

Реконструкция полей напряжений Кокджотского блока Малого Каратау (Южный Казахстан)*

А. Н. Москаленко¹, М. В. Рекашова²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² ООО «Научно-производственное предприятие “Бента”»,
Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Якубовича, 22

Для цитирования: Москаленко, А. Н., Рекашова, М. В. (2019). Реконструкция полей напряжений Кокджотского блока Малого Каратау (Южный Казахстан). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64 (2), 281–293. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.207>

По результатам детальных структурных исследований реконструированы палеозойские поля напряжений в Кокджотском блоке Малого Каратау, представляющем собой северо-западные отроги Тянь-Шаня в южном Казахстане. Основную роль в структуре раннепалеозойского комплекса Малого Каратау играют крупные надвиговые пластины, состоящие из терригенных отложений докембрия и карбонатов кембрия и ордовика. В формировании каледонской структуры Малого Каратау выделяются четыре этапа деформации. Первый характеризуется надвиганием тектонических пластин друг на друга в юго-западном направлении с амплитудами до 15–20 км, второй — формированием продольных складок северо-восточной vergentности и продольных взбросов, третий — диагональных сдвигов и сопряженных с ними складчатых форм, и четвертый — развитием продольного кливажа северо-западного простирания и сопутствующих ему сдвиговых складок в наиболее сжатых частях структуры. Индикаторами тектонических напряжений послужили данные о пространственной ориентировке шарниров складок и кинк-зон во флишеидных толщах кокджотской серии. Изучены три участка Кокджотского блока, которые расположены на протяжении с северо-запада до юго-востока плато Кокджот и сложены терригенными породами зеленосланцевой и филлитовой фаций метаморфизма, а также менее измененными терригенными и карбонатными отложениями. Выделенное поле напряжений на первом и втором участках работ соответствует каледонским (позднеордовикским) деформациям и характеризуется горизонтальным сжатием в северо-восточном направлении при субвертикальной ориентировке оси растяжения. Установленное сдвиговое поле напряжений на третьем участке работ соответствует предположительно герцинским деформациям в юго-восточной части исследуемой территории и характеризуется запад-северо-западной ориентировкой оси сжатия.

Ключевые слова: Кокджотский блок, Малый Каратау, реконструкция полей напряжений.

1. Введение

Реконструкция полей напряжений — важный аспект в понимании геологической и геодинамической природы исследуемого региона. На сегодня существу-

* Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 18-35-00464.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2019

ет множество полевых методов реконструкции напряженно-деформированного состояния по структурно-геологическим данным на дневной поверхности, основанных на выделении сколовых сопряженных трещин (Anderson, 1905; Гзовский, 1956), систем трещин с зеркалами и бороздами скольжения (Гущенко, 1973; Парфенов, 1984; Angelier, 1984; Ребецкий, 1997), трещинах отрыва (Bankwitz and Bankwitz, 1984) или на их комбинации с привлечением данных по другим малым структурным формам (Hansen, 1971; Ramsay and Huber, 1983; Marshak and Mitra, 1988). Однако упомянутые методы можно применять только в ходе детальных структурных работ на изучаемой территории. Основной объект данного исследования — Кокджотский блок хребта Малого Каратау в Южном Казахстане, где проводившиеся исследования касались различных аспектов его геологического строения (Еганов и Советов, 1979; Геология..., 1986; Алексеев, 1993; Degtyarev et al., 2017; Худолей и др., 2018), но его структурная геология изучалась лишь на региональном уровне (Паталаха и Гиоргобиани, 1975; Alexeiev et al., 2009; Алексеев и др., 2017) без детальных работ. В регионе большей частью расшифрована каледонская структура Малого Каратау и проведен общий анализ процессов деформаций покровно-складчатого сооружения (Паталаха и Гиоргобиани, 1975; Алексеев, 1993), однако параметры напряженно-деформированного состояния региона начали изучать по структурным данным только в последнее время (Рекашова и Москаленко, 2017), и в настоящей работе приводятся новые результаты реконструкции полей напряжений.

2. Геологическое строение

Хребет Малый Каратау представляет собой северо-западные отроги Тянь-Шаня в южном Казахстане (рис. 1). Основную роль в структуре раннепалеозойского комплекса Малого Каратау играют крупные надвиговые пластины, состоящие из терригенных отложений докембрия и карбонатов кембрия и ордовика. В формировании каледонской структуры Малого Каратау выделяются четыре этапа деформации (Алексеев, 1993). Первый характеризуется надвиганием тектонических пластин друг на друга в юго-западном направлении с амплитудами до 15–20 км, второй — формированием продольных складок северо-восточной вергентности и продольных взбросов, третий — диагональными сдвигами и образованием сопряженных с ними складчатых форм, четвертый — развитием продольного кливажа северо-западного простирания и сопутствующих ему сдвиговых складок в наиболее сжатых частях структуры. Параавтохтоном по отношению к серии пластин являются флишоидные отложения кокджотской серии и большекаройской свиты неопротерозойского возраста Кокджотского блока (Худолей и др., 2018). Область распространения кокджотской серии на юго-западе ограничена Байджансайским и Главным Каратауским разломами, а на северо-востоке граница не столь отчетливая, но для значительной части региона совпадает с Большекаройским взбросом (рис. 1). Породы кокджотской серии слабо метаморфизованы. Метаморфизм наиболее сильно проявлен в центральной части блока, и по мере удаления от Главного Каратауского разлома на северо-восток, а также на северо-запад и юго-восток он ослабевает до полного исчезновения в краевых частях кокджотского блока.

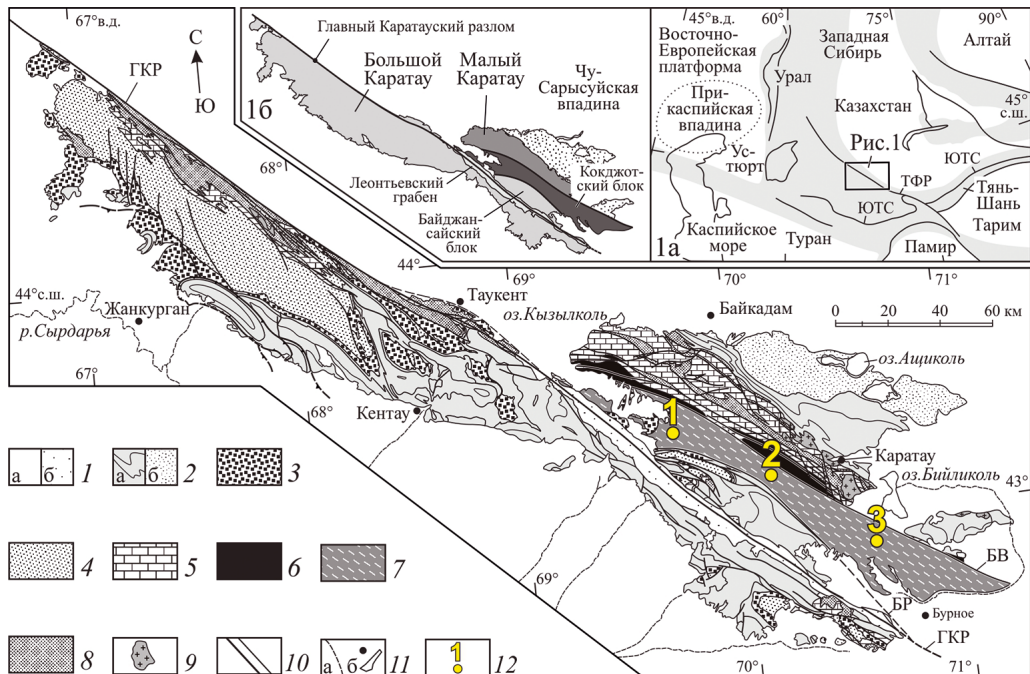


Рис. 1. Геологическая карта хребта Каратау ((Alexeiev et al., 2009) с изменениями):

на врезках: 1а — положение хр. Каратау в структуре Урало-Монгольского пояса; 1б — схема районирования Каратау; 1 — отложения мела, кайнозоя (а) и юры (б); 2 — отложения от фамена до башкирского яруса (а) и от среднего карбона до верхней перми (б); 3 — красноцветные толщи среднего и верхнего девона; 4 — песчаники среднего и верхнего ордовика; 5 — карбонаты, сланцы кембрия — среднего ордовика; 6–8 — терригенные толщи докембрия: 6 — большекаройская свита, 7 — кокчетовская серия, 8 — другие; 9 — граниты; 10 — разломы крупные и второстепенные; 11 — реки (а), населенные пункты (б); 12 — расположение участков работ; ГКР — Главный Каратауский разлом, БР — Байджансайский разлом, БВ — Большекаройский взброс

В структурном отношении эта зона продолжает зеленосланцевые толщи Таласского хребта (Буртман, 2006).

3. Фактический материал

Детальные структурные исследования были проведены на трех участках в пределах Кокчетовского блока (рис. 1). Первый участок на северо-западе плато Кокчетов сложен терригенными породами зеленосланцевой и филлитовой фаций метаморфизма. Второй участок, находящийся в центральной части блока и южнее Большекаройской долины, также сложен терригенными породами зеленосланцевой фации, тогда как третий участок в юго-восточной части плато Кокчетов сложен значительно менее измененными терригенными и карбонатными отложениями. Поля напряжений реконструировались на основе анализа ориентировки шарниров и морфологии присдвиговых складок (Hansen, 1971; Cowan and Brandon, 1994; Соловьев, 2008) а также ориентировке кинк-зон (Ramsay and Huber, 1983; Marshak and Mitra, 1988) во флишиоидных отложениях кокчетовской серии.

Таблица 1. Направление шарниров складок и перпендикуляров к ним на первом и втором участках работ Кокджотского блока

Номер замера	Долгота	Широта	Сложность		Направление шарнира		Перпендикуляр к шарниру		Тип структуры	Направление перемещения
			Азимут падения, °	Угол падения, °	Азимут погружения, °	Угол погружения, °	Азимут погружения, °	Угол погружения, °		
1	43.14401	70.21497	186	85	109	35	278	54	S	TL
2	43.14401	70.21497	194	82	110	37	274	52	S	TL
3	43.14299	70.21471	188	82	105	38	267	51	S	TL
4	43.14116	70.21465	105	40	148	31	44	22	Z	TR
5	43.13887	70.2127	228	73	143	16	275	67	S	TL
6	43.12583	70.17973	215	72	246	57	305	0	S	TL
7	43.37274	69.83646	176	43	156	41	255	10	S	TL
8	43.37274	69.83646	179	44	146	39	249	15	S	TL
9	43.35218	69.616	102	42	150	30	43	26	Z	TR
10	43.35218	69.616	104	45	142	34	37	21	Z	TR
11	43.35218	69.616	102	39	136	37	32	17	Z	TR
12	43.35157	69.61503	190	28	150	22	247	16	S	TL
13	43.14116	70.21465	—	—	96	65	—	—	—	—
14	43.14116	70.21465	—	—	52	52	—	—	—	—
15	43.14116	70.21465	—	—	70	53	—	—	—	—
16	43.14116	70.21465	—	—	125	22	—	—	—	—
17	43.14116	70.21465	—	—	125	19	—	—	—	—
18	43.14116	70.21465	—	—	135	18	—	—	—	—
19	43.13996	70.21365	—	—	285	18	—	—	—	—
20	43.13996	70.21365	—	—	290	15	—	—	—	—
21	43.13887	70.2127	—	—	123	22	—	—	—	—
22	43.13887	70.2127	—	—	128	19	—	—	—	—

Примечание: S и Z — соответственно лево- и праводвиговая структура, TL и TR — соответственно взброс с лево- и праводвиговой компонентой.

На первом и втором участках работ в Кокджотском блоке получены два массива данных (табл. 1):

- первый представлен результатами 12 замеров шарниров присдвиговых складок, которые деформируют кливаж в зонах, параллельных кливажным пластинам, и отчетливо фиксируют направления перемещений внутри комплекса;
- второй представлен результатами 10 замеров шарниров мелких складок, которые секут слоистость и сланцеватость, однако не указывают направления перемещения. Как следствие, данные по ним не учитывались при вычислении параметров напряженно-деформированного состояния.

Параметры напряженно-деформированного состояния реконструировались на основании анализа S- и Z-образных складок присдвиговых структур, которые фиксируют лево- и правостороннее перемещения соответственно. Перпендикуляр к шарниру складки рассматривается как аналог вектора перемещения (Hansen, 1971; Cowan and Brandon, 1994; Соловьев, 2008). Углы погружения шарниров варьируют от 16 до 57° при азимутах погружения в восточном, юго-восточном и западном направлениях. Число S-складок в 2 раза больше, чем Z-складок. Ориентировки осей главных напряжений вычислялись в программе FaultKin (Marrett and Allmendinger, 1990; Allmendinger et al., 2012), которая базируется на методе квазиглавных напряжений (Angelier and Mechler, 1977; Парфенов, 1984; Angelier, 1984).

На третьем участке работ широко развиты только кинк-зоны, которые, в отличие от присдвиговых складок, образуют вытянутые линейные области, секущие кливажные пластины под крутыми углами. В одном из естественных обнажений фиксируется сопряженная система лево- и правосторонней кинк-зон (рис. 2), что указывает на формирование структуры при сжатии, которое ориентировано субпараллельно общему простиранию структуры (Ramsay and Huber, 1983; Marshak and Mitra, 1988). Сопряженный характер пары кинк-зон определяется и противоположным направлением смещения, и их взаимным пересечением (Шерман и Днепровский, 1989). Направление осей главных сжимающих и растягивающих напряжений определяется путем вычисления биссектрис острого и тупого углов сопряженной системы кинк-зон. Отметим, что в условиях хрупкой деформации направления осей сжатия и растяжения совпадают с направлением биссектрисы острого и тупого углов соответственно. В то же время в условиях пластичной деформации (см. рис. 2) с направлением биссектрисы острого угла совпадает вектор главного растягивающего напряжения, а с направлением биссектрисы тупого угла — главного сжимающего (Гзовский, 1975). Линия пересечения кинк-зон, образующих сопряженную систему, соответствует промежуточной оси главных напряжений.

Чтобы получить наиболее достоверный результат реконструкции напряженно-деформированного состояния, на третьем участке были собраны данные о распределении лево- и правосторонних кинк-зон, всего 24 замера (табл. 2). Простирания кинк-зон ориентированы субмеридионально, а углы погружения шарниров варьируют от 39 до 82°.

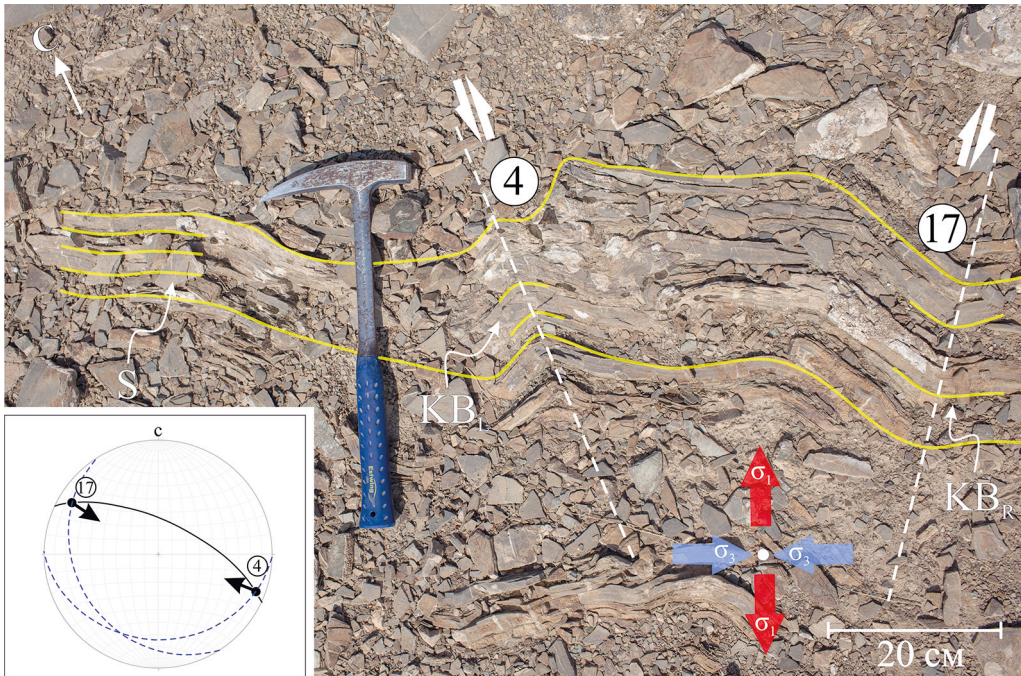


Рис. 2. Сопряженная система лево- и правосторонней кинк-зон на третьем участке работ в Кокджотском блоке:

S — слоистость, субпараллельная поверхности кливажа; KB_L и KB_R — соответственно лево- и правосторонняя кинк-зона; белый пунктир — след осевой плоскости складок, слагающих кинк-зоны, фиксирующий простирание собственно кинк-зоны; белые жирные стрелки — направление перемещения по кинк-зоне; синяя и красная стрелки — направление осей сжатия (σ_3) и растяжения (σ_1) соответственно; на врезке — сетка Шмидта, проекция нижней полусферы; числа в кружках — номера замеров шарниров кинк-зон (см. табл. 2.); черная линия — ориентация поверхности сместителя (слоистость структуры в данном случае); черная стрелка — направление перемещения висячего блока (перпендикуляр к шарниру складки); синий пунктир — плоскость, в которой происходит перемещение

Таблица 2. Направление шарниров лево- и правосторонних кинк-зон на третьем участке работ Кокджотского блока

Номер замера	Долгота	Широта	Направление шарнира		Тип структуры	Направление перемещения
			Азимут погружения, °	Угол погружения, °		
1	42.78614	70.81216	330	64	S	L
2	42.78722	70.81404	354	59	S	L
3	42.78722	70.81404	355	72	S	L
4	42.78741	70.81405	2	64	S	L
5	42.78738	70.8142	185	76	S	L
6	42.78738	70.8142	180	59	S	L
7	42.78746	70.8142	164	86	S	L

Номер замера	Долгота	Широта	Направление шарнира		Тип структуры	Направление перемещения
			Азимут погружения, °	Угол погружения, °		
9	42.78596	70.81463	40	76	S	L
10	42.78564	70.81488	171	74	S	L
11	42.78515	70.81423	346	39	S	L
12	42.78503	70.81415	45	62	S	L
13	42.78498	70.81389	196	70	S	L
14	42.78498	70.81389	185	74	S	L
15	42.78472	70.81319	325	82	S	L
16	42.78732	70.8141	45	66	Z	R
17	42.78741	70.81405	56	62	Z	R
18	42.78738	70.81429	21	60	Z	R
19	42.78746	70.8142	210	82	Z	R
20	42.78597	70.81464	226	58	Z	R
21	42.78596	70.81463	46	62	Z	R
22	42.7857	70.81482	49	72	Z	R
23	42.7857	70.81482	250	55	Z	R
24	42.78545	70.8144	242	59	Z	R

Примечание: S и Z — соответственно лево- и праводвиговая структура, L и R — соответственно лево- и праводвиговая компонента перемещения.

4. Результаты

Поля напряжений на первом и втором участках работ в Кокджотском блоке реконструировались по 12 замерам шарниров присдвиговых складок, перпендикуляры к которым фиксируют направление перемещения висячего блока относительно лежачего (рис. 3, а). На основании того, что оси локального сжатия и растяжения формируют единые группы и, как следствие, образуют единые области сжатия и растяжения на проекции нижней полусферы (рис. 3, б), можно предполагать, что все присдвиговые складки деформировались в едином поле напряжений. Фиксируемое поле напряжения (рис. 3, в) характеризуется следующими параметрами: ось сжатия (σ_3) имеет азимут погружения 235° и угол погружения 9° ; ось растяжения (σ_1) имеет азимут погружения 336° и угол погружения 46° ; промежуточная ось (σ_2) имеет азимут погружения 136° и угол погружения 42° .

При анализе геометрических характеристик кинк-зон на третьем участке было выделено 15 левосторонних и 9 правосторонних кинк-зон (рис. 4, а), образующих

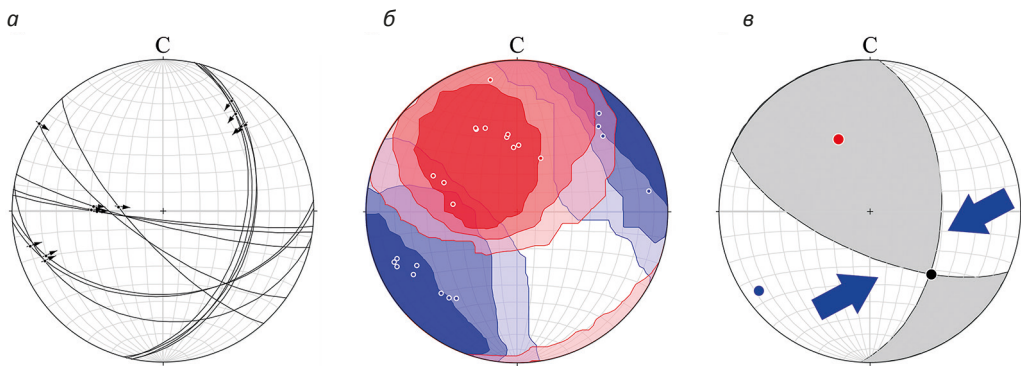


Рис. 3. Реконструкция поля напряжения в Кокджотском блоке по данным замеров шарниров присдвиговых складок и шарниров разно ориентированных мелких складок (см. табл. 1):

a — направление поверхности сместителя (слоистость структуры в данном случае) показана черной линией, направление перемещения висячего блока (перпендикуляр к шарниру складки) показано черной стрелкой; *б* — направление локальных осей сжатия (синий кружок) и растяжения (красный кружок), области сжатия и растяжения показаны синим и красным цветом соответственно; *в* — направление осей сжатия (синий кружок и синие стрелки), растяжения (красный кружок) и промежуточной оси (черный кружок), белое поле на стереограмме — квадрант сжатия, серое — квадрант растяжения. Сетки Шмидта, проекция нижней полусферы

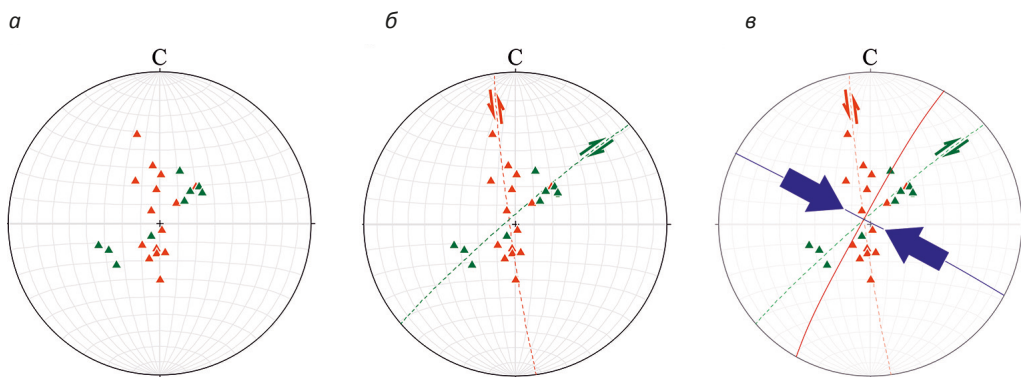


Рис. 4. Реконструкция поля напряжения Кокджотском блоке по данным замеров сопряженной системы кинк-зон (см. табл. 2):

a–в — сетки Шмидта, проекция нижней полусферы: *a* — направления шарниров складок левосторонних и правосторонних кинк-зон показаны треугольниками оранжевого и зеленого цветов; *б* — усредненные направления трендов левосторонних и правосторонних кинк-зон показаны пунктирными линиями оранжевого и зеленого цветов; *в* — биссектрисы острого и тупого углов показаны сплошными линиями красного и черного цветов, синие стрелки отображают направление оси сжатия

сопряженную систему (рис. 4, б), аналогичную приведенной на рис. 2. Напряженно-деформированное состояние (рис. 4, в) характеризуется субгоризонтальным положением осей сжатия (σ_3) и растяжения (σ_1), при их запад-северо-западной и субмеридиональной ориентации соответственно, а также субвертикальным положением промежуточной оси (σ_2), что определяет обстановку сдвига (Гзовский, 1975; Fossen, 2016).

5. Обсуждение результатов

Возраст деформаций покровных пластин Малого Каратау определяется по возрасту соскладчатых гранитоидов — 451 ± 3 млн лет (K—Ar-датирование) и 447 ± 4 млн лет (Rb—Sr-датирование), что соответствует позднему ордовику (Алексеев, 1993; Alexeiev et al., 2009). Выделенное поле напряжений на первом и втором участках работ характеризуется горизонтальным сжатием в северо-восточном направлении при субвертикальном направлении оси растяжения. Таким образом, сжатие ориентировано перпендикулярно северо-западному простиранию региональной структуры, сформировавшейся на наиболее ранних этапах каледонских деформаций и, вероятно, фиксирует поле напряжений, существовавшее при становлении покровно-надвиговой структуры. Сдвиговое поле напряжений на третьем участке работ характеризуется запад-северо-западным направлением оси сжатия, и возраст обусловившего его появления тектонического события неочевиден. В частности, полученная ориентация оси сжатия может фиксировать изгиб Байджансайского разлома, ограничивающего кокджотский горст с юго-запада (см. рис. 1) при левосдвиговых перемещениях по разлому, и в этом случае наблюдаемое поле напряжений соответствует уже не региональному полю напряжений, а локальному. Альтернативная интерпретация тектонических событий состоит в том, что данная кинематика разрывных нарушений соответствует герцинскому этапу деформаций с общим сжатием в субширотном направлении (Alexeiev et al., 2009).

6. Заключение

На основании проведенного исследования получены новые данные о напряженно-деформированном состоянии Кокджотского блока Малого Каратау. При изучении малых структурных форм во флишеидных толщах кокджотской серии выделены два поля напряжений. Первое из них характеризуется горизонтальным сжатием в северо-восточном направлении и соответствует позднеордовикским деформациям, проявленным в северо-западной, а также в центральных частях плато Кокджот. Второе поле характеризуется запад-северо-западной ориентацией оси сжатия при субвертикальном положении промежуточной оси и может соответствовать герцинским деформациям в юго-восточной части исследуемой территории.

Литература

- Алексеев, Д. В., 1993. Тектоника Малого Каратау (Южный Казахстан). URL: <http://earthpapers.net/tektonika-malogo-karatau-yuzhnyu-kazahstan> (дата обращения: 05.05.2019).
- Алексеев, Д. В., Быкадоров, В. А., Волож Ю. А., Сапожников Р. Б., 2017. Кинематический анализ юрских грабенов Южного Тургая и роль мезозойского этапа в истории Каратау-Таласо-Ферганского сдвига (Южный Казахстан и Тянь-Шань). Геотектоника 2, 3–20.
- Буртман, В. С., 2006. Тянь-Шань и Высокая Азия: Тектоника и геодинамика в палеозое. Геос, Москва.
- Гзовский, М. В., 1956. Соотношение между тектоническими разрывами и напряжениями в земной коре. Разведка и охрана недр 11, 7–22.
- Гзовский, М. В., 1975. Основы тектонофизики. Наука, Москва.
- Геология и металлогения Каратау. Т. 1, 1986 / Абдулин, Д. А. (под ред.). Наука, Алма-Ата.
- Гущенко, О. И., 1973. Анализ ориентировок сколовых тектонических смещений и их тектонических смещений и их тектонофизическая интерпретация при реконструкции палеонапряжений. Доклады АН СССР 210(2), 331–334.

- Еганов, Э. А., Советов Ю. К., 1979. Каратау — модель региона фосфоритонакопления. Наука, Новосибирск.
- Парфенов В. Д., 1984. К методике тектонофизического анализа геологических структур. Геотектоника 1, 60–72.
- Паталаха, Е. И., Гиоргобиани, Т. В., 1975. Структурный анализ линейной складчатости на примере хребта Каратау (каледонский цикл). Наука, Алма-Ата.
- Ребецкий, Ю. Л., 1997. Реконструкция тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций: методические основы, поле современных напряжений Юго-Восточной Азии Океании. Доклады Академии наук 354(1), 101–104.
- Рекашова, М. В., Москаленко, А. Н., 2017. Реконструкция поля палеонапряжений в зоне Главного Каратаусского разлома, в: Материалы V Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной памяти академика А. П. Карпинского. ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург, 112–115.
- Соловьев, А. В., 2008. Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит, в: Методы трекового и структурного анализа. Наука, Москва.
- Худoley, А. К., Алексеев, Д. В., Дюфрейн, С. Э., Дестярев, К. Е., Летникова, Е. Ф., 2018. Новые данные о возрастах обломочных цирконов из кокджотской серии и большекаройской свиты Малого Каратау (Южный Казахстан). Доклады Академии наук 479(2), 179–182.
- Шерман, С. И., Днепровский, Ю. И., 1989. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Наука, Новосибирск.
- Anderson, E. M., 1905. The dynamic of faulting. Transactions of the Edinburgh Geological Society 8(3), 387–402.
- Angelier, J., 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 89, 5835–5848.
- Alexeiev, D. V., Cook, H. E., Buvtyshkin, V. M., Golub, L. Ya., 2009. Structural Evolution of the Ural — Tian Shan Junction: a View from Karatau Ridge, South Kazakhstan. Comptes Rendus Geoscience 341(2–3), 287–297.
- Allmendinger, R. W., Cardozo, N., Fisher, D., 2012. Structural geology algorithms: Vectors and tensors in structural geology. Cambridge University Press, Cambridge.
- Angelier, J., 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. J. Geophys. Res.: Solid Earth 89, 5835–5848.
- Angelier, J., Mechler, P., 1977. Sur une methode graphique de recherche des contraintes principals egale-ment utilisable en tectonique et en seismologie: la methode des diedres droits. Bulletin de la Société Géologique de France 19(6), 1309–1318.
- Bankwitz, P., Bankwitz, E., 1984. Die Symmetrie von Klüftoberflaechen und ihre Nutzung füreine Palaeospannunganalyse. Zeitschrift für Geologische Wissenschaften 12, 305–334.
- Cowan, D., Brandon, M., 1994. A symmetry-based method for kinematic analysis of large-slip brittle fault zones. American Journal of Science 294, 257–306.
- Degtyarev, K. E., Yakubchuk, A. S., Tret'yakov, A. A., Kotov, A. B., Kovach, V. P., 2017. Precambrian Geology of the Kazakh Uplands and the Tien Shan: an Overview. Gondwana Research 47, 44–75.
- Fossen, H., 2016. Structural Geology. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hansen, E., 1971. Methods of Deducing Slip-Line Orientations from the Geometry of Folds. In: Strain Facies. Minerals, Rocks and Inorganic Materials (Monograph Series of Theoretical and Experimental Studies). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Marrett, R. A., Allmendinger, R. W., 1990. Kinematic analysis of fault-slip data. Journal of Structural Geology 12, 973–986.
- Marshak, S., Mitra, G., 1988. Basic Methods of Structural Geology. Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- Ramsay, J. G., Huber, M. I., 1983. The techniques of modern structural geology: Strain analysis. Academic press.

Статья поступила в редакцию 13 ноября 2018 г.
Статья рекомендована в печать 18 марта 2019 г.

Контактная информация:

Москаленко Артем Николаевич — artemmn@gmail.com

Рекашова Мария Владимировна — oct2894@gmail.com

Reconstruction of the paleostress field of the Kokdjot Block, Malyi Karatau ridge (South Kazakhstan)

A. N. Moskalenko¹, M. V. Rehashova²

¹ St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., 199034, St. Petersburg, Russian Federation

² Benta LLC, 22, ul. Yakubovicha, St. Petersburg, 190000, Russian Federation

For citation: Moskalenko A. N., Rehashova M. V. (2019). Reconstruction of the paleostress field of the Kokdjot Block, Malyi Karatau ridge (South Kazakhstan). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (2), 281–293. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.207> (In Russian)

Paleozoic fields of the Kokdjot Block, Malyi Karatau ridge (South Kazakhstan) were reconstructed as a result of a detailed structural study. The main role in the structure of the Early Paleozoic complex of Malyi Karatau is played by large thrust plates composed of terrigenous Precambrian deposits and Cambrian and Ordovician carbonates. In the formation of the Caledonian structure of Malyi Karatau, four stages of deformation were distinguished. The first stage is characterized by the thrust of tectonic plates on each other in the southwest direction with amplitudes up to 15–20 km; the second is characterized by the formation of longitudinal folds of the northeastern vergence and longitudinal uplifts; the third is characterized by diagonal shifts and the folded forms associated with them; and the fourth is characterized by the development of longitudinal cleavage of the northwestern strike and accompanying shear folds in the most compressed parts of the structure. Kink-bands and fold-axes were used to indicate stress field reconstruction. Study areas of the Kokdjot Block are located from the northwest to the southeast of the Kokdjot plateau and are characterized as both clastic sedimentary rocks of greenschist and phyllite facies of metamorphism, and clastic and carbonate sedimentary rocks. Two stress fields have been identified as corresponding to Caledonian (Late Ordovician) and Hercynian deformations. The earlier tectonic event is characterized by horizontal compression of the northeastern trend, and the later tectonic event is characterized by the shear stress field at the west-north-west trend of the compression axis.

Keywords: Kokdjot Block, Malyi Karatau ridge, stress field.

References

- Alexeiev, D. V., 1993. Tektonika Malogo Karatau (Iuzhnyi Kazakhstan) [Tectonics of the Malyi Karatau ridge (South Kazakhstan)]. URL: <http://earthpapers.net/tektonika-malogo-karatau-yuzhnyy-kazakhstan> (access date: 05.05.2019). (In Russian)
- Alexeiev, D. V., Bykadorov, V. A., Volozh, Yu. A., Sapozhnikov, R. B., 2017. Kinematicheskii analiz iurskikh grabenov Iuzhnogo Turgaia i rol' mezozoiskogo etapa v istorii Karatau-Talaso-Ferganskogo sdviga (Iuzhnyi Kazakhstan i Tian'-Shan') [Kinematic Analysis of Jurassic Grabens of Southern Turgai and the Role of the Mesozoic Stage in the Evolution of the Karatau-Talas-Ferghana Strike-Slip Fault, Southern Kazakhstan and Tian Shan]. *Geotektonika [Geotectonics]* 2, 3–20.
- Alexeiev, D. V., Cook, H. E., Buvtyshkin, V. M., Golub, L. Ya., 2009. Structural Evolution of the Ural — Tian Shan Junction: a View from Karatau Ridge, South Kazakhstan. *Comptes Rendus Geoscience* 341(2–3), 287–297.
- Allmendinger, R. W., Cardozo, N., Fisher, D., 2012. Structural geology algorithms: Vectors and tensors in structural geology. Cambridge University Press, Cambridge.
- Anderson, E. M., 1905. The dynamic of faulting. *Transactions of the Edinburgh Geological Society* 8(3), 387–402.
- Angelier, J., 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 89, 5835–5848.

- Angelier, J., Mechler, P., 1977. Sur une methode graphique de recherche des contraintes principals egale-ment utilisable en tectonique et en seismologie: la methode des diedres droits. Bulletin de la Société Géologique de France 19(6), 1309–1318.
- Bankwitz, P., Bankwitz, E., 1984. Die Symmetrie von Klüftoberflaechen und ihre Nutzung für eine Palaeospannunganalyse. Zeitschrift für Geologische Wissenschaften 12, 305–334.
- Burtman, V.S., 2006. Tian'-Shan' i Vysokaia Aziia: Tektonika i geodinamika v paleozoe [Tien Shan and High Asia: Tectonics and Geodynamics in the Paleozoic]. Geos Publ., Moscow. (In Russian)
- Cowan, D., Brandon, M., 1994. A symmetry-based method for kinematic analysis of large-slip brittle fault zones. American Journal of Science 294, 257–306.
- Degtyarev, K. E., Yakubchuk, A. S., Tretyakov, A. A., Kotov, A. B., Kovach, V. P., 2017. Precambrian Geology of the Kazakh Uplands and the Tien Shan: an Overview. Gondwana Research 47, 44–75.
- Eganov, E. A., Sovetov, Yu. K., 1979. Karatau — model' regiona fosforitonakopleniia [Karatau — Model of Phosphorite Accumulation Region]. Nauka Publ., Novosibirsk. (In Russian)
- Fossen, H., 2016. Structural Geology. Cambridge University Press, Cambridge.
- Geologiya i metallogeniia Karatau [Geology and metallogeny of the Karatau] / Abdulin, A. A. (ed.), 1986. Science of the Kazakhstan's USSR. (In Russian)
- Gushenko, O. I., 1973. Analiz orientirovok skolyvykh tektonicheskikh smeshchenii i ikh tektonicheskikh smeshchenii i ikh tektonofizicheskoi interpretatsii pri rekonstruktsii paleonapriazhenii [Analysis of the orientations of faults and joints and their tectonic displacements during the reconstruction of the paleostress field]. Doklady Akademii nauk SSSR [Doklady of the Academy of Sciences of the USSR. Earth Science Sections] 210(2), 331–334. (In Russian)
- Gzovskii, M. V., 1956. Sootnoshenie mezhdru tektonicheskimi razryvami i napriazheniiami v zemnoi kore [Relationship between faults and stress]. Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources] 11, 7–22. (In Russian)
- Gzovskii, M. V., 1975. Osnovy tektonofiziki [Tectonophysics]. Science Publ., Moscow. (In Russian)
- Hansen, E., 1971. Methods of Deducing Slip-Line Orientations from the Geometry of Folds. In: Strain Facies. Minerals, Rocks and Inorganic Materials (Monograph Series of Theoretical and Experimental Studies). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Khudoley, A. K., Alexeiev, D. V., DuFrane, S. A., Degtyarev, K. E., Letnikova, E. F., 2018. Novye dannye o vozrastakh oblomochnykh tsirkonov iz kokdzhotskoi serii i bol'shekaroiiskoi svity Malogo Karatau (Iuzhnyi Kazakhstan) [New Data on the Age of Detrital Zircons from the Kokdjot Group and Bolshekaroi Formation, Malyy Karatau (Southern Kazakhstan)]. Doklady Akademii nauk [Doklady Earth Sciences] 479(2), 179–182. (In Russian)
- Marrett, R. A., Allmendinger, R. W., 1990. Kinematic analysis of fault-slip data. Journal of Structural Geology 12, 973–986.
- Marshak, S., Mitra, G., 1988. Basic Methods of Structural Geology. Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- Parfenov, V. D., 1984. K metodike tektonofizicheskogo analiza geologicheskikh struktur [To the method of tectonophysical analysis of geological structures]. Geotektonika [Geotectonics] 1, 60–72. (In Russian)
- Ptalaha, E. I., Georgobiany, T. V., 1975. Strukturnyi analiz lineinoi skladchatosti na primere khrebta Karatau (kaledonskii tsikl) [Structural analysis of linear folding on the example of the Karatau Range (Caledonian cycle)]. Science Publ., Alma-Ata. (In Russian)
- Ramsay, J. G., Huber, M. I., 1983. The techniques of modern structural geology: Strain analysis. Academic press.
- Rebetsky, Yu. L., 1997. Rekonstruktsiia tektonicheskikh napriazhenii i seismotektonicheskikh deformatsii: metodicheskie osnovy, pole sovremennykh napriazhenii Iugo-Vostochnoi Azii Okeanii [Reconstruction of the tectonic stresses and seismotectonic deformations: methodological foundations, the field of modern stresses of Southeast Asia, Oceania]. Doklady Akademii nauk [Doklady Earth Sciences] 354(1), 101–104. (In Russian)
- Rekashova, M. V., Moskalenko, A. N., 2017. Rekonstruktsiia polia paleonapriazhenii v zone Glavnogo Karatausskogo razloma [Reconstruction of the palaeostress field in the Main Karatau fault zone]. In: Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov pamyati akademika A. P. Karpinskogo [Materials of the V International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists, dedicated to the memory of Academician A. P. Karpinsky]. VSEGEI Publ., St. Petersburg, 112–115. (In Russian)

- Sherman, S. I., Dneprovsky, Yu. I., 1989. Polia napriazhenii zemnoi kory i geologo-strukturnye metody ikh izucheniia [Stress fields of the earth's crust and geological and structural methods for studying them]. Science Publ., Novosibirsk. (In Russian)*
- Soloviev, A. V., 2008. Izuchenie tektonicheskikh protsessov v oblastiakh konvergensii litosfernykh plit [The study of tectonic processes in the areas of convergence of lithospheric plates]. In: Metody trekovogo i strukturnogo analiza [Methods of track and structural analysis]. Science Publ., Moscow. (In Russian)*

Received: November 13, 2018

Accepted: March 18, 2019

Author's information:

Artem N. Moskalenko — artemmn@gmail.com

Mariya V. Rekashev — oct2894@gmail.com