

Деформация и перекристаллизация сульфидных прослоев на золоторудном черносланцевом месторождении Голец Высочайший

С. А. Онищенко

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167000, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54,
e-mail: mine222@ya.ru

Поступила в редакцию 05.10.2022 г., принята к печати 03.04.2023 г.

Предмет исследований. Взаимоотношения сульфидных прослоев в алевропелитовых породах с кливажом осевой поверхности на золоторудном черносланцевом месторождении Голец Высочайший (Бодайбинский рудный район). **Методы.** Изучение строения горных пород в обнажениях, керне скважин, пришлифованных образцах, прозрачных и полированных шлифах, определение химического состава минералов. **Результаты.** Установлено, что сульфидные и сульфидсодержащие прослои при пластических динамометаморфических преобразованиях горных пород подвергаются деформации и перекристаллизации совместно с вмещающими алевропелитовыми породами. **Выводы.** Метаморфические преобразования пород происходили в две стадии. При складчато-надвиговых деформациях первой стадии формируется кливаж пород, который приводит к разлинзованию сульфидных прослоев с ориентировкой линз по направлению кливажа. Метаморфические преобразования второй стадии проявляются в сульфидных и сульфидсодержащих прослоях в собирательной перекристаллизации слагающих их минералов с замещением окружающих пород, деформированных на предыдущей стадии. Для второй стадии характерны изменения минерального состава пород, проявляющиеся в замещении пирротина пиритом, увеличении железистости хлоритов и карбонатов.

Ключевые слова: пирит-пирротинные прослои, складчатость, кливаж осевой поверхности, кливаж пloyчатости (кренуляционный), перекристаллизация

Deformation and recrystallization of sulfide interlayers at the Golets Vysochaishii Gold-Ore Black-Shale Deposit

Sergei A. Onishchenko

N.P. Yushkin Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, 54 Pervomaiskaya st., Syktывkar 167000, Russia,
e-mail: mine222@ya.ru

Received 05.10.2022, accepted 03.04.2023

Research subject. The relationship of sulfide interlayers in silt-pelitic rocks with the cleavage of the axial surface at the Golets Vysochaishii gold-ore black-shale deposit (Bodaibo ore district). **Methods.** The structure of rocks was studied in outcrops, borehole cores, sanded samples, transparent and polished sections. The chemical composition of minerals was determined. **Results.** It was established that sulfide and sulfide-containing interlayers undergo deformation and recrystallization together with the host silt-pelitic rocks during plastic dynamometamorphic transformations of rocks. **Conclusions.** Metamorphic transformations of rocks took place in two stages. During the folding-thrust deformations of the first stage, a cleavage of rocks is formed, which leads to the splintering of sulfide interlayers with the orientation of the lenses along the cleavage. Metamorphic transformations of the second stage are manifested in sulfide and sulfide-containing interlayers in the collective recrystallization of their composing minerals with the replacement of surrounding rocks deformed at the previous stage. The second stage is characterized by changes in the mineral composition of rocks, manifested in the substitution of pyrrhotite with pyrite, increase in the iron content of chlorites and carbonates.

Keywords: pyrite-pyrrhotite interlayers, folding, cleavage of the axial surface, crenulation cleavage, recrystallization

Для цитирования: Онищенко С.А. (2023) Деформация и перекристаллизация сульфидных прослоев на золоторудном черносланцевом месторождении Голец Высочайший. *Литосфера*, 23(6), 1059–1078. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-6-1059-1078>

For citation: Onishchenko S.A. (2023) Deformation and recrystallization of sulfide interlayers at the Golets Vysochaishii Gold-Ore Black-Shale Deposit. *Lithosphere (Russia)*, 23(6), 1059–1078. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-6-1059-1078>

ВВЕДЕНИЕ

Сульфиды являются обычным компонентом осадочных пород, особенно они характерны для черных сланцев, в которых наряду с углеродистым веществом часто фиксируются значительные содержания сульфидной серы (Петтиджон, 1975; Юдович, Кетрис, 1988; Rickard, 2012).

В слабометаморфизованных осадочных породах пирит представлен дисперсными формами и скрытокристаллическими обособлениями желвакообразной, линзовидной, овоидальной формы, сфероидными и конкрециями. Характерными для осадочных сред являются фрамбоиды – субсфероидальные агрегаты микрористаллов пирита (Rickard, 2012). Локализация пирита осадочно-диагенетической группы наиболее отчетливо регулируется стратиграфическим фактором. Максимальные содержания пирита отмечаются в углеродистых филлитовидных сланцах. Установлена приуроченность пирита к углеродсодержащим пачкам в целом или отдельным слоям. Для всех форм агрегированного пирита преимущественно свойственна согласная послойная локализация. Для пирита метаморфической генетической группы наиболее характерны кристаллические индивиды неправильной формы, метакристаллы и их срастания. В метаморфических комплексах пород меньше распространены дисперсные и скрытокристаллические формы пирита, а фрамбоиды наблюдаются почти исключительно в реликтовой форме (Андреев, 1992).

Прослои пирита и пирит-пирротиновые конкреции распространены в Печенгской структуре на Кольском полуострове, где черные сланцы являются вмещающими породами для никеленосных интрузий и вследствие этого называются продуктивной толщей (Ахмедов, Крупеник, 1990; Melezhik et al., 1998). Среди железистых кварцитов докембрийского возраста в районе оз. Верхнее в Северной Америке выделяется сульфидная фация, в которой прослои тонкозернистого пирита заключены в углеродсодержащих сланцах (James, 1954). Слоистое строение характерно для колчеданных руд месторождений гидротермально-осадочного генезиса, в них установлены также конкреционные сульфидные образования (Скрипченко, 1972; Дистанов, Ковалев, 1975; Масленников, 2006; Сафина и др., 2015; Целуйко и др., 2017; Аюпова и др., 2019; Safina et al., 2020).

Сульфидная вкрапленность, конкреционные стяжения и прослои сульфидов распространены в черносланцевых отложениях рудных полей крупных золоторудных месторождений, в частности Кумтор в Кыргызстане (Шевкунов и др., 2018), Бендиго в Австралии (Thomas et al., 2011). В Бодайбинском рудном районе, одном из важнейших золотодобывающих районов России, к сульфид-

содержащим черносланцевым отложениям приурочено гигантское месторождение Сухой Лог и менее крупные Голец Высочайший, Вернинское и др. (Буряк, Хмелевская, 1997; Large et al., 2007; Иванов, 2008, 2014; Юдовская и др., 2011; Паленова и др., 2015; Tarasova et al., 2020; Онищенко, Сокерина, 2021; Тарасова и др., 2021). Осадочно-диагенетические сульфиды рассматриваются в ряде работ в качестве источника золота и других элементов, которые мобилизуются в раствор и перетлагаются на метаморфогенно-гидротермальной стадии с формированием промышленных руд (Буряк, 1982; Large et al., 2011; Thomas et al., 2011). Характер преобразований осадочно-диагенетического сульфидного вещества при метаморфизме оценивается на основании изменения формы и состава последовательных генераций сульфидных минералов на фоне происходящих деформаций пород (Large et al., 2007).

Решающее значение для определения относительного возраста минеральных срастаний имеют взаимоотношения послойно локализованных сульфидных выделений с тектоническими структурами, в первую очередь со складчатостью и кливажом (Жабин, 1979). В связи с этим представляется важным уточнение закономерностей деформации и перекристаллизации сульфидных прослоев при пластических динамометаморфических преобразованиях алевропелитовых пород, что и является целью исследований.

БОДАЙБИНСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН

Месторождение Голец Высочайший находится в Бодайбинском рудном районе, центральной части Ленской золотоносной провинции. Золоторудные месторождения заключены в мощной (несколько км) толще рифей-вендских углеродсодержащих карбонатно-терригенных отложений, слагающих Бодайбинский синклиниорий. Золото концентрируется на нескольких стратиграфических уровнях, к отложениям хомолхинской свиты рифейского возраста приурочено гигантское месторождение Сухой Лог, а также его аналог – Голец Высочайший. Эти месторождения, а также Вернинское, Невское и Угахан относятся к золотосульфидной формации с прожилково-вкрапленным типом руд. В районе развиты также кварцево-жильные золоторудные месторождения (рис. 1).

Бодайбинский синклиниорий характеризуется складчато-надвиговым строением. В палеозое породы были смяты в серию запрокинутых на юго-юго-запад складок, осложненных взбросами и надвигами. Складкообразование сопровождалось регионально распространенным кливажом горных пород, имеющим в целом северное падение. Синскладчатый метаморфизм соответствует зеленосланцевой фации. В Бодайбинском районе прояв-

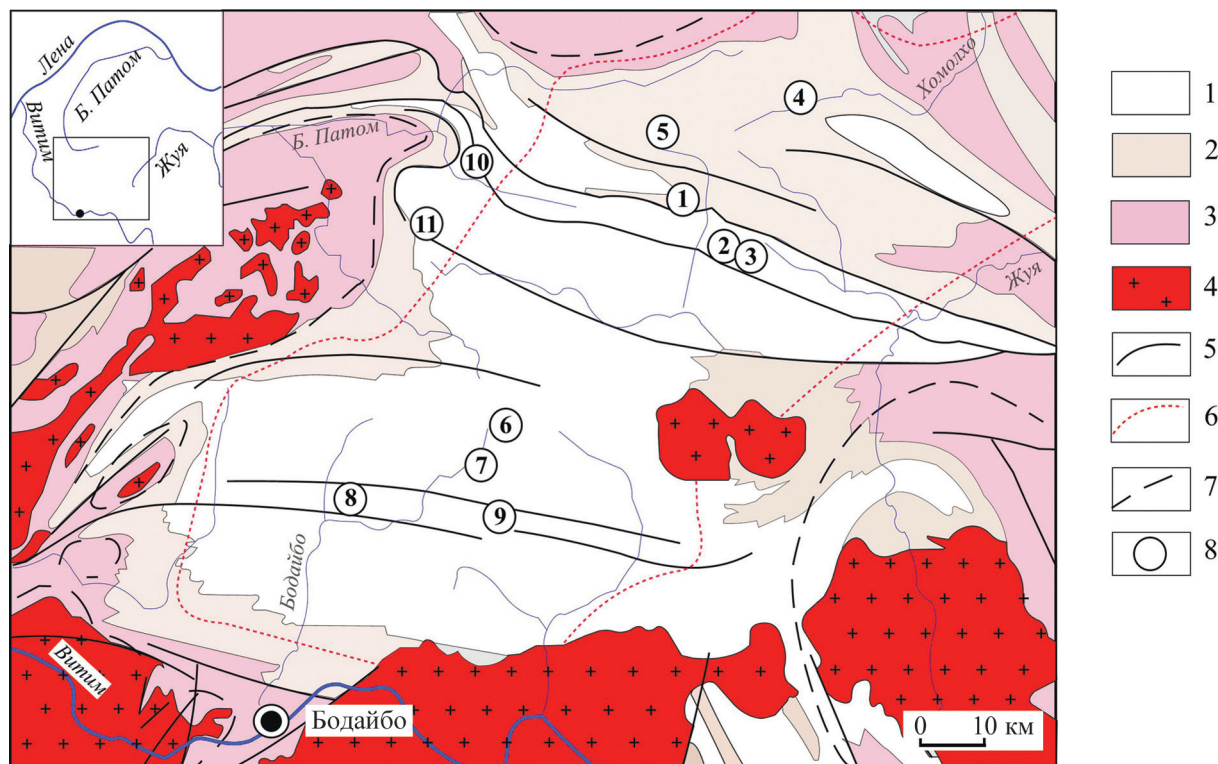


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Бодайбинского рудного района, по (Иванов, 2008) с упрощениями.

1 – венд, 2 – средний–верхний рифей (бужуихтинская, угаханская, хомолхинская и имняхская свиты), 3 – средний рифей; 4 – палеозойские гранитоиды мамского и конкудеро-мамakanского комплексов; 5 – главные разрывные нарушения; 6 – изограда биотита регионального метаморфизма; 7 – границы деформационных зон гранитогнейсовых куполов; 8 – золоторудные месторождения (1 – Сухой Лог, 2 – Вернинское, 3 – Невское, 4 – Голец Высочайший, 5 – Угахан, 6 – Красное, 7 – Догадлынская жила, 8 – Кавказ, 9 – Копыловское, 10 – Ожерелье, 11 – Ыканское).

Fig. 1. Geological sketch map of Bodaibo ore district, after (Ivanov, 2008) with simplifications.

1 – Vendian, 2 – Middle–Upper Riphean (Buzhuikhita, Ugakhan, Khomolkho and Imnyakh formations), 3 – Middle Riphean; 4 – Paleozoic granitoids of the Mamsky and Konkudero-Mamakan complexes; 5 – major faults; 6 – isograd of biotite of regional metamorphism; 7 – boundaries of deformation zones of granite-gneiss domes; 8 – gold deposits: (1 – Sukhoi Log, 2 – Verna, 3 – Neva, 4 – Golets Vysochaishii, 5 – Ugakhan, 6 – Krasnoe, 7 – Dogaldynskaya zhila, 8 – Caucasus, 9 – Kopylov, 10 – Ozherel'e, 11 – Ykanskoe).

лен также более поздний зональный региональный метаморфизм; в той части района, где находятся основные месторождения, в том числе Голец Высочайший и Сухой Лог, породы метаморфизованы в фации зеленых сланцев, на периферии района – в амфиболитовой фации. Изограды биотита, граната, кианита пересекают складчатые структуры, что свидетельствует о более позднем проявлении регионального метаморфизма относительно складкообразования. В зонах высокотемпературных фаций формировались гранитогнейсовые купола, деформирующие складчатость. В пределах гранитогнейсовых структур образовались синметаморфические относительно небольшие тела плагиопегматитов мамского комплекса. В регрессивно-метаморфический этап внедрились гранитоиды конкудеро-мамakanского комплекса, вскрытые в основном по периферии Бодайбинского рудного района (Иванов, 2008, 2014).

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в районе золоторудного черносланцевого месторождения Голец Высочайший в Бодайбинском рудном районе (Байкало-Патомское нагорье, Иркутская область). Геологическое строение месторождения и прилегающей территории изучалось по керну скважин, полотну траншей, скальным обнажениям по руч. Каменному, р. Хомолхо, р. Имнях и в стенках карьера. Особое внимание уделялось изучению характера распределения сульфидной минерализации в слоистой толще и ее поведению при тектонических деформациях. Непосредственным объектом исследований являлась Каменская антиклиналь, южное крыло которой пересекается кливажом почти под прямым углом, а северное рудоносное крыло – под острым углом к слоистости. Текстурно-структурные особенности и минеральный состав пород изучались

в шлифованных образцах, специально изготовленных прозрачных препаратах, петрографических и полированных шлифах. Для изучения строения пирита применялось травление полированной поверхности концентрированной азотной кислотой в течение 50–60 с. Лабораторные исследования проведены в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН с использованием оптического микроскопа Nikon Eclipse LV 100 ND и сканирующих электронных микроскопов ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM с энергодисперсионной приставкой TrueSight EDS 25 mm² (оператор В.А. Радаев) и Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 Oxford Instruments (операторы С.С. Шевчук, А.А. Кряжев и Е.М. Тропников). Анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ; номинальный диаметр зонда – 0.2 мкм, фактический – 1.0 мкм. Эталоны: чистые металлы – для Au, Ag, Fe, Cu и Zn, FeS₂ – для S, InAs – для As, MgO – для Mg, волластонит – для Ca, Al₂O₃ – для Al, SiO₂ – для Si.

СТРОЕНИЕ КАМЕНСКОЙ АНТИКЛИНАЛИ

Каменская антиклиналь, к которой приурочено месторождение Голец Высочайший, сложена породами рифейского возраста. В ее ядре обнажаются терригенно-карбонатные отложения угаханской свиты, а крылья сложены терригенными отложениями хомолхинской свиты. Каменская антиклиналь имеет субширотное простирание и асимметричное строение. Ее северное крыло, к которому приурочено промышленное оруденение, полого (10–30°) погружается на север и сливается с нормальным крылом запрокинутой на юг почти изоклиальной Имняхской синклинали, опрокинутое крыло которой на месторождении эродировано. Породы в южном крыле Каменской антиклинали имеют крутое южное падение (рис. 2, 3).

Вследствие тектонического воздействия мощность отложений хомолхинской свиты в южном крыле Каменской антиклинали значительно больше, чем в северном, в первую очередь за счет их смятия, масштабы которого бывают различными – от мелкой гофрировки слоев до складок с размахом крыльев в несколько метров. Кливаж под прямым углом сечет слоистость пород в южном крыле антиклинали и почти совпадает с залеганием пород в северном рудоносном ее крыле (Онищенко, Сокерина, 2021; Ванин, Мазукабзов, 2021).

Хомолхинская свита представляет собой ритмично построенную толщу, сложенную сланцами, алевролитами и тонкозернистыми песчаниками; нижняя (*hm*₁) и верхняя (*hm*₃) ее подсвиты, сложенные преимущественно пелитами, разделяются песчаными отложениями средней подсвиты (*hm*₂). В нижней подсвите изредка отмечаются прослои известняков (см. рис. 3б). Терригенные отложения

хомолхинской свиты подстилаются известняками угаханской свиты (*uh*), в которых присутствуют прослои сланцев и алевролитов.

Характерными компонентами отложений хомолхинской свиты являются линзовидные прослои и послойная вкрапленность пирротина и пирита с отчетливо выраженным литолого-стратиграфическим контролем их распространения. Сульфиды в виде линзочек пирротина, кристаллов пирита и их сростаний распространены по всему разрезу хомолхинской свиты, нередко отмечаются также в карбонатно-сланцевых породах угаханской свиты. Относительно высокие содержания сульфидных минералов (0.5–3.0 об. %) характерны для отложений нижнехомолхинской подсвиты (*hm*₁), сложенных черными и темно-серыми углеродсодержащими хлорит-кварц-серицитовыми филлитовидными сланцами с прослоями алевритистых сланцев серицит-кварцевого и анкерит-серицит-кварцевого состава, выделяющихся более светлой окраской. Породы содержат послойную и рассеянную вкрапленность пирротина и пирита, линзовидные выделения и тонкие прослои пирротинового, пирит-пирротинового и пиритового состава. В небольшом количестве в сульфидных прослоях присутствуют халькопирит, арсенопирит, сфалерит и галенит, изредка отмечаются пентландит и аргентопентландит. Протяженность сульфидных линз и прослоев обычно изменяется от 0.3 до 2.0 м, толщина – 0.3–3.0 см, количество – 3–8 на 1 м мощности.

Наиболее высокие содержания сульфидных минералов отмечены в северном крыле Каменской антиклинали, где отложения нижнехомолхинской подсвиты являются золотоносными. Содержание сульфидов в рудоносной толще месторождения Голец Высочайший составляет около 5 мас. %. Самородное золото заключено в сульфидных прослоях, где находится в непосредственном сростании с пиритом, пирротинном, арсенопиритом, халькопиритом и сфалеритом или в тонких прожилках и мелких гнездах кварц-карбонатного состава. Размер золотин от мельчайших до 0.5 мм, изредка до 3.0 мм. Самородное золото представлено твердым раствором Au-Ag, наиболее распространено золото пробностью 714–828‰, в мелких золотишках размером 10–30 мкм диапазон изменения пробности заметно больше (622–856‰). Отмечается также низкопробное (404–488‰) золото, образующее в кристаллах арсенопирита микропрожилки толщиной 3–5 мкм совместно с халькопиритом, сфалеритом и галенитом. Состав сульфидов варьируется в небольших пределах: пирит – Fe_{0.98-1.02}S_{1.98-2.02}, пирротин – Fe_{0.85-0.91}S (в единичных зернах примесь Ni – до 0.4 мас. %), халькопирит – Cu_{0.96-0.99}Fe_{1.02-1.04}S_{1.99-2.01}, арсенопирит – Fe_{0.98-1.00}As_{0.95-0.99}S_{1.02-1.07}, сфалерит – Zn_{0.87-0.89}Fe_{0.11-0.13}S_{1.00}. В рудоносной толще месторождения присутствуют немногочисленные квар-

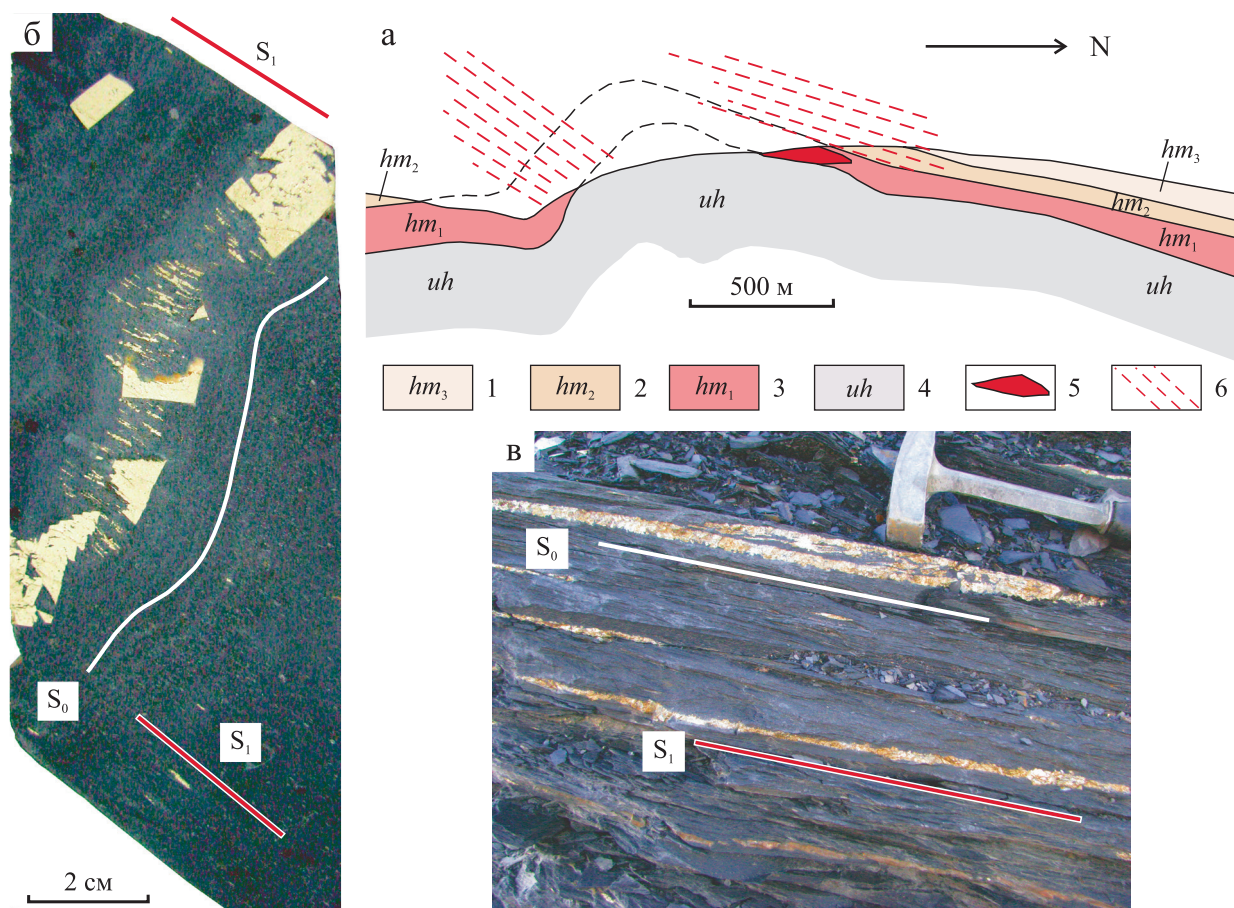


Рис. 2. Взаимоотношения слоистости (S_0) и кливажа осевой поверхности (S_1) в южном и северном крыльях Каменской антиклинали.

а – схематический разрез через Каменскую антиклиналь: 1–3 – верхняя, средняя и нижняя соответственно подсвиты хомолхинской свиты (сланцы, алевролиты, песчаники); 4 – угаханская свита (известняки); 5 – рудная залежь месторождения Голец Высочайший, 6 – кливаж осевой поверхности; б – крутое залегание сульфидсодержащих пород в южном крыле антиклинали, фото керна вертикальной скв. 5026 (глубина 122 м); в – пологое залегание сульфидсодержащих пород в северном крыле антиклинали (рудная залежь в карьере месторождения).

Fig. 2. The relationship of layering (S_0) and cleavage of the axial surface (S_1) on the southern and northern wings of the Kamensk anticline.

а – schematic section through the Kamensk anticline: 1–3 – upper, middle and lower sub-formations of the Homolkho formation, respectively (shales, siltstones, sandstones); 4 – Ugakhan formation (limestones); 5 – ore deposit; 6 – cleavage of the axial surface; б – steep occurrence of sulfide-containing rocks in the southern flank of the anticline, photo of core of vertical borehole 5026 (depth 122 m); в – shallow occurrence of sulfide-containing rocks in the northern wing of the anticline (ore deposit).

цевые жилы, иногда содержащие сульфидные минералы и самородное золото.

В пелитовых отложениях хомолхинской свиты распространены порфиобласты магнезиально-железистых карбонатов сфероидальной и овальной формы размером до 5 мм, обычно содержащие большое количество мелких включений окружающей матрицы. Количество порфиобластов карбонатов значительно варьируется, отмечаются как послойные их скопления, так и рассеянная или густая вкрапленность, наиболее высокие их содержания (до 15 об. %) наблюдаются в отложениях верхней подсвиты хомолхинской свиты. По имеющим-

ся данным (Онищенко, Сокерина, 2021), порфиобласты сложены магнезиосидеритом. Постоянным компонентом пелитовых отложений является углеродистое вещество, содержание $C_{орг}$ в рудоносной толще в основном составляет 1–2 мас. % (Кряжев и др., 2009; Онищенко, Сокерина, 2021). Текстура пород слоистая, наложенная сланцеватая, для наиболее распространенных пелитовых и алевропелитовых пород характерна лепидогранобластовая структура.

Среди акцессорных минералов пород доминирует тонкая вкрапленность рутила, в незначительном количестве присутствуют турмалин, апатит, цир-

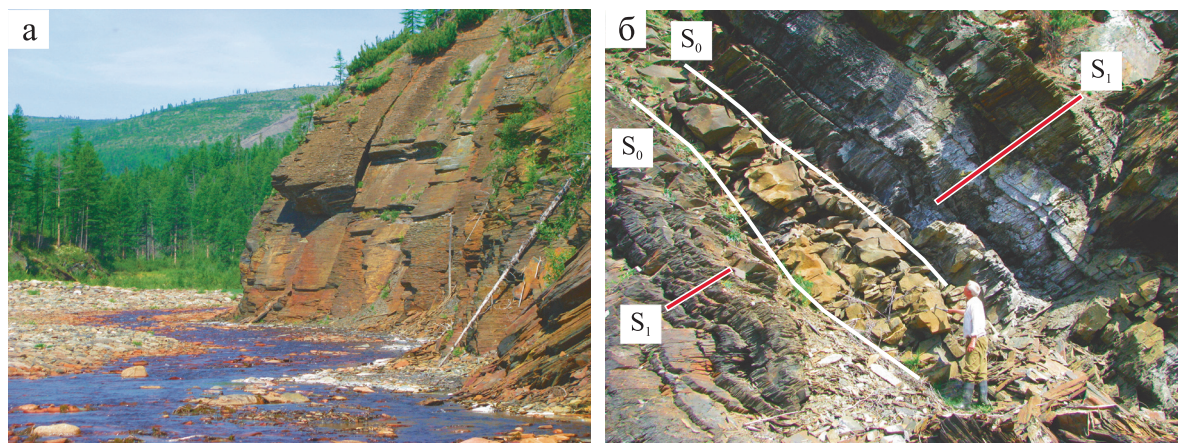


Рис. 3. Крутое залегание пород нижнехомолхинской подсвиты в южном крыле Каменской антиклинали (руч. Каменный).

а – обнажены поверхности слоистости, козырьки образованы плоскостью кливажа (в тени); б – прослой известняка в алевросланцевой толще. S_0 – слоистость, S_1 – кливаж осевой поверхности.

Fig. 3. Steep occurrence of rocks of the Homolkho lower sub-formations in the southern wing of the Kamensk anticline (Kamenny Creek).

а – the layered surfaces are exposed, the visors are formed by the cleavage plane (in the shade); б – limestone interlayer in the siltstone thickness. S_0 – layering, S_1 – cleavage of the axial surface.

кон, монацит и алланит. В средней и верхней частях разреза хомолхинской свиты распространен ильменит в виде мелких идиобластов, часто псевдоморфно замещенных агрегатами рутила, но в рудоносной толще ильменит не обнаружен (Онищенко, 2013).

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СУЛЬФИДНЫХ ПРОСЛОЕВ

Наиболее характерными составляющими отложений хомолхинской свиты являются сульфидные линзовидные прослои вкрапленного или монокристаллического строения, в которых отражается многоэтапная история их формирования, включающая в себя седиментацию, диагенез и главным образом метаморфические преобразования. Состав прослоев варьируется от пирротинового до пиритового, прослои с различным соотношением этих минералов чередуются в разрезе без видимой закономерности.

Линзы пирротина в филлитах имеют монокристаллическое сложение, заключены в кварцевую оболочку толщиной 0.1–0.5 мм, окруженную каймой зерен рутила, при этом в самих пирротиновых линзах рутил обычно отсутствует. В алевросланцевых прослоях серицит-кварцевого и анкерит-серицит-кварцевого состава пирротин образует вкрапленность, переходящую в линзы относительно массивного сложения, содержащие большое количество включений нерудных минералов. Пирротиновые линзы сопровождаются кварцевыми оторочками, но цепочки зерен рутила развиваются только вдоль контакта с тонкозернистым филлитом.

Кристаллы пирита распространены в виде рассеянной или послойной вкрапленности, но особенно часто приурочены к пирротинным выделениям, образуя пирит-пирротинные прослои. Установлено, что индивидуальные метакристаллы пирита развиваются путем замещения рассланцованной породы, содержащей линзы и прослои пирротина (Онищенко, 2012). Внутреннее строение кристаллов пирита отражает характер замещаемого им субстрата. В пирите сохраняются контуры рутил-кварц-пирротинных линз в виде цепочек зерен рутила и кварца на фоне пирита, насыщенного реликтовыми частицами вмещающей породы.

Прослои пирита, как и пирротина, образованы вкрапленностью зерен в алевросланцевых прослоях, переходящих при густой вкрапленности в линзовидные прослои относительно монокристаллического сложения. В целом для пиритовых прослоев характерна грубозернистая структура, являющаяся следствием метаморфической перекристаллизации. В зависимости от ориентации плоскости кливажа по отношению к слоистости строение сульфидных прослоев существенно различается.

В южном крыле Каменской антиклинали породы имеют крутое южное падение, а кливаж почти под прямым углом пересекает слоистость. В филлитовидных и алевролитистых сланцах листочки серицита и хлорита, определяющие сланцеватость пород, ориентированы в одном направлении, не совпадающем со слоистостью. Породы часто содержат вытянутые по кливажу мелкие линзочки кварц-хлорит-серицитового состава, но пластинки

слоистых силикатов в них ориентированы перпендикулярно удлинению линзочек. Сульфидсодержащие прослои смяты в складки и расчленены на тонкие линзочки кварц-сульфидного состава, ориентированные по кливажу (см. рис. 2б, 4).

В пирротинсодержащих прослоях мелкозернистые агрегаты пирротина образуют уплощенные линзочки толщиной 0.5–1.3 мм, разделенные кварц-серицитовыми агрегатами. Линзочки пирротина ориентированы по кливажу, но в целом контур первичного сульфидного прослоя сохраняется (см. рис. 4а, б). Во внешних частях пирротинсодержащих прослоев отмечаются цепочечные каймы рутила. В породах, вмещающих сульфидные прослои, присутствуют крупные овальные порфириобласты магнезиосидерита (см. светлые пятна на рис. 4а, б) и псевдоморфозы рутила по ильмениту (см. мелкие белые удлиненные кристаллики на рис. 4б). В пир-

ротинных линзочках отмечаются зерна пирита изометричной или чаще удлиненной формы, повторяющие форму пирротинных линзочек (см. врезку на рис. 4а).

В пиритсодержащих прослоях обычно наблюдаются две морфологические разновидности пирита, одна из них представлена удлиненными выделениями, ориентированными по кливажу, вторая – метакристаллами (см. рис. 2б). Посткливажное образование метакристалла пирита, развивающегося в сульфидсодержащем прослое, расчлененном на тонкие линзы, в наглядной форме представлено на рис. 4в, г. Линзочки в прослое сложены пиритом, но по форме они очень похожи на линзочки пирротина; вполне возможно, что при образовании метакристалла пирита происходило также замещение пирротинных линзочек пиритом.

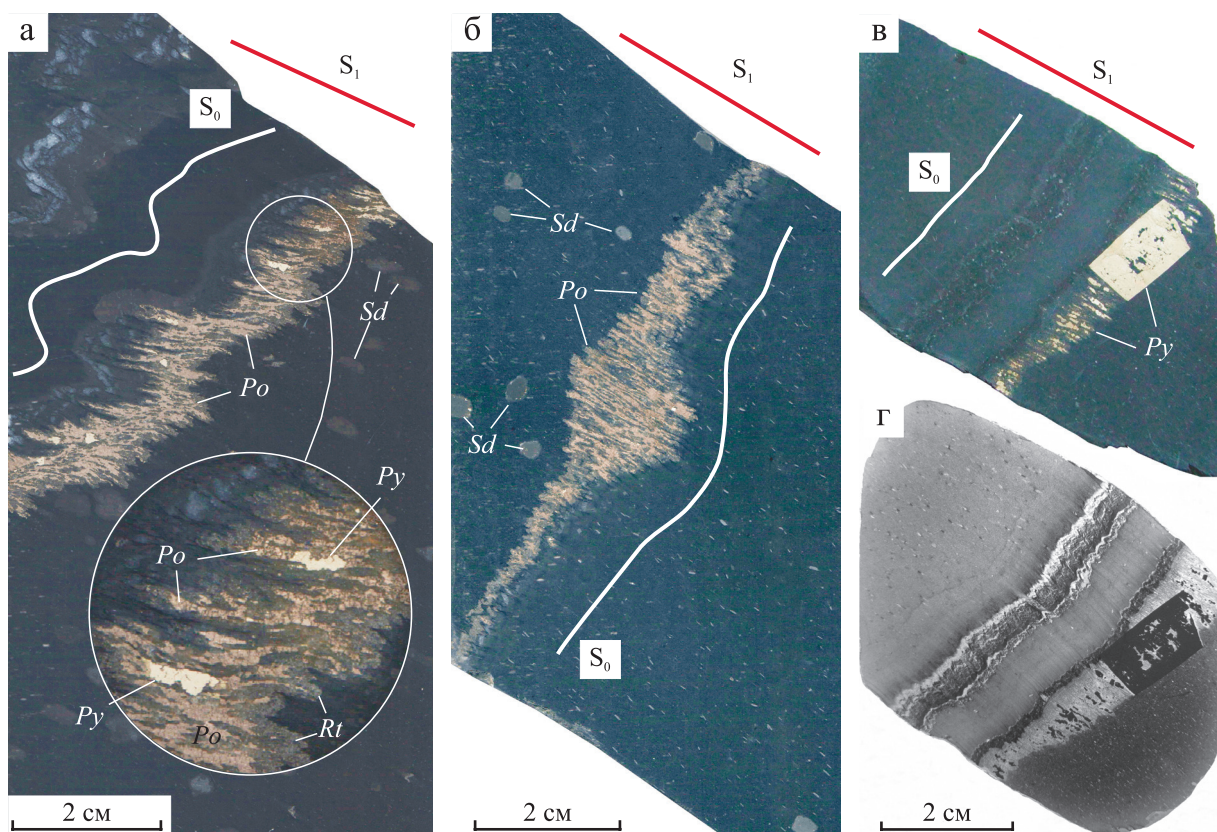


Рис. 4. Разлинзованные сульфидсодержащие прослои в южном крыле Каменской антиклинали.

а, б – в пирротинных прослоях удлиненные агрегаты пирротина ориентированы по кливажу; в, г – в пиритсодержащем прослое удлиненные зерна пирита ориентированы по кливажу, более поздний метакристалл пирита развивается в деформированной породе. S_0 – слоистость, S_1 – кливаж осевой поверхности. Py – пирит, Po – пирротин, Rt – рутил, Sd – магнезиосидерит. Обр. 5026-207 (а), 5026-133 (б), 5026-153 (в, г; г – проходящий свет).

Fig. 4. Split sulfide-containing interlayers in the southern wing of the Kamenskaya anticline.

а, б – in the pyrrhotite-containing layer, elongated pyrrhotite aggregates are oriented along the cleavage; в, г – in the pyrite-containing layer, elongated pyrite grains are oriented along the cleavage, a later pyrite metacrystal develops in the deformed rock. S_0 – layering, S_1 – cleavage of the axial surface. Py – pyrite, Po – pyrrhotite, Rt – rutile, Sd – Mg siderite. Samples 5026-207 (а), 5026-133 (б), 5026-153 (в, г; г – transmitted light).

Строение пиритсодержащего прослоя детально изучено в обр. 5023-62 (вертикальная скв. 5023, глубина 62 м). Прослой расчленен на тонкие линзочки кварц-сульфидного состава, ориентированные по кливажу (рис. 5а, б). Линзочки сложены мозаичным кварцевым агрегатом, в котором заключены удлиненные выделения пирита, состоящие обычно из нескольких зерен. В составе линзочек

присутствуют также чешуйки серицита и хлорита, реже зерна пирротина и карбоната; линзочки окружены каймами рутила (рис. 5в). Между собой линзочки разделяются струйчатыми агрегатами кварц-серицитового или хлорит-кварц-серицитового состава. Более поздний пирит развивается в расслаиванной породе в виде идиоморфных метакристаллов размером до 1.5 см, в которых отмечают-

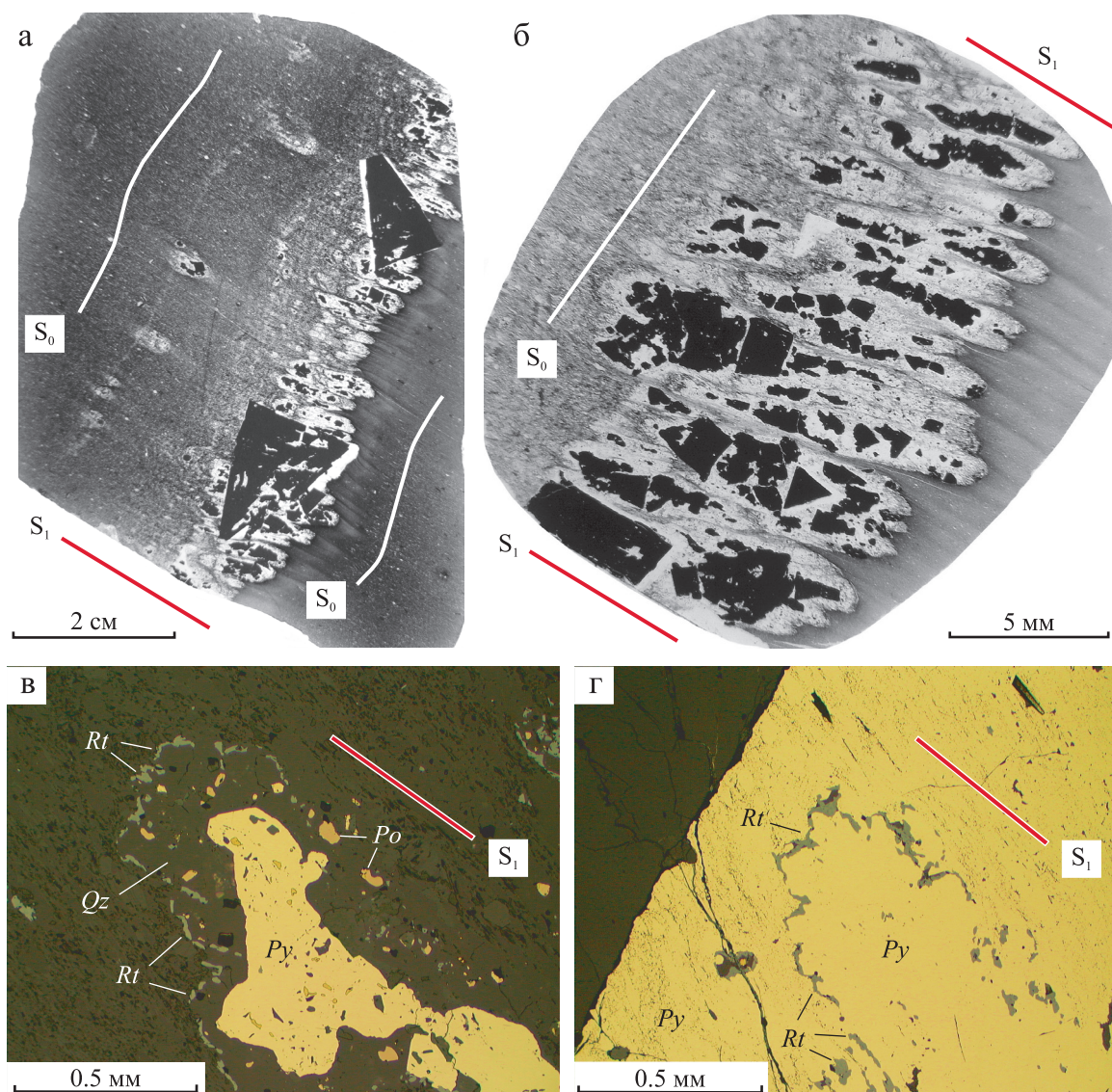


Рис. 5. Строение пиритсодержащего прослоя.

а – разлинзованный пиритсодержащий прослой с крупными метакристаллами пирита; б – линзовидное строение пиритсодержащего прослоя; в – линзовидные выделения пирита окружены кварц-рутиловой оторочкой; г – рутиловая кайма сохраняется в метакристаллах пирита при замещении деформированной породы. S_0 – слоистость, S_1 – кливаж осевой поверхности. Py – пирит, Po – пирротин, Qz – кварц, Rt – рутил. Обр. 5023-62. а, б – проходящий свет; в, г – отраженный свет.

Fig. 5. Structure of the pyrite-containing interlayer.

а – split pyrite-containing interlayer with large pyrite metacrystals; б – lenticular structure of the pyrite-containing interlayer; в – lenticular grains of pyrite are surrounded by quartz-rutile rim; г – rutile rim is preserved in pyrite metacrystals during the replacement of deformed rock. S_0 – layering, S_1 – cleavage of the axial surface. Py – pyrite, Po – pyrrhotite, Qz – quartz, Rt – rutile. Sample 5023-62. а, б – transmitted light; в, г – reflected light.

ся удлиненные включения породы, трассирующие ее сланцеватость. Рутиловые каймы, сопровождающие разлинзованные сульфидсодержащие прослои, сохраняются в крупных метакристаллах пирита (рис. 5г). В виде узких полосок вокруг метакристаллов пирита фрагментарно развивается стебельчатый кварц с небольшим количеством карбоната.

Отмечено, что при разлинзовании сульфидсодержащих прослоев существует тенденция к образованию раздувов, гнезд и скоплений сульфидного вещества. Это явление наблюдается в пирротитовых прослоях (см. рис. 4б), но более характерно для прослоев пиритового состава, в которых поздние (посткливажные) кристаллы пирита подчеркивают неоднородность его строения (рис. 6а, б). Предельной формой концентрации сульфидного вещества являются своеобразные стяжения пирита линзовидно-веретенообразной формы (рис. 6в), длинной осью ориентированные по линии пересечения слоистости плоскостью кливажа. Длина стяжений достигает 30 см, в поперечном сечении форма их овальная, толщина 3–5 см. Во вмещающей породе присутствуют мелкие линзочки пирротита,

ориентированные по сланцеватости. В стяжениях сланцеватость прослеживается по линзовидному строению пирита в их периферической части. Центральная часть стяжений сложена неравномерно-зернистым хлорит-серицит-кварцевым агрегатом, в котором заключены крупные кристаллы пирита. Характерно, что при перекристаллизации сульфидов, сопровождающейся перемещением вещества, сульфидные прослои испытывают пережимы и раздувы, но не дают жильных ответвлений по кливажным трещинам.

Известняки, в виде линз и прослоев встречающиеся в разрезе хомолхинской свиты, также испытывают перекристаллизацию (мраморизируются). Они сложены ориентированным тонкозернистым агрегатом кальцита с обильными порфиробластами доломита размером 0.2–0.8 мм и мусковита размером 0.2–1.4 мм.

В северном рудоносном крыле Каменской антиклинали кливаж пересекает слоистость под острым углом (рис. 7), но во многих случаях плоскости слоистости и кливажа практически совпадают. Сульфиды образуют прослои вкрапленного, линзовидно-полосчатого (рис. 8а) или относительно

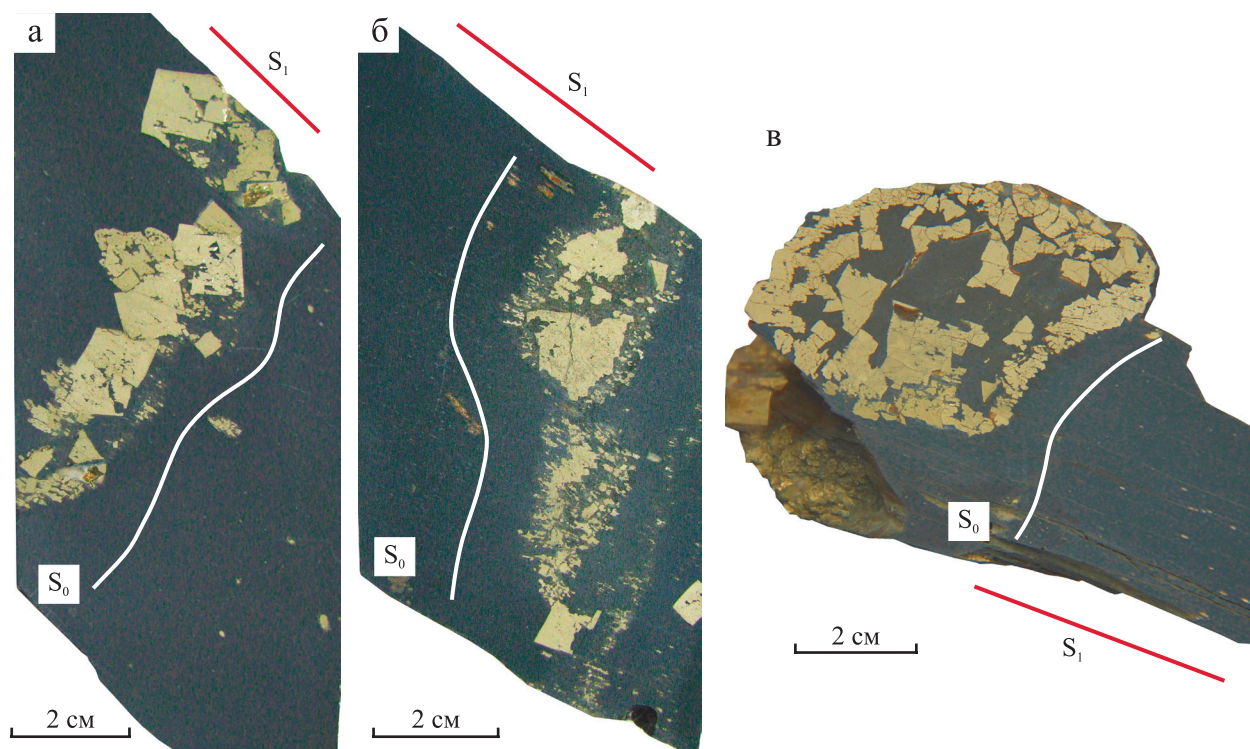


Рис. 6. Посткливажные преобразования сульфидных прослоев в южном крыле Каменской антиклинали.

а, б – раздувы сульфидных прослоев с широким развитием кристаллов пирита; в – стяжение пирита в филлите. S_0 – слоистость, S_1 – кливаж осевой поверхности. Обр. 5026-148 (а), 5026-180 (б), 2033-7 (в).

Fig. 6. Post-cleavage transformations of sulfide interlayers in the southern wing of the Kamensk anticline.

а, б – swells of sulfide interlayers with a wide development of pyrite crystals; в – the nodule of pyrite in phyllite. S_0 – layering, S_1 – cleavage of the axial surface. Samples 5026-148 (а), 5026-180 (б), 2033-7 (в).

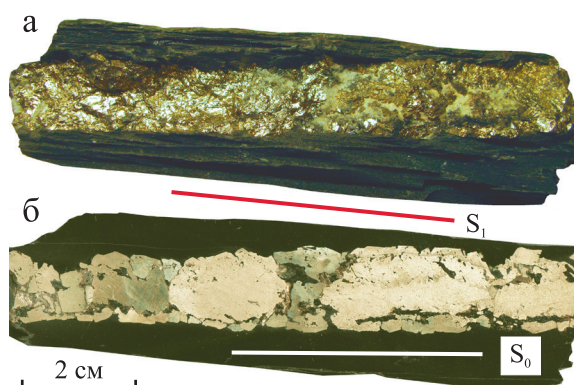


Рис. 7. Кливаж осевой поверхности (S_1) ориентирован под острым углом к слоистости (S_0), в плоскости которого находится пиритовый прослой грубозернистого строения. Северное крыло Каменской антиклинали.

а – скол, б – полированный срез, протравленный азотной кислотой. Обр. ГВ-5.

Fig. 7. The cleavage of the axial surface (S_1) is oriented at an acute angle to the layering (S_0), in the plane of which there is a pyrite interlayer of coarse-grained structure. The northern wing of the Kamensk anticline.

а – chip, б – polished slice etched with nitric acid. Sample GV-5.

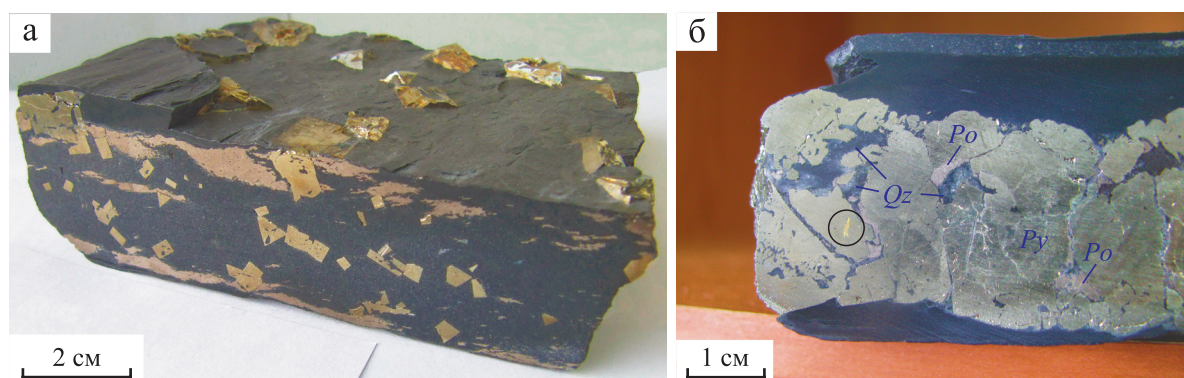


Рис. 8. Сульфидсодержащие и сульфидные прослои в северном крыле Каменской антиклинали.

а – линзовидно-полосчатые выделения пирротина и кристаллы пирита в алевроитовом сланце; б – пиритовый прослой крупнозернистого строения с гнездами и прожилками кварца в филлитовидном сланце, вверху тонкий прослой анкеритсодержащего алевролита. Кругом выделено включение золота в пирите. *Py* – пирит, *Po* – пирротин, *Qz* – кварц. Обр. ГВ-3 (а), ГВ-1 (б).

Fig. 8. Sulfide-containing and sulfide interlayers in the northern wing of the Kamensk anticline.

а – lenticular-striped pyrrhotite secretions and pyrite crystals in siltstone shale; б – pyrite interlayer of coarse-grained structure with nests and quartz veins in phyllite shale, at the top a thin interlayer of ankerite-containing siltstone. The inclusion of gold in pyrite is highlighted with a circle. *Py* – pyrite, *Po* – pyrrhotite, *Qz* – quartz. Samples GV-3 (a), GV-1 (b).

но монолитного строения (рис. 8б), распространены также послойные линзовидные выделения пирротина и цепочки кристаллов пирита. Сульфидные прослои приурочены к филлитовидным сланцам или прослоям алевроитовых сланцев в них.

Для линзовидных выделений пирротина обычно характерно мелкозернистое строение, иногда они содержат значительное количество мелких включений нерудных минералов. Кристаллы пирита, локализованные среди линзочек пирротина, имеют кубическую форму с преобладающим размером от 0.3 до 1.0 см, содержат включения вмещающей породы и нередко окружены тонкими каймами стебельчатого кварца с небольшим количеством хлорита.

Сульфидные прослои пиритового и пирротин-пиритового состава имеют крупно- и грубозернистую структуру. Зерна пирита размером 5–12 мм разделяются выделениями пирротина размером

1–10 мм, гнездами и тонкими прожилками кварца. Структура пирротиновых выделений обычно средне- и мелкозернистая, но иногда размер индивидов пирротина достигает 5–10 мм. Отмечены разрастание пиритовых прослоев с замещением вмещающей породы, замещение сульфидами тонких прослоев анкеритсодержащего алевролита и пирротина – пиритом. Обращают на себя внимание особенности распределения хлорита в породах. Хлорит сопутствует серициту, образуя с ним совместные лепидобластовые агрегаты, в которых распространены мелкие линзочки хлоритового, хлорит-серицитового или кварц-хлоритового состава. Обычное содержание хлорита в филлитовидных сланцах – 5–10 об. %, в сульфидных прослоях – 2–10 об. %, а в тонких (1–2 мм) полосках, прилегающих к сульфидным прослоям монолитного сложения, его содержание нередко достигает 30–80 об. %.

Самородное золото присутствует в пирротиновых, пирит-пирротиновых и пиритовых прослоях в виде единичных выделений, рассеянных или компактных скоплений среди сульфидов, а также в тонких прожилках и мелких гнездах кварц-карбонатного состава (Онищенко, Сокина, 2021). В частности, в пиритовом прослое (см. рис. 8б) крупное выделение золота удлиненно-неправильной формы размером до 3 мм, сопровождаемое ореолом очень мелких включений, заключено в монозерне пирита.

Пирротиновые и пиритовые линзы и прослои окружены оторочками рутил-кварцевого состава, но в пиритовых прослоях его зерна обычно образуют выступы за пределы рутиловой каймы (рис. 9). Часто реликты этих оторочек в виде цепочек зерен рутила и включений кварца полностью заключены внутри пиритовых прослоев, а их периферическая зона насыщена мелкими и мельчайшими остатками вмещающего филлита. Такое строение пиритовых прослоев свидетельствует о его двукратном формировании, о его разрастании после перерыва путем замещения филлита. Отмечается как одностороннее увеличение толщины пиритового прослоя (см. рис. 7), так и разрастание в обе стороны, в результате которого пиритовый прослой приобретает симметричное строение (рис. 10). Для прослоев пирротинового состава разрастание не характерно. Внешняя оболочка пиритового прослоя формировалась за счет концентрации сульфидного вещества из окружающего пространства в результате собирательной перекристаллизации, при-

чем, как свидетельствуют наблюдения над индивидуальными кристаллами пирита, с частичным замещением пирротина пиритом. Разрастание пиритового прослоя сопровождается формированием карбонат-кварцевых гнезд и прожилков, не выходящих за его пределы. В сульфидных прослоях пирит чаще всего идиоморфен по отношению к пирротину и вмещающей породе и его кристаллы выступают за контуры прослоя, но весьма часто зерна пирита на контакте с вмещающей породой не огранены. При разрастании пиритового прослоя во внешней зоне отмечается многоглавый рост поздней генерации пирита в виде мелких кристаллов (см. рис. 10), вокруг которых фрагментарно развиваются тонкие каймы стебельчатого кварца.

В породах северного крыла антиклинали помимо кливажа осевой поверхности распространена еще одна разновидность деформаций – кливаж плейчатости (кренуляционный кливаж), накладывающийся на слоистость и кливаж осевой поверхности. Кливаж плейчатости имеет крутое (50–80°) северное падение (Ванин, Мазукабзов, 2021). Плейчатость в филлите проявляется в смятии слоистых минералов в серии микрофлексур или микроскладок, пигментированных углеродистым веществом. Полоски плейчатости ориентированы под углом 50–60° к слоистости и плоскости кливажа осевой поверхности (рис. 11). В кварц-пирротиновых и кварц-анкерит-пирротиновых прослоях кливаж плейчатости иногда трассируется кварцевыми выделениями (см. рис. 11а, б).

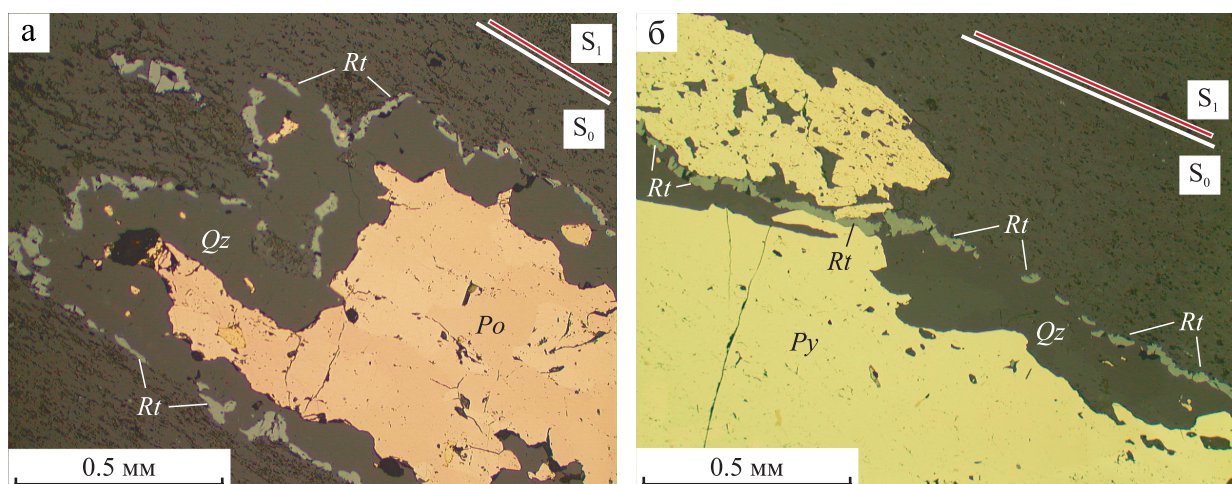


Рис. 9. Рутил-кварцевые оторочки вокруг пирротиновых (а) и пиритовых линз (б).

S_0 – слоистость, S_1 – кливаж осевой поверхности. Po – пирротин, Py – пирит, Qz – кварц, Rt – рутил. Полированные шлифы 2296-15.6 (а) и 4446-49.9 (б). Отраженный свет.

Fig. 9. Rutile-quartz rims around pyrrhotite (a) and pyrite lenses (b).

S_0 – layering, S_1 – cleavage of the axial surface. Po – pyrrhotite, Py – pyrite, Qz – quartz, Rt – rutile. Polished sections 2296-15.6 (a), 4446-49.9 (b). Reflected light.

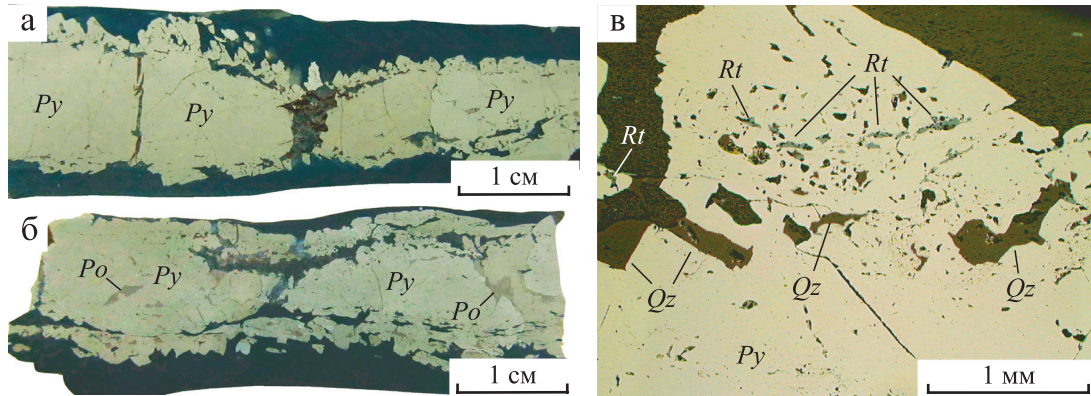


Рис. 10. Разрастание пиритовых прослоев.

а, б – центральная часть прослоя сложена крупными зернами пирита, дальнейший рост после перерыва, отмеченного включениями кварца и реликтами филлита (черное), происходил в виде относительно мелких кристаллов; в – первоначальные границы пиритового прослоя фиксируются выделениями кварца и цепочками зерен рутила. *Py* – пирит, *Po* – пирротин, *Qz* – кварц, *Rt* – рутил. Образец и полированный шлиф 2180 (а, в), обр. 2191 (б).

Fig. 10. Proliferation of pyrite interlayers.

а, б – the central part of the interlayer is composed of large grains of pyrite, further growth after a break marked by inclusions quartz and phyllite relicts (black) occurred in the form of relatively small crystals; в – the initial boundaries of the pyrite interlayer are fixed by quartz secretions and chains of rutile grains. *Py* – pyrite, *Po* – pyrrhotite, *Qz* – quartz, *Rt* – rutile. Sample and polished section 2180 (а, в), sample 2191 (б).

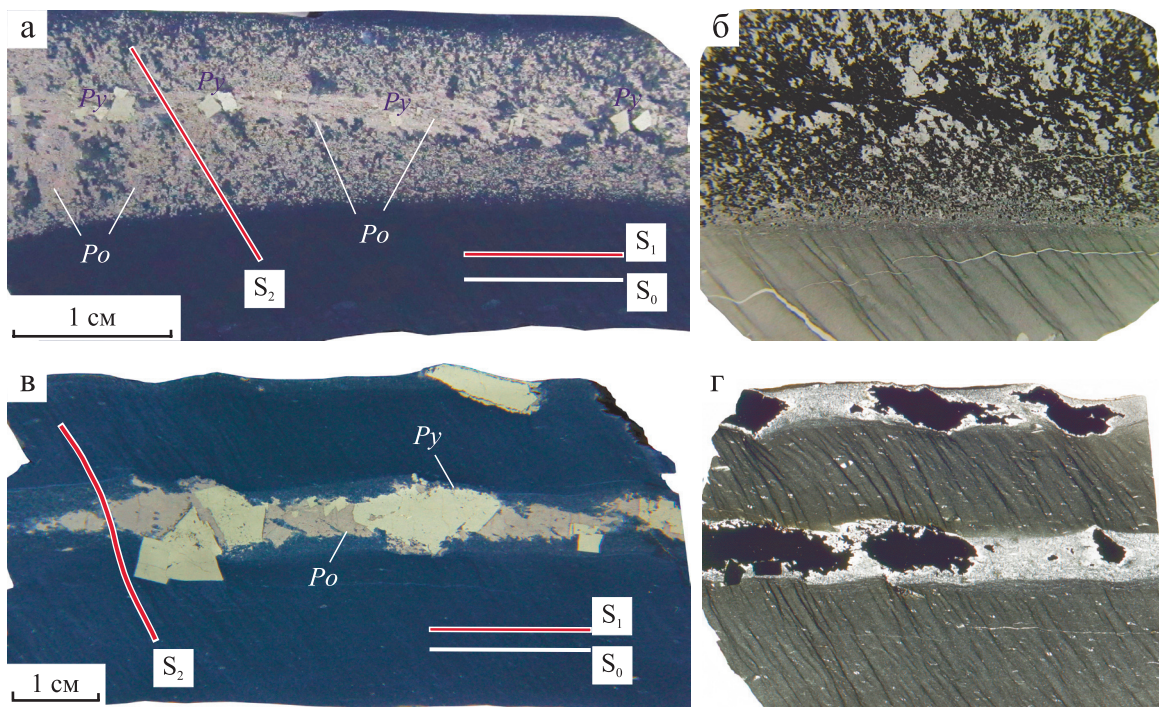


Рис. 11. Взаимоотношения слоистости (S_0) с кливажом пloidчатости (кренуляционным; S_2) в северном крыле Каменской антиклинали.

Кливаж осевой поверхности (S_1) практически совпадает со слоистостью. *Po* – пирротин, *Py* – пирит. а, б – образец и шлиф 2182; в, г – образец и шлиф ГВ-11; б, г – проходящий свет.

Fig. 11. The relationship of layering (S_0) with the crenulation cleavage (S_2) in the northern wing of the Kamensk anticline.

The cleavage of the axial surface (S_1) practically coincides with the layering. *Po* – pyrrhotite, *Py* – pyrite. а, б – sample and thin section 2182; в, г – sample and thin section GV-11; б, г – transmitted light.

В пиритовых прослоях, особенно в периферической их части, нередко присутствуют полосы, содержащие многочисленные включения нерудных минералов, ориентированные параллельно контактам слоя и плоскости кливажа (рис. 12а). Кроме того, в пиритовых прослоях отмечаются группы удлиненных кварцевых включений, ориентированных под значительным углом к слоистости, которые, видимо, отражают направление кливажа плейчатости (рис. 12б). При травлении полированной поверхности шлифа более контрастно проявляются ориентированное положение включений нерудных минералов (рис. 12в) и зональное строение кристаллов пирита в краевой части пиритового прослоя (рис. 12г). Кроме того, строение пирита иногда усложнено сериями тонких чистых полосочек, ориентированных под углом к слоистости, которые, возможно, являются залеченными полосами кливажа плейчатости (рис. 12д).

Характерные для пород хомолхинской свиты процессы замещения пирротина пиритом и ильменита рутилом приводят к увеличению железисто-

сти хлоритов и карбонатов, что обусловлено перераспределением серы и железа между минеральными фазами (Онищенко, Сокина, 2021). В рудоносной толще месторождения замещение ильменита рутилом не проявлено и, таким образом, увеличение железистости хлоритов и карбонатов вызвано главным образом замещением пирротина пиритом. В пирротиновых прослоях, замещаемых метакристаллами пирита, изменение состава хлоритов и карбонатов проявлено в наглядной форме (рис. 13). Вариации состава Fe-Mg-минералов удобно выражать величиной их железистости $Fe/(Fe + Mg)$ с атомными соотношениями между элементами.

В обр. 2182 (см. рис. 11а, б; рис. 13а, б) сульфидный прослой, заключенный в филлите, имеет пирит-кварц-пирротиновый состав, присутствует небольшое количество хлорита и серицита, а карбонатные минералы отсутствуют. Идиоморфные кристаллы пирита размером 0.5–2.0 мм цепочкой протягиваются в центральной части прослоя. В пирите прослеживаются реликты замещаемого субстрата. Железистость первичного магнезиального

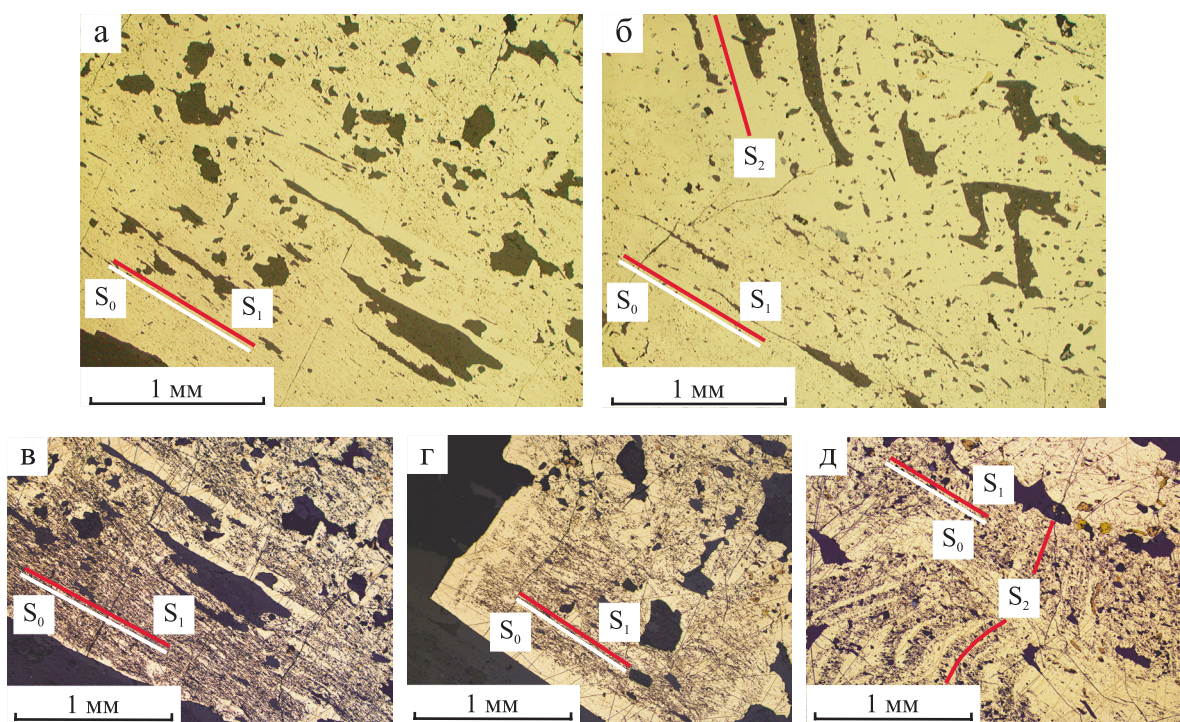


Рис. 12. Внутреннее строение пиритового прослоя.

а–д – ориентированные по слоистости S_0 и кливажу осевой поверхности S_1 включения нерудных минералов в пирите; б, д – группы удлиненных кварцевых включений и серии тонких чистых полосочек, ориентированные под углом к слоистости, отражают, видимо, направление кливажа плейчатости S_2 . Отраженный свет (а–д), после травления азотной кислотой (в–д). Полированный шлиф 2124.

Fig. 12. The internal structure of the pyrite interlayer.

а–д – inclusions of non-metallic minerals in pyrite oriented by layering S_0 and cleavage of the axial surface S_1 ; б, д – groups of elongated quartz inclusions and a series of thin clean stripes oriented at an angle to the layering, apparently reflect the direction of the crenulation cleavage S_2 . Reflected light (а–д), after etching with nitric acid (в–д). Polished section 2124.

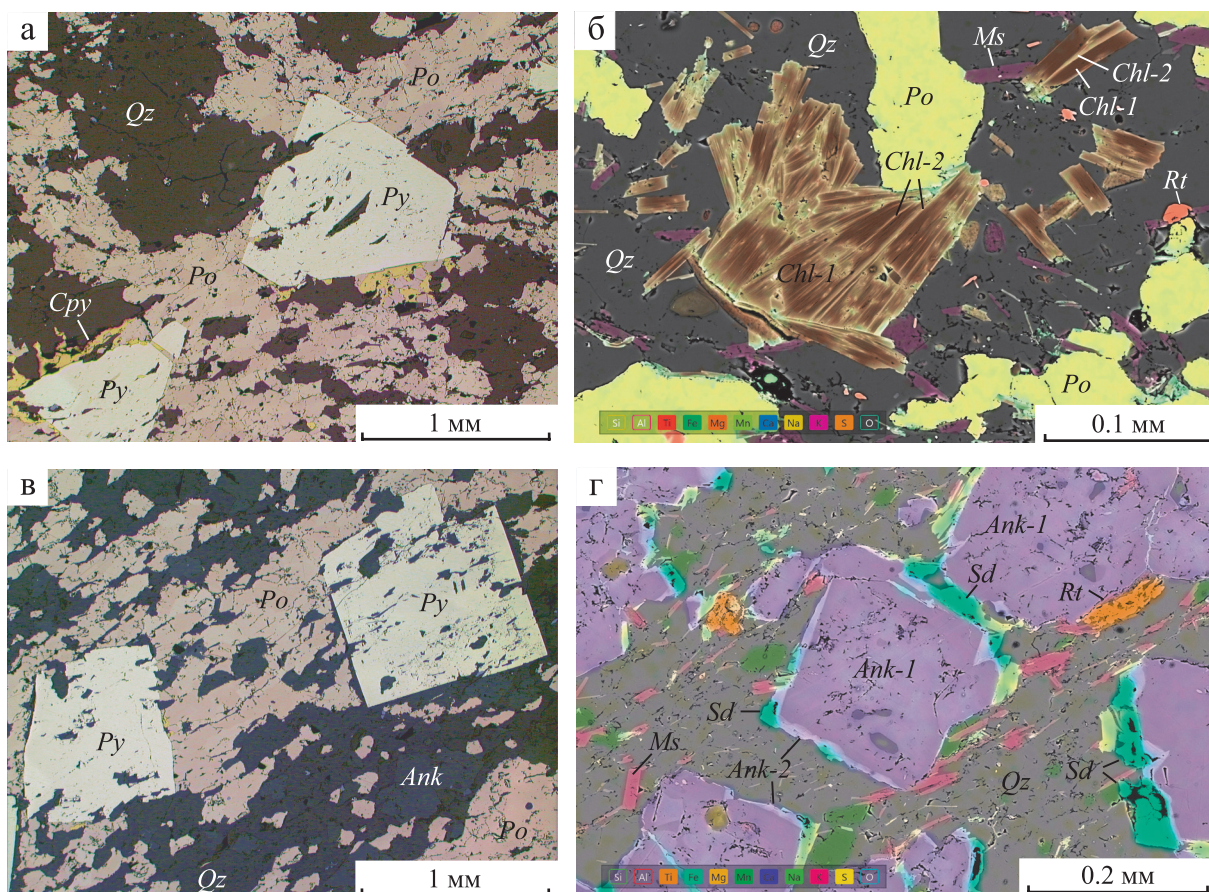


Рис. 13. Минеральные преобразования в кварц-пирротиновом (а, б) и кварц-карбонат-пирротиновом (в, г) прослоях.

а – метакристаллы пирита развиваются в агрегатах пирротина; б – магнезиальный хлорит *Chl-1* замещается железистым хлоритом *Chl-2* в виде периферических каемок и пластинок по спайности; в – метакристаллы пирита развиваются в агрегатах пирротина с сохранением текстуры замещающей породы; г – повышение железистости во внешней зоне кристаллов анкерита и образование сидерита. *Po* – пирротин, *Py* – пирит, *Cpy* – халькопирит, *Ank* – анкерит, *Sd* – сидерит, *Qz* – кварц, *Ms* – серицит, *Rt* – рутил. Изображения в отраженном свете (а, в) и многослойные в характеристическом излучении элементов (б, г). Полированные шлифы 2182 (а, б) и 2126-2 (в, г).

Fig. 13. Mineral transformations in quartz-pyrrhotite (а, б) and quartz-carbonate-pyrrhotite (в, г) interlayers.

а – pyrite metacrystals develop in pyrrhotite aggregates; б – magnesian chlorite *Chl-1* is replaced by ferruginous chlorite *Chl-2* in the form of peripheral edges and cleavage plates; в – pyrite metacrystals develop in pyrrhotite aggregates while preserving the texture of the replaced rock; г – increased ferruginousness in the outer zone of ankerite crystals and the formation of siderite. *Po* – pyrrhotite, *Py* – pyrite, *Cpy* – chalcopyrite, *Ank* – ankerite, *Sd* – siderite, *Qz* – quartz, *Ms* – sericite, *Rt* – rutile. Images in reflected light (а, в) and multilayer in the characteristic radiation of elements (б, г). Polished sections 2182 (а, б) and 2126-2 (в, г).

хлорита *Chl-1* составляет 0.17, железистость развивающегося по нему *Chl-2* увеличивается до 0.55. Пирротин имеет состав $\text{Fe}_{0.90-0.91}\text{S}$, пирит – $\text{Fe}_{1.00}\text{S}_{2.00}$, халькопирит – $\text{Cu}_{0.93}\text{Fe}_{1.03}\text{S}_{2.04}$.

В обр. ГВ-11 (см. рис. 11в, г) сульфидный прослой имеет карбонат-кварц-пирит-пирротиновый состав с небольшим количеством серицита и хлорита. Пирит развивается в виде крупных (3–10 мм) зерен и идиоморфных метакристаллов. Содержит мелкие включения нерудных минералов, пирротина и халькопирита. Карбонаты, составляющие 10–15% объема прослоя, образуют идиоморфные кристаллы размером 0.1–0.3 мм. Сложе-

ны они преимущественно анкеритом-1, периферическая зона кристаллов – анкеритом-2 и в небольшом количестве низкомагнезиальным сидеритом. Железистость анкерита-1 составляет 0.20–0.27, анкерита-2 – 0.35–0.45. Типичные составы карбонатов: *Ank-1* $\text{Ca}_{1.00}\text{Mg}_{0.72}\text{Fe}_{0.23}\text{Mn}_{0.05}(\text{CO}_3)_2$, *Ank-2* $\text{Ca}_{0.99}\text{Mg}_{0.55}\text{Fe}_{0.40}\text{Mn}_{0.06}(\text{CO}_3)_2$, *Sd* $\text{Fe}_{0.84}\text{Ca}_{0.11}\text{Mg}_{0.01}\text{Mn}_{0.04}\text{CO}_3$. В хлорите также проявлено замещение первичного магнезиального хлорита-1 с железистостью 0.33–0.34 хлоритом-2 с железистостью 0.59–0.61. Пирротин имеет состав $\text{Fe}_{0.88-0.93}\text{S}$.

В обр. 2126-2 (см. рис. 13в, г) сульфидный прослой сложен кварц-карбонат-пирротиновым агрега-

том, в котором развиваются метакристаллы пирита размером до 5 мм, часто в них сохраняются реликты замещаемого субстрата. Карбонаты, составляющие 15–20% объема прослоя, образуют идиоморфные кристаллы размером 0.1–0.3 мм. Сложены они преимущественно анкеритом-1, периферическая зона кристаллов – анкеритом-2. Железистость анкерита-1 составляет 0.14–0.22, анкерита-2 – 0.33–0.40. Внешние зоны кристаллов анкерита замещаются низкомagneзиальным сидеритом. Типичные составы карбонатов: *Ank-1* $\text{Ca}_{1.00}\text{Mg}_{0.81}\text{Fe}_{0.16}\text{Mn}_{0.03}(\text{CO}_3)_2$, *Ank-2* $\text{Ca}_{0.99}\text{Mg}_{0.60}\text{Fe}_{0.35}\text{Mn}_{0.06}(\text{CO}_3)_2$, *Sd* $\text{Fe}_{0.84}\text{Ca}_{0.12}\text{Mg}_{0.01}\text{Mn}_{0.03}\text{CO}_3$. Мелкие пластиночки хлорита имеют железистость 0.47–0.60, т. е. по составу соответствуют *Chl-2*, но реликты первичного хлорита не выявлены. Пирротин имеет состав $\text{Fe}_{0.89-0.90}\text{S}$, пирит – $\text{Fe}_{1.00}\text{S}_{2.00}$.

В результате метаморфической перекристаллизации сульфидные прослои приобретают крупнозернистое строение, сопровождаются кварцевыми оторочками, гнездами и обособлениями, в связи с чем имеют некоторое сходство с послойными прожилками. Кварц участвует в процессе метаморфических преобразований совместно с сульфидами. Мелкокристаллический кварц образует тонкие (0.3–1.5 мм) каймы вокруг сульфидных прослоев, а также тонкие прожилки и неправильной формы гнезда среди сульфидного агрегата, составляя 5–20% объема сульфидных прослоев. Характерно, что кварцевые прожилки не выходят за пределы сульфидных прослоев, даже если они ориентированы перпендикулярно их контактам. Размеры кварцевых гнезд или линзовидных обособлений

составляют 2–10 мм (см. рис. 8б), изредка больше (рис. 14а). При общем моноклиальном залегании пород в северном крыле Каменской антиклинали отмечаются межслоевые смещения, сопровождающиеся складками волочения, в которых жильный кварц выполняет полости отслоения (рис. 14б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характерными компонентами терригенных пород хомолхинской свиты являются линзовидные прослои и послойная вкрапленность пирротина и пирита с отчетливо выраженным литологостратиграфическим контролем их распространения, что свидетельствует о первично-осадочном происхождении сульфидной минерализации. Отложения хомолхинской свиты формировались как глубоководные турбидитные осадки склона и котловины задугового бассейна (Немеров и др., 2010). Значительную роль в формировании сульфидосодержащих осадков в рудоносной толще месторождения Голец Высочайший и перекрывающих отложениях (по результатам изучения изотопного состава сульфидной серы) играли гидротермально-осадочные процессы (Кряжев, 2017). Первичная золотоносность сульфидосодержащих осадков нами предполагается по аналогии с соседними месторождениями Сухой Лог и Вернинское (Large et al., 2007; Кряжев, 2017).

Первичные породы представляли собой переслаивающиеся глинистые сланцы и алевроиты, в различной степени насыщенные дисперсным сульфидным материалом и органическим веществом.

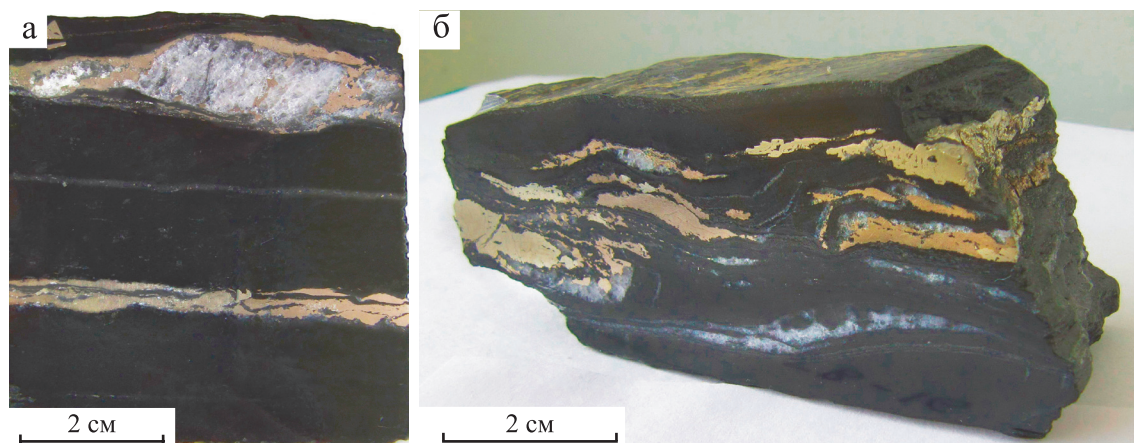


Рис. 14. Кварц в сульфидных прослоях.

а – кварцевое обособление в пирротитовом прослое; б – дислоцированные и перекристаллизованные анкерит-пирит-пирротитовые слои с жильным кварцем в полостях отслоения. Обр. 1020-214 (а), ГВ-16 (б).

Fig. 14. Quartz in sulfide interlayers.

а – quartz segregation in the pyrrhotite interlayer; б – dislocated and recrystallized ankerite-pyrite-pyrrhotite layers with vein quartz in the separation cavities. Samples 1020-214 (а), GV-16 (б).

Осадочно-диагенетические сульфиды в районе месторождения Голец Высочайший нами не выявлены; все породы, в том числе сульфидные и сульфидсодержащие прослои, перекристаллизованы. Можно предполагать, что процессы оформления сульфидных и сульфидсодержащих прослоев начались еще на стадии диагенеза осадков, как это наблюдается в черносланцевых отложениях верхнеюрско-нижнемеловой баженовской свиты в Западной Сибири (Эдер, 2020) или основании ордовикских диоктионемовых сланцев Прибалтики (Гаврилов, 2010). При метаморфизме в условиях зеленосланцевой фации происходило преобразование пород с дальнейшим концентрированием сульфидного вещества при сохранении его послойного распределения.

По взаимоотношениям послойно локализованных сульфидных выделений с деформационными структурами в районе месторождения Голец Высочайший выделяются две стадии их преобразований. На первой стадии, соответствующей основной фазе складчатости, формируется кливаж пород, вызванный перекристаллизацией слоистых минералов и их ориентацией параллельно осевой поверхности складок. Последующие деформационные процессы с учетом представлений, приведенных в работах (Ванин, Мазукабзов, 2021; Ванин и др., 2022), трансформировали кливаж осевой поверхности в сланцеватость и привели к формированию межслоевых складок волочения. В заключительный период этой стадии образуется дискретно проявленный кливаж плойчатости (кренуляционный).

Сульфидсодержащие прослои подвергались складчатым деформациям совместно с вмещающими породами (см. рис. 2, 4, 5). Перекристаллизация пород на первой стадии преобразований сопровождалась консолидацией пирротиновых и пиритовых прослоев с образованием вокруг них кварц-рутиловых оболочек, формирующихся путем перекристаллизации обильной тонкой вкрапленности рутила в исходной породе. При секущем характере кливажа по отношению к слоистости деформации вызывали разлинзование сульфидных прослоев с ориентировкой линзочек по кливажу. Линзочки сопровождаются кварц-рутиловыми оторочками.

Вторая стадия метаморфических преобразований пород характеризовалась незначительными деформациями, не сопоставимыми по величине со складчато-надвиговыми деформациями первой стадии, и проявлялась в сульфидных прослоях главным образом в образовании кайм стебельчатого (шестоватого) кварца вокруг идиоморфных кристаллов пирита. Минеральные преобразования второй стадии характеризуются ростом метакристаллов пирита и их агрегатных послойных скоплений, в которых хорошо просматриваются реликты ранее рассланцованных пород, замещением пирротина пиритом, ильменита – рутилом и изменением

состава хлоритов и карбонатов. Кварц-рутиловые оторочки, образовавшиеся на первой стадии, прослеживаются в виде цепочек рутила в пиритовых прослоях и крупных кристаллах пирита.

Сульфидные прослои в существенной мере являются метаморфогенными образованиями, nasledующими первичное послойное распределение сульфидного вещества. Тектоническое развитие района завершилось хрупкими деформациями с образованием по трещинам кварцевых жил с незначительным количеством сульфидов.

Первая стадия преобразований сульфидных прослоев обусловлена складкообразованием, сопровождаемым синскладчатым метаморфизмом, вторая, видимо, связана с зональным региональным метаморфизмом, на регрессивной стадии которого внедрились гранитоиды конкудеро-мамаканского комплекса.

Метаморфические преобразования, по данным изучения флюидных включений в кварцевых оболочках и гнездах, заключенных в сульфидных прослоях, протекали в температурном интервале 230–510°C при участии окисленных углекислотно-водных флюидов и восстановленных метан-азотных флюидов (Сокерина и др., 2016).

Процессы деформации и перекристаллизации сульфидных прослоев, наблюдающиеся на месторождении Голец Высочайший, проявлены в ряде других месторождений Бодайбинского рудного района. На месторождении Сухой Лог, приуроченном к сильнодеформированным отложениям хомолхинской свиты, в образовании пирита выделяются осадочно-диагенетическая, синдеформационная и позднедеформационная стадии. Пириты соответствующих стадий различаются формой, размерами, наличием ориентированных реликтов вмещающей матрицы и синдеформационного кварца шестоватого (стебельчатого) строения. В целом эволюция пирита заключается в смене микрокристаллических и фрамбоидальных его выделений, характерных для осадочно-диагенетической стадии, крупнокристаллическими формами последующих стадий. Наиболее золотоносными являются послойные кварц-пиритовые прожилки, смятые в мелкие складки в процессе основного периода складчатости. Центральная часть прожилков, выполненная пиритом, окаймляется шестоватым кварцем, волокна которого параллельны кливажу. Наряду с послойными кварц-пиритовыми прожилками отмечаются прожилки такого же состава, ориентированные по кливажу (Large et al., 2007). Фактически послойные кварц-пиритовые прожилки являются трансформированными сульфидными прослоями, поскольку, как указывают сами авторы (Large et al., 2007), в их ядерной части повсеместно распространен пирит синдиагенетического и главным образом докливажного и синдеформационного происхождения, в котором прослеживается

строение, унаследованное при замещении отдельных прослоев вмещающих черных сланцев. В итоге авторы (Large et al., 2007) приходят к выводу, что до складкообразования или в его начале минерализация месторождения Сухой Лог, вероятно, была представлена прерывистыми пиритовыми прослоями, а также изолированными нодулями и агрегатами пирита.

На месторождении Угахан в рудовмещающей песчано-сланцевой флишеидной толще бужуйтинской свиты широко распространены сингенетичные пирротиновые слойки. В процессе складчатости пирротиновые прослои часто деформировались в мелкие складки, разлинзовывались в плоскости кливажа осевой поверхности с ориентировкой линз и новообразованных (перекристаллизованных) линзовидных зерен по кливажу. Порфиروبласты пирита формировались в пирротиновых слойках позднее основной деформации (Иванов, 2017).

На месторождении Голец Высочайший золото участвовало в процессе метаморфических преобразований совместно со всей сульфидсодержащей толщей осадочных пород. Самородное золото, помимо вкрапленности в пирите и пирротине, заключено в кварц-карбонатных обособлениях и прожилках в сульфидных прослоях, что указывает на перераспределение золота при метаморфизме пород, но масштабы его перемещения остаются неизвестными. Возможно, что контуры рудной залежи в общих чертах отражают первичное распределение золота в осадочных породах (Онищенко, Сокерина, 2021). Для других месторождений, локализованных в черносланцевых толщах, первично обогащенных золотом, для образования промышленных руд обычно предполагается более значительная его миграция при гидротермально-метаморфических процессах (Буряк, 1982; Large et al., 2007, 2011; Thomas et al., 2011; Tarasova et al., 2020; и др.). В альтернативных магматогенно-гидротермальных моделях образование месторождений имеет наложенный характер и связывается с поступлением золотоносных флюидов в осадочные породы по зонам складчато-надвиговых деформаций и рассланцевания (Юдовская и др., 2011; Yudovskaya et al., 2016; Иванов, 2017).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что в районе месторождения Голец Высочайший сульфидные и сульфидсодержащие прослои при пластических динамометаморфических преобразованиях горных пород подвергаются деформации и перекристаллизации совместно с вмещающими алевропелитовыми породами. По взаимоотношениям послойно локализованных сульфидных выделений с элементами тектоники выделяются две стадии их преобразований.

При складчато-надвиговых деформациях первой стадии формируется кливаж пород, вызванный перекристаллизацией пород и ориентацией слоистых минералов параллельно осевой поверхности складок. Сульфидные прослои подвергаются разлинзованию с ориентировкой линз по кливажу.

Метаморфические преобразования второй стадии, не сопровождающиеся значительными деформациями, проявляются в сульфидных и сульфидсодержащих прослоях в собирательной перекристаллизации слагающих их минералов, выражающейся в укрупнении зерен, идиобластическом росте пирита, увеличении толщины сульфидных прослоев с замещением окружающих пород, деформированных на предыдущем этапе. Для этой же стадии характерны изменения минерального состава пород, проявляющиеся в замещении пирротина пиритом и увеличении железистости хлоритов и карбонатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев Б.С. (1992) Пирит золоторудных месторождений. М.: Наука, 143 с.
- Ахмедов А.М., Крупеник В.А. (1990) Турбидитные режимы седиментации и колчеданообразование в раннепротерозойском Печенгском бассейне. *Сов. геология*, (11), 51-60.
- Аюпова Н.Р., Масленников В.В., Артемьев Д.А., Блинов И.А. (2019) Минералого-геохимические особенности конкреций пирита из сульфидных турбидитов Талганского медно-цинково-колчеданного месторождения (Южный Урал). *Литология и полез. ископаемые*, (6), 518-539. <https://doi.org/10.31857/S0024-497X20196518-539>
- Буряк В.А. (1982) Метаморфизм и рудообразование. М.: Недра, 256 с.
- Буряк В.А., Хмелевская Н.М. (1997) Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). Владивосток: Дальнаука, 156 с.
- Ванин В.А., Мазукабзов А.М. (2021) Структура золоторудного месторождения Голец Высочайший (Северное Забайкалье). *Геодинамика и тектонофизика*, 12(1), 60-75. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-1-0512>
- Ванин В.А., Мазукабзов А.М., Юдин Д.С., Блинов А.В., Тарасова Ю.И. (2022) Наложенные деформации герцинского времени в структуре месторождения Голец Высочайший (Байкало-Патомский пояс), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ данные. *Геодинамика и тектонофизика*, 13(1), 0575. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-1-0575>
- Гаврилов Ю.О. (2010) Диагенетическая миграция сульфидов в отложениях различных обстановок седиментации. *Литология и полез. ископаемые*, 45(2), 133-150.
- Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р. (1975) Текстуры и структуры руд гидротермально-осадочных колчеданно-полиметаллических руд Озерного месторождения. Новосибирск: Наука, 173 с.
- Жабин А.Г. (1979) Онтогенез минералов. Агрегаты. М.: Наука, 275 с.

- Иванов А.И. (2008) Основные черты геологического строения и золотоносность Бодайбинского рудного района. *Руды и металлы*, (3), 43-61.
- Иванов А.И. (2014) Золото Байкало-Патомы (геология, оруденение, перспективы). М.: ФГУП ЦНИГРИ, 215 с.
- Иванов А.И. (2017) Роль метаморфических условий преобразования углеродистых карбонатно-терригенных отложений для формирования золотого оруденения на разных этапах коллизионной эпохи развития Байкало-Патомской металлогенической провинции. *Отеч. геология*, (4), 3-23.
- Кряжев С.Г. (2017) Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах. *Отеч. геология*, (1), 28-38.
- Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А. (2009) Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным. *Геохимия*, (10), 1108-1117.
- Масленников В.В. (2006) Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 384 с.
- Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. (2010) Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона. *Геология и геофизика*, **51**(5), 729-747.
- Онищенко С.А. (2012) Метакристаллы пирита в рудах месторождения Голец Высочайший (Ленский золотоносный район). *Кристаллическое и твердое некристаллическое состояние минерального вещества*. Мат-лы минерал. семинара. Сыктывкар: Геопринт, 302-304.
- Онищенко С.А. (2013) Ильменит и рутил в отложениях хомолхинской свиты (Хомолхинский рудный узел, Ленский золотоносный район). *Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2013)*. Мат-лы минерал. семинара. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 105-109.
- Онищенко С.А., Сокерина Н.В. (2021) Особенности формирования золоторудного черносланцевого месторождения Голец Высочайший (Бодайбинский рудный район). *Геология рудн. месторождений*, **63**(2), 154-173. <https://doi.org/10.31857/S0016777021020040>
- Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Плотинская О.Ю., Новоселов К.А., Масленников В.В., Котляров В.А., Блинов И.А., Кузьменко А.А., Грибоедова И.Г. (2015) Эволюция состава пирита на золоторудных месторождениях Копыловское и Кавказ в черносланцевых толщах (Бодайбинский район, Россия) по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС. *Геология рудн. месторождений*, **57**(1), 71-92. <https://doi.org/10.7868/S0016777015010025>
- Петтиджон Ф.Дж. (1975) Осадочные породы. М.: Недра, 751 с.
- Сафина Н.П., Масленников В.В., Масленникова С.П., Котляров В.А., Данюшевский Л.В., Ларж Р.Р., Блинов И.А. (2015) Полосчатые сульфидно-магнетитовые руды Маукского медноколчеданного месторождения (Средний Урал): состав и генезис. *Геология рудн. месторождений*, **57**(3), 221-238. <https://doi.org/10.7868/S0016777015030053>
- Сокерина Н.В., Онищенко С.А., Исаенко С.И. (2016) Флюидный режим формирования золоторудного месторождения Голец Высочайший (Ленский золотоносный район). *Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (7), 3-9. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-7-3-9>
- Скрипченко Н.С. (1972) Гидротермально-осадочные сульфидные руды базальтоидных формаций. М.: Недра, 216 с.
- Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Иванов А.В., Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Радомская Т.А., Блинов А.В., Бабяк В.Н. (2021) Типоморфизм, типохимизм и изотопно-геохимические характеристики сульфидов железа месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь). *Записки РМО*, **150**(1), 63-75. <https://doi.org/10.31857/S0869605521010123>
- Целуйко А.С., Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П. (2017) Минеральные и текстурно-структурные особенности рудных фаций Юбилейного медно-колчеданного месторождения (Южный Урал). *Изв. вузов. Геол. и разведка*, (4), 50-56.
- Шевкунов А.Г., Масленников В.В., Ларж Р.Р., Масленникова С.П., Данюшевский Л.В. (2018) Геохимические особенности разновидностей пирита золоторудного месторождения Кумтор, Кыргызстан. *Минералогия*, **4**(4), 22-40.
- Эдер В.Г. (2020) Пиритизация пород зон перехода черносланцевой толщи к вмещающим отложениям на примере баженской свиты Западной Сибири. *Литология и полез. ископаемые*, **55**(3), 257-271. <https://doi.org/10.31857/S0024497X20030027>
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (1988) Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 272 с.
- Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов В.В., Мохов А.В., Антонов А.В., Сергеев С.А. (2011) Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов. *Геология рудн. месторождений*, **53**(1), 32-64.
- James H.L. (1954) Sedimentary facies of iron formation. *Econ. Geol.*, **49**, 235-293.
- Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. (2011) A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Econ. Geol.*, **106**, 331-358. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.3.331>
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. (2007) Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia. *Econ. Geol.*, **102**, 1233-1267. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>
- Melezhik V.A., Grinenko L.N., Fallick A.E. (1998). 2000-Ma sulphide concretions from the 'Productive' Formation of the Pechenga Greenstone Belt, NW Russia: genetic history based on morphological and isotopic evidence. *Chem. Geol.*, **148**(1-2), 61-94. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00021-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00021-7)
- Rickard D. (2012) Sulfidic sediments and sedimentary rocks, developments in sedimentology. Amsterdam: Elsevier, 801 p.
- Safina N.P., Melekestseva I.Y., Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Artemyev D.A., Blinov I.A. (2020) Authigenesis at the Urals massive sulfide deposits: insight from pyrite nodules hosted in ore diagenites. *Minerals*, **10**(2), 193. <https://doi.org/10.3390/>

min10020193

- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanova N.N., Parshin A.V. (2020) Mineralogical and Isotope-Geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) Characteristics of the Krasniy Gold Mine (Baikal-Patom Highlands): Constraining Ore-Forming Mechanisms and the Model for Sukhoi Log-Type Deposits. *Ore Geol. Rev.*, **119**, 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>
- Thomas H.V., Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V., Berry R.F., Fraser R., Froud S., Moye R. (2011) Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo gold mine, Australia: Insights for ore genesis. *Econ. Geol.*, **106**, 1-31. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.1.1>
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiev N.N. (2016) Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geosci. Front.*, (7), 453-481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010>
- Akhmedov A.M., Krupenik V.A. (1990). Turbidity conditions of sedimentation and pyrite formation in the Early Proterozoic Pechenga Basin. *Sov. Geol.*, (11), 51-60. (In Russ.)
- Andreev B.S. (1992) Pyrite of gold deposits. Moscow, Nauka Publ., 143 p. (In Russ.)
- Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Artem'ev D.A., Blinov I.A. (2019) Mineralogical and geochemical features of pyrite nodules from sulfide turbidites in the Talgan Cu-Zn massive sulfide deposit (Southern Urals). *Litol. Miner. Resour.*, **54**(6), 447-464 (translated from *Litol. Polez. Iskop.*, (6), 518-539). <https://doi.org/10.1134/S0024490219060026>
- Buryak V.A. (1982) Metamorphism and ore formation. Moscow, Nedra Publ., 256 p. (In Russ.)
- Buryak V.A., Khmelevskaya N.M. (1997) Sukhoi Log, one of the greatest gold deposits in the world: Genesis, distribution patterns, prospecting criteria. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 156 p. (In Russ.)
- Distanov E.G., Kovalev K.R. (1975) Textures and structures of ores of hydrothermal-sedimentary pyrite-polymetallic ores of the Ozeroye deposit. Novosibirsk, Nauka Publ., 173 p. (In Russ.)
- Eder V.G. (2020) Pyritization of rock in black shale/host rock transition zones: evidence from the Bazhenov formation (Western Siberia). *Lithol. Miner. Resour.*, **55** (3), 218-230 (translated from *Litol. Polez. Iskop.*, (3), 257-271). <https://doi.org/10.1134/S0024490220030025>
- Gavrilov Y.O. (2010) Diagenetic migration of sulfides in sediments accumulated in different sedimentation setting. *Lithol. Miner. Resour.*, **45**(2), 120-135 (translated from *Litol. Polez. Iskop.*, (2), 133-150).
- Ivanov A.I. (2008) Main features of the geological structure and gold potential of the Bodaibo ore cluster. *Rudy i Metally*, (3), 43-61. (In Russ.)
- Ivanov A.I. (2014) Gold of Baikal-Patom: Geology, Mineralization, and Prospects. Moscow, TsNIGRI, 215 p. (In Russ.)
- Ivanov A.I. (2017) Role of metamorphic conditions of trans-formation of carbonaceous carbonate-terrigenous sediments for the formation of gold mineralization at different stages of collisional stages of the evolution of the Baikal-Patom metallogenic province. *Otechestvennaya Geol.*, (4), 3-23. (In Russ.)
- James H.L. (1954) Sedimentary facies of iron formation. *Econ. Geol.*, **49**, 235-293.
- Kryazhev S.G. (2017) Isotope-geochemical and genetic models of gold deposits in the carbonaceous-terrigenous sequences. *Otechestvennaya Geol.*, (1), 28-38. (In Russ.)
- Kryazhev S.G., Ustinov V.I., Grinenko V.A. (2009) Fluid regime at the Sukhoi Log gold deposit: isotopic evidence. *Geochem. Int.*, **47**(10), 1041-1049 (translated from *Geokhimiya* (10), 1108-1117). <https://doi.org/10.1134/S0016702909100085>
- Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. (2011) A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Econ. Geol.*, **106**, 331-358. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.3.331>
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. (2007) Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia. *Econ. Geol.*, **102**, 1233-1267. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>
- Maslennikov V.V. (2006) Lithogenesis and massive sulfide deposits formation. Miass, Institut Mineralogii, 384 p. (In Russ.)
- Melezhik V.A., Grinenko L.N., Fallick A.E. (1998). 2000-Ma sulphide concretions from the 'Productive' Formation of the Pechenga Greenstone Belt, NW Russia: genetic history based on morphological and isotopic evidence. *Chem. Geol.*, **148**(1-2), 61-94. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00021-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00021-7)
- Nemerov V.K., Razvozhayeva E.A., Budyak A.E., Stanovich A.M., Kornilova T.A. (2010) Biogenic sedimentation factors of mineralization in the neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region. *Russ. Geol. Geophys.*, **51**(5), 572-586 (translated from *Geol. Geofiz.*, **51**(5), 729-747).
- Onishchenko S.A. (2012) Pyrite metacrystals in the ores of the Golets Vysochaishii deposit (Lena gold district). *Crystalline and Solid Non-Crystalline State of Mineral Matter*. Proc. Mineral. Seminar. Syktyvkar, Geoprint Publ., 302-304. (In Russ.)
- Onishchenko S.A. (2013) Ilmenite and rutile in sediments of the Khomolkhin Formation (Khomolkhin ore cluster, Lena gold province). *Modern Problems of Theoretical, Experimental, and Applied Mineralogy (Yushkin Reading - 2013)*. Proc. Mineral. Seminar. Syktyvkar, IG Komi NTs UrO RAN, 105-109. (In Russ.)
- Onishchenko S.A., Sokerina N.V. (2021) Features of the Formation of the Golets Vysochaishii Gold-Ore Black-Shale Deposit (Bodaibo Ore District). *Geol. Ore Depos.*, **63**(2), 138-155 (translated from *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **63**(2), 154-173). <https://doi.org/10.1134/S1075701521020045>
- Palenova E.E., Belogub E.V., Novoselov K.A., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Plotinskaya O.Y., Griboedova I.G., Kuzmenko A.A. (2015) Chemical evolution of pyrite at the Kopylovsky and Kavkaz black shale-hosted gold deposits, Bodaybo district, Russia: evidence from EPMA and LA-ISP-ms data. *Geol. Ore Depos.*, **57**(1), 64-84 (translated from *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **57**(1), 71-92). <https://doi.org/10.1134/>

- S107570151501002X
- Pettijohn F.J. (1975) *Sedimentary Rocks*. 3rd ed. N.Y., Harper and Row, 628 p.
- Rickard D. (2012) *Sulfidic sediments and sedimentary rocks, developments in sedimentology*. Amsterdam, Elsevier, 801 p.
- Safina N.P., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Danyushevsky L.V., Large R.R. (2015) Banded sulfide-magnetite ores of Mauk copper massive sulfide deposit, Central Urals: composition and genesis. *Geol. Ore Depos.*, **57**(3), 197-212 (translated from *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **57**(3), 221-238). <https://doi.org/10.1134/S1075701515030058>
- Safina N.P., Melekesteva I.Y., Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Artemyev D.A., Blinov I.A. (2020) Authigenesis at the Urals massive sulfide deposits: insight from pyrite nodules hosted in ore diagenites. *Minerals*, **10**(2), 193. <https://doi.org/10.3390/min10020193>
- Shevkunov A.G., Maslennikov V.V., Large R.R., Maslennikova S.P., Danyushevsky L.V. (2018) Geochemical features of pyrite types of the Kumtor gold deposit, Kyrgyzstan. *Mineralogiya*, **4**(4), 22-40. (In Russ.)
- Skipchenko N.S. (1972) Hydrothermal-sedimentary sulfide ores of basaltoid formations. Moscow, Nedra Publ., 216 p. (In Russ.)
- Sokerina N.V., Onishchenko S.A., Isaenko S.I. (2016) Fluid regime of formation of the Golets Vysochaishii gold deposit, Lena gold province. *Vestn. Inst. Geol. Komi NTs UrO RAN*, (7), 3-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-7-3-9>
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanova N.N., Parshin A.V. (2020) Mineralogical and Isotope-Geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) Characteristics of the Krasniy Gold Mine (Baikal-Patom Highlands): Constraining Ore-Forming Mechanisms and the Model for Sukhoi Log-Type Deposits. *Ore Geol. Rev.*, **119**, 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Radomskaya T.A., Blinov A.V., Babyak V.N. (2021) Typomorphism, ty-pochemistry, and isotope-geochemical characteristics of iron sulfides of the Golets Vysochaishiy deposit (Eastern Siberia). *Zapiski RMO*, **150**(1), 63-75. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869605521010123>
- Thomas H.V., Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V., Berry R.F., Fraser R., Froud S., Moye R. (2011) Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo gold mine, Australia: Insights for ore genesis. *Econ. Geol.*, **106**, 1-31. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.1.1>
- Tseluiko A.S., Maslennikov V.V., Aupova N.R., Maslennikova S.P. (2017) Mineral and textural-structural features of the ore facies of Yubileynoe massive sulfide deposit (The Southern Urals). *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Geol. i Razvedka*, (4), 50-56. (In Russ.)
- Vanin V.A., Mazukabzov A.M. (2021) Structure of the Golets Vysochaishy gold deposit (Northern Transbaikalia). *Geodynam. Tectonophys.*, **12** (1), 60-75. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-1-0512>
- Vanin V.A., Mazukabzov A.M., Yudin D.S., Blinov A.V., Tarasova Yu.I. (2022) The Hercynian imposed deformations in the Golets Vysochaishii deposit structure (Baikal-Patom belt), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data. *Geodynamics & Tectonophysics*, **13**(1), 0575. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-1-0575>
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (1988) *Black Shale Geochemistry*, Leningrad, Nauka Publ., 272 p. (In Russ.)
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Mokhov A.V., Rodionov N.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. (2011) 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. *Geol. Ore Depos.*, **53**(1), 27-57 (translated from *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **53**(1), 32-64). <https://doi.org/10.1134/S1075701511010077>
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiev N.N. (2016) Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geosci. Front.*, (7), 453-481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010>
- Zhabin A.G. (1979) *Ontogeny of minerals. Aggregates*. Moscow, Nauka Publ., 275 p. (In Russ.)