

Микроструктуры кливажа и индикаторы растяжения в черносланцевых породах северной части Улахан-Сисской антиформы (Куларский район, Якутия)

О.А. Суставов

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия
olsustavov@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены разновидности кливажа в черносланцевых породах северной части Улахан-Сисской антиформы (в туогучанской и тарбаганнахской свитах верхнепермского возраста) и некоторые индикаторы растяжения пород в этой части антиформы. При реконструкции процессов деформации наряду с обычными геологическими методами использованы систематические микроструктурные наблюдения пород в шлифах под микроскопом. Охарактеризованы главный субсогласный кливаж S_1 и роль растворения под давлением при его формировании. Становление кливажа S_1 местами сопровождалось образованием линейности растяжения, вдоль которой в метапесчаниках вытянуты зерна кварца, плагиоклаза и прилегающие к торцам этих зерен серицит-кварцевые «бороды». Судя по ориентировке данной линейности, породы при образовании кливажа S_1 подвергались растяжению в северо-северо-западном направлении. В углеродистых сланцах туогучанской свиты нередко присутствуют осадочно-диагенетические углеродисто-кварцевые нодулы и более поздние кристаллы пирита. Те и другие часто окружены сложными кварцем и хлоритом параллельно-шестоватыми оторочками деформации (ОД). Шестоватость в ОД прямолинейная и параллельная S_1 , что указывает на образование ОД при коаксиальной деформации пород с растяжением параллельно S_1 . Судя по направлению шестоватости в ОД на кристаллах пирита, растяжение при образовании этих ОД было ориентировано преимущественно в северо-северо-восточном направлении, близком к оси Улахан-Сисской антиформы. В статье рассмотрен также локально наложенный на S_1 кливаж плейчатости S_2 (в данном районе описан впервые); его кливажные зоны отвечают крыльям микроскладок, в которые сминается S_1 . Кливаж S_2 имеет близкое к оси антиформы северо-восточное простирание и преимущественно крутое юго-восточное падение. Формирование кливажа S_1 может быть связано с первой (надвиго-складчатой) стадией раннеколлизийного надвигового этапа позднемезозойских деформаций Верхояно-Колымской орогенной области, а кливажа плейчатости S_2 – со второй (складчатой) стадией того же этапа деформаций.

Ключевые слова: Якутия, Куларский район, Верхояно-Колымская орогенная область, черносланцевые породы, кливаж, вкрапленный пирит, линейность растяжения, оторочки деформации, кливаж плейчатости.

Благодарности. Автор выражает благодарность рецензенту статьи за полезные рекомендации.

Введение

Континентальные коллизийные зоны представляют собой места интенсивной деформации, проявляющейся в таких процессах, как коровое скучивание, вертикальное утолщение, параллельное орогенам растяжение и эксгумация более глубоких коровых пород [1]. Одним из источников данных при реконструкции этих процессов в древних зонах коллизии являются деформированные горные породы – их внутренняя деформация обусловлена общей деформацией орогенов.

Важная информация о деформированных породах может быть получена при микроструктурном анализе – целенаправленном структурном изучении деформированных пород в шлифах под микроскопом [2–4]. В качестве деформационных маркеров и кинематических индикаторов, несущих информацию о тектонических движениях и деформациях, могут рассматриваться многие деформационные структуры и текстуры горных пород [4]. Полученные при микроструктурном анализе данные могут быть использованы, в частности, для определения механизмов дефор-

мации пород, ориентировки напряжений при деформации и для реконструкции последовательности тектонических событий в исследуемых районах [3, 4].

По Е.И. Полуфунтиковой и В.Ю. Фридовскому [5], одним из главных маркеров деформации верхоянского терригенного комплекса является кливаж обломочных пород; он характеризует как морфологическое изменение различных компонентов породы, так и общую величину деформации породы. Образование кливажа ортогонально оси сжатия определяет возможность использования этой плоскостной текстуры в качестве динамического индикатора. В работе [5] приводится подробная обобщающая характеристика микроструктур кливажа верхоянского комплекса, рассматриваются механизмы образования этих микроструктур и, с использованием стрейн-анализа, особенности деформации пород при образовании разных микроструктур.

Целью настоящей статьи является описание, с использованием микроструктурного анализа, разновидностей кливажа и некоторых индикаторов растяжения в черносланцевых породах северной части крупной Улахан-Сисской антиформы, к которой приурочен одноименный золоторудный район [6].

Методы исследования

Статья основывается на ранее не опубликованных результатах полевых наблюдений и более позднего изучения проб (в том числе 520 шлифов пород), отобранных в 1976–1982 гг. при минералогическом картировании северной части Куларского района [7]. Пробы отбирались при исскаживании обнаженных участков местности по широтным профилям, располагающимся через 50 м друг от друга. Измерялись элементы залегания слоистости, кливажей и линейности на поверхности кливажа. Особое внимание уделялось описанию оторочек деформации на кристаллах вкрапленного пирита.

Для реконструкции процессов деформации пород наряду с обычными геологическими методами использованы систематические микроструктурные наблюдения пород в шлифах под микроскопом. Шлифы ориентировались преимущественно перпендикулярно кливажу пород, а в случае наличия в породе линейности – перпендикулярно последней. В отдельных случаях из одного образца изготавливались шлифы по трем взаимно-перпендикулярным направлениям.

При изучении шлифов под микроскопом наряду со стандартным описанием минерального состава и структуры породы детально характеризуется кливаж – его соотношения со слоистостью, состав, форма и густота кливажных зон, соотношения чешуек серицита с кливажными зонами. Рассматриваются проявления процессов растворения под давлением, форма обломочных зерен и их соотношения с кливажными зонами, наличие изометричных, линзовидных и уплощенных зерен. Отмечаются наличие и возрастные соотношения регенерационных кайм, «бород» и оторочек деформации на зернах породы, соотношения между кливажем и кристаллами ильменита, карбонатов, биотита. В случае наличия кливажа плейчатости характеризуются его ориентировка, строение и роль при его образовании процессов растворения под давлением.

В качестве справочных пособий при описании в шлифах особенностей деформации пород использовались работы [2–4, 8].

Геология

Изучаемый район (рис. 1) находится на северо-западном фланге Кулар-Нерского сланцевого пояса Верхояно-Колымской орогенной области, сложенном углеродистыми сланцами и турбидитами склона и подножия Верхоянской пассивной континентальной окраины. Породы подвержены складчатости в поздней юре–раннем мелу при коллизии Сибирского кратона и Колымо-Омолонского супертеррейна [9]. В районе устанавливается несколько крупных кулисообразно расположенных опрокинутых складок северо-восточного простираения, разделенных надвигами и взбросами северо-западной вергентности, в том числе сложенная породами верхнепермского возраста Улахан-Сисская антиформа длиной более 100 км и шириной до 20 км (рис. 1, а).

Улахан-Сисская антиформа ориентирована в северо-северо-восточном направлении ($10\text{--}15^\circ$) и постепенно погружается на юго-юго-запад под углом $5\text{--}8^\circ$. Углы падения слоев в приосевой части антиформы (тарбаганнахская свита верхнепермского возраста) не превышают $3\text{--}7^\circ$, а на крыльях (туогучанская свита верхнепермского возраста) – $20\text{--}25^\circ$. По [9], это лежащая изоклинальная складка, повторно изогнутая в пологую асимметричную антиклиналь. В ее своде предполагается нескрытый крупный гранитоидный интрузив, кровля которого, по геофизическим данным, находится на глубине 1–2 км от совре-

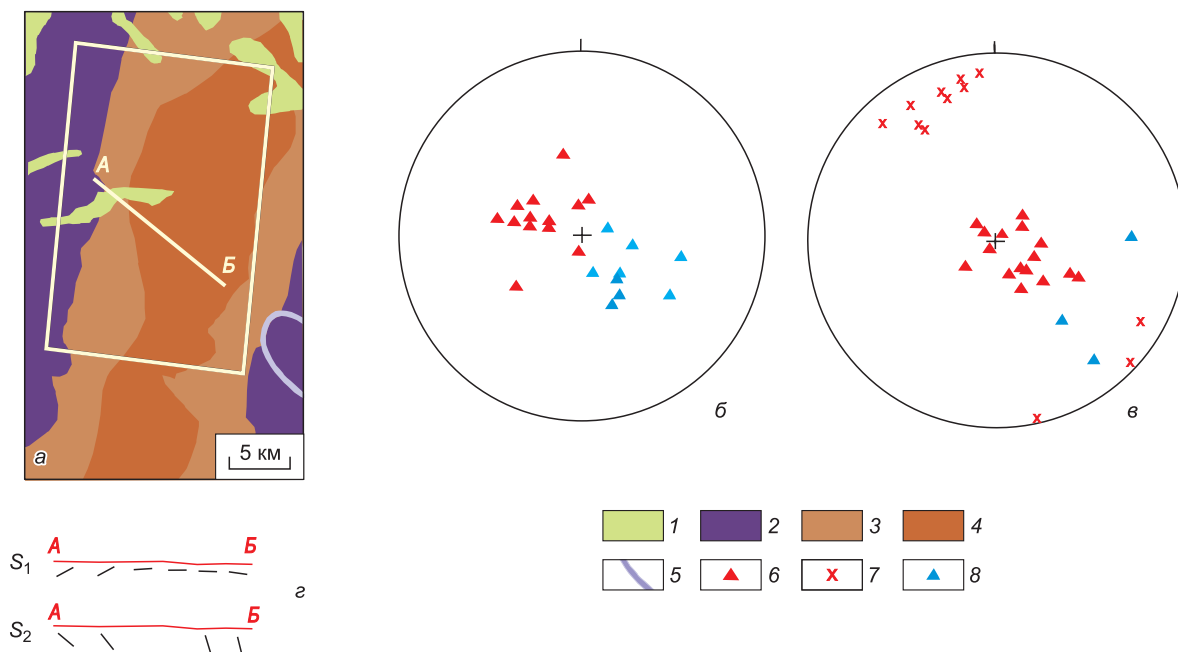


Рис. 1. Схема геологического строения северной части Улахан-Сисской антиформы (а, схематизировано по геологической карте масштаба 1 : 1 000 000: 1 – четвертичные отложения, 2 – триас, 3 – туогучанская свита верхней перми, 4 – тарбаганнахская свита верхней перми, 5 – р. Яна; белая рамка – изученная площадь) и ориентировка кливажа S_1 (б), линейности на поверхностях S_1 (7) и кливажа S_2 (8) в породах туогучанской (б, ручьи Бургуат и Нэттик) и тарбаганнахской (в, ручьи Бургуат и гора Кыллах) свит; з – положение кливажа S_1 и S_2 в разрезе по АБ.

Fig. 1. The scheme of the geological structure of the Northern part of the Ulakhan-Sissky antiform (a, according to the geological map of the scale 1 : 1 000 000: 1 – quaternary deposits, 2 – lower Triassic, 3 – Tuoguchansky suite of upper Permian, 4 – Tarbagannahsky suite of upper Permian, 5 – Yana River; white frame – the studied area) and the orientation of cleavage S_1 (б), lineation on the cleavage S_1 plane (7) and cleavage S_2 (8) in the rocks of Tuoguchansky (б, streams Burguat and Nettik) and Tarbagannahsky (в, stream Burguat and mountain Kyllah) suites; з – position of cleavages S_1 and S_2 in the section AB.

менной поверхности. С запада и востока антиформа окружена породами нижнего и среднего триаса, отделенными от антиформы надвигами и взбросами северо-западной вергентности.

В данной статье рассматривается северная часть Улахан-Сисской антиформы между ручьями Тарбаганнах, Батор-Юрэх на юге и горой Мунулу на севере (см. рис. 1). Это зона развития верхнепермских углеродистых сланцев (преимущественно метааргиллитов и метаалевролитов), среди которых залегают отдельные пласты метапесчаников. Углеродистые сланцы состоят в основном из кварца, серицита, углеродистого вещества и хлорита (последний особенно характерен для туогучанской свиты). Метапесчаники главным образом мелко- и тонкозернистые (размер обломков в среднем 0,2–0,05 мм) граувакковые (наряду с обломками кварца и плагиоклаза в них содержится более 25 % обломков пород); могут также присутствовать, преимущественно

в матриксе, серицит, хлорит, карбонаты и углеродистое вещество. Следует отметить присутствие в породах туогучанской свиты вкрапленности кристаллов пирита, а в углеродистых сланцах тарбаганнахской свиты – ильменита. Породы метаморфизованы в условиях мусковит-хлоритовой и биотитовой субфаций зеленосланцевой фации [7].

Результаты исследований

Преобладающим развитием в породах Улахан-Сисской антиформы пользуется кливаж S_1 [9], залегающий в тарбаганнахской свите (в ядре антиформы) субгоризонтально, преимущественно параллельно слоистости, а в туогучанской свите (на крыльях антиформы) – под углами до 20–25° к горизонту (см. рис. 1), нередко пересекая слоистость. В слагающей ядро антиформы тарбаганнахской свите кливаж S_1 развит значительно более интенсивно, чем в при-

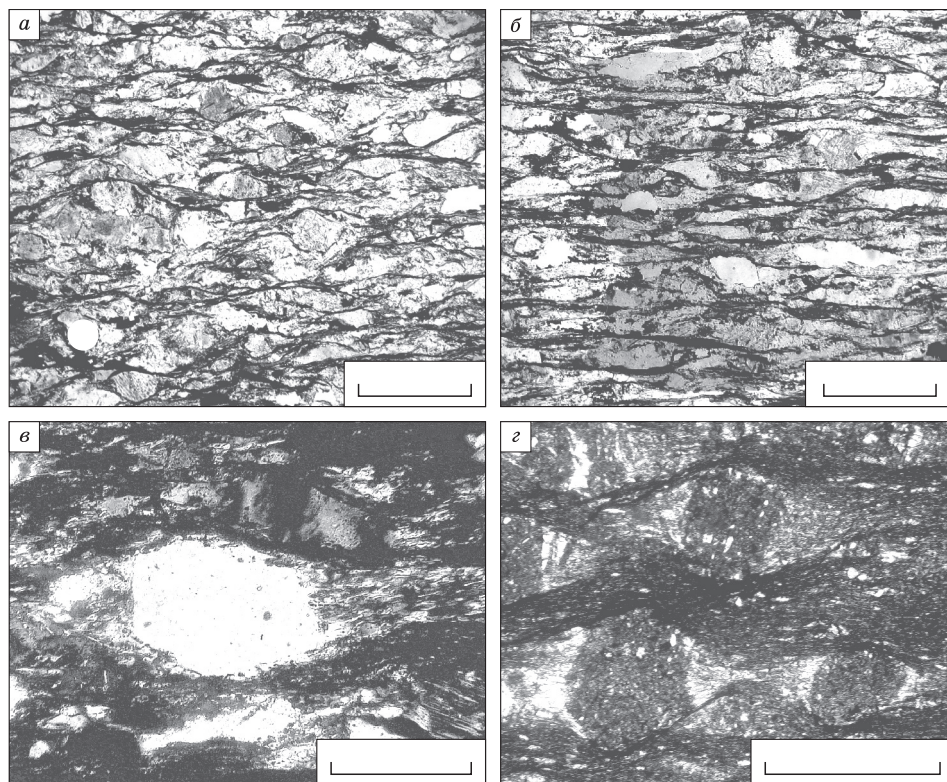


Рис. 2. Кливаж S_1 :

а–в – межзерновой кливаж в мелко-тонкозернистом метапесчанике (*а* – перпендикулярно линейности; *б, в* – перпендикулярно S_1 и параллельно линейности, *в* – кварц-серицитовая «борода» на правой границе обломка кварца); тарбаганнахская свита, гора Мунулу; *г* – углеродисто-кварцевые нодулы с хлорит-кварцевыми оторочками деформации в метааргиллите со сланцевым кливажем и углеродистыми кливажными зонами (черное); туогучанская свита, ручей Бургуат. *а, б, г* – без анализатора, *в* – николи скрещены. Масштабный отрезок: *а, б* – 0,5 мм, *в* – 0,2 мм, *г* – 0,4 мм.

Fig. 2. Cleavage S_1 :

а–в – intergranular cleavage in fine-grained metasandstone (*а* – perpendicular to the lineation; *б, в* – perpendicular to S_1 and parallel to the lineation, *в* – quartz-sericite «beard» at the right edge of the quartz grain), Tarbagannahsky suite, mountain Munulu; *г* – carbon-quartz nodules with chlorite-quartz strain fringes in metapelite with slaty cleavage and carbon-containing cleavage zones (black); Tuoguchansky suite, stream Burguat (*а, б, г* – without the analyzer, *в* – crossed nicoli). Scale segment: *а, б* – 0.5 mm, *в* – 0.2 mm, *г* – 0.4 mm.

уроченной к крыльям антиформы туогучанской свите.

В метапесчаниках тарбаганнахской свиты кливаж S_1 под микроскопом наблюдается в виде совокупности субпараллельных серицит-углеродистых кливажных зон толщиной в тысячные доли миллиметра, которые отстоят между собой на расстоянии до 0,1–0,2 мм («межзерновой» [4] кливаж). Обломочные зерна уплощены субпараллельно S_1 и нередко имеют линзовидную форму (рис. 2, *а–в*). В присутствующих в метапесчаниках обломках пород и в матрике наблюдаются параллельные кливажным зонам S_1 мелкие чешуйки серицита.

В углеродистых сланцах (метааргиллитах) туогучанской свиты наблюдается сланцевый кливаж S_1 (slaty cleavage [2]), проявленный в парал-

лельности чешуек хлорита и серицита, уплощенности в той же плоскости зерен кварца и в наличии протяженных углеродистых кливажных зон такой же ориентировки (рис. 2, *г*). Углеродистые сланцы тарбаганнахской свиты нередко отличаются более высоким содержанием серицита и местами характеризуются текстурой, близкой к сланцеватости.

В породах тарбаганнахской свиты на поверхностях кливажа S_1 местами наблюдается слабо выраженная *линейность*. Вдоль руч. Бургуат и на горе Кыллах она ориентирована в северо-северо-западном направлении, под углом 20–40° к оси Улахан-Сисской антиформы (см. рис 1, *в*).

Линейность отражается в конфигурации углеродистых кливажных зон S_1 : в охарактеризованном рисунком 2, *а–в* метапесчанике с линей-

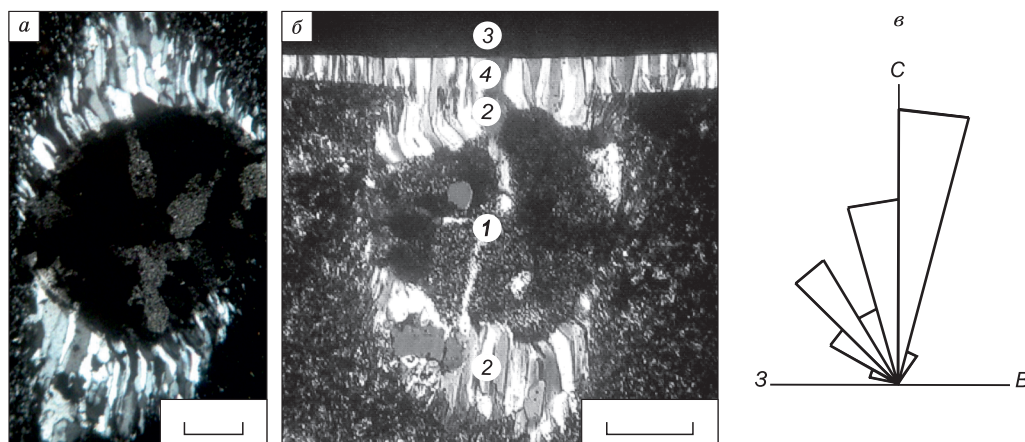


Рис. 3. Параллельно-шестоватые кварцевые оторочки на углеродисто-кварцевых нодулях и кристаллах пирита в углеродистых сланцах:

a – поворот направления шестоватости в оторочке на нодуле, *б* – оторочка (2) на нодуле (1) пересекается оторочкой (4) на пирите (3) (*a, б* – сечение параллельно S_1 , ручей Улахан-Юреге); *в* – распределение азимутов ориентировки шестоватости в оторочках на кристаллах пирита, по 52 замерам в 16 точках наблюдения (замеры А.Ф. Бушмакина). *a, б* – николи скрещены; масштабный отрезок: *a* – 0,1 мм, *б* – 0,2 мм.

Fig. 3. Fibrous quartz strain fringers on carbon-quartz nodules and pyrite crystals in carbonaceous shales:

a – turning of the fibres direction in fringer on nodule, *б* – fringer (2) on nodule (1) intersects by the fringer (4) on pyrite (3) (*a, б* – section parallel to S_1 , stream Ulakhan-Yurege); *в* – distribution of the azimuth orientation of fibres on pyrite crystals, 52 measurements (A.F. Bushmakina) in 16 observation points. *a, б* – crossed nicoli; scale segment: *a* – 0.1 mm, *б* – 0.2 mm.

ностью углеродистые кливажные зоны в шлифе, ориентированном поперек линейности (см. рис. 2, *a*), имеют волнистую форму, а в шлифе, ориентированном вдоль линейности (см. рис. 2, *б*), их форма более уплощенная.

В шлифе, ориентированном вдоль направления линейности (см. рис. 2, *б*) к поперечным по отношению к S_1 границам относительно крупных обломочных зерен кварца и плагиоклаза нередко приурочены вытянутые параллельно S_1 «бороды» [2, 10] – «удлиненные взаимопрорастания волокнистой белой слюды и кварца» [2] (см. рис. 2, *в*). В шлифе, ориентированном поперек линейности (см. рис. 2, *a*), «бород» возле зерен кварца и плагиоклаза обычно не наблюдается.

Углеродистым сланцам туогучанской свиты нередко свойственно присутствие осадочно-диагенетических *углеродисто-кварцевых* [11] *нодулей* (округлых выделений) размерами преимущественно в десятые доли миллиметра (см. рис. 2, *г*; 3, *a, б*). Нодули обычно представляют собой сращения нескольких разноориентированных зерен кварца (см. рис. 3, *a*), равномерно насыщенных тонкодисперсным углеродистым веществом (подобную форму, состав и размеры могут иметь заполненные при диагенезе кремнеземом цисты водорослей [12]). Кроме того, породам туогучанской свиты свойственно широкое развитие вкрапленности кристаллов *пирита* [11].

Осадочно-диагенетические углеродисто-кварцевые нодули огибаются и срезаются кливажем S_1 , а кристаллы пирита пересекают кливаж; под микроскопом в кристаллах пирита наблюдаются остатки углеродистых кливажных зон S_1 , замещаемых пиритом (реликтовая текстура [11]).

По краям углеродисто-кварцевых нодулей и кристаллов пирита часто располагаются сложенные параллельно-шестоватым кварцем и хлоритом тени деформации [2–4] («тени давления» [13]) параллельно-шестоватого строения (см. рис. 2, *г*; 3, *a, б*); такие тени деформации называют оторочками деформации (ОД) – strain fringes [2, 3]. В большинстве случаев оторочки деформации на углеродисто-кварцевых нодулях (ОД-1) и на кристаллах пирита (ОД-2) сложены прямолинейными шестоватыми индивидами кварца, вытянутыми параллельно S_1 (см. рис. 2, *г*). Оторочки деформации на углеродисто-кварцевых нодулях пересекаются кристаллами пирита и приурочены к ним ОД-2 (см. рис. 3, *б*).

В ОД-1 в единичных редких случаях имеются изгибы, изменения направления вытянутости шестоватых индивидов (см. рис. 3, *a*). Это наблюдается в некоторых шлифах, вырезанных параллельно S_1 (при этом в шлифах, вырезанных из тех же образцов поперек S_1 , подобных изменений направления шестоватости в ОД-1 нет –

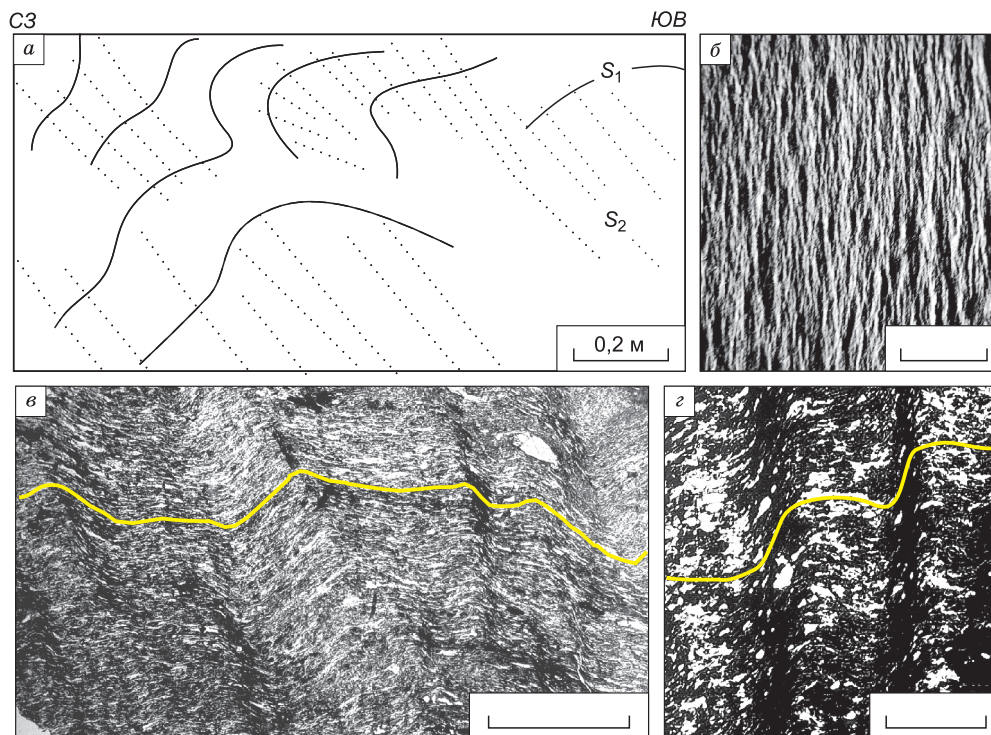


Рис. 4. Кливаж плейчатости S_2 в углеродистых сланцах:

a – S_2 (пунктир) в складках, изгибающих кливаж S_1 ; b – поверхность кливажа S_1 , гофрированная перпендикулярным к этой поверхности кливажем S_2 (линейность плейчатости); образец из обнажения, изображенного на рисунке a); c, d – S_2 в шлифах, ориентированных перпендикулярно S_1 , без анализатора; желтое – изменение направления кливажа S_1 . a, b – гора Кыллах, c – ручей Тарбаганнах, d – ручей Эмись, масштабный отрезок: b – 6 мм, c, d – 0,5 мм.

Fig. 4. Crenulation cleavage S_2 in carbonaceous slates:

a – S_2 (dotted line) in the folds, bending the cleavage S_1 , b – the cleavage S_1 surface corrugated by a cleavage S_2 perpendicular to this surface (crenulation lineation; a sample from the outcrop shown in figure a); c, d – S_2 in thin sections oriented perpendicular to S_1 , without analyzer; yellow – changing the direction of the cleavage S_1 . (a, b – mountain Kyllah, c – stream Tarbagannah, d – stream Emici), scale bar: b – 6 mm, c, d – 0.5 mm.

наблюдается обычная однонаправленная прямолинейная шестоватость).

Оторочки деформации возле кристаллов пирита на севере изученной площади, по данным А.Ф. Бушмакина, встречаются значительно реже, чем в южной части площади; их средняя мощность на севере площади 0,5–1 мм. В средней части площади (ручьи Бургуат, Пологий) ОД-2 встречаются часто в углеродистых сланцах и редко в метапесчаниках, их мощность 1–2 и 1 мм соответственно. На юге изученной площади ОД-2 обычны на кристаллах пирита из углеродистых сланцев, где достигают мощности 4–5 мм, и часто отмечаются на кристаллах пирита из метапесчаников.

Как показывают замеры ориентировки шестоватости в оторочках деформации возле кристаллов пирита на местности (в породах туогучанской свиты на западном и восточном крыльях антиформы), направление вытянутости шесто-

ватых индивидов в ОД-2 изменяется от северо-западного до преобладающего северо-северо-восточного (см. рис. 3, z), близкого к оси Улахан-Сисской антиформы.

Наряду с кливажем S_1 в углеродистых сланцах туогучанской и тарбаганнахской свит местами присутствует пересекающий S_1 кливаж плейчатости [4, 14] S_2 (в данном районе описывается впервые). Под микроскопом устанавливается, что кливажные зоны S_2 отвечают в той или иной степени сжатым крыльям микроскладок плейчатости, в которые сминается кливаж S_1 (рис. 4, c, d ; 5, b, e). В штуфах кливаж S_2 может быть макроскопически проявлен на поверхностях S_1 в виде тонкой гофрировки (линейность плейчатости [4, 14]) – рис. 4, b .

Микроскладки плейчатости кливажа S_2 характеризуются преимущественно плавными, реже резкими изгибами: внутри одних микролитонов S_2 кливаж S_1 может быть изогнутым, а в других –

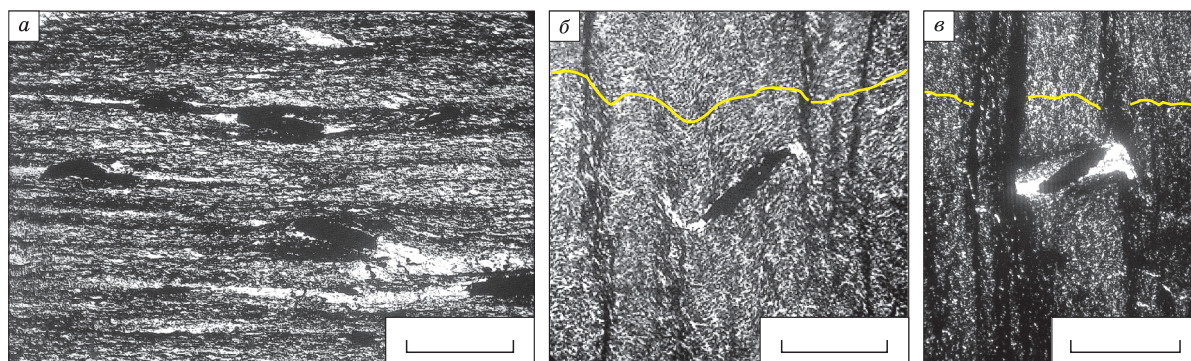


Рис. 5. Кварцевые тени деформации (белое) возле кристаллов ильменита в серицит-углеродисто-кварцевых сланцах с кливажем S_1 (а, S_1 горизонтальный) и с кливажем плейчатости S_2 (б, в; S_2 вертикальный; желтое – положение S_1 ; тени деформации изгибаются (б) и срезаются (в) на контактах с кливажными зонами S_2); тарбаганнахская свита, гора Кыллах. Без анализатора, масштабный отрезок: а, в – 0,5 мм, б – 0,15 мм.

Fig. 5. Quartz strain shadows (white) near ilmenite crystals in sericite-carbonaceous-quartz slates with cleavage S_1 (а, S_1 horizontal) and with crenulation cleavage S_2 (б, в; S_2 vertical; yellow – position S_1 ; strain shadows bend (б) and cut away (в) at contacts with cleavage zones S_2); Tarbagannakh suite, mountain Kyllah. Without analyzer, the scale segment: а, в – 0.5 mm, б – 0.15 mm.

плоским (см. рис. 5, в); микроскладки могут быть симметричными и асимметричными (см. рис. 4, з; 5, б). При сжатии крыльев микроскладок на месте этих крыльев могут возникать почти чисто углеродистые кливажные зоны S_2 (см. рис. 5, з). В некоторых случаях углеродистые кливажные зоны S_2 имеют резкие границы и пересекают почти не смятый кливаж S_1 (см. рис. 5, в).

Если в углеродистых сланцах присутствуют минералы с образовавшимися при формировании S_1 тенями деформации, то при наложении на эти сланцы кливажа плейчатости S_2 тени деформации могут изгибаться у границ с кливажными зонами S_2 и срезаться этими зонами. Так, это наблюдается в углеродистых сланцах тарбаганнахской свиты, содержащих вкрапленность кристаллов ильменита. Возле этих кристаллов нередко имеются возникшие при формировании S_1 тени деформации (сложенные изометрично-зернистым кварцем), сильно вытянутые вдоль направления S_1 (рис. 5, а). Изгибание этих теней деформации у границ с кливажными зонами S_2 и срезание теней деформации в результате растворения под давлением на границах с кливажными зонами S_2 показано на рис. 5, б, в.

Кливаж S_2 имеет северо-восточное простирание, близкое к оси Улахан-Сисской антиформы. Падение этого кливажа на юго-восток – преимущественно под $60-85^\circ$ в породах тарбаганнахской свиты (в ядре антиформы) и под $20-50^\circ$ в породах туогучанской свиты на западном крыле антиформы – измерения проведены по линии АВ (см. рис. 1). В небольших локальных складках

северо-западной vergentности, в которые иногда смят ранний кливаж S_1 , кливаж S_2 ориентирован близко к направлению осевых поверхностей этих складок (см. рис. 4, а).

Обсуждение результатов

Формирование рассмотренного выше пологозалегающего кливажа S_1 связано, по-видимому, с первой [15] (надвиго-складчатой) стадией раннеколлизийного надвигового этапа поздне-мезозойских деформаций Верхояно-Колымской орогенной области. Образование субсогласного кливажа (сланцеватости) S_1 на первой стадии раннеколлизийных деформаций (синхронно с крупными лежащими складками, в условиях вертикального сжатия пород) отмечается и в других регионах [16–18].

Микроструктуры кливажа S_1 показывают, что его формирование происходило при уплотнении пород перпендикулярно S_1 , сопровождавшемся потерей объема при процессах растворения под давлением, обычных при деформации слабометаморфизованных терригенно-осадочных пород [4, 14].

В метапесчаниках процессы растворения под давлением проявлены преимущественно вдоль границ между углеродистыми кливажными зонами и обломочными зернами, чем обусловлена уплощенная параллельно S_1 и линзовидная форма обломочных зерен метапесчаников. С процессами растворения под давлением при образовании кливажа связывают и образование теней деформации (в том числе параллельно-шестова-

тых оторочек деформации) возле отдельных зерен породы (считается, что в тенях деформации отлагается кремнезем, оседающий при растворении обломочных зерен [4]).

Линейность, местами наблюдаемая в изученных породах и ориентированная в северо-северо-западном направлении, под углом 20–40° к оси Улахан-Сисской антиформы (см. рис. 1, в), относится к обычной в метаморфических породах [14] линейности растяжения [3, 4]. В метапесчаниках с линейностью зерна породы вытянуты вдоль направления линейности (см. рис. 2, б), что характерно для линейности растяжения [3, 4]. Вдоль направления линейности вытянуты и образующиеся при растяжении породы в плоскости кливажа [10] «бороды» возле зерен кварца и плагиоклаза (см. рис. 2, в).

При формировании в углеродистых сланцах туогучанской свиты кливажа S_1 основная масса породы нередко отрывается от боковых частей присутствующих в этих сланцах углеродисто-кварцевых нодулей и кристаллов пирита. Образующиеся полости заполняются параллельно-шестоватым кварцем и хлоритом с образованием оторочек деформации [2, 3]. Такие ОД, возникшие при образовании кливажа, являются кинематическими индикаторами – шестоватость в них указывает на направление растяжения пород [2, 3, 14].

То, что в данном районе ОД на углеродисто-кварцевых нодулях и кристаллах пирита в большинстве случаев сложены прямолинейными шестоватыми индивидами кварца, вытянутыми параллельно S_1 (см. рис. 2, г), показывает, согласно [3, 4, 13, 19], что образование ОД в том и другом случае происходило преимущественно в процессе коаксиальной деформации пород с растяжением в плоскости S_1 . Присутствие в отдельных случаях изгибов, изменений направления вытянутости шестоватых индивидов (см. рис. 3, а) является признаком локального проявления некоаксиальной деформации пород [4, 13, 19] и может быть связано с присутствием зон сдвига (отмечены в данном районе в работе [20]) и разломов в местах нахождения таких ОД [19].

На осадочно-диагенетических углеродисто-кварцевых нодулях оторочки деформации (ОД-1) образуются на ранних стадиях формирования кливажа, по-видимому, в близкое время с «бородами», вытянутыми вдоль линейности растяжения (см. рис. 2, в). Присутствующие в тех же породах кристаллы пирита возникают на поздних стадиях формирования кливажа, после того, как

кливаж S_1 был в основном сформирован. Это следует из того, что кристаллы пирита пересекают кливаж S_1 и в них постоянно наблюдаются видимые под микроскопом остатки углеродистых кливажных зон S_1 , которые присутствовали в породе до образования кристаллов пирита (реликтовая текстура [11]). Это подтверждается и многочисленными случаями пересечений кристаллами пирита и оторочками ОД-2 возле кристаллов пирита оторочек ОД-1 (см. рис. 3, б).

В оторочках деформации возле кристаллов пирита направление вытянутости шестоватых индивидов изменяется от северо-западного до преобладающего северо-северо-восточного (рис. 3, г). Из этого следует, что направление растяжения пород при образовании оторочек деформации возле кристаллов пирита было ориентировано преимущественно в северо-северо-восточном направлении, близком к оси Улахан-Сисской антиформы. Увеличение мощности этих оторочек с севера на юг изучаемой площади показывает, что на данной площади растяжение пород при образовании ОД-2 нарастало с севера на юг.

Кливаж плейчатости S_2 является более поздним, чем S_1 (S_2 пересекает S_1). Он характеризуется резко отличным от S_1 крутым углом падения и простирается вдоль оси Улахан-Сисской антиформы. Иногда наблюдающееся развитие кливажа плейчатости параллельно осевым плоскостям относительно редких наложенных складок сантиметрового и метрового масштаба (см. рис. 4, а) отмечается и в других районах [21].

Образование кливажа S_2 , как и кливажа S_1 , происходит с участием процессов растворения под давлением. При сжатии крыльев микроскладок кливажа плейчатости кварц и серицит могут из крыльев микроскладок почти полностью удаляться (вынос материала растворами), а углеродистое вещество – пассивно накапливаться, в связи с чем на месте крыльев микроскладок могут возникать почти чисто углеродистые кливажные зоны S_2 (см. рис. 5, в).

Подобно тому, как это отмечается в других регионах [16, 18, 22, 23], образование кливажа плейчатости S_2 может быть связано со второй (складчатой) стадией [15] раннеколлизийного надвигового этапа позднемезозойских деформаций Верхояно-Колымской орогенной области.

Выводы

1. В верхнепермских терригенных породах северной части Улахан-Сисской антиформы развит субпараллельный слоистости кливаж S_1 и локаль-

но наложенный на него преимущественно крутопадающий кливаж плейчатости S_2 . Образование того и другого кливажа происходит при участии процессов растворения под давлением.

2. Кварцевые оторочки деформации на присутствующих в углеродистых сланцах углеродисто-кварцевых нодулях и кристаллах пирита возникают в условиях преобладающей коаксиальной деформации пород: на углеродисто-кварцевых нодулях – на ранних стадиях образования кливажа S_1 , а на кристаллах пирита – на поздних стадиях образования кливажа S_1 .

3. При формировании кливажа S_1 породы подвергаются растяжению в северо-северо-западном направлении (исходя из простирания линейности растяжения), а после образования вкрапленности кристаллов пирита (судя по ориентировке шестоватости в оторочках деформации возле этих кристаллов) – преимущественно в северо-северо-восточном направлении, близком к оси Улахан-Сисской антиформы.

4. Образование кливажа S_1 может быть связано с первой (надвиго-складчатой) стадией раннеколлизийного надвигового этапа позднемезозойских деформаций Верхояно-Колымской орогенной области, а ориентированного поперек S_1 кливажа плейчатости S_2 – со второй (складчатой) стадией того же этапа деформаций.

Литература

1. Seyferth M., Henk A. Syn-convergent exhumation and lateral extrusion in continental collision zones – insights from three-dimensional numerical models // *Tectonophysics*. 2004. Vol. 382. P. 1–29.
2. Vernon R. H. A practical guide to rock microstructure. Cambridge University Press, 2018. 431 p. <https://doi.org/10.1017/9781108654609>
3. Passchier C.W., Trouw R.A. J. Microtectonics. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2005. 366 p.
4. Кирмасов А.Б. Основы структурного анализа. М.: Научный мир, 2011. 368 с.
5. Полуфунтикова Е.И., Фридовский В.Ю. Микродеформации рудоносных терригенных толщ // *Разведка и охрана недр*. 2013. № 12. С. 16–19.
6. Фридовский В.Ю. Куларская металлогеническая зона: метаморфогенные Au кварцевые месторождения // *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)* / Под ред. Л.М. Парфенова и М.И. Кузьмина. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 350–353.
7. Суставов О.А. Деформации жильного кварца при формировании золотого оруденения в черносланцевых толщах (Куларский район, Восточная Якутия) // *Геол. и геоф.* 1995. № 4. С. 81–87.
8. *Atlas of Deformational and Metamorphic Rock Fabrics* / Edited by G.J. Borradaile, M.B. Bayly, C. McA. Powell. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. 551 p.
9. Парфенов Л.М., Оксман В.С., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Третьяков Ф.Ф., Трунилина В.А., Дейкуненко А.В. Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области // *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)* / Под ред. Л.М. Парфенова и М.И. Кузьмина. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 199–254.
10. Powell C. McA. Conjugate cleavage in quartzose sandstone // *Atlas of Deformational and Metamorphic Rock Fabrics*. Edited by G. J. Borradaile M. B. Bayly C. McA. Powell. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. P. 266–267.
11. Бушмакин А.Ф. Унаследованное строение кристаллов пирита из пород с углеродистым веществом // *Проблемы онтогении минералов*. Л.: Наука, 1985. С. 73–82.
12. Schieber J. Early diagenetic silica deposition in algal cysts and spores: a source of sand in black shales? // *Jour. Sedim. Res.* 1996. Vol. 66. P. 175–183.
13. Ramsay J.G., Huber M.I. The Techniques of Modern Structural Geology. London: Academic press, 1983. Vol. 1. 307 p.
14. Fossen H. Structural Geology. Cambridge University Press, 2010. 463 p.
15. Третьяков Ф.Ф. Стадии надвигового этапа позднемезозойских деформаций Верхояно-Колымской орогенной области // *Отч. геол.* 2015. № 5. С. 89–95.
16. Poyatos D.M., Nieto F., Azor A. Relationships between very low-grade metamorphism and tectonic deformation: examples from the southern Central Iberian Zone (Iberian Massif, Variscan belt) // *Jour. Geol. Soc. London*. 2001. Vol. 158. P. 953–968.
17. Chen C.T., Chan Y.C., Lo C.H., Malavieille J., Lu C.Y., Tang J.T., Lee Y.H. Basal accretion, a major mechanism for mountain building in Taiwan revealed in rock thermal history // *Jour. Asian Earth Sci.* 2018. Vol. 152. P. 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.11.030>.
18. Friedel C.H., Huckriede H., Leis B., Zweig M. Large-scale Variscan shearing at the southeastern margin of the eastern Rhenohercynian belt: a reinterpretation of chaotic rock fabrics in the Harz Mountains, Germany // *Intern. Jour. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*. 2019. Vol. 108. P. 2295–2323. <https://doi.org/10.1007/s00531-019-01763-1>
19. Tillman K.S., Byrne T.B. Kinematic analysis of the Taiwan Slate Belt // *Tectonics*. 1995. Vol. 14, No. 2. P. 322–341.
20. Фридовский В.Ю. Деформации и оруденение Куларского сегмента Кулар-Нерского сланцевого пояса (Восточная Якутия) // *Изв. вузов. Геол. и разв.* 1996. № 4. С. 64–71.
21. Aerden D.G.A.M. Porphyroblast non-rotation during crustal extension in the Variscan Lys-Caillaouas Massif, Pyrenees // *Jour. Struct. Geol.* 1995. Vol. 17, No. 5. P. 709–725.

22. Миллер Ю.В. Тектоно-метаморфические циклы. Л.: Наука, 1982. 159 с.

23. Lačný A., Plašienka D., Vojtko R. Structural evolution of the Turňa Unit constrained by fold and cleavage

analyses and its consequences for the regional tectonic models of the Western Carpathians // Geol. Carpathica. 2016. Vol. 67. N 2. P. 177–193. <https://doi.org/10.1515/geoca-2016-0012>

Поступила в редакцию 15.06.2021

Принята к публикации 28.07.2021

Об авторе

СУСТАВОВ Олег Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Уральский государственный горный университет, 620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-1880-5494>, olsustavov@mail.ru.

Информация для цитирования

Суставов О.А. Микроструктуры кливажа и индикаторы растяжения в черносланцевых породах северной части Улахан-Сисской антиформы (Куларский район, Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 3. С. 31–42. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-31-42>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-3-31-42

Cleavage microstructures and stretching indicators in black-slate rocks of the northern part of the Ulakhan-Sis antiform (Kularsky district, Yakutia)

O.A. Sustavov

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia
olsustavov@mail.ru

Abstract. The varieties of cleavage in the black-shale rocks of the northern part of the Ulakhan-Sis antiform (in the Tuoguchan and Tarbagannakh suites of the Upper Permian age) and some rocks stretching indicators in this part of the antiform are considered. In the reconstruction of the deformation processes, along with the ordinary geological methods, systematic microstructural observations of rocks in the thin sections under a microscope were used. The main sub-conformable cleavage S_1 and the role of pressure solution in its formation are characterized. The cleavage S_1 formation sometimes accompanied by the formation of a stretching lineation. In metasandstones the of quartz and plagioclase grains and sericite-quartz «beards» adjacent to the ends of these grains are elongated along lineation. Based on the orientation of this lineation, the rocks during the formation of the cleavage S_1 were subjected to stretching in the north-north-western direction. The carbonaceous shales of the Tuoguchan suite often contain the sedimentary-diagenetic carbon-quartz nodules and later pyrite crystals. Both are often surrounded by fibrous strain fringers (SF) composed of quartz and chlorite. The fibers in SF is rectilinear and parallel to S_1 , which indicates the formation of SF during the coaxial deformation of rocks with stretching parallel to S_1 . Based on the fiber directions in SF on pyrite crystals, the stretching during these SF formation was oriented mainly in the north-north-eastern direction, close to the axis of the Ulakhan-Sis antiform. The article also considers the crenulation cleavage S_2 (described in this area for the first time), locally superimposed on S_1 .

The S_2 cleavage zones correspond to the microfolds limbs into which the cleavage S_1 is bended. The cleavage S_2 has a north-eastern strike, close to the antiform axis, and a predominantly steep south-eastern fall. The cleavage S_1 formation may be associated with the first (thrust-fold) stage of the early collisional thrust phase of the Late Mesozoic deformations of the Verkhoyano-Kolyma orogenic region, and the crenulation cleavage S_2 – with the second (fold) stage of the same deformation phase.

Keywords: Yakutia, Kularsky district, Verkhoyansk-Kolyma orogenic region, black shale rocks, cleavage, impregnated pyrite, extension linearity, deformation margins, plicature cleavage.

Acknowledgements. Author expresses gratitude to Reviewer for useful recommendations.

References

1. Seyferth M., Henk A. Syn-convergent exhumation and lateral extrusion in continental collision zones – insights from three-dimensional numerical models // *Tectonophysics*. 2004. Vol. 382. P. 1–29.
2. Vernon R.H. A practical guide to rock microstructure. Cambridge University Press, 2018. 431 p. <https://doi.org/10.1017/9781108654609>
3. Passchier C.W., Trouw R.A. J. Microtectonics. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2005. 366 p.
4. Kirmasov A.B. Osnovy strukturnogo analiza. M.: Nauchnyj mir, 2011. 368 p.
5. Polufuntikova E.I., Fridovskij V.Ju. Mikrodeformacii rudonosnyh terrigennyh tolshh // *Razvedka i ohrana nedr*. 2013. No. 12. P. 16–19.
6. Fridovskij V.Ju. Kularskaja metallogenicheskaja zona: metamorfogennyye Au kvarcevye mestorozhdeniya // *Tektonika, geodinamika i metallogenija territorii Respubliki Saha (Jakutija)* / Pod red. L.M. Parfenova i M.I. Kuz'mina. M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. P. 350–353.
7. Sustavov O.A. Deformacii zhil'nogo kvarca pri formirovanii zolotogo orudneniya v chernoslanцевых tolshhah (Kularskij rajon, Vostochnaja Jakutija) // *Geol. i geof.* 1995. No. 4. P. 81–87.
8. *Atlas of Deformational and Metamorphic Rock Fabrics* / Edited by G.J. Borradaile, M.B. Bayly, C. McA. Powell. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag 1982. 551 p.
9. Parfenov L.M., Oksman B.C., Prokoi'ev A.V., Timofeev V.F., Tret'yakov F.F., Trunilina V.A., Dejkunenko A.V. Kollazh terrejnov Verhojano-Kolymskoj orogennoj oblasti // *Tektonika, geodinamika i metallogenija territorii Respubliki Saha (Jakutija)* / Pod red. L.M. Parfenova i M.I. Kuz'mina. M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. P. 199–254.
10. Powell C. McA. Conjugate cleavage in quartzose sandstone // *Atlas of Deformational and Metamorphic Rock Fabrics*. Edited by G. J. Borradaile M. B. Bayly C. McA. Powell. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. P. 266–267.
11. Bushmakina A.F. Unasledovannoe stroenie kristallov pirita iz porod s ugleorodistym veshhestvom // *Problemy ontogenii mineralov*. L.: Nauka, 1985. P. 73–82.
12. Schieber J. Early diagenetic silica deposition in algal cysts and spores: a source of sand in black shales? // *Jour. Sedim. Res.* 1996. Vol. 66. P. 175–183.
13. Ramsay J.G., Huber M.I. The Techniques of Modern Structural Geology. London: Academic press, 1983. Vol. 1. 307 p.
14. Fossen H. Structural Geology. Cambridge University Press, 2010. 463 p.
15. Tret'yakov F.F. Stadii nadvigovogo jetapa pozdne-mezozojskikh deformacij Verhojano-Kolymskoj orogennoj oblasti // *Otech. geol.* 2015. No. 5. P. 89–95.
16. Poyatos D.M., Nieto F., Azor A. Relationships between very low-grade metamorphism and tectonic deformation: examples from the southern Central Iberian Zone (Iberian Massif, Variscan belt) // *Jour. Geol. Soc. London*. 2001. Vol. 158. P. 953–968.
17. Chen C.T., Chan Y.C., Lo C.H., Malavieille J., Lu C.Y., Tang J.T., Lee Y.H. Basal accretion, a major mechanism for mountain building in Taiwan revealed in rock thermal history // *Jour. Asian Earth Sci.* 2018. Vol. 152. P. 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.11.030>.
18. Friedel C.H., Huckriede H., Leis B., Zweig M. Large-scale Variscan shearing at the southeastern margin of the eastern Rhenohercynian belt: a reinterpretation of chaotic rock fabrics in the Harz Mountains, Germany // *Intern. Jour. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*. 2019. Vol. 108. P. 2295–2323. <https://doi.org/10.1007/s00531-019-01763-1>
19. Tillman K.S., Byrne T.B. Kinematic analysis of the Taiwan Slate Belt // *Tectonics*. 1995. Vol. 14, No. 2. P. 322–341.
20. Fridovskij V.Ju. Deformacii i orudnenie Kularskogo segmenta Kular-Nerskogo slancevogo pojasa (Vostochnaja Jakutija) // *Izv. vuzov. Geol. i razv.* 1996. No. 4. P. 64–71.
21. Aerden D.G.A.M. Porphyroblast non-rotation during crustal extension in the Variscan Lys-Caillaouas Massif, Pyrenees // *Jour. Struct. Geol.* 1995. Vol. 17, No. 5. P. 709–725.
22. Miller Ju.V. Tektono-metamorficheskie cikly. L.: Nauka, 1982. 159 p.
23. Lačný A., Plašienka D., Vojtko R. Structural evolution of the Turňa Unit constrained by fold and cleavage analyses and its consequences for the regional tectonic models of the Western Carpathians // *Geol. Carpathica*. 2016. Vol. 67, No. 2. P. 177–193. <https://doi.org/10.1515/geoca-2016-0012>

O.A. СУСТАВОВ

About the author

SUSTAVOV, Oleg Anatolyevich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), associate professor, Ural State Mining University, 30 Kuibyshev st., Yekaterinburg 620144, Russia,
<https://orcid.org/0000-0002-1880-5494>, olsustavov@mail.ru.

Citation

Sustavov O.A. Cleavage microstructures and stretching indicators in black-slate rocks of the northern part of the Ulakhan-Sis antiform (Kularsky district, Yakutia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021. Vol. 26, No. 3. pp. 31–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-31-42>