неоднородности, обособленность отдельных блоков и активный кайнозойский тектогенез создали наблюдаемую мозаику разнородных результатов деформации.



**Рис. 5.** Ориентировка осей минимальных сжимающих напряжений (девиаторное растяжение) в пределах Киргизского хребта. Стрелками показаны проекции осей ( $\sigma_1$ ) минимальных сжимающих напряжений. Направление стрелок в сторону погружения, а их длина указывает на угол наклона оси — при крутом погружении стрелки короткие, при пологом погружении — длинные, а при наклоне круче 60° знак — кружок). Белым фоном показаны докайнозойские образования, а желтой заливкой кайнозойские отложения

**Fig. 5.** Orientation of axes of minimum compressive ( $\sigma_1$ ) stresses of the Kyrgyz Range crust. The arrows show the horizontal projections of plunges of the principal axis  $\sigma_1$ . The direction of the arrows in the direction of dip, and their length indicates the angle of the axis — in a steep dive short arrows, with a gentle dip — long, and the slope steeper than 60 degrees sign — circle). White background shows pre-Cenozoic formations, and yellow fill Cenozoic sediments

Tun Рассмотрим более напряженного состояния. подробно распределение реконструированных типов напряженного состояния в пределах Киргизского хребта (см рис. 7, рис. 8 — правая часть). Из 103 локальных стресс-состояний с обстановкой горизонтального сдвига связано 33 определения, с обстановкой горизонтального растяжения 29 определений. Горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом характерно для 9 локальных стресс-состояний. С обстановками горизонтального сжатия и горизонтального сжатия в сочетании со сдвигом оказались связаны 19 и 12 определений соответственно. Гораздо меньше было реконструировано обстановок сдвигания в вертикальной/ горизонтальной плоскости (5 определений). Таким образом, в целом в регионе доминирует тип напряженного состояния горизонтального сдвига. Если объединить с этим типом напряженного состояния определения горизонтального сжатия со сдвигом и горизонтального растяжения со сдвигом, то из 103 реконструированных нами локальных стресс-состояния более половины (54 определений) формируются в обстановках со значительной компонентой латерального сдвигания. Обстановкам горизонтального сдвига и сжатия, а также их сочетаниям, соответствует уже 64 определения, что в целом и определяет геодинамический тип напряженного состояния земной коры Киргизского хребта.

Различие геодинамического типа напряженного состояния для горных хребтов и смежных с ними впадин установлено по данным анализа сейсмологических данных [Ребецкий, 2015]. Как уже отмечалось в обзоре истории тектонофизических исследований в регионе, в работе [Сим и др., 2014] предполагалось, что изменение связано с влиянием близрасположенных впадин и с перестройкой общего поля напряжений к условиям растяжения с субвертикальной ориентировкой оси максимального сжатия. Альтернативным вариантом интерпретации является предположение, что это связано с изменением первоначального положения выявленных индикаторов тектонических деформаций. В пользу этого предположены как раз в зоне сформировавшегося на неотектоническом этапе перегиба Киргизской мегантиклинали. Это хорошо видно на рис. 4, где субвертикальные оси максимального сжатия, обозначенные кружками, тяготеют к границе Киргизского хребта с Чуйской впадиной.

## Киргизский хребет



**Рис. 6.** Ориентировка осей главных напряжений в пределах Киргизского хребта. На круговых диаграммах (стереографическая проекция на верхнюю полусферу) показаны выходы осей главных напряжений и плотностные максимумы их распределения. В верхнем ряду показаны суммарные диаграммы для Киргизского хребта. Ниже в трех рядах диаграмм показаны выборки по трем областям, расположенным по простиранию Киргизского хребта. Оси σ<sub>1</sub>, σ<sub>2</sub>, σ<sub>3</sub> — минимальных (девиаторное растяжение), промежуточных и максимальных сжимающих напряжений. Заливкой показаны плотностные максимумы распределения на диаграммах выходов соответствующих осей

**Fig. 6.** Orientation of the principal stress axes of the Kyrgyz Range crust. The stereoplots (upper hemisphere) show the outputs of the principal stress axes and the density maxima of their distribution. The top row shows the summary stereoplots for the Kyrgyz range. Below, three rows of stereoplots show samples for three regions located along the strike of the Kyrgyz Range. The principal stress axes:  $\sigma_1$  — minimum (deviator tension),  $\sigma_2$  — intermediate and  $\sigma_3$  — maximum compressive stresses. The fill shows the density maxima of the distribution in the output diagrams of the respective axes



**Рис. 7.** Типы напряженного состояния в пределах Киргизского хребта, определенные по собранным геологическим индикаторам палеонапряжений при помощи МКА:

1 — горизонтальное растяжение; 2 — горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом; 3 — горизонтальный сдвиг; 4 — горизонтальное сжатие в сочетании со сдвигом; 5 — горизонтальное сжатие; 6 — сдвиг в вертикальной/ горизонтальной плоскости. Белым фоном показаны докайнозойские образования, а желтой заливкой кайнозойские отложения

Fig. 7. Types of stress state within of the Kyrgyz range crust, determined by the collected geological indicators of paleostress using the method of cataclastic analysis:

1 — horizontal extension; 2 — horizontal extension in combination with shear; 3 — horizontal shear; 4 — horizontal compression in combination with shear; 5 — horizontal compression; 6 — shift in the vertical / horizontal plane. White background shows pre-Cenozoic formations, and yellow fill Cenozoic sediments

Пример подобного изменения первоначального положения геологических стресс-индикаторов в зоне смены восхолящих движений в области Киргизского хребта нисходящими движениями Чуйской впадины мы зафиксировали в долине р. Ак-Суу. Проведенные исследования были сконцентрированы на небольшом по площади участке вблизи Чонкурчакского надвига, по которому палеозойские образования надвинуты здесь на более молодые палеоген-неогеновые отложения. Группа близко расположенных точек расположена в правом борту р. Ак-Суу на выступающей в рельефе небольшой гривке, образованной плотными конгломератами и известняками олигоцен-миоценового (?) возраста. По результатам проведенных замеров зафиксированы системы сбросов, взрезов и взбросов восток - северо-восточного простирания и парагенетически с ними связанных отрывов, что устанавливается по непосредственным полевым наблюдениям и по их общему минеральныму выполнению. При помощи МКА по структурно-кинематическим данным о трещинах здесь определено несколько локальных стресс-состояний с крутым положением оси максимального сжатия и обстановкой горизонтального растяжения. В большинстве точек наблюдения устанавливается единый этап деформирования, при котором все измеренные индикаторы палеонапряжений укладываются в единственное решение по МКА и образуют единый структурный парагенез. Оси оз с субвертикальным погружением реконструированы в массиве горных пород, имеющих кругое залегание. Таким образом, первоначальные структурные парагенезы связаны наклонное с горизонтальным укорочением по слоям осадочного напластования и формировались в обстановке горизонтального сжатия, ориентированного в меридиональном направлении. В отдельных точках помимо вышеописанного структурного парагенеза фиксируется обстановка горизонтального сжатия с ССВ ориентировкой оси максимального сжатия и субвертикальной осью девиаторного растяжения, которая вероятно формировалась уже при наклонном положении слоистости — близком к современному их положению. Пример подобных структурных парагенезов представлен на рис. 9.

Выявленные особенности регионального распределение параметров напряженнодеформированного состояния. Рассматривая отдельные области по простиранию Киргизского хребта, можно наметить некоторые различия в распределении направлений осей главных напряжений и типов напряженного состояния. Особенно отчетливо проявляются различия по соотношению разных типов напряженного состояния (см. рис. 8, левая часть).



**Рис. 8**. Соотношение типов напряженного состояния в пределах Киргизского хребта по данным реконструкции геологических индикаторов напряжения. На диаграммах показано количество локальных стресс-состояний с определенным типом напряженного состояния в трех областях по простиранию Киргизского хребта (слева) и для всего хребта в целом (справа)

**Fig. 8.** The ratio of types of stress state of the Kyrgyz Range crust according to the reconstruction of geological stress indicators. The diagrams show the number of local stress states with a certain type of stress state in three regions along the strike of the Kyrgyz Range (left) and for the Kyrgyz Range (right)

Западная область (от долины р. Кара-Балта на западе до долины р. Джыламыш на востоке) характеризуется практически равным количеством локальных стресс-состояний всех геодинамических типов: горизонтального растяжения, сдвига в вертикальной/горизонтальной плоскости, горизонтального сдвига и горизонтального сжатия (см. рис. 8.). Исключение составляет тип горизонтального растяжения со сдвигом (одно определение). Особенностью области является наличие типов напряженного состояния сдвига в вертикальной/горизонтальной плоскости (оси  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  наклонены, а ось  $\sigma_2$  субгоризонтальна). Преобладают меридиональные положения осей максимального сжатия и растяжения, с погружением осей  $\sigma_3$  на север, а осей  $\sigma_1$  на юг. Если в целом для западной области Киргизского хребта характерны разнообразные типы напряженного состояния, то для самой западной ее части в долине р. Кара-Балта для большинства реконструированных локальных стресс-тензоров характерно горизонтальное сжатие (оси  $\sigma_3$  и  $\sigma_2$  имеют горизонтальное положение, а ось  $\sigma_1$  субвертикальна).



Рис. 9. Круговые диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу), показывающие полюса плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа и положение осей главных напряжений, определенных МКА в точке наблюдения № 11529 (Аксу):

1-8 — полюса тектонических трещин с преимущественным типом перемещений: 1 — взбросы, 2 — сбросы, 3 — правые сдвиги, 4 — левые сдвиги, 5 — отрывы, 6 — жилы, 7 — трещины сколового типа, 8 — элементы залегания слоистости нормальные и опрокинутые; 9-11 — оси главных нормальных напряжений: 9 — минимальных, 10 — промежуточных, 11 — максимальных; 12 — направление перемещения висячего блока в полюсах трещин (зеркал скольжения) со структурно-кинематическими данными, которые были использованы при реконструкции. Толщина линий или сплошная заливка значков (1-4) указывает на степень достоверности определения кинематики смещения: отличная с амплитудой (сплошная заливка), хорошая (толстые) и предполагаемая (тонкие)

**Fig. 9.** Stereoplots (upper hemisphere) showing poles of the planes of small structural forms of different kinematic type and position of principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis at observation point  $N_{2}$  11529 (Aksu): 1-8 — poles of small structural forms with kinematic type: 1 — thrust and reverse faults, 2 — normal faults, 3 — dextral strike-slip faults, 4 — sinistral strike-slip faults, 5 — tension gashes, 6 — veins, 7 — cracks, 8 — bedding/overturned bedding; 9-11 — principal stress axes: 9 — minimum, 10 — intermediate, 11 — maximum, 12 — direction of movement of hanging wall in poles of minor faults (slickensides) were used at reconstruction. The thickness of the lines or the solid fill of the icons (1-4) indicates the degree of confidence (quality) in determining the displacement kinematics: excellent with amplitude (solid fill), good (thick), and assumed (thin)

Центральная область (район НС РАН, от долины р. Алы-Арча на западе до долины р. Иссык-Ата на востоке) характеризуется обстановками горизонтального растяжения и растяжения со сдвигом (при субвертикальном положении оси максимальных сжимающих напряжений ( $\sigma_3$ ) и субгоризонтальном положении оси минимальных сжимающих напряжений ( $\sigma_1$ ). Существенно меньше определено обстановок горизонтального сдвига, горизонтального сжатия, а также их сочетания — от 4 до 9 против 15 обстановок горизонтального растяжения (см. рис. 8.). Оси максимального сжатия часто имеют здесь крутые погружения на север, а субгоризонтально ориентированные оси максимального сжатия направлены в северных румбах и на северо-запад. Большая распространенность в центральной области обстановок горизонтального растяжения связана, по всей видимости, с расположением большинства точек наблюдения, которые находятся вблизи границы Киргизского хребта и Чуйской впадины.

Характерные точки наблюдения рассматриваемой области расположены в районе НС РАН, на дороге между средней и верхней площадками станции (т.н. 11523 и 11527). Выходы гранитов разбиты системами трещин с характерной для магматических пород X-образной отдельностью, образованной системами круто падающих трещин (на ЮЮВ, 3C3 и CB) и менее развитыми субгоризонтальными трещинами. Здесь реконструированы два локальных стресс-состояния со следующими ориентировками осей главных напряжений:  $\sigma_1 - 144 \angle 11^\circ$ ;  $\sigma_2 - 238 \angle 8^\circ$ ;  $\sigma_3 - 0 \angle 77^\circ$ для одного и  $\sigma_1 - 231 \angle 17^\circ$ ,  $\sigma_2 - 133 \angle 24^\circ$ ,  $\sigma_3 - 352 \angle 60^\circ$  для другого. Реконструированные локальные стресс-состояния характеризуются крутыми ориентировками осей сжатия, погружающимися в северных румбах и определяющими обстановку горизонтального растяжения. Оси  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  этих двух определений взаимно меняются местами, что свидетельствует скорее о сходной обстановке одного этапа, нежели о двух независимых этапах деформирования. Определенные по сколовым трещинам оси растяжения не совпадают с осями растяжения, полученными при анализе отрывных дизъюнктивов (азимутальное расхождение более 30°). Для жил и отрывов характерны максимумы 275∠70-80° и 175∠70-80°. Особенно четко проявлена субмеридиональная система отрывов и жил. В них отмечается наибольшая минерализация и величина открытия.

Сходные данные получены и по группе соседних точек: т.н. 11524–11526 к югу от верхней площадки НС РАН (рис. 10). Определенное здесь локальное стресс-состояние имеет ориентировки осей главных напряжений:  $\sigma_1 - 251 \angle 12^\circ$ ,  $\sigma_2 - 156 \angle 21^\circ$ ,  $\sigma_3 - 8 \angle 66^\circ$ . Тектонофизическая интерпретация действовавших в этих точках палеонапряжений может быть связана: 1) с формированием гранитной протрузии с субвертикальной ориентировкой максимальных сжимающих напряжений; 2) с близостью новейших впадин (Чуйской и Чонкурчакской), которые на современном этапе находятся в режиме горизонтального растяжения с вертикально ориентированной осью  $\sigma_3$ ; 3) изменением первоначального положения всех структур на крыле Киргизской мегантиклинали.



Рис. 10. Круговые диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу), показывающие полюса плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа (слева) и положение осей главных напряжений, определенных МКА в точке наблюдения № 11524–11526 (в центре и справа для двух реконструированных этапов «А» и «Б»)

**Fig. 10.** Stereoplots (upper hemisphere) showing the poles of the planes of small structural forms of different kinematic type and the position of principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis at observation point  $N_{\rm D}$  11524–11526 (center and right for the two reconstructed stages "A" and "B")

В центральной области Киргизского хребта в районе сел. Чонкурчак (т.н. 11550) в наиболее молодых отложениях Киргизского хребта, из тех в которых удалось зафиксировать трещины со следами относительных перемещений, определена обстановка горизонтального сжатия. Относительно полого (Аз. Пд.  $120\angle 20^{\circ}$ ) залегающие красноцветные отложения киргизской серии (палеоген-неоген) нарушены многочисленными зеркалами скольжения надвигового характера с измеренной амплитудой до 0.7 м и падениями плоскостей этих нарушений преимущественно в северных и южных румбах (рис. 11). Установлены ориентировки осей главных напряжений:  $\sigma_1 - 171\angle 65^{\circ}$ ,  $\sigma_2 - 292\angle 13^{\circ}$ ,  $\sigma_3 - 27\angle 20^{\circ}$ . Конгломераты красноцветные нарушены трещинами, образующими две системы, в остром угле между которыми и лежит определенная ось сжатия. Таким образом, в данных отложениях разными геологическими стресс-индикаторами четко зафиксирован один этап с обстановкой горизонтального сжатия с ССВ осью сжатия и субвертикальной осью растяжения, который и является самым последним из проявленных в этом массиве горных пород.

Восточная область (между долинами рек Иссык-Ата и Чу) характеризуется заметным преобладанием режимов горизонтального сдвига — оси  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  имеют близгоризонтальное положение. Обстановка ССЗ сжатия (тип напряженного состояния горизонтального сдвига и горизонтального сжатия). Для группы точек, расположенных в Боомском ущелье (долина р. Чу) характерна обстановка горизонтального сдвига (рис. 12), которая резко преобладает над обстановками горизонтального растяжения и горизонтального растяжении в сочетании со сдвигом (см. рис. 8). В целом следует отметить, что при перемещении с запада на восток области увеличивается роль стресс-тензоров, сформированных в обстановке горизонтального сдвига.

*Хронология*. Сделанные определения локальных стресс-состояний могут относиться к широкому возрастному интервалу. Исключение составляют определения, сделанные на основании анализа стресс-индикаторов в кайнозойских отложениях. Поскольку у нас нет в настоящий момент надежных сведений для обоснованного разделения локальных стресс-состояний по абсолютной или относительной

хронологии, мы рассматриваем все полученные определения совместно. В таблице сделано разделение на этапы «А» и «Б» с учетом количества участвующих в однородной выборке трещин с кинематической информацией при расчете фаз деформаций в программе *STRESSgeol*: этап «А» содержит большее количество геологических индикаторов палеонапряжений, чем этап «Б».



Рис. 11. Круговые диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу), показывающие полюса плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа и положение осей главных напряжений, определенных МКА в точке наблюдения № 11550

Fig. 11. Stereoplots (upper hemisphere) showing the poles of the planes of small structural forms of different kinematic type and the position of principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis at observation point  $N_{\text{O}}$  11550



Рис. 12. Круговые диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу), показывающие полюса плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа и положение осей главных напряжений, определенных методом катакластического анализа в точке наблюдения № 12088 (Боомское ущелье)

Fig. 12. Stereoplots (upper hemisphere) showing the poles of the planes of small structural forms of different kinematic type and the position of principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis at observation point  $N^{\circ}$  12088 (Boom Valley)

Таким образом, в пределах Киргизского хребта установлена большая вариабельность по направлениям максимального сжатия (при общем субмеридиональном тренде) и по типу напряженного состояния (при преобладании обстановок горизонтального сдвига для которых оси максимальных и минимальных сжимающих напряжений имеют горизонтальное положение, а промежуточная ось субвертикальна). Полученные результаты реконструкции тектонических напряжений по Киргизскому хребту показали необходимость получения подробных данных по напряженно-деформированному состоянию смежных с ним межгорных впадин, выполненных кайнозойскими отложениями. Проведенные исследования в Кочкорской и Иссык-Кульской впадинах позволили получить информацию о преобладающих в них типах напряженного состояния и ориентации осей главных напряжений и деформаций с использованием полевых данных по геологическим стресс-индикаторам, которые заведомо формировались на неотектоническом этапе развития.

### Результаты реконструкции напряженно-деформированного состояния горных пород в пределах Кочкорской впадины

Кочкорская впадина выполнена кайнозойскими отложениями, а ее борта сложены преимущественно палеозойскими образованиями. Тектоническое строение Кочкорской впадины подробно рассмотрено многими исследователями [Чедия, 1986; Корженков, 1999]. Полевые тектонофизические исследования были направлены на реконструкцию основных параметров локальных стресс-состояний в массивах горных пород, слагающих как собственно Кочкорскую впадину, так и ее бортов. Основную часть собранного материала представляют замеры геологических индикаторов палеонапряжений, позволяющих нам устанавливать кинематику их относительных перемещений (небольшие разрывы, зеркала скольжения, отрывы и т.д.). В 35 точках собрана информация по геологическим стресс-индикаторам напряжений. Всего собрано около 700 замеров, из них 325 с информацией о кинематике относительного перемещения бортов разрывных нарушений. Собранные полевые данные позволили реконструировать основные параметры локальных стресс-состояний по комплексу геологических индикаторов палеонапряжений (табл. 2).

Таблица 2 Table 2

## Реконструированные параметры палеонапряженного состояния (локальных стресс-тензоров) в пределах Кочкорской впадины

	Номер	Координаты точек наблюдения		Район	Возраст отложе-	σι		σ <sub>2</sub>		σ3		Тип напряженного	μσ
	10484	с.ш.	в.д.		ний	Аз. Пд.	Ζ	Аз. Пд.	Ζ	Аз. Пд.	2	состояния	
1	15703	42° 16.12′	75° 51.24′	Кочкорка	PZ	31	49	209	41	300	1	гор. сжатие со сдвигом	-0,14
2	15704	42° 16.05′	75° 51.26′	Кочкорка	PZ	83	12	263	78	173	0	гор. сдвиг	0,12
3	15705	42° 06.72′	75° 38.73′	Джоон-Арык	PZ	156	22	64	6	320	67	гор. растяжение	0,01
4	15706	42° 05.39'	75° 38.58′	Джоон-Арык	PZ	350	11	95	54	253	34	гор. сдвиг	0,06
5	15708	42° 01.90'	75° 41.58′	Джоон-Арык	PZ	46	11	254	78	137	6	гор. сдвиг	-0,24
6	15709	42° 02.20'	75° 41.52′	Джоон-Арык	PZ	141	73	329	17	238	2	гор. сжатие	0,21
7	15710	42° 03.16′	75° 40.98′	Джоон-Арык	PZ	165	31	300	50	61	23	гор. сдвиг	0,24
8	15711	42° 03.53'	75° 40.77′	Джоон-Арык	PZ	77	11	182	53	339	34	гор. сдвиг	0,01
9	15713	42° 09.09'	75° 38.74′	Джоон-Арык	KZ	68	77	311	6	219	12	гор. сжатие	-0,37
10	16459	42° 11.08′	75° 34.79′	Кок-Джар	KZ	95	60	255	28	349	9	гор. сжатие	0,2
11	16460	42° 11.07′	75° 34.02′	Кок-Джар	KZ	5	54	266	7	171	35	гор. сжатие	-0,39
12	16462	42° 08.54'	75° 15.81′	Кочкорка	PZ	291	41	119	49	24	4	гор. сжатие со сдвигом	0,47
13	16463	42° 08.99'	75° 16.64′	Кочкорка	PZ	95	42	257	47	357	9	гор. сжатие со сдвигом	0,3
14	16465	42° 15.39′	75° 43.85′	Кочкорка	PZ	113	6	23	2	275	84	гор. растяжение	0,35
15	16469	42° 13.60'	75° 42.58′	Кочкорка	PZ	69	23	233	66	336	6	гор. сдвиг	-0,14
16	16471	42° 13.91′	75° 41.97′	Кочкорка	PZ	251	6	156	38	348	52	гор. раст. со сдвигом	0,76
17	16475	42º 16.77'	75° 36.00'	Кокадыр	PZ	229	55	53	35	322	2	гор. сжатие	-0,35
18	16476	42° 17.12′	75° 36.09′	Кокадыр	PZ	185	66	86	4	354	24	гор. сжатие	-0,36
19	16479	42º 14.76'	75° 50.83′	Кочкорка	PZ	77	17	340	20	204	64	гор. растяжение	0,12
20	16480	42° 15.06'	75° 51.12′	Кочкорка	PZ	89	6	183	30	349	59	гор. растяжение	-0,14

## Reconstructed parameters of the local stress states of the Kochkor depression crust

Примечание. В столбцах указаны номер и координаты точки наблюдения; название участка, в пределах которого располагается точка наблюдения; реконструированные ориентировки осей главных напряжений (σ<sub>1</sub> — минимальных (девиаторное растяжение), σ<sub>2</sub> — промежуточных и σ<sub>3</sub> — максимальных сжимающих напряжений); тип напряженного состояния; коэффициент Лоде — Надаи µσ.

Большая часть замеров была проведена в палеозойских и более древних образованиях, слагающих борта Кочкорской впадины (рис. 13). В неогеновых отложениях, слагающих южные краевые части впадины и небольшие поднятия внутри неё, удалось зафиксировать зеркала скольжения отличной сохранности, а также другие геологические индикаторы тектонических напряжений, которые позволили реконструировать локальные стресс-состояния различными методами. Эти локальные стресс-состояния несомненно могут быть отнесены к свидетельствам новейших тектонических деформаций.

Ориентировка осей главных напряжений. Проведенная реконструкция показывает, что в изученном районе оси максимальных сжимающих напряжений ( $\sigma_3$ ) преимущественно ориентированы в ССЗ-ЮЮВ направлении, занимая при этом субгоризонтальное положение (рис. 14). Оси минимальных сжимающих напряжений (девиаторного растяжения —  $\sigma_1$ ) имеют преимущественно субширотную и реже субвертикальную ориентацию. Субвертикальная ориентация оси  $\sigma_1$  характерна для кайнозойских отложений южной части впадины. Некоторое разнообразие ориентировок осей максимального сжатия наблюдается уже непосредственно к югу от Кочкорской впадины в смежном хребте, сложенном палеозойскими образованиями. Здесь в серии точек, расположенных вдоль р. Джоон-Арык, зафиксированы обстановки, связанные как с северо-восточными направлениями максимального сжатия, так и с северо-западными его ориентировками (см. рис. 13). Установленная ориентация осей главных напряжений для верхних горизонтов земной коры Кочкорской впадины и ее обрамления согласуется с данными по современным движениям земной поверхности [Кузиков, 2014], механизмами крупных землетрясений [Омуралиева и др., 2009] и реконструкциями по сейсмологическим данным [Ребецкий и др., 2016].



Рис. 13. Тип напряженного состояния и ориентировка осей максимальных сжимающих напряжений в пределах Кочкорской впадины. Цифрами (курсивом) обозначены номера точек наблюдения. Стрелками показаны проекции осей максимальных сжимающих напряжений, а значками — тип напряженного состояния: *1* — горизонтального растяжения; *2* — горизонтального растяжения в сочетании со сдвигом; *3* — горизонтального сдвига; *4* — горизонтального сжатия в сочетании со сдвигом; *5* — горизонтального сжатия; *6* — проекции осей максимальных сжимающих напряжений (направление стрелок в сторону погружения; длина указывает на угол

максимальных сжимающих напряжении (направление стрелок в сторону погружения; длина указывает на угол наклона оси — при крутом погружении стрелки короткие, при пологом погружении — длинные). Белым фоном показаны докайнозойские образования, а желтой заливкой кайнозойские отложения впадины

**Fig. 13.** Type of stress state and orientation of maximal (compression) stress axis of the Kochkor depression crust. The numbers (italic) indicate the numbers of the observation points. Arrows show projections of axes of maximum compressive stresses, and icons indicate the type of stress state:

1 — horizontal extension; 2 — horizontal extension in combination with shear; 3 — horizontal shear; 4 — horizontal compression in combination with shear, 5 — horizontal compression; 6 — horizontal projection of plunges of maximum compressive stresses (direction of arrows towards immersion; Length indicates the angle of inclination of the axis — at steep immersion the arrows are short, at shallow immersion — long). White background shows pre-Cenozoic formations, and yellow fill Cenozoic sediments

Изученные структурные парагенезы зеркал скольжения разного кинематического типа, отрывов и других дизьюнктивных структур также свидетельствуют о ССЗ направлении максимального сжатия. На северном борту Кочкорской впадины (к северо-западу от сел. Кочкорка) в обстановке горизонтального сдвига наблюдается парагенез правых сдвигов северо-западного простирания и левых сдвигов субмеридионального простирания, а также отрывов ССЗ простирания. Здесь же, чуть западнее, хорошо проявлены взбросо-надвиговые нарушения ВСВ простирания с падением плоскостей сместителя как на ЮЮВ, при котором надвигание шло по азимуту ССЗ 330°, так и на ССЗ – надвигание на ЮЮВ 150°. Эти структуры формировались в обстановке горизонтального сжатия (рис. 15).

В центральной части Кочкорской впадины (западнее сел. Кок-Жар) в неогеновых отложениях, слагающих небольшой хребет субширотного простирания, в серии точек зафиксированы четкие зеркала скольжения, которые характеризуют новейший этап тектонического развития. Среди них преобладают пологие надвиговые нарушения с падением сместителя в южных румбах (рис. 16 и 17). На зеркалах скольжения видна отчетливая механическая штриховка, иногда с тонкой глинистой

примазкой, по которой уверенно определяется относительное перемещение их крыльев. Тектонические трещины субмеридионального простирания имеют неровные границы или приоткрыты, что свидетельствует об отрывном характере данных структур. Проведенной реконструкцией установлены следующие ориентировки осей главных напряжений в двух точках наблюдения:  $\sigma_1 - 95 \angle 60^\circ$ ,  $\sigma_2 - 255 \angle 28^\circ$ ,  $\sigma_3 - 349 \angle 9^\circ$ ;  $\sigma_1 - 5 \angle 54^\circ$ ,  $\sigma_2 - 266 \angle 7^\circ$ ,  $\sigma_3 - 171 \angle 35^\circ$ . Таким образом, для новейшего этапа геологическими стресс-индикаторами подтвержден режим горизонтального сжатия с ССЗ ориентировкой оси  $\sigma_3$  и субвертикальной ориентировкой оси  $\sigma_1$ . Промежуточная ось  $\sigma_2$  по этим данным занимает широтное субгоризонтальное положение. Геологические и геофизические исследования более крупных разрывных структур, проведенные в этой части Кочкорской впадины, устанавливают сходную тектоническую обстановку с формированием пологих надвигов субширотного простирания [Пржиялговский и др., 2018].



**Рис. 14.** Ориентировка осей главных напряжений локальных стресс-тензоров в пределах Кочкорской впадины. На круговых диаграммах (стереографическая проекция на верхнюю полусферу) показаны выходы осей главных напряжений и плотностные максимумы их распределения. Оси  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  — минимальных (девиаторное растяжение), промежуточных и максимальных сжимающих напряжений. Заливкой показаны плотностные максимумы распределения на диаграммах выходов соответствующих осей

**Fig. 14.** Orientation of principal stress axes of local stress tensors of the Kochkor depression crust. The stereoplots (upper hemisphere) show the outputs of the principal stress axes and the density maxima of their distribution. Axes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  are minimum (deviator tension), intermediate and maximum compressive stresses. The fill shows the density maxima of the distribution in the output diagrams of the respective axes



Рис. 15. Круговые диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу), показывающие полюса плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа и положение осей главных напряжений, определенных методом катакластического анализа в точке наблюдения № 16475 (Кокадыр). Условные обозначения приведены на рис. 9.

**Fig. 15.** Stereoplots (upper hemisphere) showing the poles of the planes of small structural forms of different kinematic type and the position of the principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis at observation point No. 16475 (Kokadyr). Refer to Figure 9.

*Тип напряженного состояния.* Данные проведенной реконструкции по всей совокупности измеренных индикаторов палеонапряжений показывают, что в области Кочкорской впадины преобладают два типа напряженного состояния – горизонтального сжатия и сдвига, а также их

сочетания. Обстановки горизонтального растяжения фиксируются намного реже и приурочены к восточной окраине Кочкорской впадины (см. рис. 13). Интересно, что в случае субвертикальной ориентации оси максимального сжатия промежуточная ось направлена на ССЗ или субмеридионально. Это свидетельствует о ССЗ направлении латерального укорочения во всех изученных точках Кочкорской впадины. К югу от впадины в долине р. Джоон-Арык преобладают обстановки горизонтального сдвига, а ориентации осей максимального сжатия имеет большую изменчивость (реконструированы северо-восточные и северо-западные направления).



Рис. 16. Круговые диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу), показывающие полюса плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа и положение осей главных напряжений, определенных методом катакластического анализа в миоценовых отложениях в точке наблюдения № 16459 (Кокджар). Условные обозначения приведены на рис. 9

**Fig. 16.** Stereoplots (upper hemisphere) showing the poles of the planes of small structural forms of different kinematic type and the position of the principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis in the Miocene deposits at observation point No. 16459 (Kokjar). Refer to Figure 9



Рис. 17. Круговые диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу), показывающие полюса плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа и положение осей главных напряжений, определенных методом катакластического анализа в миоценовых отложениях в точке наблюдения № 15713 (Джоон-Арык). Условные обозначения приведены на рис. 9

**Fig. 17.** Stereoplots (upper hemisphere) showing the poles of the planes of small structural forms of different kinematic type and the position of the principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis in Miocene deposits at observation point No. 15713 (Joon-Aryk). Refer to Figure 9

Ранее было установлено, что для новейших поднятий Северного Тянь-Шаня характерны преимущественно обстановки горизонтального сжатия и сдвига [Ребецкий и др., 2016; Маринин и др., 2016]. При этом на новейшем этапе геодинамический тип напряженного состояния закономерно меняется от режима горизонтального растяжения в предгорных прогибах к режимам горизонтального сжатия и сдвига в горной части [Ребецкий, 2015; Ребецкий и др., 2016]. Преобладающие в Кочкорской впадине обстановки горизонтального сжатия и сдвига больше соответствует режиму горной части,

вследствие расположения вблизи осевой части складчатой системы Северного Тянь-Шаня и полноценного вовлечения в процесс развития орогенных поднятий. Это является, по-видимому, существенным различием напряженно-деформированного состояния небольших межгорных впадин, с одной стороны, и крупных предгорных прогибов с иными характеристиками земной коры, с другой.

## Результаты реконструкции напряженно-деформированного состояния горных пород в пределах южного борта Иссык-Кульской впадины

Полевые исследования проводились в южной части Иссык-Кульской впадины Северного Тянь-Шаня. Наибольшее количество замеров собрано непосредственно к западу от пос. Каджи-Сай (рис. 18) на крыльях диапироподобной антиклинальной складки, имеющей северо-восточное простирание у своей восточной периклинали и субширотное простирание в юго-западной части. Ядро складки сложено мезозойскими желтоватыми и зеленоватыми глинами, а крылья кайнозойскими красноцветными терригенными отложениями, которые представлены алевролитами, песчаниками, гравелитами и реже конгломератами. Крылья складки характеризуются крутым или субвертикальным залеганием, а часто и опрокинутым (что помимо прямых структурных наблюдений устанавливается также и по градационной слоистости отложений). На ряде участков северное крыло запрокинуто больше, нежели южное, и, соответственно, осевая плоскость складки имеет здесь падение в южных румбах. Образование рассматриваемой антиклинали связывается с внедрением пластичных зеленых юрских глин в компетентные слои красноцветных отложений кайнозоя вдоль ослабленной зоны разрывного нарушения [Delvaux et al., 2013]. Другие точки наблюдения располагались к востоку от пос. Каджи-Сай (две из которых в палеозойских образованиях).



**Рис. 18.** Схема расположения точек с реконструированными локальными стресс-тензорами в районе сел. Каджи-Сай. Показано расположение антиклинальной складки и диаграммы с направлением погружения осей главных напряжений реконструированных локальных стресс-состояний (стереографическая проекция на верхнюю полусферу): σ<sub>1</sub> — минимальных, σ<sub>2</sub> — промежуточных и σ<sub>3</sub> — максимальных сжимающих напряжений (синий, черный и красный цвет соответственно)

**Fig. 18.** The layout of points with reconstructed local stress states in the area of villages. Kadzhi-Sai. The arrangement of anticline fold and stereoplots (upper hemisphere) with the direction of the plunges of principal stress axes is shown:  $\sigma_1$  — minimum,  $\sigma_2$  — intermediate and  $\sigma_3$  — maximum compressive stresses (blue, black and red, respectively)

В ходе полевых исследований в пределах южной части Иссык-Кульской впадины в 20 точках собрано около 500 замеров, из них 125 с информацией о кинематике относительного перемещения бортов разрывных нарушений. Поскольку основная часть наблюдений проведена в кайнозойских отложениях южного борта Иссык-Кульской впадины, то полученные нами данные по напряженнодеформированному состоянию могут быть отнесены к новейшему тектоническому этапу деформирования. По результатам проведенных расчетов получены основные параметры локальных стресссостояний (ориентация осей главных напряжений, коэффициент Лоде-Надаи и др.) в 10 точках наблюдения. Полученные параметры напряженно-деформированного состояния участка южного борта Иссык-Кульской впадины приведены в таблице № 3 и представлены в виде выходов осей главных напряжений рассчитанных локальных стресс-тензоров в проекции на верхнюю полусферу стереограмм (рис. 19).



**Рис. 19.** Ориентировка осей главных напряжений локальных стресс-тензоров южной части Иссык-Кульской впадины. На круговых диаграммах (стереографическая проекция на верхнюю полусферу) показаны выходы осей главных напряжений: σ<sub>1</sub> — минимальных (девиаторное растяжение), σ<sub>2</sub> — промежуточных и σ<sub>3</sub> — максимальных сжимающих напряжений

Fig. 19. Orientation of principal stress axes of the local stress tensors of the southern part of Issyk-Kul valley. Stereoplots (upper hemisphere) show the outputs of the principal stress axes:  $\sigma_1$  — minimum (deviator tension),  $\sigma_2$  — intermediate and  $\sigma_3$  — maximum compressive stresses

*Ориентировка осей главных напряжений*. В изученном районе оси максимальных сжимающих напряжений ( $\sigma_3$ ) характеризуются погружением преимущественно в северных румбах довольно часто под крутым углом, а оси минимальных сжимающих напряжений (девиаторного растяжения —  $\sigma_1$ ) напротив, имеют погружения в южных румбах с углом погружения от 20° до 60°. Промежуточные оси максимальных сжимающих напряжений ориентированы в широтном направлении вдоль южного борта Иссык-Кульской впадины.

Тип напряженного состояния. Анализируя полученные типы напряженного состояния, можно сказать, что присутствуют как обстановки горизонтального сжатия, так и обстановки горизонтального растяжения. Кроме того, присутствуют обстановки сдвига в вертикальной/горизонтальной плоскости. В последней упомянутой обстановке возможно формирование взрезовых и/или пологих надвиговопокровных нарушений. Для южной части Иссык-Кульской впадины в работе [Delvaux et al., 2013] также отмечается наличие данного типа напряженного состояния (для которого используется термин regime»). Необходимо отметить, что проведенная нами реконструкция «unknown stress не рассматривала изменение ориентировки главных напряжений и типа напряженного состояния в зависимости от возможного доскладчатого положения измеренных геологических стрессиндикаторов. Другими словами, часть обстановок может отражать развернутые ориентировки осей главных напряжений относительно их первоначального положения в момент формирования. Типы напряженного состояния, реконструированные в разных частях антиклинали около пос. Каджи-Сай, показали закономерное изменение от обстановок горизонтального сжатия и сдвига в вертикальной плоскости на северо-западном и юго-восточном крыльях антиклинали (рис. 20) до горизонтального растяжения на северо-восточной периклинали структуры. При этом ось девиаторного растяжения  $\sigma_1$ ориентирована вдоль шарнира антиклинали, что подтверждается также и расположением трещин отрыва (рис. 21).

По установленным к настоящему времени типам напряженно-деформированного состояния южная часть Иссык-Кульской впадины отличается как от ближайшей к нему восточной части Киргизского хребта, так и расположенной западнее Кочкорской впадины. В двух последних структурах, как уже выше указывалось, преобладают обстановки горизонтального сдвига и сжатия. Общим для всех рассматриваемых структур является север–северо-западная ориентация направления

латерального укорочения. Данное направление согласуется с данными по современным движениям земной поверхности, механизмами крупных землетрясений и реконструкциями по сейсмологическим данным, отмечаемым для всего региона в целом [Кузиков, 2014; Ребецкий и др., 2016; Сычева, Мансуров, 2017].



Рис. 20. Круговые диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу), показывающие полюса плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа и положение осей главных напряжений, определенных МКА в миоценовых отложениях в точке наблюдения № 17520 (Каджи-Сай). Ручка на фото указывает на нормаль к трещине отрыва и ее положение близко к рассчитанной оси минимальных сжимающих напряжений (σ<sub>1</sub>) на правой диаграмме. Условные обозначения приведены на рис. 9

**Fig. 20.** Stereoplots (upper hemisphere) showing the poles of the planes of small structural forms of different kinematic type and the position of principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis in the Miocene deposits at observation point No. 17520 (Kaji-Sai). The handle in the photo indicates the normal to the break crack and its position is close to the calculated axis of minimum compressive stresses ([alpha] 1) on the right diagram. Refer to Figure 9

Таблица 3 Table 3

## Реконструированные параметры палеонапряженного состояния (локальных стресс-тензоров) южной части Иссык-Кульской впадины

#### Reconstructed parameters of the local stress states of the southern part of Issyk-Kul valley

	№ точки	Координаты точек наблюдения		Возраст	Элементы залегания		$\sigma_1$		σ <sub>2</sub>		σ <sub>3</sub>		Тип	
		с.ш.	в.д.	огложе- ний	Аз. Пд.	Ζ	Аз. Пд.	Z	Аз. Пд.	Ζ	Аз. Пд.	Z	состояния	μσ
1	14231	42°08.25′	77°11.96′	MZ-KZ	334	70	108	18	309	71	200	6	гор. сдвиг	-0,44
2	14236	42°07.80′	77°10.65′	PZ			95	0	185	30	5	60	гор. растяжение	-0,3
3	15714	42°08.72′	77°10.26′	KZ	140	80 опр.	185	48	74	18	331	37	сдвиг в вертик. плоскости	-0,05
4	15716	42°08.72′	77°10.29′	KZ	335	80 опр.	56	60	218	28	312	8	гор. сжатие	-0,42
5	15717	42°08.75′	77°10.28′	KZ	140	50 опр.	146	50	263	20	6	33	гор. сжатие	-0,12
6	15718	42°09.34′	77°21.22′	KZ	175	65	167	25	276	36	66	50	гор. раст. со сдвигом	0,13
7	15719	42°08.83′	77°10.41′	KZ	325	87	240	46	136	13	34	41	сдвиг в вертик. плоскости	-0,14
8	17520	42°08.85′	77°10.45′	KZ	325	75	205	31	302	12	50	57	гор. растяжение	-0,07
9	17522	42°08.58′	77°09.94′	KZ	185	87	160	27	70	1	338	63	гор. растяжение	-0,01
10	17526	42°08.73′	77°10.30′	KZ	320	82 опр.	34	22	288	35	150	47	гор. растяжение	-0,35

Примечание. В столбцах указаны номер и координаты точки наблюдения; возраст отложений; элементы залегания слоистости (опр. — опрокинутое); реконструированные ориентировки осей главных напряжений (σ<sub>1</sub> — минимальных (девиаторное растяжение), σ<sub>2</sub> — промежуточных и σ<sub>3</sub> — максимальных сжимающих напряжений); тип (обстановка) напряженного состояния; коэффициент Лоде — Надаи µ<sub>σ</sub>.



Рис. 21. Круговые диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу), показывающие полюса плоскостей тектонических трещин разного кинематического типа и положение осей главных напряжений, определенных МКА в миоценовых отложениях в точке наблюдения № 15714 (Каджи-Сай). Условные обозначения приведены на рис. 9

**Fig. 21.** Stereoplots (stereographic projection on the upper hemisphere) showing the poles of the planes of small structural forms of different kinematic type and the position of principal stress axes determined by the method of cataclastic analysis in the myocene deposits at observation point No. 15714 (Kaji-Sai). Refer to Figure 9

#### Обсуждение результатов

Применение методов полевой тектонофизики для реконструкции палеонапряжений дополнительно к проведенным ранее сейсмологическими и геодезическими методами реконструкциям современных напряжений/деформаций [Сычева и др., 2005; Кузиков, Мухамедиев, 2010; Ребецкий и др., 2016] позволило уточнить условия деформирования массива горных пород (преобладающие ориентировки главных осей напряжения. геолинамический тип напряженного состояния) тектонических областях на более длительном временном в определенных интервале (неотектоническом этапе). Полученные данные свидетельствуют о значительном разнообразии как преобладающих ориентировок осей главных напряжений, так и геодинамических типов напряженного состояния в пределах северного склона Киргизского хребта. Это согласуется как с данными натурных измерений в горных выработках, так и с данными реконструкций современных напряжений по сейсмологическим данным.

В результате проведенных реконструкций выделено три области со сходными обстановками напряженного состояния на основе рассчитанных определений локальных стресс-состояний. В западной области Киргизского хребта не наблюдается четкого преобладания определенного типа режима, но её особенностью являются наличие взрезовых типов (субгоризонтальна ось  $\sigma_2$ ). Для центральной области характерны режимы горизонтального растяжения и растяжения со сдвигом (при субвертикальном положении оси максимальных сжимающих напряжений  $(\sigma_3)$ и субгоризонтальном положении оси минимальных сжимающих напряжений (о1). В восточной области преобладают обстановки горизонтального сдвига (оси  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  имеют близгоризонтальное положение), что хорошо коррелирует с данными по современному напряженному состоянию земной коры, согласно которым преобладает тип напряженного состояния горизонтальный сдвиг [Ребецкий, Сычева, 2008]. Совпадает и ориентация большего числа реконструированных осей максимальных сжимающих напряжений (σ<sub>3</sub>) в направлении СЗ-ЮВ. Интересно, что эти области различаются также по строению рельефа [Чедия, 1986]. Для области Киргизского хребта западнее долины р. Аксу характерно развитие довольно пологого склона при отсутствии предгорий. Для центральной области (район НС РАН) присущи максимальные значения высоты водораздела Киргизского хребта (до 4855 м). В восточной части Киргизский хребет понижается и разворачивается в юго-восточном направлении.

Одним из неожиданных результатов реконструкций оказалась во всех изученных областях крайне низкая роль обстановок горизонтального сжатия. Как мы уже отмечали, бо́льшая часть локальных стресс-состояний, сформированных в обстановке горизонтального растяжения, приурочена к переходу от Киргизской мегантиклинали к Чуйской впадине. Предположительно это может быть связано: 1) с изменением типа напряженного состояния в переходной зоне этих двух крупных новейших геодинамических структур; 2) с изменением первоначального положения геологических стресс-индикаторов в этой переходной зоне (в результате которого массив горных пород, в котором проводились измерения, на новейшем этапе оказался круто наклонен).

В большинстве точек наблюдения устанавливаются закономерные парагенезы тектонической трещиноватости, свидетельствующие как минимум о двух этапах деформирования (в отдельных случаях подтвержденные пересечениями одних структур другими). Не во всех точках это удалось подтвердить результатами реконструкции с помощью метода катакластического анализа. Так, для Киргизского хребта из 89 точек только в 20 точках реконструировано по два локальных стресстензора, что по всей видимости связано с исходными полевыми данными. Поскольку наличие как минимум двух этапов во многих точках четко фиксируется по различающимся структурно-парагенетическим ассоциациям с разным преобладающим простиранием разрывных систем определенной кинематики. Для тех 20 точек наблюдения, где с помощью метода катакластического анализа реконструированы по два разных этапа нагружения, главные оси этих этапов деформации часто имеют сильное расхождение по направлению вплоть до взаимно перпендикулярного. Это хорошо видно и по изменению типа напряженного состояния для вторых определений параметров напряженно-деформированного состояния в точке наблюдения (см. табл. 1). По данным реконструкции современных напряжений такие значительные изменения ориентировки осей главных напряжений наблюдается значительно реже.

Принадлежность как минимум одного из реконструированных этапов деформирования к современному можно определить, исходя из сопоставления результатов нашей реконструкции с результатами реконструкций по сейсмологическим данными и по молодым (кайнозойским) отложениям. Новейший этап деформирования в большей части точек наблюдения характеризуется субмеридиональной (ССЗ) и субгоризонтальной ориентацией оси максимального сжатия, субвертикальной ориентацией промежуточной оси и близким к широтному положением оси девиаторного растяжения. Такое положение главных осей соответствует геодинамическому режиму горизонтального сдвига. Вместе с тем, есть и области, где преобладают обстановки горизонтального сжатия также с субмеридиональной (ССЗ) и субгоризонтальной ориентацией оси максимального сжатия, но с субвертикальным положением оси девиаторного растяжения. Геодинамический тип напряженного состояния на новейшем этапе закономерно изменяется от предгорий, где он характеризуется режимом горизонтального растяжения, к режимам горизонтального сдвига и сжатия в горной части. Сходная обстановка горизонтального сдвига установлена и в пределах Кочкорской впадины, реконструировано поле тектонических напряжений с преимущественно где субгоризонтальными ориентировками осей максимальных сжимающих напряжений в ССЗ-ЮЮВ направлении. Оси минимальных сжимающих напряжений имеют субширотную и реже субвертикальную ориентацию.

Проведенные исследования показывают, что использование современных тектонофизических методов реконструкции позволяет получить усредненную картину действующих тектонических напряжений на неотектоническом и современном этапах развития региона. Полученные максимумы распределения ориентировок малых структурных форм и рассчитанных на их основе направлений осей главных деформаций/напряжений указывают на современную геодинамическую обстановку. Подобный подход может использоваться для получения данных о напряженно-деформированном состоянии тех участков земной коры, для которых невозможно получить информацию по сейсмологическим данным.

### Благодарности

Авторы признательны А.К. Рыбину за помощь в организации полевых работ. Мы искренне благодарим наших коллег, помогавших при проведении полевых работ и при написании данной статьи: Ю.Л. Ребецкого, С.И. Кузикова, В.Н. Сычева, Е.С. Пржиялговского, А.М. Корженкова, В.А. Мухамадееву, А.Н. Калашникова, Е.В. Лаврушину, А.С. Лермонтову, Р.С. Алексеева, Н.С. Гордеева и И.В. Бондаря.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 09-05-00687а, 12-05-00234а, 12-05-00550а, 15-05-06857а, 15-05-10138к и 17-05-01193а.

### Литература

*Гзовский М.В.* Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. I, II. М.: Изд-во АН СССР,1959. 265 с.

*Гзовский М.В.* Новейшая тектоника и геофизика Тянь-Шаня // Неотектоника СССР. Рига, 1961. С. 191–203.

- Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. III, IV. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 544 с.
- Гзовский М.В., Крестников В.Н., Нерсесов И.Л., Рейснер Г.И. Новые принципы сейсмического районирования на примере центральной части Тянь-Шаня. Изв. АН СССР, сер. геоф. 1960. № 3. С. 353–370.
- Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // ДАН СССР. Сер. геофиз. 1975. Т. 225, № 3. С. 557–560.
- Зубович А.В., Макаров В.И., Кузиков С.И., Мосиенко О.И., Щелочков Г.Г. Внутриконтинентальное горообразование в Центральной Азии по данным спутниковой геодезии // Геотектоника. 2007. № 1. С. 16–29.
- Корженков А.М. Морфоструктуры и сейсмичность Кочкорской впадины и ее горного обрамления (Северный Тянь-Шань) // Известия НАН КР. 1999. № 3–4. С. 33–39.
- Кузиков С.И. Методические задачи и проблемы точности GPS-наблюдений (на примере Бишкекского геодинамического полигона) // Физика Земли. 2014. № 6. С. 55–69.
- 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.
- *Лаврушина Е.В., Пржиялговский Е.С.* Трещиноватость гранитов: опыт анализа напряженных состояний сложно дезинтегрированных массивов пород (Тянь-Шань) // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы 4-й тектонофизической конференции. М.: ИФЗ РАН, 2016. С. 114–122.
- *Мамбетов Ш.А.* Геоакустический контроль состояния массива горных пород вблизи горных выработок. Фрунзе: Илим, 1978. 173 с.
- *Мамбетов Ш.А., Ялымов Н.Г.* Влияние тектоники на напряженное состояние массива горных пород на территории Киргизии // Исследования по механики скальных пород. Фрунзе: Илим, 1974. С. 6–15.
- Маринин А.В., Сим Л.А., Сычева Н.А., Сычев В.Н. Реконструкция палеонапряжений северного склона Киргизского хребта методом катакластического анализа // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы третьей тектонофизической школы-семинара. М.: ИФЗ, 2013. Т. 1. С. 219–223.
- Маринин А.В., Сим Л.А., Сычева Н.А., Сычев В.Н. Напряженно-деформированное состояние Киргизского хребта по данным изучения геологических стресс-индикаторов // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы 4-й тектонофизической конф. 3–7 октября 2016. М.: ИФЗ, 2016. Т. 1. С. 152–161.
- Маринин А.В., Тверитинова Т.Ю. Строение Туапсинской сдвиговой зоны по тектонофизическим данным // Вестник МГУ, сер. геол. 2016. № 1, С. 41–55.
- Маринин А.В., Сим Л.А., Сычева Н.А. Тектонические напряжения Кочкорской впадины по данным тектонофизических исследований // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: материалы докл. VII Междунар. симпозиума, г. Бишкек, 19–24 июня 2017 г. Бишкек: НС РАН, 2018. С. 229–234.
- Маринин А.В., Сычева Н.А. Полевые тектонофизические исследования южной части Иссык-Кульской впадины // Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений: тез. докл. Междунар. Юбилейной науч. конф., г. Бишкек, 3–7 июля 2018 г. Бишкек: НС РАН, 2018. С. 211–212.
- *Миколайчук А.В.* Структурная позиция надвигов в новейшем орогене Центрального Тянь-Шаня // Геология и геофизика.2000. Т. 41, № 7. С. 961–970.
- *Миколайчук А.В., Собел Э., Губренко М.В., Лобанченко А.Н.* Структурная эволюция северной окраины Тяньшаньского орогена // Изв. НАН КР. 2003. № 4. С. 50–58.
- Омуралиева А., Омуралиев М., Джумабаева А. Локальная скоростная 3D неоднородность зоны Южно-Кочкорского разлома, её сейсмичность и Кочкорское землетрясение Тянь-Шаня 2006 г. // Известия НАН КР. 2009. № 2. С. 32–46.
- Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В. Складчатые деформации кровли палеозойского фундамента Чункурчакского прогиба, Киргизский хребет // Геотектоника. 2017. № 4. С. 31–50.
- Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Леонов М.Г., Рыбин А.К. Структуры чехла и поверхности фундамента Кочкорской впадины (Тянь-Шань) по геологическим и геофизическим данным // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 4. С. 417–436.
- *Расцветаев Л.М.* Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений. Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М.: ГИН АН СССР, 1987. Ч. 2. С. 173–235.

- Ребецкий Ю.Л. Методы реконструкции тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // Докл. РАН. 1999. Т. 365, № 3. С. 392–395.
- *Ребецкий Ю.Л.* Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Докл. РАН. 2003. Т. 3, № 2. С. 237–241.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Наука, 2007. 406 с.
- *Ребецкий Ю.Л.* Об особенности напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, вып. 4. С. 437–466.
- Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.А., Кузиков С.И., Маринин А.В. Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети КНЕТ // Геология и геофизика. 2016. № 3. С. 496–520.
- Сим Л.А., Сычева Н.А, Сычев В.Н., Маринин А.В. Новейшее напряженное состояние Северного Тянь-Шаня // Современные проблемы геодинамики и геоэкология внутриконтинентальных орогенов: тез. докл. Пятого Междунар. симп. 19–24 июня 2011. Бишкек: МНИЦ, 2011. Т. 2. С. 87–90.
- Сим Л.А., Сычева Н.А., Сычев В.А., Маринин А.В. Особенности палео- и современных напряжений Северного Тянь-Шаня // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докл. III Всерос. тектонофиз. конф. М.: ИФЗ РАН, 2012. Т. 1. С. 236–240.
- Сим Л.А., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Маринин А.В. Особенности палео- и современных напряжений Северного Тянь-Шаня // Физика Земли. 2014. № 3. С. 127–41.
- Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадеева В.А. Сейсмотектонические 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., Мансуров А.Н. Сравнение оценок деформаций земной коры Бишкекского геодинамического полигона на основе сейсмологических и GPS-данных // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 4. С. 809–825.
- Чедия О.К. Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1986. 314 с.
- Шульц С.С. Анализ новейшей тектоники и рельеф Тянь-Шаня // Зап. ВГО. Новая серия. М.: Географгиз, 1948. Т. З. 221 с.
- Angelier J. Determination of mean principal directions of stresses for a given fault population // Tectonophysics. 1979. V. 56. P. 17–26.
- Delvaux D., Cloetingh S., Beekman F., Sokoutis D., Burov E., Buslov M.M., Abdrakhmatov K.E. Basin evolution in a folding lithosphere: Altai-Sayan and Tien Shan belts in Central Asia // Tectonophysics. 2013. V. 602. P. 194–222.
- *Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Sycheva N.A., Tatevossian R.E.* Development of inversion methods on fault slip data. Stress state in orogenes of Central Asia // Tectonophysics. 2012. V. 581. P. 114–131.