

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

### *Геология и полезные ископаемые*

УДК 552.163:551.25

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-7-19>

*Оригинальная статья*

### **Метаморфизм (низы зеленосланцевой фации) терригенных пород северной части Куларского золотоносного района, Якутия: соотношения минералов с кливажем**

**О. А. Суставов**✉

*Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация*  
✉ [olsustavov@mail.ru](mailto:olsustavov@mail.ru)

#### **Аннотация**

В крупном Куларском золотоносном районе (из россыпей извлечено 170 т золота) имеются относительно слабо изученные коренные золоторудные месторождения, освоение которых требует проведения детальных геологических работ, включающих в себя исследование процессов метаморфизма горных пород. То же относится и к обсуждению перспектив освоения редкоземельной минерализации в россыпях района – образование присутствующего в россыпях монацита («куларита») во многих случаях связывается с региональным метаморфизмом терригенных пород. Куларский золотоносный район располагается в пределах находящейся на северо-западном фланге Кулар-Нерского складчатого пояса Верхояно-Колымской орогенной области крупной Улахан-Сисской антиклинали, сложенной пермскими углеродисто-терригенными породами. На основании минералогического картирования района обосновывается приуроченность к данной антиклинали субмеридионально вытянутой зоны метаморфизма, повышающегося от наиболее широко развитой мусковит-хлоритовой субфации до биотитовой субфации зеленосланцевой фации в отдельных частях свода антиклинали. С использованием результатов микрозондовых анализов минералов и 520 шлифов пород описан вещественный состав распространенных в северной части Куларского района углеродисто-терригенных пород, степень постдиagenетических преобразований которых изменяется от метагенеза в породах триаса до мусковит-хлоритовой и биотитовой субфаций зеленосланцевой фации метаморфизма в пермских породах крупной Улахан-Сисской антиклинали. По мере перехода от метагенеза к мусковит-хлоритовой и биотитовой субфациям метаморфизма возрастает степень перекристаллизации пород, увеличиваются размеры зерен перекристаллизации обломочного кварца и ширина новообразованных чешуек мусковита, в породах появляются монацит, ильменит, биотит. Указанные изменения происходят до завершения формирования в породах сланцевого кливажа  $S_1$ . После формирования последнего, преимущественно до появления более позднего кливажа плейчатости  $S_2$ , в породах происходит кристаллизация образующегося в процессе метаморфизма пирита. Биотит и магнезиосидерит возникают при образовании кливажа плейчатости  $S_2$ . Появление биотита при формировании кливажа  $S_1$  и  $S_2$  может соответствовать имеющимся представлениям о двухэтапности метаморфизма пород района. Приводимые сведения требуют пополнения на основании дальнейшего разностороннего изучения метаморфизма района.

**Ключевые слова:** зеленосланцевая фация, мусковит-хлоритовая субфация, биотитовая субфация, перекристаллизация кварца, сланцевый кливаж, кливаж плейчатости

**Финансирование.** Исследования выполнялись за счет хозяйского договора № 57-212-79 Уральского горного института с Янской геологоразведочной экспедицией Производственного ордена Ленина Геологического объединения «Якутскгеология».

**Для цитирования:** Суставов О.А. Метаморфизм (низы зеленосланцевой фации) терригенных пород северной части Куларского золотоносного района, Якутия: соотношения минералов с кливажем. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):7–19. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-7-19>

## Metamorphism (greenschist facia down) of terrigenous rocks in the northern part of the Kularsky gold-bearing district, Yakutia: mineral ratios with cleavage

Oleg A. Sustavov✉

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation  
✉olsustavov@mail.ru

### Abstract

In the Kularsky gold-bearing area, where 170 tons of gold were extracted from placers, primary gold deposits have not been well studied; therefore, their development requires detailed geological analysis including the study of rock metamorphism. A large Ulakhan-Sis anticline composed of Permian carbonaceous-terrigenous rocks is found on the northwestern flank of the Kular-Nersky folded belt of the Verkhoyano-Kolyma orogenic region. In this article we describe the material composition of carbonaceous-terrigenous rocks prevalent in the northern part of the Kularsky district. The degree of their postdiagenetic transformations varies from metagenesis in Triassic rocks to muscovite-chlorite and biotite subfacies of the greenschist facia of metamorphism in Permian rocks of the Ulakhan-Sis anticline. As the transition from metagenesis to muscovite-chlorite and biotite subfacies of metamorphism the degree of recrystallization of rocks, the grain sizes of the recrystallization of clastic quartz and the width of newly formed muscovite flakes are increasing, monazite, ilmenite, biotite flakes appear in rocks. These changes occur before the completion of formation in the rocks of the  $S_1$  slate cleavage. After the formation of the latter, mainly before the appearance of a later crenulation cleavage  $S_2$ , crystallization of pyrite occurs in the rocks. Porphyroblasts of biotite and magnesiosiderite appear during the formation of a crenulation cleavage  $S_2$ . The appearance of biotite during the formation of the  $S_1$  and  $S_2$  cleavages may correspond to the theories about the two-stage metamorphism of the rocks of the area. Thus, further metamorphism studies in this region are required.

**Keywords:** metagenesis, greenschist facia, muscovite-chlorite subfacia, biotite subfacia, quartz recrystallization, slate cleavage, crenulation cleavage

**Funding.** This study was conducted in accordance with the agreement (No. 57-212-79) of the Ural State Mining University and the Yansk geological-prospecting expedition of Production Geological Association “Yakutskgeologiya”.

**For citation:** Sustavov O. A. Metamorphism (greenschist facia down) of terrigenous rocks in the northern part of the Kularsky gold-bearing district, Yakutia: mineral ratios with cleavage. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):7–19. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-7-19>

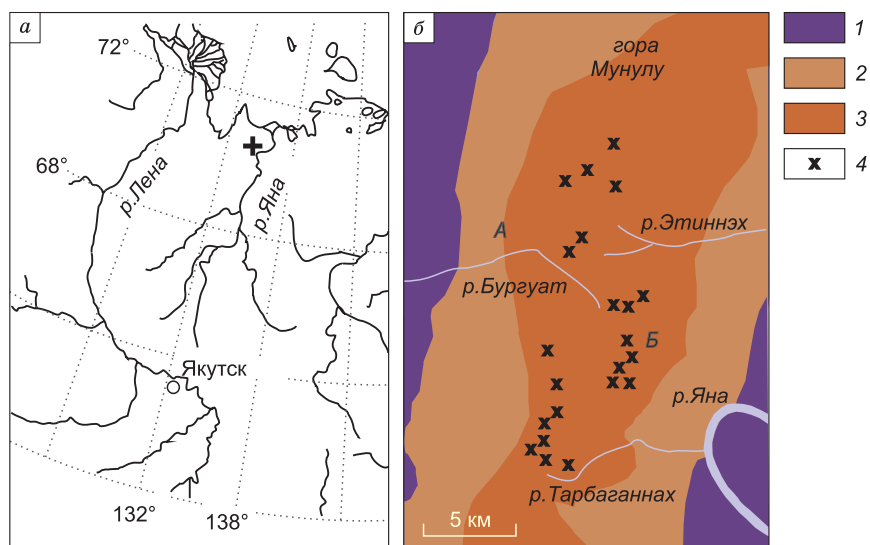
### Введение

Данный район находится на северо-западном фланге Кулар-Нерского сланцевого пояса Верхояно-Колымской орогенной области (рис. 1, а), который сложен глубоководными углеродистыми сланцами и турбидитами склона и подножия Верхоянской пассивной континентальной окраины. Породы смяты в складки в поздней юре-раннем мелу при коллизии Сибирского кратона и Колымо-Омолонского супертеррейна [4].

Среди структур северо-восточного простирания здесь устанавливается несколько крупных кулисообразно расположенных складок, в том числе Улахан-Сисская антиклиналь длиной более 100 км и шириной до 20 км. Крылья антиклинали образованы породами туогучанской (ТГ) свиты пермского возраста, а сводовая часть антиклинали – породами тарбаганнахской (ТБ) свиты пермского возраста. С запада и востока антиклиналь окружена породами нижнего и среднего триаса (рис. 1, б), отделенными от пермских отложений надвигами и взбросами.

Улахан-Сисская антиклиналь ориентирована в северо-северо-восточном направлении (10–15°) и постепенно погружается на юго-юго-запад под углом 5–8°. Углы падения слоев в своде антиклинали (ТБ свита) не превышают 3–7°, на крыльях (ТГ свита) – 20–25°. По [4], это лежащая изоклиналиная складка, повторно изогнутая в пологую асимметричную антиклиналь. В ее своде предполагается нескрытый крупный гранитоидный интрузив, кровля которого, по геофизическим данным, располагается на глубине 1–2 км от современной поверхности.

В настоящей статье рассматривается северная часть Улахан-Сисской антиклинали (северная часть Улахан-Сисского золоторудного района, по [2]) между ручьем Тарбаганнах на юге и горой Мунулу на севере (см. рис. 1, б). Описывается вещественный состав распространенных в данном районе углеродисто-терригенных пород, степень постдиagenетических преобразований которых изменяется от метабазита до мусковит-хлоритовой и биотитовой субфаций зеленосланцевой



**Рис. 1.** Географическое положение Куларского золотоносного района (+) (а) и схема его геологического строения (б) (по материалам ПГО «Якутскгеология»).

1 – триас, 2, 3 – верхняя пермь: 2 – туогучанская свита, 3 – тарбаганнахская свита; 4 – точки обнаружения в породах биотита. А – Эмисское золоторудное поле, Б – золоторудное месторождение Кыллах

**Fig. 1.** Geographical location of the Kularsky gold-bearing area (+) (a) and the scheme of its geological structure (б) (based on the materials of the PGA “Yakutskgeologiya”).

1 – Triassic, 2, 3 – Upper Permian: 2 – Tuoguchan formation, 3 – Tarbagannakh formation; 4 – points of detection of biotite in rocks. A is the Emis gold field, B is the Kyllakh gold deposit

фации метаморфизма. Рассмотрены присутствующие в метаморфизованных породах перекристаллизованный кварц, мусковит, ильменит, монацит, биотит, пирит и магнезиосидерит. Обсуждены вопросы соотношений между образованием данных минералов и формированием в породах кливажа  $S_1$  и  $S_2$ .

### Материалы и методы

Работа основана на ранее не опубликованных результатах полевых наблюдений и последующего изучения образцов, отобранных при минералогическом картировании северной части Куларского района [5]. Образцы пород отбирались при искаживании обнаженных участков местности по широтным профилям, располагающимся через 50 м друг от друга. Производился также отбор образцов пород из керна скважин Куларской поисково-разведочной партии.

Из отобранных образцов было изготовлено 520 шлифов пород. 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 петрографическим описанием минерального состава и структуры пород производились систематические микроструктурные наблюдения пород в шлифах – такие наблюдения могут быть использованы для получения информации о последовательности деформаций в том или другом районе и о связи этой последовательности с метаморфическими событиями [6, 7]. Детально характеризовался кливаж – его разновидности, форма и густота кливажных зон, соотношения между кливажем и породообразующими минералами. Систематически производилось определение степени перекристаллизации обломочного кварца, размеров зерен перекристаллизации кварца и чешуек новообразованного мусковита. Исследовалась реликтовая текстура в кристаллах пирита и магнезиосидерита и ее соотношения с текстурой вмещающих пород. Уделялось внимание изучению форм нахождения метаморфического биотита и распределению биотита на изученной площади. В качестве справочных пособий при описании в шлифах метаморфических минералов и их соотношений с кливажем использовались работы [6–8].

Травление срезов кристаллов пирита концентрированной  $HNO_3$  проведено А.Ф. Бушмакиным

(Уральский государственный горный университет), определение химического состава монацита и магнезиосидерита производилось на рентгеноспектральном микроанализаторе Cameca SX 100 в Институте геологии и геохимии УрО РАН Е.С. Шагаловым [9].

### Результаты

Изученный участок Улахан-Сисской антиклинали сложен пермскими углеродистыми сланцами (преимущественно аргиллитами и алевролитами), среди которых залегают отдельные пласты песчаников. Углеродистые сланцы состоят в основном из кварца, мусковита, углеродистого вещества и хлорита (последний особенно характерен для ТГ свиты). Углеродистое вещество в сланцах ТГ свиты представлено тонкодисперсным неполноупорядоченным графитом с межплоскостным расстоянием (002), равным 3,40–3,43 Å [10]. Песчаники преимущественно мелко- и тонкозернистые (размер обломков преимущественно 0,2–0,05 мм) граувакковые. Обломки сложены кварцем и плагиоклазом (альбит или альбитолигоклаз), калиевый полевой шпат отсутствует (наблюдения в шлифах, окрашивание 57 штупфов кобальтнитритом), в матриксе содержатся мусковит, хлорит, карбонат и углеродистое вещество.

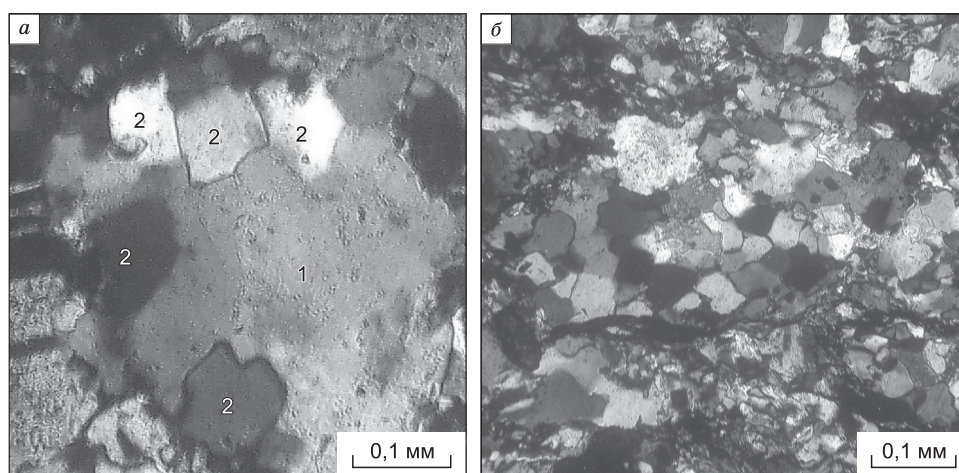
В породах наблюдается кливаж  $S_1$  [11]. В углеродистых сланцах это «сланцевый» кливаж (slaty cleavage [5]), обусловленный наличием тонких

углеродистых кливажных зон (УКЗ), субпараллельных чешуек хлорита, мусковита и вытянутых в том же направлении уплощенных мелких обломков кварца [8]. Кливаж песчаников «межзерновой» [8] (penetrative domainal cleavage [6]) – УКЗ располагаются между обломочными зернами. В песчаниках ТБ свиты кливаж  $S_1$  развит значительно сильнее, чем в песчаниках ТГ свиты [11].

Кроме того, в Улахан-Сисской антиклинали локально развит пересекающий  $S_1$  кливаж плейчатости  $S_2$  (crenulation cleavage [6, 7]), УКЗ которого отвечают сжатым крыльям микроскладок плейчатости, в которые сминается кливаж  $S_1$  [11].

Ниже характеризуются присутствующие в метаморфизованных пермских углеродистых породах Улахан-Сисской антиклинали кварц, мусковит, ильменит, монацит, биотит, пирит и магнезиосидерит.

*Кварц.* В песчаниках Улахан-Сисской антиклинали часто наблюдается перекристаллизация (recrystallization [6]) обломочного кварца с возникновением в обломках кварца (преимущественно по их краям) мелких новообразованных кварцевых зерен (рис. 2, а). Иногда перекристаллизация может нацело захватывать обломочные зерна кварца (рис. 2, б). Средний размер зерен перекристаллизации кварца в песчаниках ТГ свиты 0,02–0,03 мм (9), а в песчаниках ТБ



**Рис. 2.** Перекристаллизация кварца в песчанике тарбаганнахской свиты (верховья ручья Кыллах): а – зерна перекристаллизации (2) по краям обломка кварца (1), б – полная перекристаллизация обломков кварца и матрикса (горизонтальные черные полосы – углеродистые кливажные зоны  $S_1$ )

**Fig. 2.** Recrystallization of quartz in the sandstone of the Tarbagannakh formation (upper Kyllakh stream): а – recrystallization grains at the edges of the quartz fragment (1), б – complete recrystallization of quartz and matrix fragments (horizontal black bands – carbonaceous  $S_1$  cleavage zones)

свиты – 0,03–0,10 мм (12) (в скобках – число измерений).

При перекристаллизации обломочного кварца матрикс и обломки пород в песчаниках нередко приобретают мелкозернистую гранобластовую или лепидогранобластовую структуру. Данные структуры наблюдаются и в углеродистых сланцах. Особенно такие структуры характерны для ильменитсодержащих углеродисто-кварцевых и мусковит-углеродисто-кварцевых сланцев (в [11] – рис. 5, а); эти сланцы могут быть метаморфизованными глинисто-углеродисто-кремнистыми породами.

*Мусковит* при метаморфических изменениях песчаных пород образует ориентированные преимущественно субпараллельно кливажу  $S_1$  новообразованные чешуйки в матриксе и в обломках пород в песчаниках. Средняя толщина чешуек мусковита в песчаниках ТГ свиты – 0,005 мм (5), а в песчаниках ТБ свиты – 0,010 мм (21) (в скобках – число замеров).

Углеродистым сланцам ТБ свиты нередко свойственны более высокие содержания мусковита, чем углеродистым сланцам ТГ свиты (мусковит нередко развивается, замещая хлорит).

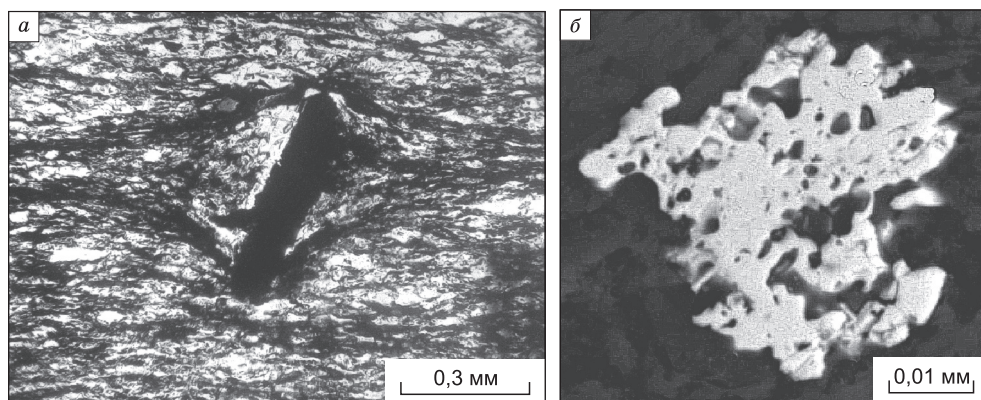
*Ильменит* образует приуроченные к некоторым углеродистым сланцам ТБ свиты пластинчатые кристаллы размерами до 1 мм, ориентированные преимущественно вдоль направления кливажа  $S_1$  или под небольшим углом к нему (в [11] – рис. 5, в), реже поперек  $S_1$ , огибаясь углеродистыми кливажными зонами  $S_1$  (рис. 3, а).

Возле кристаллов ильменита часто наблюдаются кварцевые тени деформации, вытянутые,

иногда очень сильно, вдоль направления  $S_1$ . Структура кварца в тенях деформации возле кристаллов ильменита, как и в окружающей матрице углеродистых сланцев, близка к гранобластовой. При наложении на  $S_1$  кливажа плейчатоности  $S_2$  кварцевые тени деформации возле кристаллов ильменита изгибаются у границ с УКЗ  $S_2$  и срезаются этими зонами (в [11] – рис. 5, в).

*Монацит* наблюдался нами в углеродистых сланцах ТГ и ТБ свит в виде изометричных выделений размерами в сотые доли миллиметра, которые огибаются кливажными зонами  $S_1$  вмещающего сланца. Характерны неправильные лапчатые контуры этих выделений и присутствие в них мелких (преимущественно размерами в первые микрометры) включений кварца и других минералов, тяготеющих преимущественно к периферическим частям выделений монацита (рис. 3, б).

Это так называемый нодулярный (в виде округлых выделений) монацит, или куларит (по первоначальным находкам в шлихах из россыпей Куларского района). В Верхояно-Колымской области он изучен главным образом из россыпей [3], куда минерал попадает из кор выветривания углеродистых пород. Размеры его выделений в шлихах из россыпей – от десятых долей до 1–2 мм. Нами же были описаны находящиеся непосредственно в коренных углеродистых породах мелкие (размерами в сотые доли миллиметра) выделения монацита (см. рис. 3, б), в которых наблюдается обрастание нодулярным монацитом обломочного монацита [9].



**Рис. 3.** Ильменит (а, без анализатора, тарбаганнахская свита, водораздел ручьев Бургуат и Кибергел-Юреге) и монацит (б, изображение в отраженных электронах [11], туогучанская свита, ручей Неттик) в углеродистых сланцах

**Fig. 3.** Ilmenite (a, without analyzer, Tarbagannakh formation, watershed of Burguat and Kibergel-Urege streams) and monazite (b, image in reflected electrons [11], Tuoguchan formation, Nettik stream), in black shale

Таблица 1

Химический состав монацита из углеродистых сланцев, нормир. масс. % [9]

Table 1

Chemical composition of monazite from carbon shales, normal. wt% [9]

Образец, точка анализа Sample, point of analysis	O	Al	Si	P	Ca	Fe	Sr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Th	U	Сумма
1	28,11	He опр.	0,31	13	0,34	0,21	1,05	He опр.	12,68	26,51	He опр.	11,07	1,59	He опр.	2,52	0	100
4, 1	28,96	0,23	0,55	12,88	0,15	He опр.	0,92	1,82	12,89	26,12	2,25	10,49	1,79	0,94	0	0	100
4, 2	28,52	0,24	0,69	12,76	0,26	He опр.	1	1,28	11,96	24,94	2,7	10,64	1,66	0,76	2,61	0	100
4, 3	28,7	0,25	0,55	13,09	0,24	He опр.	1,27	1,22	12,01	25,88	3,08	10,42	1,46	0	1,84	0	100
4, 4	29,13	0,21	0,37	13,69	0,17	He опр.	0,58	He опр.	12,62	25,63	2,2	10,66	1,69	1,01	2,05	0	100
4, 5	34,27	0,2	0,77	12,75	0,4	He опр.	1,28	1,95	11,3	21,38	2,15	8,73	1,51	0,62	2,69	0	100

Note. He опр. – It was not determined.

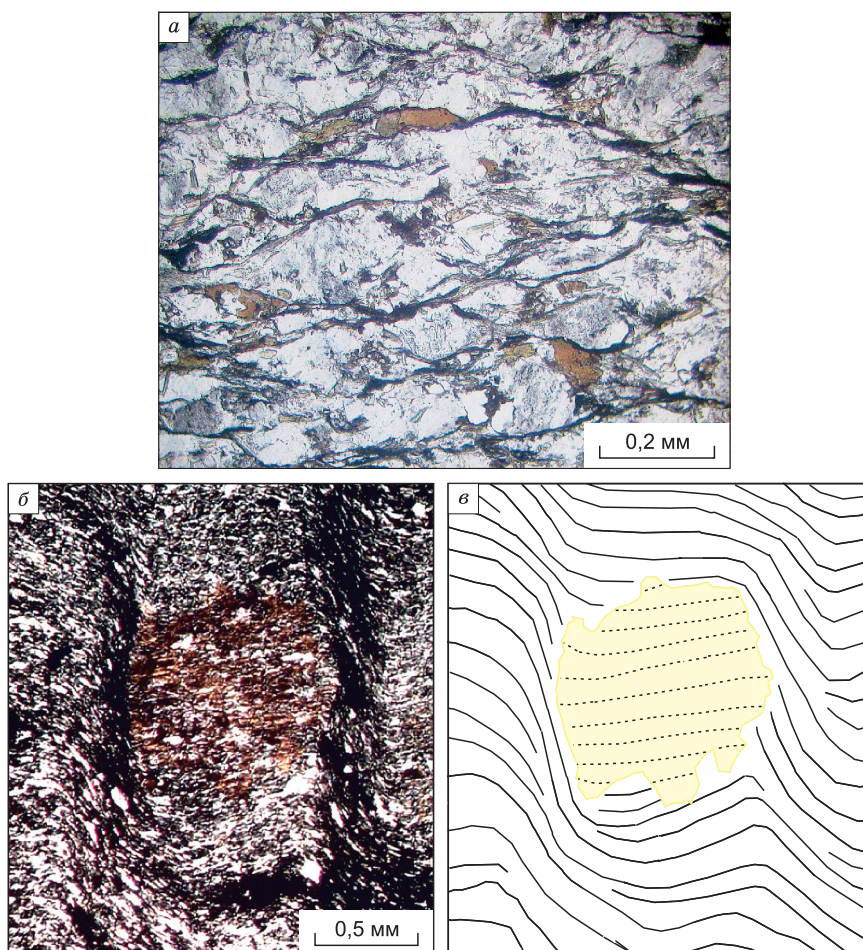
*Биотит* (преимущественно в виде редких чешуек) встречается в породах ТБ свиты в сводовой части Улахан-Сисской антиклинали. При этом в южной части изученной площади он встречается несколько чаще, чем в северной части (см. рис. 1, б). Биотит приурочен преимущественно к песчаникам, реже к алевролитам и не отмечался в аргиллитах. Обломочный кварц песчаников, содержащих биотит, нередко подвержен более сильной перекристаллизации, чем аналогичный обломочный кварц в песчаниках, в которых биотит отсутствует.

Биотит в породах нередко замещает хлорит и мусковит. Его чешуйки могут тяготеть к УКЗ  $S_1$  и располагаться между УКЗ. В том и другом случае зерна биотита могут быть ориентированы своей вытянутостью как вдоль, так и под разными углами к направлению УКЗ. Последние нередко приурочены к границам выделений биотита, иногда огибая и срезая эти выделения (рис. 4, а).

В южной части изученной площади (ручей Тарбаганнах) в углеродистых сланцах с кливажем плейчатости  $S_2$  в промежутках между кливажными зонами  $S_2$  наблюдался биотит в виде крупных зерен, густо насыщенных включениями мелких реликтовых зерен присутствующего в породе (метаалевролит) обломочного кварца (рис. 4, б, в). Включения располагаются внутри биотита «полосками» [8] (inclusion trails [6]), фиксирующими конфигурацию кливажа  $S_1$  при росте биотита (рис. 4, в).

*Пирит* в виде вкрапленности кубических кристаллов (метакристаллов) широко развит в породах ТГ свиты. При образовании этих кристаллов значительная часть присутствующего в породе углеродистого вещества сохраняется от замещения пиритом, образуя в кристаллах пирита видимую под микроскопом реликтовую текстуру [10].

Особенно наглядно реликтовая текстура проявлена в кристаллах пирита в углеродистых сланцах ТГ свиты, содержащих осадочно-диагенетические углеродисто-кварцевые нодулы (округлые выделения размерами преимущественно в десятые доли миллиметра) [11]; эти нодулы обычно огибаются и срезаются кливажем  $S_1$  (рис. 5, а). Травление срезов отобранных из таких сланцев кристаллов пирита концентрированной  $HNO_3$  (А.Ф. Бушмакин) выявляет в пирите, в частности, реликтовые углеродистые кливажные зоны и за-



**Рис. 4.** Биотит в породах тарбаганнахской свиты:

*a* – углеродистые кливажные зоны  $S_1$  (черное) и зерна биотита (бурое) в песчанике (сечение перпендикулярно кливажу  $S_1$  и линейности); без анализатора; ручей Икиясь; *б*, *в* – биотит в углеродистом сланце с кливажем пloyчатости  $S_2$ , ручей Тарбаганнах: *б* – без анализатора (бурое – биотит, черные расплывчатые вертикальные полосы – зоны кливажа пloyчатости  $S_2$ ), *в* – схема ориентировки кливажа  $S_1$  в породе и полосок включений (пунктир) в зерне биотита

**Fig. 4.** Biotite in rocks of the Tarbagannakh formation:

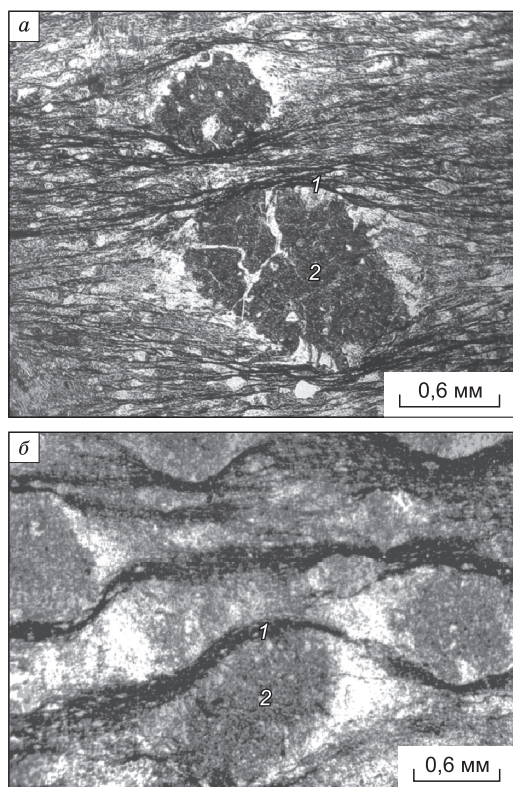
*a* – carbonaceous cleavage zones  $S_1$  (black) and grains of biotite (brown) in sandstone (cross section perpendicular to cleavage  $S_1$  and lineation); without analyzer; Ikies stream; *б*, *в* – biotite in carbonaceous shale with a crenulation cleavage  $S_2$ , Tarbagannakh stream: *б* – without an analyzer (brown – biotite, black blurry vertical stripes – zones of crenulation cleavage  $S_2$ ), *в* – a scheme of orientation of cleavage  $S_1$  in the rock and inclusion trails (dotted lines) in the biotite

мещенные пиритом отмеченные выше осадочно-диагенетические нодули (рис. 5, б). При этом углеродистые кливажные зоны огибают замещенные пиритом осадочно-диагенетические нодули аналогично тому, как это наблюдается на рис. 5, а в углеродистом сланце. Подобные наблюдения позволяют заключить, что данные кристаллы пирита возникают после образования в породах кливажа  $S_1$ .

По реликтовой текстуре кристаллов пирита обычно устанавливается, что при образовании этих кристаллов в замещающей пиритом породе

имелся лишь кливаж  $S_1$  (см. рисунки в статье [10]) и отсутствовал кливаж пloyчатости  $S_2$  (в том числе при наличии последнего в породах возле кристаллов пирита). Лишь в единичных случаях полоски реликтовой текстуры в некоторых кристаллах пирита местами локально смяты в слабые мелкие складки, осевые поверхности которых субпараллельны кливажу пloyчатости  $S_2$  окружающих сланцев (рис. 6, а).

Вкрапленному пириту свойствен широкий разброс изотопного состава серы ( $\delta S^{34}$  от  $-13$  до  $+2$  ‰) в разных образцах, с обогащением боль-



**Рис. 5.** Углеродистый сланец (*а*, шлиф, без анализатора) и протравленный концентрированной  $HNO_3$  (А.Ф. Бушмакин) пришлифованный срез кристалла пирита из углеродистого сланца (*б*): 1 – углеродистые кливажные зоны, 2 – осадочно-диагенетические подулы (*б* – замещенные пиритом)

**Fig. 5.** Carbonaceous shale (*a*, shale, without analyzer) and etched with concentrated  $HNO_3$  (A.F. Bushmakina) ground section of pyrite crystal from carbonaceous shale (*b*): 1 – carbonaceous cleavage zones, 2 – sedimentary-diagenetic nodules (*b* – replaced by pyrite)

шинства проб легким изотопом серы (от  $-1$  до  $-11\%$ ) [12]. При этом среди кристаллов вкрапленного пирита достаточно много и кристаллов с однородным изотопным составом серы, близким к метеоритному стандарту (последнее свойственно также пириту из сульфидно-кварцевых жил района) [12].

**Магнезиосидерит.** В местах развития кливажа плейчатости  $S_2$  в углеродистых сланцах ТГ и ТБ свит нередко присутствуют зерна магнезиосидерита [9] размерами до 1 мм (табл. 2). Наиболее интенсивное их развитие наблюдалось нами в пиритизированных углеродистых сланцах ТГ свиты (см. рис. 6) в Эмисском золоторудном поле (кern скважин Куларской поисково-разведочной партии).

Магнезиосидерит замещает мусковит, хлорит и отчасти кварц в промежутках между УКЗ в по-

родах. Внутри зерен магнезиосидерита реликты УКЗ прямолинейны (см. рис. 6, б) и ориентированы поперек развитого в окружающей породе кливажа плейчатости  $S_2$ , субпараллельно во всех зернах присутствующего в пределах шлифа магнезиосидерита (см. рис. 6, а; в данном случае в том же направлении ориентированы и реликтовые зоны кливажа  $S_1$  в метакристалле пирита).

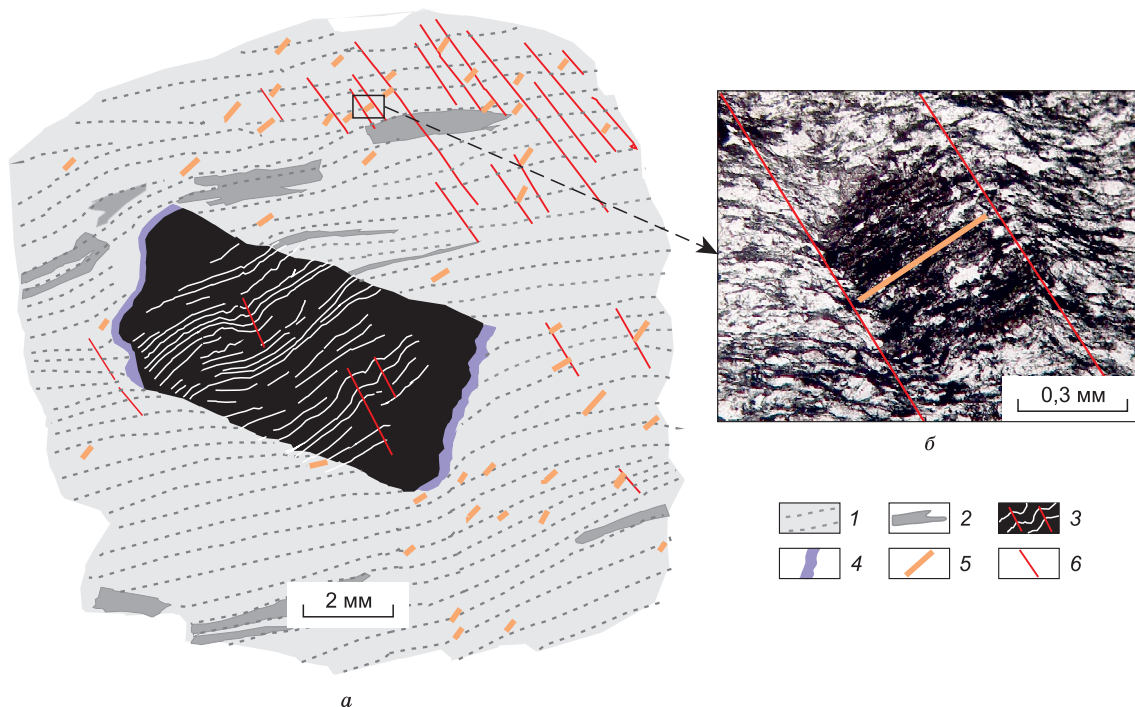
### Обсуждение

В изученном районе распространены терригенно-осадочные породы – нижнетриасового возраста за пределами Улахан-Сисской антиклинали и пермского возраста – на крыльях (ТГ свита) и в своде (ТБ свита) данной антиклинали. Песчаникам района свойственны в той или иной степени проявленная перекристаллизация обломочного кварца и появление чешуек новообразованного мусковита. При этом в ряду от песчаников триаса к песчаникам ТГ, а затем ТБ свиты размеры зерен перекристаллизации обломочного кварца увеличиваются от  $0,010$ – $0,015$  мм [13] до  $0,02$ – $0,03$  мм и  $0,03$ – $0,10$  мм. В том же ряду поперечник новообразованных чешуек мусковита также возрастает – от меньшего  $0,005$  мм [13] до  $0,005$  и  $0,010$  мм.

Размеры зерен перекристаллизованного кварца и чешуек мусковита, наблюдающиеся в песчаниках триаса, характерны для степени постдиагенетических изменений триасовых пород, отвечающей метагенезу (анхиметаморфизму) [13, 14] (происходит при температурах  $200$ – $350$  °С [15]). Размеры зерен перекристаллизованного кварца и чешуек мусковита, подобные наблюдающимся в песчаниках ТГ и ТБ свит, отмечаются в терригенно-осадочных породах, подвергшихся метаморфизму зеленосланцевой фации [16]. На метаморфические изменения пород данных свит указывает [6] и наличие гранобластовых (см. рис. 2, б) и лепидогранобластовых структур в углеродистых сланцах, а также в матриксе и обломках пород в песчаниках.

Приведенные выше значения межплоскостного расстояния (002) углеродистого вещества в сланцах ТГ свиты ( $3,40$ – $3,43$  Å) отвечают, по [17], углеродистому веществу мусковит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации (температуры метаморфизма  $350$ – $400$  °С). Данной субфации не противоречит и присутствие в породах изученной площади нодулярного монацита («ку-





**Рис. 6.** Зерна пирита (*a*, черное) и магнезиосидерита (*б*, без анализатора) в алевролите, ручей Эмись: 1 – кливаж  $S_1$  в алевролите, 2 – аргиллит, 3 – реликты кливажа  $S_1$  (белое) в пирите (черное) и осевые плоскости (красное) изгибов реликтов, 4 – хлоритовая оторочка деформации на кристалле пирита, 5 – направление полосок включений в зернах магнезиосидерита, 6 – направление слабо дифференцированного кливажа плейчатости  $S_2$

**Fig. 6.** Porphyroblasts of pyrite (*a*, black) and magnesiosiderite (*б*, without analyzer) in siltstone, Emis stream: 1 – cleavage  $S_1$  in siltstone, 2 – argillite, 3 – relicts of cleavage  $S_1$  (white) in pyrite (black) and axial planes (red) of relic bends, 4 – chlorite deformation fringe at pyrite crystal, 5 – the direction of inclusion trails in magnesiosiderite, 6 – the direction of weakly differentiated crenulation cleavage  $S_2$

ларита»). По [18], во многих районах подобный монацит наиболее характерен для мусковит-хлоритовой субфации метаморфизма (хотя может образовываться и при более низких температурах – до 100–300 °С). В условиях данной субфации нодулярный монацит возникал и в углеродистых сланцах крупнейшего в России золоторудного месторождения Сухой Лог [19]. Ильменит – обычный минерал ряда углероди-

стых сланцев ТБ свиты, в подобных породах других районов также часто образуется в условиях мусковит-хлоритовой субфации [20].

Нередкое присутствие в породах ТБ свиты метаморфического биотита (см. рис. 1, б) показывает, что степень метаморфизма в породах этой свиты достигает, по крайней мере местами, биотитовой субфации зеленосланцевой фации (первое появление биотита при метаморфизме

Таблица 2

Химический состав магнезиосидерита из углеродистых сланцев, мол.% [9]

Table 2

Chemical composition of magnesiosiderite from carbonaceous shales, mol.% [9]

Образец Sample	FeCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	MnCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Примечания Notes
1	64,9	32	1,8	1,2	Среднее по 3 анализам Average of 3 analyses
2	68,9	28,8	1,9	0,3	
3	63,8	33,8	2,0	0,4	

подобных пород происходит при температуре около 400 °С [21]).

К биотитовой субфации в ТБ свите могут относиться и породы, не содержащие в своем составе биотита, Это могут быть по крайней мере некоторые ильменитсодержащие мусковит-углеродисто-кварцевые сланцы – свойственный им безбиотитовый парагенезис ильменит–хлорит–мусковит может быть стабилен как в мусковит-хлоритовой, так и в биотитовой субфации [20].

По [22], низкотемпературная граница биотитовой субфации соответствует появлению первых биотитов в калишпатсодержащих песчаниках, а в таких породах, как не содержащие калишпата песчаники данного района, биотит появляется лишь при более высоких температурах, чем соответствующие началу биотитовой субфации. В метапелитах, наиболее широко распространенных в данном районе породах, биотит в условиях биотитовой субфации может вообще не образовываться [22].

Таким образом, биотитовая субфация в ТБ свите может быть развита более широко, чем лишь в участках непосредственного обнаружения в породах биотита (см. рис. 1, б).

В целом приведенные выше данные отвечают преобразованиям пермских пород Улахан-Сисской антиклинали в условиях низов зеленосланцевой фации [5, 23] – к данной антиклинали приурочена зона метаморфизма, повышающегося от наиболее широко развитой мусковит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации до биотитовой субфации в отдельных участках сводовой части антиклинали.

Рассмотренные в настоящей статье минералы метаморфизованных пермских углеродистых пород Улахан-Сисской антиклинали находятся в разных возрастных соотношениях с ранним кливажем  $S_1$  и наложенным на него кливажем  $S_2$ . Эти минералы можно разделить на образовавшиеся: 1) до завершения образования  $S_1$ , 2) после образования  $S_1$ , но до формирования  $S_2$ , 3) при формировании  $S_2$ .

1. К минералам, образовавшимся до завершения формирования  $S_1$ , можно отнести хлорит, мусковит, ильменит, монацит и часть биотита. Хлорит замещается ориентированным параллельно  $S_1$  мусковитом, выделения ильменита (см. рис. 3, а) и нодулярного монацита (см. рис. 3, б) огибаются кливажными зонами  $S_1$ . В других районах на образование кристаллов ильменита при формировании  $S_1$  в подобных породах

указывается в [24], на огибание выделений монацита кливажными зонами  $S_1$  вмещающих сланцев – в [25]. Отмечаемое в ряде случаев огибание и срезание чешуек биотита углеродистыми кливажными зонами  $S_1$  (см. рис. 4, а) также указывает на образование данных чешуек биотита до завершения формирования  $S_1$ .

2. После формирования  $S_1$  (или на самых поздних стадиях его формирования, непосредственно перед окончанием течения породы, сопровождавшего образование  $S_1$ ), преимущественно до возникновения  $S_2$ , в породах ТБ свиты происходила кристаллизация пирита. При наличии в породах возле кристаллов пирита кливажа  $S_2$  реликтовая текстура кристаллов обычно не фиксирует присутствия  $S_2$  при росте пирита (за исключением единичных редких случаев локального мелкого смятия полосок реликтового  $S_1$  – рис. 6, а). Подобное образование кристаллов пирита главным образом после образования кливажа  $S_1$ , до образования кливажа  $S_2$ , отмечается в аналогичных породах и в других районах [26].

Свойственный кристаллам вкрапленного пирита широкий разброс изотопного состава серы, с обогащением большинства проб легким изотопом серы, указывает на участие в образовании большинства кристаллов пирита легкой серы осадочно-диагенетических сульфидов. Наличие при этом среди кристаллов вкрапленного пирита существенного количества кристаллов с однородным изотопным составом серы, близким к метеоритному стандарту (как у пирита из сульфидно-кварцевых жил района) [12], может быть связано с подобным отмеченному на месторождении Сухой Лог [19] совместным присутствием в породах сходных метакристаллов пирита, образовавшихся при метаморфизме и в процессе метасоматических изменений, связанных с образованием сульфидно-кварцевых жил.

3. При формировании кливажа плейчатости  $S_2$  в породах южной части площади (ручей Тарбаганнах) в углеродистых сланцах образуется биотит в виде отдельных изометричных крупных зерен (см. рис. 6, б, в). Такие зерна начинают расти при коаксиальной деформации в начале образования кливажа плейчатости и прекращают свой рост при последующем активном сдвигании на крыльях плейчатости [27].

Таким образом, в породах изученной площади наблюдаются биотит с рассмотренными выше признаками образования до завершения формирования  $S_1$  и биотит, кристаллизовавшийся в про-

цессе формирования более позднего  $S_2$ . Подобное последовательное выделение метаморфического биотита сначала при образовании раннего «сланцевого» кливажа, а затем вместе с более поздним кливажем плейчатости отмечается в работе [7, p.196].

Так как биотит является индикатором максимальных для данного района температур метаморфизма, это может указывать на повышение температур метаморфизма до максимальных значений как при образовании  $S_1$ , так и при образовании  $S_2$ . В случае существенного разрыва во времени между образованием  $S_1$  и  $S_2$  (как это отмечается в других районах [8]), появление биотита при формировании того и другого кливажа может соответствовать представлениям о двухэтапности метаморфизма в данном районе («ранний дограницитный региональный метаморфизм зеленосланцевой фации» и «более поздний метаморфизм в ядре Улахан-Сисской антиклинали, тесно связанный со становлением располагающегося южнее Куларского гранитного батолита») [23]).

Кроме того, при формировании кливажа плейчатости образуются приуроченные к промежуткам между кливажными зонами  $S_2$  зерна магнезиосидерита (см. рис. 6). Последние широко распространены и в углеродистых сланцах в районе упомянутого выше золоторудного месторождения Сухой Лог. На этом месторождении формирование магнезиосидерита связывают с региональным метаморфизмом или с наложенным на регионально метаморфизованные породы метасоматизмом [19, 25, 26]. По [19], процесс образования магнезиосидерита происходил «синхронно с деформациями и рассланцеванием пород». В рассматриваемом в настоящей статье случае это соответствует выделению магнезиосидерита при образовании кливажа плейчатости  $S_2$ .

### Выводы

1. Пермские углеродисто-терригенные породы Улахан-Сисской антиклинали метаморфизованы в условиях мусковит-хлоритовой и биотитовой субфаций зеленосланцевой фации – к данной антиклинали приурочена субмеридионально вытянутая зона метаморфизма, повышающегося от наиболее широко развитой мусковит-хлоритовой субфации до биотитовой субфации зеленосланцевой фации в отдельных частях свода антиклинали.

2. К числу наиболее ранних метаморфических минералов в породах Улахан-Сисской анти-

клинали относятся хлорит, монацит и ильменит. Они выделялись до и/или в начале образования кливажа  $S_1$ . При формировании последнего происходила также перекристаллизация обломочного кварца и образование ориентированных вдоль направления  $S_1$  чешуек мусковита. Размеры зерен перекристаллизации кварца и чешуек мусковита в породах возрастают по мере усиления степени метаморфических преобразований при переходе от крыльев к сводовой части антиклинали.

3. Биотит, являющийся индикатором максимальных для данного района температур метаморфизма, образуется как в виде отдельных рассеянных чешуек до завершения формирования кливажа  $S_1$ , так и в виде значительно более крупных изометричных зерен при формировании более позднего кливажа плейчатости  $S_2$ ; это, в случае значительного разрыва во времени между образованием  $S_1$  и  $S_2$ , не противоречит известным представлениям о двухэтапности метаморфизма пород в данном районе.

4. Рост кристаллов вкрапленного пирита происходит при завершении формирования  $S_1$ , до появления кливажа плейчатости  $S_2$ . Образование кристаллов пирита при метаморфизме пород происходило преимущественно с участием серы осадочно-диагенетических сульфидов. Кроме того, возникновение некоторых кристаллов пирита могло быть связано с процессами метасоматических изменений в контактах сульфидсодержащих кварцевых жил.

5. Магнезиосидерит мог образовываться при формировании кливажа плейчатости  $S_2$  в связи с метаморфизмом пород или с наложенным на метаморфизованные породы карбонатным метасоматизмом.

### Список литературы / References

1. Горячев Н.А. *Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН; 1998. 210 с.

Goryachev N.A. *Geology of mesozoic gold-quartz vein belts in Northeast Asia*. Magadan: North-Eastern Scientific Research Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 1998. 210 p. (In Russ.)

2. Фридовский В.Ю. Куларская металлогеническая зона: метаморфогенные Au кварцевые месторождения. В кн.: Парфенов Л.М. и Кузьмин М.И. (ред.) *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика»; 2001. С. 350–353.

Fridovsky V.Yu. Kular metallogenic zone: metamorphogenic Au and quartz deposits. In: Parfenov, L.M. and

- Kuz'min M.I. (eds.) *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. Moscow: MAIK "Nauka/Interperiodika"; 2001, pp. 350–353. (In Russ.)
3. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Прокопьев А.В. и др. Нодулярный монацит из россыпей Куларского кряжа (Арктическая Сибирь, Россия) – состав, оценки возраста. *Геология и геофизика*. 2018;59(10):1658–1679. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20181010>
- Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Prokopyev A.V., et al. Nodular monazite from placers of the Kular Ridge (Arctic Siberia, Russia): composition, age estimates. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;(10):1658–1679. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20181010>
4. Парфенов Л.М., Оксман В.С., Прокопьев А.В. Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области. В кн.: Парфенов Л.М. и Кузьмин М.И. (ред.) *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика»; 2001. С. 199–255.
- Parfenov L.M., Oksman V.S., Prokoiev A.V. Terrane collage of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region. In: Parfenov L.M. and Kuz'min M.I. (eds.) *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. Moscow: MAIK "Nauka/Interperiodika"; 2001, pp. 199–255. (In Russ.)
5. Сустанов О.А. Деформации жильного кварца при формировании золотого оруденения в черносланцевых толщах (Куларский район, Восточная Якутия). *Геология и геофизика*. 1995;(4):81–87.
- Sustavov O.A. Deformations of vein quartz during the formation of gold mineralization in black shale strata (Kularsky region, Eastern Yakutia). *Russian Geology and Geophysics*. 1995;(4):81–87. (In Russ.)
6. Vernon R.H. *A practical guide to rock microstructure*. Cambridge University Press; 2018. 431 p. <https://doi.org/10.1017/9781108654609>
7. Passchier C.W., Trouw R.A.J. *Microtectonics*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag; 2005. 366 p.
8. Кирмасов А.Б. *Основы структурного анализа*. М.: Научный мир; 2011. 368 с.
- Kirmasov A.B. *Fundamentals of structural analysis*. Moscow: Nauchnyi mir; 2011. 368 p. (In Russ.)
9. Сустанов О.А., Шагалов Е.С. Магнезиосидерит и монацит в углеродистых сланцах северной части Куларского района, Якутия. *Уральская минералогическая школа*. 2021;(27):117–119.
- Sustavov O.A., Shagalov E.S. Magnesiosiderite and monazite in carbonaceous shales of the northern part of the Kular region, Yakutia. *Ural'skaya mineralogicheskaya shkola [Urals Mineralogical School]*. 2021;(27): 117–119. (In Russ.)
10. Бушмакин А.Ф. Унаследованное строение кристаллов пирита из пород с углеродистым веществом. В кн.: Григорьев Д.П. и др. (ред.) *Проблемы онтогенеза минералов*. Л.: Наука; 1985. С. 73–82.
- Bushmakina A.F. Inherited structure of pyrite crystals from rocks with carbonaceous matter. In: Grigor'ev D.P., et al (eds.) *Problems of minerals ontogeny*. Leningrad: Nauka; 1985, pp. 73–82.
11. Сустанов О.А. Микроструктуры кливажа и индикаторы растяжения в черносланцевых породах северной части Улахан-Сисской антиформы (Куларский район, Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021;26(3):31–42. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-31-42>
- Sustavov O.A. Cleavage microstructures and stretching indicators in black-shale rocks of the northern part of the Ulakhan-Sis antiform (Kularsky district, Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021;26(3): 31–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-31-42>
12. Перкова Р.И., Сустанов О.А., Бушмакин А.Ф. Изотопный состав серы сульфидов золотоносных кварцевых жил и пиритизированных зон в черных сланцах одного из районов Якутии. В кн.: *VIII Всесоюзный симпозиум по стабильным изотопам в геохимии, г. Москва, 11–14 ноября 1980 г.* М., 1980. С. 337–338.
- Perkova R.I., Sustavov O.A., Bushmakina A.F. Isotopic composition of sulfur sulfides of gold-bearing quartz veins and pyritized zones in black shales of one of the regions of Yakutia. In: *8<sup>th</sup> All-Union symposium on stable isotopes in geochemistry, Moscow, November 11–14, 1980*. Moscow; 1980, pp. 337–338. (In Russ.)
13. Сустанов О.А. Динамическая перекристаллизация кварца в жилах среди песчаников зоны метатенеза (Куларский район, Якутия). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2018;(6):33–40. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-6-33-40>
- Sustavov O.A. Dynamic recrystallization of quartz in veins in sandstones of the metagenesis zone (Kularsky district, Yakutia). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2018;(6):33–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-6-33-40>
14. Сустанов О.А. Кварцевые жилы южной части Адыча-Эльгинского антиклинория и зоны Адыча-Тарынского разлома, Якутия. *Литосфера*. 2018;18(1): 111–126. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-111-126>
- Sustavov O.A. Quartz veins at the southern part of Adycha-Elgi anticlinorium and zone of Adycha-Taryn fault, Yakutia. *Lithosphere (Russia)*. 2018;18(1):111–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-111-126>
15. Япаскурт О.В. Аспекты теории постседиментационного литогенеза. *Литосфера*. 2005;(3):3–30.
- Yapaskurt O.V. The aspects of the postsedimental lithogenesis theory. *Lithosphere (Russia)*. 2005;(3):3–30. (In Russ.)
16. Turnbull I. M., Mortimer N., Craw D. Textural zones in the Haast Schist—a reappraisal. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. 2001;44(1):171–183.
17. Nakamura Y., Akai J. Microstructural evolution of carbonaceous material during graphitization in the Gyojama contact aureole: HRTEM, XRD and Raman spec-

troscopic study. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. 2013; 106(3):131–143. <https://doi.org/10.2465/jmps.120625>

18. Čopřaková R., Novák M., Franců E. Formation of authigenic monazite-(Ce) to monazite-(Nd) from Upper Carboniferous graywackes of the Drahaný Upland: Roles of the chemical composition of host rock and burial temperature. *Lithos*. 2011;127:373–385. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.08.001>

19. Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г. и др. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе. *Геология рудных месторождений*. 2008;50(1):3–46.

Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., et al. Wall-rock metasomatism of carbonaceous terrigenous rocks in the Lena gold district. *Geology of Ore Deposits*. 2008;50(1):1–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1075701508010017>

20. Портнов А.М., Жаднова Т.П. Ильменитсодержащие метаморфические сланцы Патомского нагорья. *Известия АН СССР. Серия геологическая*. 1969;(2):124–127.

Portnov A.M., Zhadnova T.P. Ilmenite-bearing metamorphic shales of the Patom Highlands. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR Seriya Geologicheskaya [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Geological Series]*. 1969;(2):124–127. (In Russ.)

21. Kidder S., Avouac J.-P., Chan Y.-C. Constraints from rocks in the Taiwan orogen on crustal stress levels and rheology. *Journal of Geophysical Research*. 2012; 117. <https://doi.org/10.1029/2012JB009303>

22. Кориковский С.П. *Фаши метаморфизма метапелитов*. М.: Наука; 1979. 263 с.

Korikovskiy S.P. *Facies of metapelite metamorphism*. Moscow: Nauka; 1979. 263 p. (In Russ.)

23. Константинов М.М., Константиновский Ф.Ф., Наталенко М.В. Типизация золоторудных районов в терригенно-сланцевых поясах России. *Региональная геология и металлогения*. 2013;(54):75–88.

Konstantinov M.M., Konstantinovskiy F.F., Natalenko M.V. Typification of gold mining areas in the terrigenous shale belts of Russia. *Regional Geology and Metallogeny*. 2013;(54):75–88. (In Russ.)

24. Prior D.J. Syntectonic porphyroblast growth in phyllites: textures and processes. *Journal of Metamorphic Geology*. 1987;(5):27–39.

25. Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В. и др. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов. *Геология рудных месторождений*. 2011;53(1):32–64.

Yudovskaya M.A., Distler V.V., Mokhov A.V., et al. Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of U-Th-Pb isotopic SHRIMP-dating of accessory minerals. *Geology of Ore Deposits*. 2011;53(1):27–57. <https://doi.org/10.1134/S1075701511010077>

26. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., et al. Multistage Sedimentary and Metamorphic Origin of Pyrite and Gold in the Giant Sukhoi Log Deposit, Lena Gold Province, Russia. *Economic Geology*. 2007; 102(7):1233–1267. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>

27. Bell T.H., Sanislav I.V., Sapkota J. The control of deformation partitioning and strain localization on porphyroblast behaviour in rocks and experiments. *Geosciences Journal*. 2018;22:65–77. <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0030-8>

### Об авторе

**СУСТАВОВ Олег Анатольевич**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-1880-5494>, SPIN: 2135-3900, e-mail: [olsustavov@mail.ru](mailto:olsustavov@mail.ru)

### About the author

**SUSTAVOV, Oleg Anatol'evich**, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-1880-5494>, SPIN: 2135-3900, e-mail: [olsustavov@mail.ru](mailto:olsustavov@mail.ru)

Поступила в редакцию / Submitted 26.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 05.02.2024

Принята к публикации / Accepted 15.02.2024