

УДК 552.16, 553.411, 549.2+549.3+549.6

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-4-2

**МИНЕРАЛОГИЯ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ЗОЛОТО-КВАРЦЕВОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОСИНОВСКОЕ (СРЕДНИЙ УРАЛ)****Н.П. Сафина, Л.Я. Кабанова, И.А. Блинов***Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Институт минералогии, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия;
natali-safina2015@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 07.10.2023 г., принята к печати 04.12.2023 г.

**MINERALOGY OF HOST ROCKS OF THE OSINOVSKOE
GOLD-QUARTZ DEPOSIT (CENTRAL URALS)****N.P. Safina, L.Ya. Kabanova, I.A. Blinov***South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy, Miass,
Chelyabinsk district, 456317 Russia; natali-safina2015@yandex.ru*

Received 07.10.2023, accepted 04.12.2023

Аннотация. В статье рассмотрена минералогия слюдястых сланцев золоторудного месторождения Осиновское на Среднем Урале. Проведенные исследования позволили выяснить роль динамометаморфизма в преобразовании исходных пород и охарактеризовать их метасоматические изменения. Установлена взаимосвязь между пластическими и хрупкими деформациями и образованием золотоносной минеральной ассоциации, в которую входят главные пирит, пирротин и ильменит, второстепенные и редкие сфалерит, халькопирит, марказит, рутил, магнетит, молибденит, галенит, алтаит, гессит, мелонит, петцит, калаверит, волинскит, сylvанит. Содержание Ag в самородном золоте варьирует от 4 до 29 мас. %. Теллуриды ассоциируют с пиритом и пирротином, а также образуют мономинеральные зерна и сростки в хлорите и слюде с включениями РЗЭ минералов (ксенотим-(Y), монацит-(Ce), гидроксилбастнезит-(Ce)), алланит-(Ce)), РЗЭ-содержащих минералов (эпидот, апатит, циркон), силиката Th (торит) и уранинита.

Ключевые слова: минералы РЗЭ, ксенотим, монацит, гидроксилбастнезит, теллуриды, самородное золото, сульфиды, слюдястые сланцы, метаморфизм, золоторудное месторождение, Средний Урал.

Abstract. The paper describes the mineralogy of mica shales of the Osinovskoe gold deposit in the Central Urals. Our studies unraveled the role of dynamometamorphism in the transformation of primary rocks and allowed the characterization of their metasomatic alteration. We showed the relationship between plastic and brittle deformations and the formation of gold-bearing mineral assemblage with major pyrite, pyrrhotite and ilmenite and subordinate and rare sphalerite, chalcopyrite, marcasite, rutile, magnetite, molybdenum, galena, altaite, hessite, melonite, petzite, calaverite, volynskite, and sylvanite. The Ag content of native gold varies from 4 to 29 wt. %. Tellurides are associated with pyrite and pyrrhotite and also form monomineral grains and intergrowths in chlorite and mica with inclusions of REE minerals (xenotime-(Y), monazite-(Ce), hydroxylbastnesite-(Ce)), allanite-(Ce)), REE-bearing minerals (epidote, apatite, zircon), Th silicate (torite), and uraninite.

Keywords: REE minerals, xenotime, monazite, hydroxylbastnesite, tellurides, native gold, sulfides, mica shales, metamorphism, gold deposit, Central Urals.

Для цитирования: Сафина Н.П., Кабанова Л.Я., Блинов И.А. Минералогия вмещающих пород золото-кварцевого месторождения Осиновское (Средний Урал). Минералогия, 9(4), 17–36. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-4-2.

For citation: Safina N.P., Kabanova L.Ya., Blinov I.A. Mineralogy of host rocks of the Osinovskoe gold-quartz deposit (Central Urals). Mineralogy, 9(4), 17–36. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-4-2.

Введение

Осиновское золоторудное месторождение находится на Среднем Урале в пределах Абрамовской лицензионной площади, расположенной в 40 км к юго-западу от г. Каменск-Уральского и в 20 км к юго-востоку от г. Сысерти. Кварцевые золотоносные жилы бывшего Осиновского рудника в центре Абрамовской площади были открыты и отработывались в период с 1898 г. до 1905 г. и во второй половине 1930-х годов. В послевоенные годы на месторождении была проведена ревизия балансовых запасов, в результате чего запасы Осиновского рудника переведены в забалансовые. В 1996 г. по результатам проведения ГДП 1 : 50 000 были оценены прогнозные ресурсы золота Осиновского рудопоявления по категории P_1 (Ведерников, Двоеглазов, 1997ф). В 2018–2020 гг. оценочные работы позволили расширить и изменить прежние представления о строении рудных тел и всего месторождения в целом.

В последнее время к месторождению появился интерес производственных организаций. В результате изучения образцов рудовмещающих пород, переданных ООО «Геопоиск», нами получены новые данные по распределению в них золото-теллуридной минерализации, уточнена пробность золота в различных минеральных ассоциациях, определены теллурид Au (калаверит) и теллурид Ni (мелонит), РЗЭ и РЗЭ-содержащие минералы: силикаты (эпидот, алланит, торит), карбонаты (гидроксилбастнезит-(Ce)), фосфаты (монацит, ксенотим) и минералы U (уранинит). В данной работе приведены результаты этих исследований.

Краткая характеристика объекта

Месторождение расположено в пределах Осиновского рудного поля Новоипатовского рудного узла (Коровко и др., 2015). Пространственно оно приурочено к юго-восточной краевой области развития пород Рефтинского габбро-диорит-плагиогранитового комплекса, протягивающегося в северо-восточном направлении практически через всю лицензионную площадь (рис. 1). Выявленные рудные тела Осиновского месторождения имеют согласное с Рефтинским комплексом простирание под углом 40–45° и, по имеющимся данным, генетически связаны с его формированием. Месторождение располагается среди метаморфитов, представленных кристаллическими сланцами, ам-

фиболитами, гнейсами, гранитогнейсами и гранитоидами кварц-диоритового или гранодиоритового состава с маломощными до 10 см прослоями углеродисто-кремнистых и кремнистых сланцев вдоль зон рассланцевания и редкими линзами мраморов мощностью до 3 м. По среднему химическому составу метаморфические породы рудовмещающей малорефтинской толщи (O_3-S_{1mg}) близки к островодужным толеитам базальт-риолитовой формации.

Осиновское месторождение сложено тремя кварцево-жильными системами, объединенными в жилы Нагорная, Веселая и Красавица (Ведерников, Двоеглазов, 1997ф). Жильные системы представлены серией сближенных субпараллельных кварцевых прожилков (до 5 штук), расположенных в виде протяженных полос шириной 1–6 м, в среднем, 2 м. Содержание Au по простиранию неравномерное, при этом отмечаются отдельные обогащенные участки («рудные столбы») протяженностью первые десятки метров с содержаниями 120–150 г/т.

По данным бурения контуры рудных тел имеют те же элементы залегания, что и полосчатость и сланцеватость вмещающих пород. Общее падение рудных тел юго-восточное под углом от 65° до 80°. Все рудные тела располагаются в минерализованной золоторудной зоне, протягивающейся в пределах месторождения на 630 м. Ширина зоны колеблется от 70 до 100 м. Всего в пределах Осиновского месторождения по оптимальному борту 0.3 г/т выделено 13 рудных тел окисленных и полукисленных руд.

Золоторудная минерализация представлена золото-кварцевым, преимущественно малосульфидным типом. Рудная вкрапленность, как правило, рассеянная, часто группирующаяся вдоль сланцеватости в виде цепочек, линз или маломощных прослоев, обогащенных сульфидами. Сульфидные агрегаты мелкие: до 1–3 мм, иногда 8–10 мм. В золотоносных кварцевых прожилках сульфиды встречаются крайне редко. Более 70 % золота образует пылеватую вкрапленность в околожильных метасоматитах. Основными рудными минералами являются пирит, пирротин и ильменит, второстепенными – сфалерит и халькопирит. Самородное золото обнаружено в пирите и в нерудной массе, характеризуется мелкими (не более 10 мкм) размерами выделений. Отмечены находки теллуридов Au, Ag, Pb и Bi.

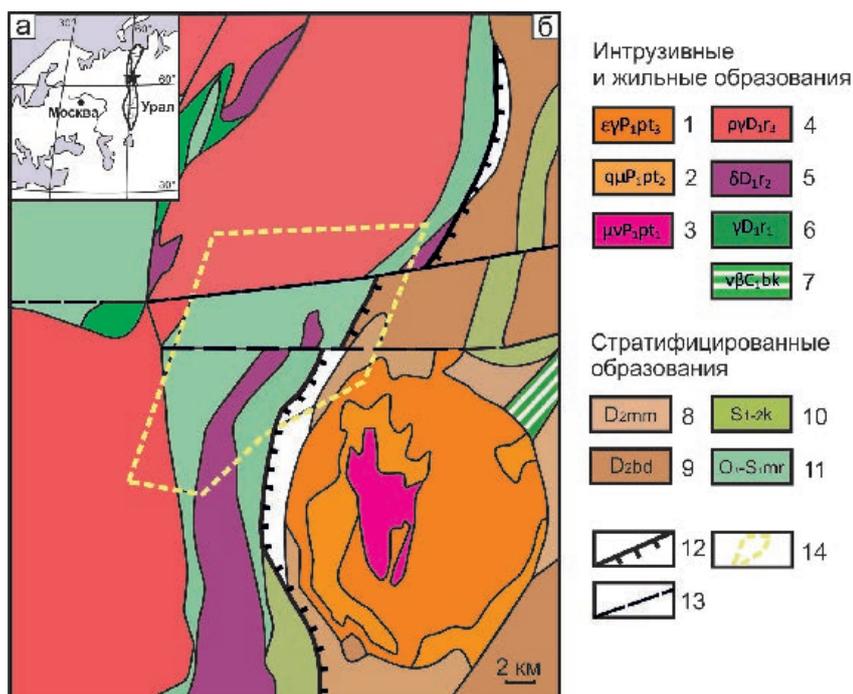


Рис. 1. Положение лицензионного участка на географической схеме (а) и геологической карте масштаба 1 : 200 000 (б) (Коровко и др., 2015).

1–3 – Петуховский монзонит-гранитовый комплекс: 1 – граниты, лейкограниты; 2 – кварцевые монзониты, сиениты, кварцевые сиениты; 3 – монзогаббро, монзониты; 4–6 – Рефтинский габбро-диорит-плагиогранитовый комплекс: 4 – плагиограниты, тоналиты; 5 – диориты, кварцевые диориты; 6 – габбро; 7 – дайки габбродолеритов, долеритов; 8 – базальты, андезибазальты, андезиты, дациты, песчаники, алевролиты с горизонтами известняков маминской толщи; 9 – базальт-дацитовая толща; 10 – слюдяно-кварцевые, графит-, гранат- и ставролитсодержащие, амфибол-полевошпатовые сланцы, кварцито-сланцы, мраморы колоткинской толщи; 11 – эпидот-амфиболовые, амфибол-плагиоклазовые, биотит-серицит-плагиоклаз-кварцевые сланцы, мраморы малорефтинской толщи; 12 – Златогоровский надвиг; 13 – надвиги; 14 – границы лицензионного участка.

Fig. 1. Position of the licensed area on geographical scheme (a) and geological map on a scale of 1 : 200 000 (b) (Korovko et al., 2015).

1–3 – Petukhovsky monzonite-granite complex: 1 – granite, leucogranite; 2 – quartz monzonite, syenite, quartz syenite; 3 – monzogabbro, monzonite; 4–6 – Reftinsky gabbro-diorite-plagiogranite complex: 4 – plagiogranite, tonalite; 5 – diorite, quartz diorite; 6 – gabbro; 7 – dikes of gabbrodolerite and dolerite; 8 – basalt, basaltic andesite, andesite, dacite, sandstone, siltstone with limestone horizons of the Maminskaya Sequence; 9 – basaltic-dacitic sequence; 10 – mica-quartz, graphite-, garnet- and staurolite-bearing, and amphibole-feldspar schist, quartzite schist, marl of the Kolyutkino Sequence; 11 – epidote-amphibole, amphibole-plagioclase, and biotite-sericite-plagioclase-quartz schist, Maloreftinsky Sequence; 12 – Zlatogorovsky Thrust, 13 – thrusts; 14 – boundaries of the licensed area.

Методы исследования

Из образцов минерализованных пород были изготовлены шлифы и аншлифы для оптических и электронно-микроскопических исследований. Все исследовательские работы проведены в Центре коллективного пользования ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс). Оптико-микроскопическое изучение шлифов проводилось на микроскопе ПОЛИАМ Р-312, аншлифов – на микроскопе Olympus BX51 с цифровой приставкой. Исследования в отраженных электронах, получение энергодисперсионных спектров и количественное определение состава

минералов выполнено на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA 3sbu с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) Oxford Instruments X-act. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка 20 нА, диаметр электронного пучка 2–3 мкм, время набора каждого спектра 120 с. Количественный анализ проведен с использованием эталонов сертифицированного стандарта № 1362 (Microanalysis Consultants Ltd), MINM25-53 (Astimes Scientific Limited, серийный номер 01-044) и НЭРМА.ГЕО1.25.10.7417.

Результаты исследований

Петрографическая характеристика пород.

Исследованные образцы представляют собой сланцы, состоящие из переменного количества полевых шпатов, кварца, слюды, карбонатов и содержащие рудную вкрапленность и кварцевые прожилки.

Полевошпат-слюдисто-кварцевые сланцы характеризуются сланцеватой, полосчатой, линзовидно-полосчатой, местами сланцевато-плойчатой и плойчатой текстурой (рис. 2а). Структура большей частью порфиробластовая, основная ткань лепидогранобластовая (рис. 2б, в). Порфиробласты плагиоклаза и ортоклаза образуют таблитчатые зерна, большей частью деформированные, серицитизированные, часто с корродированной границей зерен, частично или полностью замещенные карбонатом (рис. 2в). Отдельные обособления неправильной и линзовидной формы сложены карбонатом и биотитом в переменных количествах. В некоторых из них преобладает карбонат, в дру-

гих – карбонат ассоциирует с биотитом, количество которого колеблется в пределах от 5 до 10 об. %, редко до 50 об. %. Рудные минералы (пирит, пирротин) в виде зерен различной формы размером до 100 мкм обычно приурочены к биотит-карбонатной или кварц-биотит-карбонатной ассоциации (рис. 2б). Местами пластинки биотита и зерна рудного минерала располагаются по спирали (рис. 2г). Слюдисто-кварцевый агрегат основной ткани состоит из зерен кварца разной формы и размера (10–100 мкм), пластинок и чешуек биотита и мусковита, реже хлорита, зерен карбоната и рудного минерала, обычно ассоциирующего с хлоритизированным биотитом.

При увеличении содержания хлорита возникает пятнистая текстура, обусловленная присутствием агрегатов неправильной формы преимущественно хлоритового состава местами с примесью кварца или кальцита. Встречаются линзовидные участки, сложенные серицитом с переменным количеством кварца, хлорита, карбоната и рудного

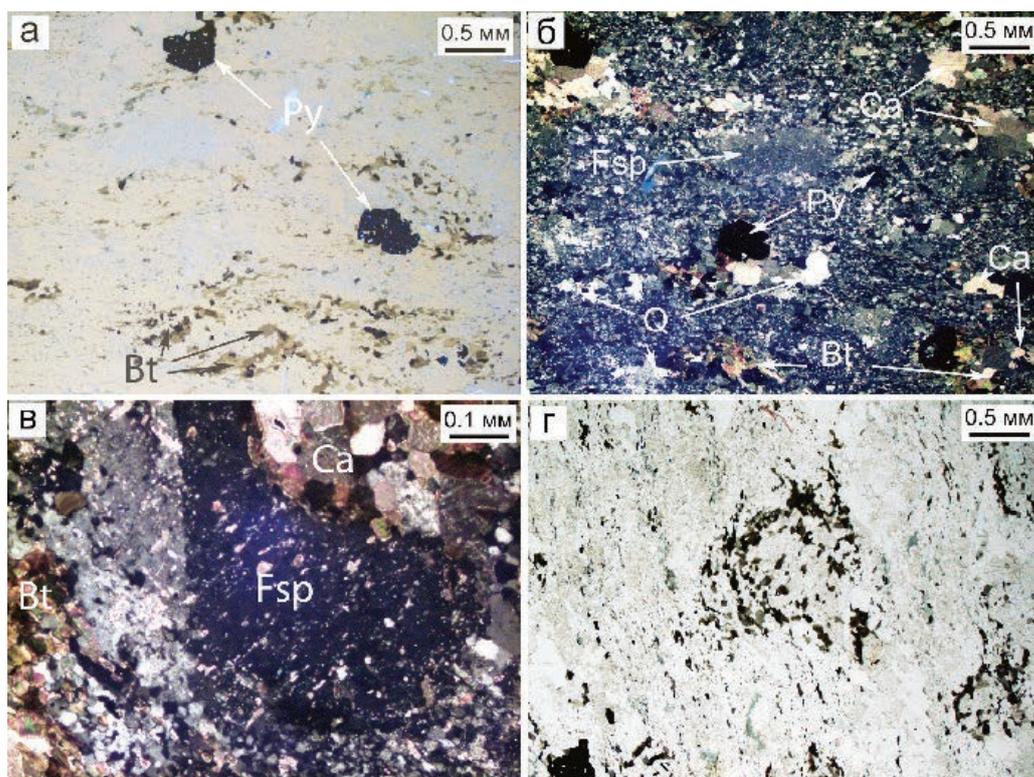


Рис. 2. Полевошпат-слюдисто-кварцевый сланец: а – линзовидно-полосчатая текстура породы, подчеркнутая вкрапленностью биотита (Bt) и пирита (Py); б, в – лепидогранобластовая структура основной ткани: порфиробласт ортоклаза (Fsp) с карбонатом (Ca), слюдой, кварцем (Q) и пиритом; г – тонкая вкрапленность рудных минералов и биотита в структуре, отражающей вращение под давлением. Поляризационный свет.

Fig. 2. Feldspar-mica-quartz schist: а – lenticular-banded texture emphasized by inclusions of biotite (Bt) and pyrite (Py); б, в – lepidogranoblastic structure of the matrix: porphyroblast of orthoclase (Fsp) with carbonate (Ca), mica, quartz (Q) and pyrite; г – thin dissemination of ore minerals and biotite in a structure reflecting pressure-related rotation. Polarized light.

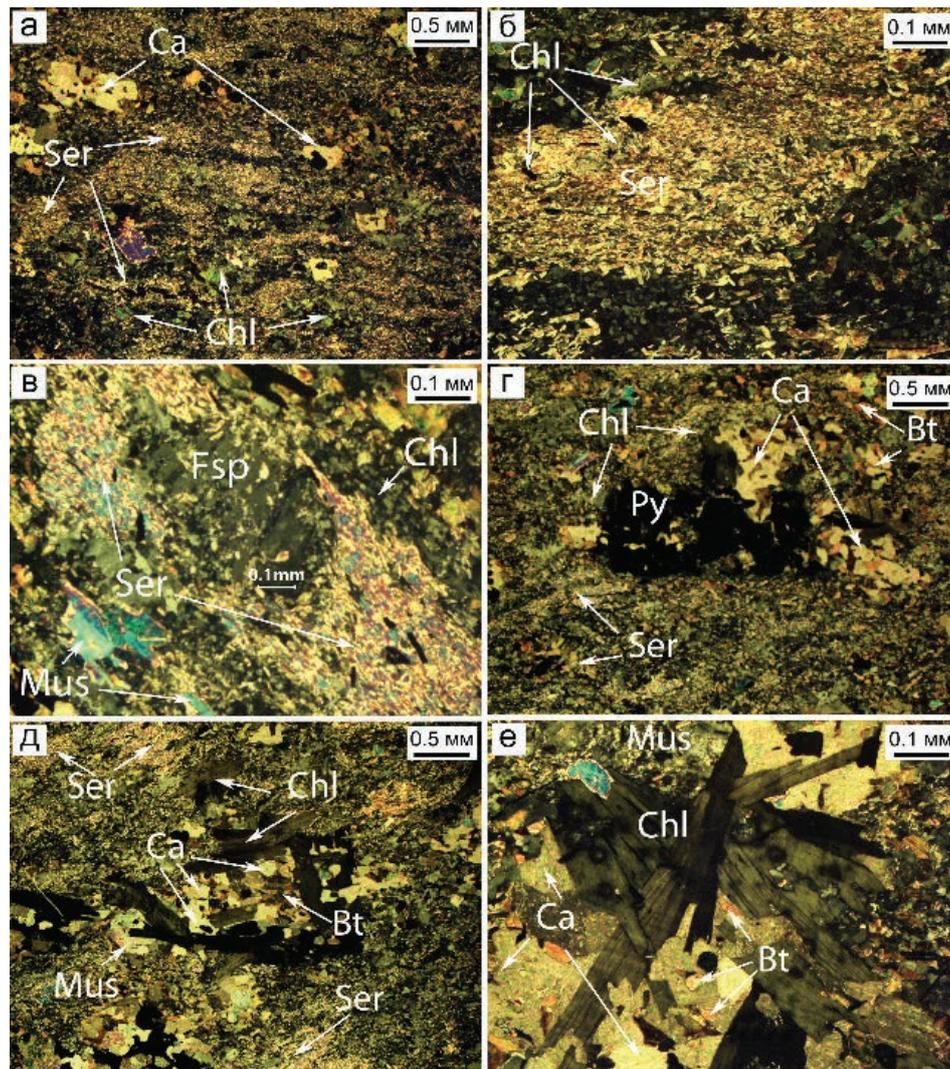


Рис. 3. Кварц-хлорит-сланцевый сланец: а – полосчатая текстура породы с линзовидными кварц-серицитовыми (Ser) агрегатами и пятнами карбоната (Ca) и хлорита (Chl); б – линзовидный агрегат серицита с лепидогранобластовой структурой; в – слюдисто-хлоритовый агрегат с реликтовым ортоклазом (Fsp) в центре; г – вкрапленность рудных минералов (Py) в хлорит-биотит-кальцитовую линзу; д – кварц-биотит-кальцитовый агрегат с хлоритовой каймой в слюдистой массе; е – сростки сдвойникового клинохлора в ассоциации с кальцитом, содержащим мелкие пластинки биотита (Bt). Поляризационный свет.

Fig. 3. Quartz-chlorite-micaceous schist: а – banded texture with lenticular quartz-sericite (Ser) aggregates and carbonate (Ca) and chlorite (Chl) spots; б – lenticular sericite aggregate with lepidogranoblastic structure; в – micaceous-chlorite aggregate with relict orthoclase (Fsp) in the center; г – dissemination of ore minerals (Py) in chlorite-biotite-calcite lens; д – quartz-biotite-calcite aggregate with chlorite rim in micaceous matrix; е – intergrowths of twinned clinoclors in assemblage with calcite and small biotite (Bt) plates. Polarized light.

минерала (рис. 3а, б). Такие участки часто деформированы, фрагментированы, со сдвигом фрагментов согласно сланцеватости породы. Отмечаются агрегаты хлорит-серицитового состава с реликтовыми зернами полевых шпатов (плагиоклаза или ортоклаза) в центре (рис. 3в). Рудные минералы приурочены к биотит-хлоритовой или хлорит-биотит-карбонатной ассоциациям обычно с небольшим содержанием кварца (рис. 3г). Именно в такой

ассоциации установлены зерна самородного золота и теллуридов, расположенные вдоль спайности хлорита и слюды.

Хлорит слабо окрашен и по оптическим свойствам диагностируется как клинохлор. Представлен двумя генерациями: 1) мелкими чешуйчатыми агрегатами, замещающими биотит, и 2) более крупными идиоморфными таблитчатыми кристаллами размером до 1–3 мм. Таблитчатые кристаллы

и сростки формируют прожилки и гнезда в породе. Сростки клинохлора размером до 1.5–2.0 мм располагаются незакономерно: иногда согласно сланцеватости породы, но часто под разными углами пересекают ее (рис. 3д). Пластинки деформированы с образованием механических двойников, появлением волнистого угасания. Хлорит обычно находится в ассоциации с биотитом и карбонатом в переменных соотношениях. В породе встречаются гнезда неправильной формы, состоящие из крупных пластинок хлорита размером до 2–3 мм, ассоциирующихся с кальцитом, в котором находятся вроски мелких пластинок биотита (рис. 3е). Иногда крупнопластинчатый хлорит содержит иголки рутила-сагениита и редкие мелкие зерна эпидота.

Полевошпат-слюдисто-кварцевые сланцы содержат значительное количество кварцевых прожилков мощностью от долей миллиметра до нескольких сантиметров. Зерна кварца в прожилках имеют разную форму и размер и характеризуются гранобластовой структурой и катакластической текстурой. Хрупкая деформация в зернах кварца проявлена внутризерновыми трещинами, местами пересекающимися, часто залеченными гематитом. Пластическая деформация привела к волнистому погасанию (рис. 4а). Кварцевые зерна содержат флюидные включения размером 1–5 мкм, иногда образующие цепочки. Обычно в краевых частях зерен отмечаются следы растворения в виде щелевидных трещин, а также коррозионные границы и тени растворения (рис. 4б, в). В результате наложенных процессов формируются участки с микрогранобластовой структурой, состоящие из мелких зерен кварца без флюидных включений, с однородным погасанием и прямолинейными границами. В кварце с гранобластовой структурой в интерстициях развиваются мусковит и кальцит (рис. 4г).

Основная ткань породы, в которой находятся кварцевые прожилки, также интенсивно деформирована, местами милонитизирована. В зернах плагиоклаза наблюдаются механические двойники, кварц рекристаллизован, местами перекристаллизован с образованием полиэдрических зерен новой генерации, трещины выполнены карбонатом, серицитом и рудным веществом (рис. 4д). Местами в таких деформированных участках отмечается биотит-хлоритовая ассоциация с рутилом (рис. 4е).

В наиболее интенсивно деформированных сланцах с катакластической и брекчиевой текстурой полосчатость нарушена трещинами деформаций, изгибами некоторых линзовидных прослоев

и незакономерной пятнистой карбонатизацией (рис. 5а). Основная ткань породы неравномерно-зернистая, с отдельными порфиробластами и порфирокластами плагиоклаза и ортоклаза, реже кварца размером 0.1–1.0 мм, обычно с деформированными и корродированными границами. Плагиоклаз серицитизирован, по трещинам плагиоклаз и ортоклаз карбонатизированы (рис. 5б). Структура основной ткани микрогранобластовая или лепидогранобластовая.

На фоне основной массы выделяются округло-овальные и неправильной формы биотит-кальцитовые агрегаты размером от 0.5–1.0 до 2.0–3.0 мм с переменным содержанием хлорита и кварца (рис. 5в, г). В них всегда преобладает кальцит, содержание биотита варьирует, расположение пластинок биотита большей частью хаотичное, кварц в виде мелких зерен обычно располагается в краевых частях. Присутствует редкая вкрапленность рудных минералов. Местами эти агрегаты согласны с общей сланцеватой структурой.

Породу пересекают прожилки кварца с включениями рудного вещества. Один из таких прожилков мощностью около 3 мм сложен неравномерно-зернистым агрегатом кварца с размером зерен от 10–50 мкм до 1–2 мм и следами хрупкой и пластической деформации. Перпендикулярно границами прожилка присутствуют трещины, выполненные рудным веществом. Многочисленные изогнутые, ветвящиеся, пересекающиеся трещины, заполненные пиритом и карбонатом в разных соотношениях, продолжаются во вмещающую породу (рис. 5д, е). Рудные жилки могут сливаться, на их пересечении встречаются идиоморфные или гипидиоморфные кристаллы пирита и пластинчатые зерна пирротина (рис. 5ж, з).

Слюдистые сланцы состоят из кварца, мусковита (серицита) и биотита и представлены кварцево-слюдистыми и слюдисто-кварцевыми разновидностями с рудными минералами. Слои, сложенные мусковитом или биотитом подвержены формированию микроплойчатости, развитию позднего биотита и рудной вкрапленности и заполнению микрокливажных трещин пластинчатым мусковитом (рис. 6а, б). Рудная вкрапленность приурочена к скоплениям биотита, особенно к участкам, где биотит хлоритизирован (рис. 6в, г). В некоторых линзах, наряду с вкрапленностью пирита и пирротина, отмечаются включения апатита и рутила. В интенсивно перекристаллизованных участках, где образовался метасоматический кварц, пластинки биоти-

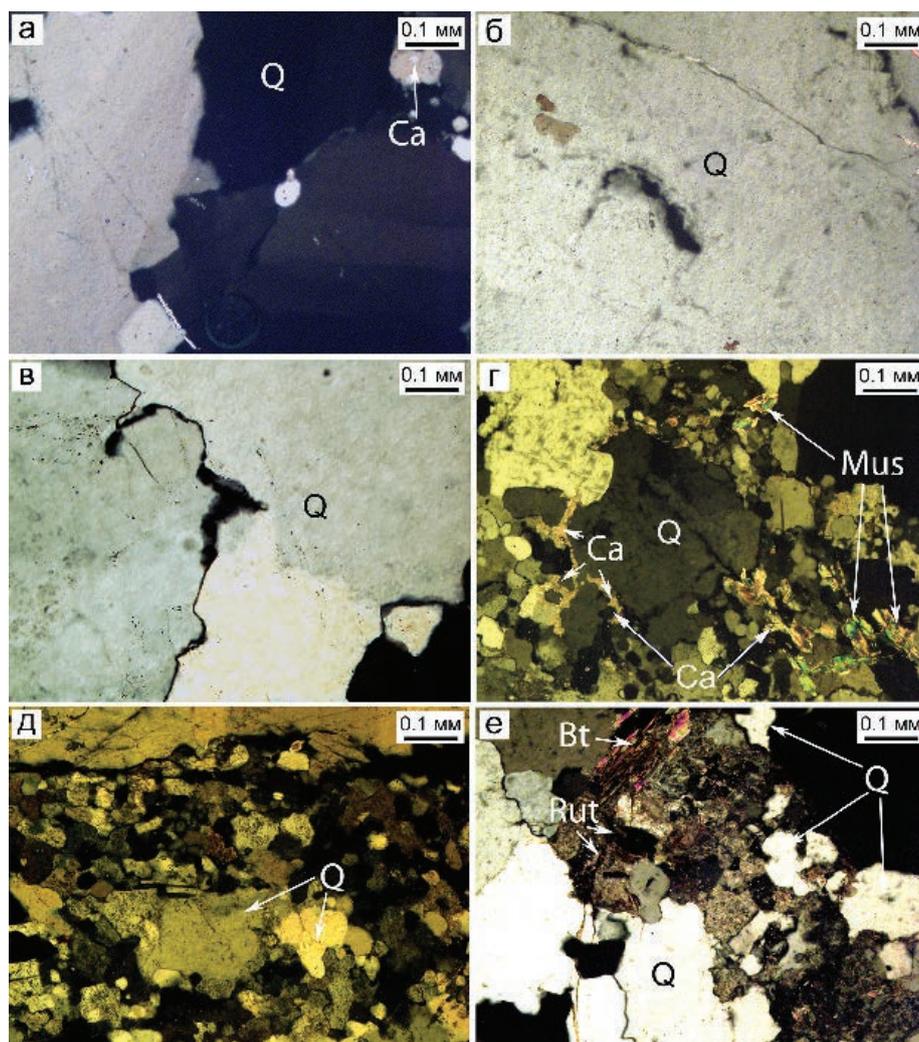


Рис. 4. Кварцевый агрегат прожилка: а – кварцевые зерна (Q) с волнистым погасением и зубчатой границей; б – щелевидные пустоты растворения в кварце; в – растворение зерен на границе и тени растворения в зернах; г – новообразованный мусковит (Mus) и кальцит (Ca) в кварцевом прожилке; д – милонитизированный кварцевый агрегат с зернами новообразованного кварца и рудным веществом (черное); е – трещины в кварце, залеченные биотитом (Bt), пиритом и рутилом (Rut). Поляризационный свет.

Fig. 4. Veinlet quartz aggregate: (a) quartz grains (Q) with wavy extinction and jagged boundary; б – slit-like dissolution cavities in quartz; в – dissolution of grains at the boundary and dissolution shadows in grains; г – newly formed muscovite (Mus) and calcite (Ca) in quartz veinlet; д – mylonitized quartz aggregate with grains of newly formed quartz and ore matter (black); е – fractures in quartz healed with biotite (Bt), pyrite, and rutile (Rut). Polarized light.

та, имеют более крупный размер (до 100 мкм) (рис. бд), интенсивно деформированы, местами развернуты. Совместно с биотитом встречаются турмалин и пирит (рис. 6е).

Рудная минерализация. Количество рудных минералов в породе варьирует от единичных зерен до крупных (до 7 мм) скоплений угловатой формы, тонкой вкрапленности или прожилков. Главные рудные минералы пирит, пирротин и ильменит. Из второстепенных и аксессуарных минералов установлены халькопирит, сфалерит, марказит, рутил,

магнетит, гематит, молибденит и Ag-содержащий галенит. Гипергенные минералы представлены гидроксидами железа.

Среди сульфидов преобладает *пирит*, который образует три морфологические разновидности: 1) крупные (до первых миллиметров) пористые и трещиноватые субгидральные кристаллы (пирит-1) (рис. 7а), которые иногда характеризуются псевдографической структурой, обусловленной замещением кристаллов нерудными минералами по отдельности; 2) удлинённые агрегаты с пластин-

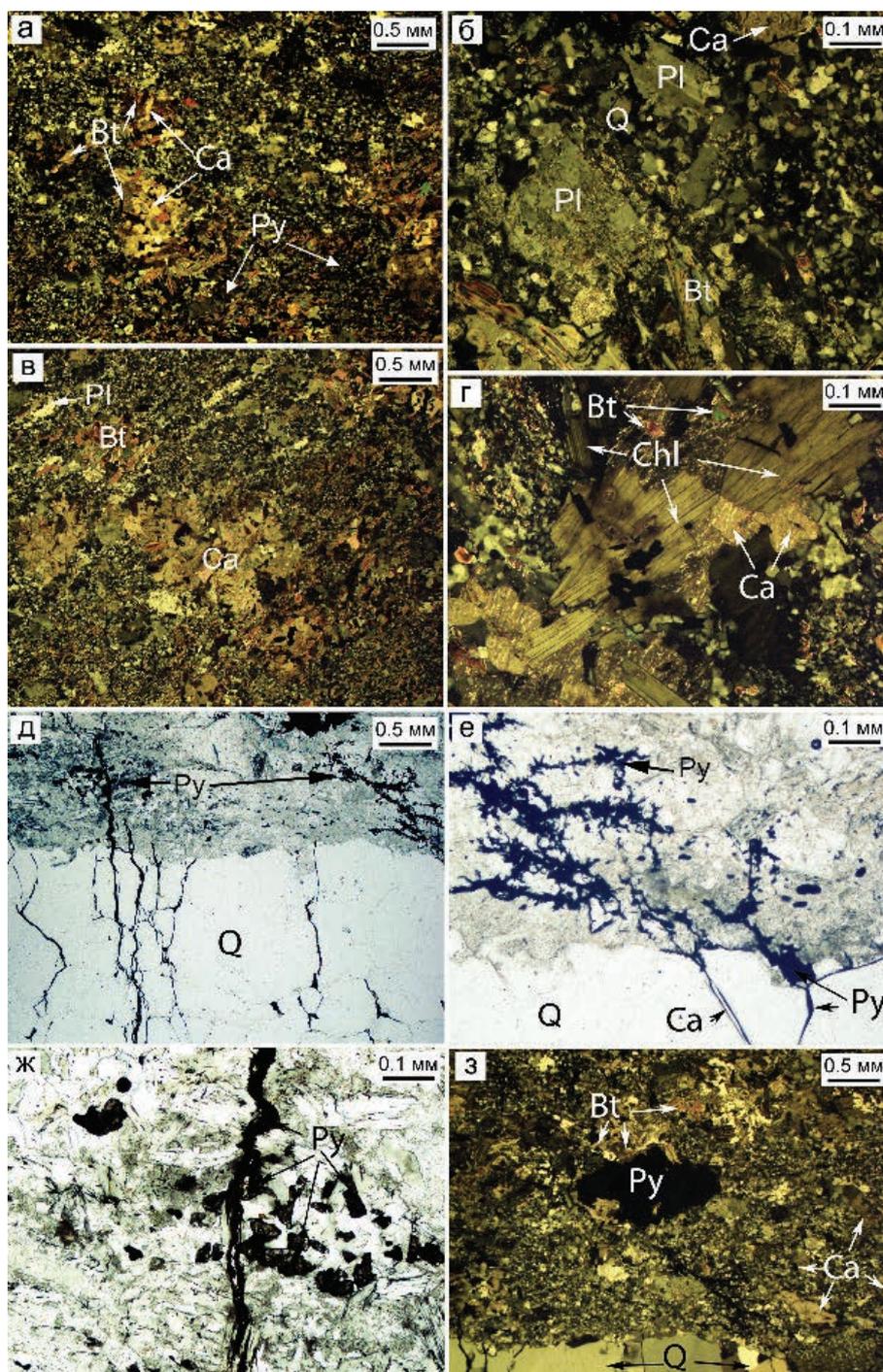


Рис. 5. Полевшпат-хлорит-слюдисто-кварцевый сланец: а – лепидогранобластовый матрикс с биотит (Bt)-карбонатными (Ca) и кварц (Q)-биотитовыми агрегатами и пиритом (Py); б – деформированные карбонатизированные порфиробласты плагиоклаза (Pl) среди кварца и слюды; в – скопления карбоната (Ca) и биотита в матриксе с элементами сланцеватой текстуры; г – пластинки хлорита (Chl) с плеохроичными дворицами в ассоциации с кальцитом (Ca) и слюдой; д, е – деформированный кварцевый прожилок на контакте с вмещающей породой; ж, з – рудная жилка и вкрапленность пирита в биотит-карбонат-хлоритовом агрегате вмещающей породы. Поляризационный свет.

Fig. 5. Feldspar-chlorite-mica-quartz schist: а – lepidogranoblastic matrix with biotite (Bt)-carbonate (Ca) and quartz (Q)-biotite aggregates and pyrite (Py); б – deformed carbonatized plagioclase (Pl) porphyroblast among quartz and mica; в – carbonate (Ca) and biotite in matrix with elements of schistose texture; г – chlorite plates (Chl) with pleochroic courtyards in assemblages with calcite (Ca) and mica; д, е – deformed quartz veinlet at the contact with host rock; ж, з – ore vein and pyrite dissemination in the biotite-carbonate-chlorite aggregate of host rock. Polarized light.

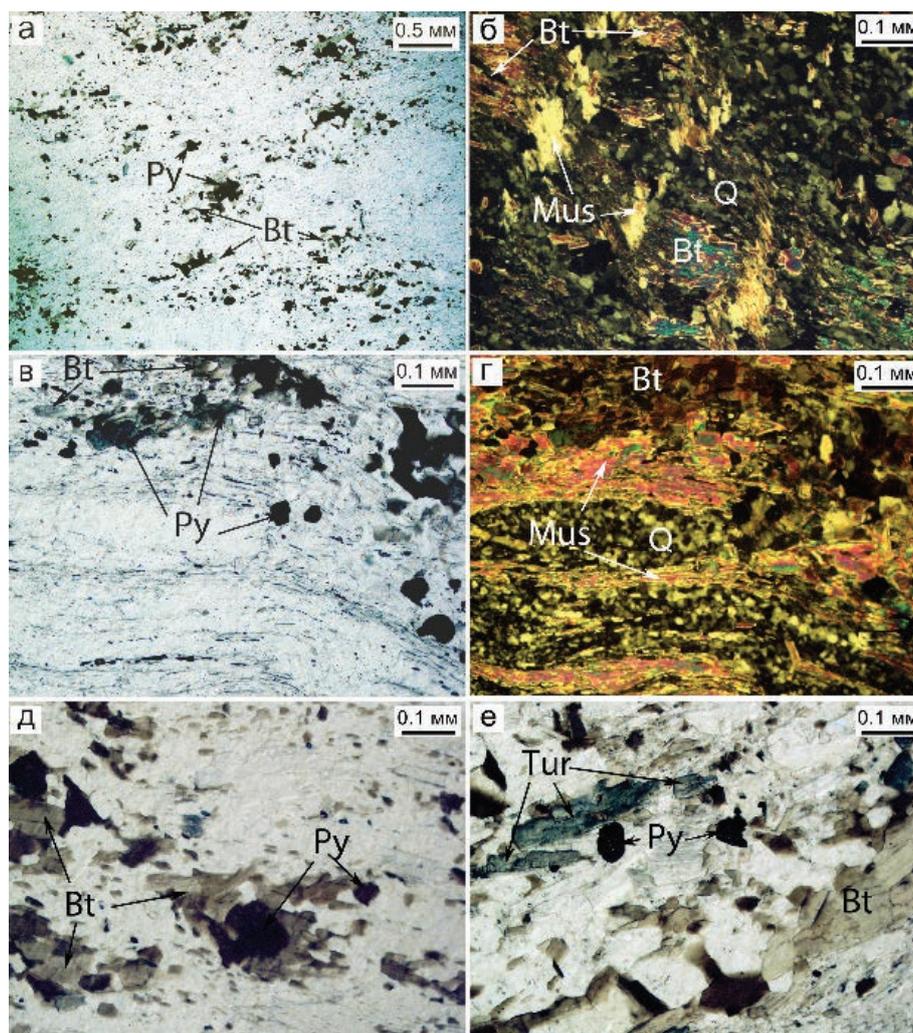


Рис. 6. Кварцево-сланцевый сланец: а, б – полосчато-плойчатая текстура и лепидогранобластовая и микрогранобластовая структура породы: включения пирита (Py) и биотита (Bt) и смятые пластинки слюды в основной массе (Mus); в, г – полосчатая текстура и лепидогранобластовая и микрогранобластовая структура породы с рудной вкрапленностью, приуроченной к биотитовым слоям; д – существенно серицитовый прослой с линзами биотита и приуроченной к ним рудной вкрапленностью; е – деформированные слои с биотитом, турмалином (Tur) и пиритом. Поляризационный свет.

Fig. 6. Quartz-mica schist: а, б – banded-lamellar texture and lepidogranoblastic and microgranoblastic structure of rock: inclusions of pyrite (Py) and biotite (Bt) and folded mica plates (Mus) in the matrix; в, г – banded texture and lepidogranoblastic and microgranoblastic structure of rock with ore dissemination mostly associated with biotite layers; д – mostly sericite interlayer with lenses of biotite and associated ore dissemination; е – deformed layers with biotite, tourmaline (Tur), and pyrite. Polarized light.

чатый строением, которые срastaются с пиритом-1 и по которым развиваются марказит (рис. 7б) и халькопирит; 2) относительно мелкие, массивные зерна (пирит-2) со скругленными краями и многочисленными включениями рудных (пирротин, халькопирит, сфалерит, ильменит, самородное золото, теллуриды, Ag-содержащий галенит) и нерудных (анкерит, эпидот, гидроксилбастнезит-(Ce), апатит) минералов (рис. 7в); 3) тонкодисперсный пирит-3 с так называемой структурой «птичьего глаза»,

скорее всего замещающий пирротин (Ярош, 1973), в виде округлых включений в пирите-2 (рис. 7г).

Пирротин встречается в виде крупных угловатых и пористых агрегатов в срastании с пиритом и халькопиритом в нерудной массе, а также многочисленных округлых включений в пирите. Размер включений пирротина достигает 100 мкм. С пирротин ассоциируют самородное золото и теллуриды Au и Ag. В единственном случае обнаружены мельчайшие включения пирротина в сфалерите (см. рис. 7в).

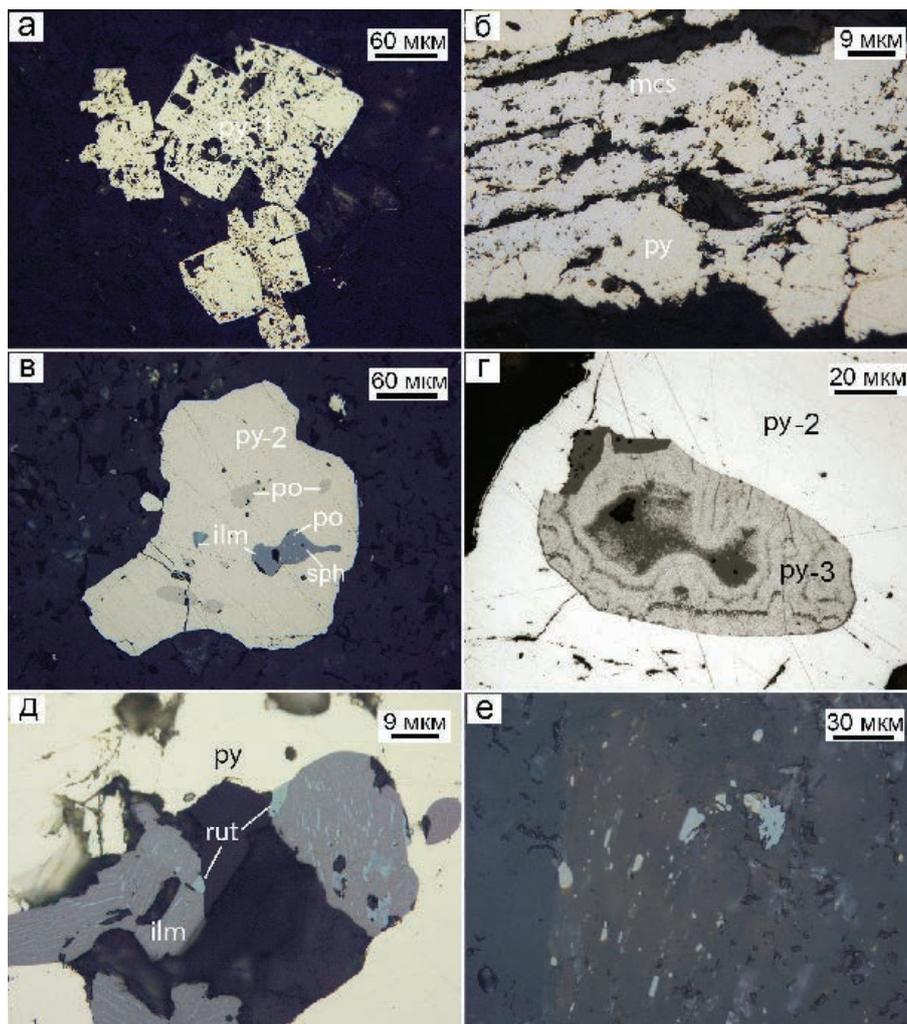


Рис. 7. Морфология и ассоциации основных рудных минералов в рудах Осиновского месторождения: а – субгедральные пористые кристаллы пирита-1 (py-1); б – сростки марказита (mcs) и пирита (py); в – изометричные зерна пирита-2 (py-2) с включениями пирротина (po) и ильменита (ilm), сфалерита (sph) также с включениями пирротина; г – округлое включение тонкодисперсного пирита-3 (py-3) в кристалле пирита-2; д – ильменит с вростками рутила (rut) в пирите; е – ориентированная вкрапленность рутила в нерудной массе. Отраженный свет.

Fig. 7. Morphology and assemblages of major ore minerals in ores of the Osinovskoe deposit: a – subhedral porous pyrite-1 crystals (py-1); б – intergrowths of marcasite (mcs) and pyrite (py); в – isometric grains of pyrite-2 (py-2) with inclusions of pyrrhotite (po) and ilmenite (ilm), sphalerite (sph) also with pyrrhotite inclusions; г – rounded inclusion of finely dispersed pyrite-3 (py-3) in pyrite-2 crystal; д – ilmenite with rutile ingrowths (rut) in pyrite; е – oriented dissemination of rutile in matrix. Reflected light.

Ильменит найден в виде субгедральных и эвгедральных кристаллов, реже сростков с рутилом (до 30 мкм), магнетитом или гематитом в нерудной массе или пирите (рис. 7д). Рутил в ильмените присутствует в виде тонких выклинивающихся пластинок. Скопления рутила, титанита и лейкоксена (?) образуют мелкие пластинчатые выделения в нерудной массе (рис. 7е).

Гидроксиды железа встречаются в породе локально, образуют прерывистые прожилки, пятна и каймы вокруг кристаллов пирита.

Золото-теллуридная ассоциация минералов представлена самородным золотом, теллуридами Ag (гессит) и Ag–Au (петцит), реже встречаются теллуриды Au (калаверит), Ag–Bi (вольфенит ?) и Ni (мелонит). Минералы присутствуют в виде включений в пирите, пирротине, реже в виде гнездообразных скоплений в нерудной массе. В единственном случае в пирите обнаружено включение Ag-содержащего галенита. Все минералы образуют как отдельные индивиды, так и взаимные сростки.

Самородное золото (Au 70.63–95.70 мас. %) выявлено в пирит-пирротиновой и слюдисто-хло-

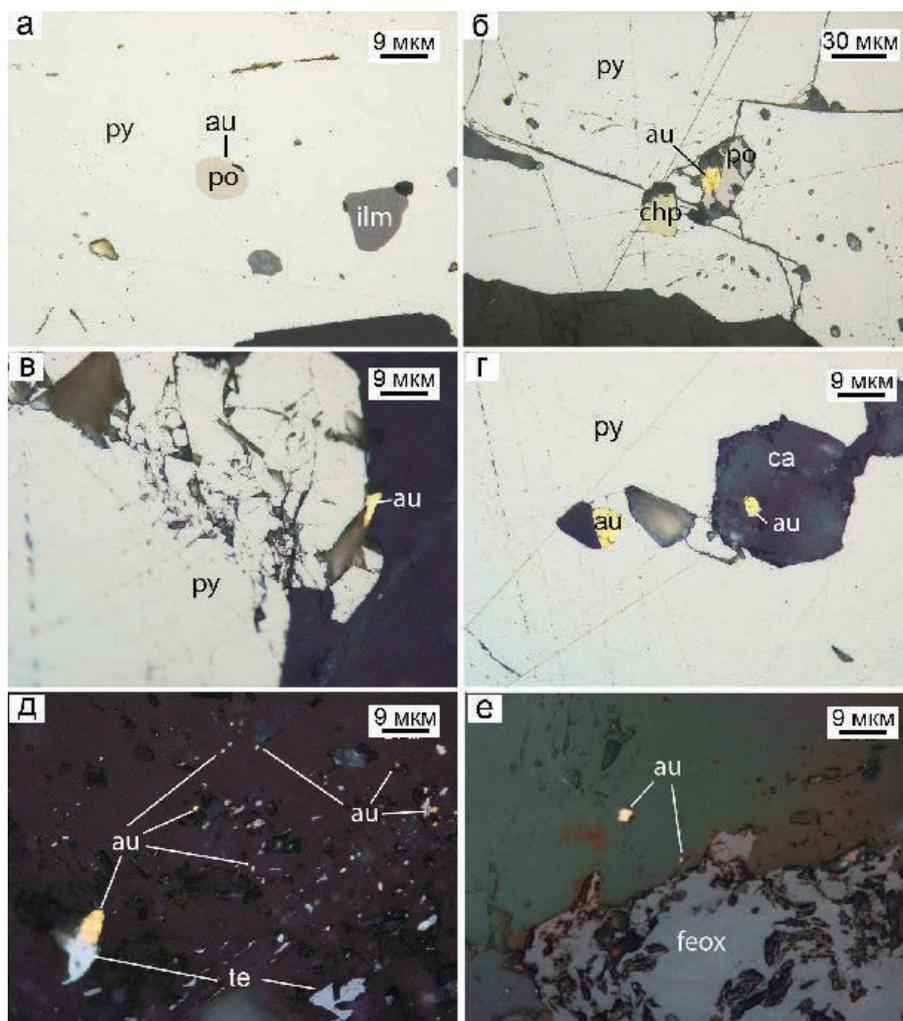


Рис. 8. Взаимоотношения самородного золота, сульфидов и нерудных минералов в рудах Осиновского месторождения: а, б – самородное золото (au) в ассоциации с включениями пирротина (po) в пирите (py), также содержащем включения ильменита (ilm) (а) и халькопирита (chp) (б); в – угловатое зерно самородного золота на контакте трещиноватого пирита и нерудной массы; г – зерна самородного золота в ассоциации с анкеритом (ca) в пирите; д, е – самородное золото в ассоциации с нерудными минералами: многочисленные включения самородного золота и теллуридов (te) в хлорит-слюдиистой массе (д) и в ассоциации с гидроокислами железа (feox) (е). Отраженный свет.

Fig. 8. Relationships of native gold, sulfides and gangue minerals in ores of the Osinovskoe deposit: a, б – native gold (au) in assemblage with pyrrhotite (po) inclusions in pyrite (py), which also contains ilmenite (ilm) (a) and chalcopyrite (chp) (б) inclusions; в – angular native gold grain at the contact between fractured pyrite and rock matrix; г – native gold grains in assemblage with ankerite (ca) in pyrite; д, e – native gold in assemblage with gangue minerals: numerous inclusions of native gold grains and tellurides (te) in chlorite-micaceous matrix (д) and in assemblage with iron hydroxides (feox) (e). Reflected light.

ритовой ассоциациях (рис. 8) в ассоциации с петцитом, гесситом и мелонитом в пирите и с алтаитом, калаверитом и мелонитом среди хлорита и слюды (рис. 9). Химический состав самородного золота характеризуется значительными вариациями содержания Ag (4.26–29.37 мас.%) (табл. 1). Единственное зерно самородного золота размером 4 мкм, обнаруженное в пирите, отличается максимальными содержаниями Ag (табл. 1, ан. 1). Самородное золото в ассоциации с пирротинном характеризуются

небольшими вариациями содержания Ag (6.24–14.89 мас. %) (табл. 1, ан. 2–6, рис. 8а, б). Размер зерен варьирует от 5 до 25 мкм. В нерудной массе содержание Ag в самородном золоте понижается до 4.26 мас. % (табл. 1, ан. 7–10, рис. 8в–е). Размер зерен не более 10–12 мкм. Зерна самородного золота сглажено-угловатой, реже округлой формы также обнаружены в окисленных породах среди нерудных минералов с гидроксидами железа (рис. 8е).

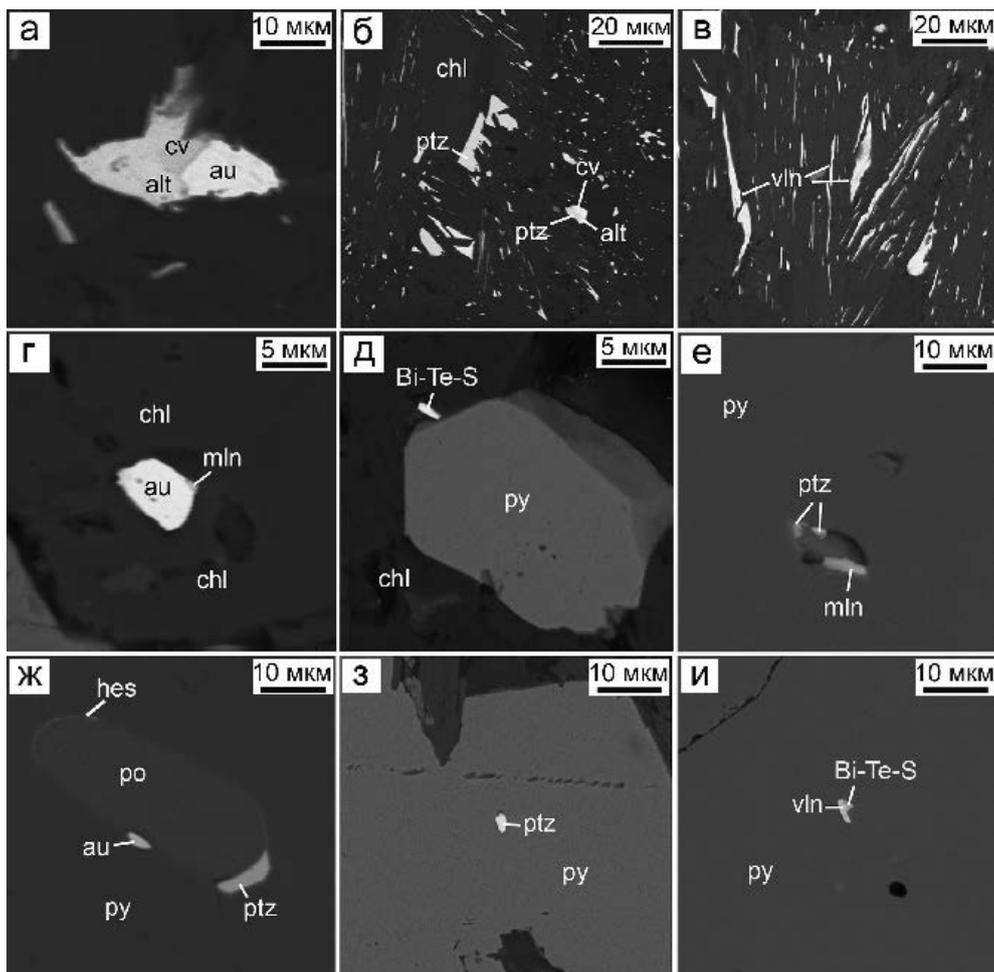


Рис. 9. Морфология самородного золота и теллуридов в слюисто-хлоритовой (а–д) и пирит-пирротиновой (е–и) ассоциациях: а – сросток самородного золота (au), алтаита (alt) и калаверита (cv) среди нерудных минералов; б – сросток калаверита, петцита (ptz) и алтаита и включения петцита в хлорите и слюде (chl); в – включения вольтинскита (vln) по спайности в хлорите и слюде; г – включение самородного золота с каймой мелонита (mln) в хлорите; д – удлиненное зерно минерала Bi-Te-S на контакте пирита (py) и нерудной массы; е – вытянутые включения петцита и мелонита в пирите; ж – включения самородного золота, петцита и гессита (hes) по контурам овального включения пирротина (po) в пирите; з – угловатое включение петцита в пирите; и – сросток вольтинскита и минерала Bi-Te-S в пирите. BSE фото.

Fig. 9. Morphology of native gold and tellurides in micaceous-chlorite (a–d) and pyrite-pyrrothite (e–i) assemblages: a – intergrowth of native gold (au), altaite (alt), and calaverite (cv) in gangue minerals; б – intergrowth of calaverite, petzite (ptz), and altaite and inclusions of petzite grains in chlorite and mica (chl); в – volynskite (vln) inclusions along cleavage in chlorite and mica; г – native gold inclusion with a melonite rim (mln) in chlorite; д – elongated grain of a Bi-Te-S mineral at the contact of pyrite and groundmass; е – elongated petzite and melonite inclusions in pyrite; ж – native gold and hessite (hes) inclusions along the contours of an oval pyrrhotite (po) inclusion in pyrite; з – angular petzite inclusion in pyrite; и – intergrowth of volynskite and Bi-Te-S mineral in pyrite. BSE photo.

Наибольшее разнообразие теллуридов установлено в слюисто-хлоритовой ассоциации (рис. 9). Минералы находятся в тесном срастании с самородным золотом, друг с другом или образуют мономинеральные зерна. Химический состав минералов и формулы приведены в таблице 2.

Алтаит $PbTe$ обычно встречается в ассоциации с самородным золотом и калаверитом или калаверитом и петцитом (рис. 9а, б). Сростки минералов

(~25 мкм) располагаются вдоль спайности пластинчатых агрегатов слюды и хлорита. В отраженном свете алтаит диагностируется по высокой отражательной способности. В сравнении с петцитом он ярко-белый с отчетливо зеленоватым оттенком.

Калаверит $AuTe_2$ обнаружен в тесном срастании с самородным золотом и алтаитом или петцитом (рис. 9а, б), редко минерал образует мелкие включения (1–2 мкм) в пирите. В отраженном свете

Таблица 1

Химический состав золота по данным электронной микроскопии (мас. %)

Table 1

SEM-EDS-based chemical composition of native gold (wt %)

№ п/п	Лабораторный номер	мас. %			Пробность	Формула	Примечание
		Au	Ag	Сумма			
1	23255b	70.63	29.37	100.00	706	Au _{0.57} Ag _{0.43}	Включение в py Сросток с po Сросток с po
2	23258e	92.32	7.68	100.00	923	Au _{0.87} Ag _{0.13}	
3	23258a	85.11	14.89	100.00	851	Au _{0.75} Ag _{0.24}	
4	23257c	93.50	6.50	100.00	935	Au _{0.88} Ag _{0.11}	Сросток с po
5	23257d	93.76	6.24	100.00	938	Au _{0.88} Ag _{0.11}	
6	23257e	93.57	6.43	100.00	936	Au _{0.88} Ag _{0.11}	
7	23255c	92.91	6.55	99.46	931	Au _{0.88} Ag _{0.11}	Сросток с alt и cv Сросток с mln Сросток с ca и py Включение в chl
8	23254g	94.38	5.24	99.61	938	Au _{0.91} Ag _{0.09}	
9	23254f	95.70	4.26	99.96	957	Au _{0.94} Ag _{0.05}	
10	23256a	88.49	11.51	100.00	885	Au _{0.80} Ag _{0.20}	

Примечание. Кристаллохимические формулы рассчитаны на S = 1; py – пирит, po – пирротин, alt – алтаит, cv – калаверитом, mln – мелонит, ca – карбонат, chl – хлорит.

Note. The formulas are recalculated to S = 1; py – pyrite, po – pyrrhotite, alt – altaite, cv – calaverite, mln – melonite, ca – carbonate, chl – chlorite.

Таблица 2

Химический состав теллуридов по данным электронной микроскопии (мас.%)

Table 2

SEM-EDS-based chemical composition of tellurides (wt.%)

№ п/п	Лабораторный номер	Минералы	Au	Ag	Pb	Te	Сумма
1	23255d	Алтаит	–	–	60.67	39.05	99.72
2	23255i		–	–	60.63	39.85	100.47
3	23258g	Гессит	–	61.55	–	38.45	100.00
4	23255e	Калаверит	42.43	–	–	58.05	100.48
5	23255g		42.73	–	–	57.01	99.73
6	23255f	Петцит	24.70	42.03	–	33.88	100.60
7	23255h		24.76	42.28	–	33.81	100.85
8	23258f		22.39	42.94	–	34.68	100.00
9	23258c		20.67	43.59	–	35.74	100.00
п/п	Лаб. номер	Минералы	Кристаллохимическая формула				
1	23255d	Алтаит	Pb _{0.93} Te _{1.00}				
2	23255i		Pb _{0.93} Te _{1.00}				
3	23258g	Гессит	Ag _{1.9} Te _{1.0}				
4	23255e	Калаверит	Au _{0.93} Te _{2.00}				
5	23255g		Au _{0.95} Te _{2.00}				
6	23255f	Петцит	Ag _{3.00} Au _{0.92} Te _{2.00}				
7	23255h		Ag _{3.00} Au _{0.92} Te _{2.00}				
8	23258f		Ag _{3.00} Au _{0.81} Te _{2.00}				
9	23258c		Ag _{3.00} Au _{0.74} Te _{2.00}				

Примечание. Кристаллохимические формулы рассчитаны на Te = 1 (алтаит, гессит) и Te = 2 (калаверит, петцит). Здесь и в табл. 3, прочерк – элемент не обнаружен.

Note. The formulas are recalculated to Te = 1 (altaite, hessite) and Te = 2 (calaverite, petzite). Here and in Table 3, dash – element not found.

калаверит диагностируется по бледно-желтоватому оттенку и наличию четкой анизотропии в розово-желтых, коричневатых и синих тонах.

Теллурид Bi и Ag (вольфрамит AgBiTe₂) образует удлиненные ксеноморфные зерна (до 25 мкм) по спайности хлорита и слюды, а также угловатые сростки с минералом Bi-Te-S или Bi-Te (до 2 мкм) в

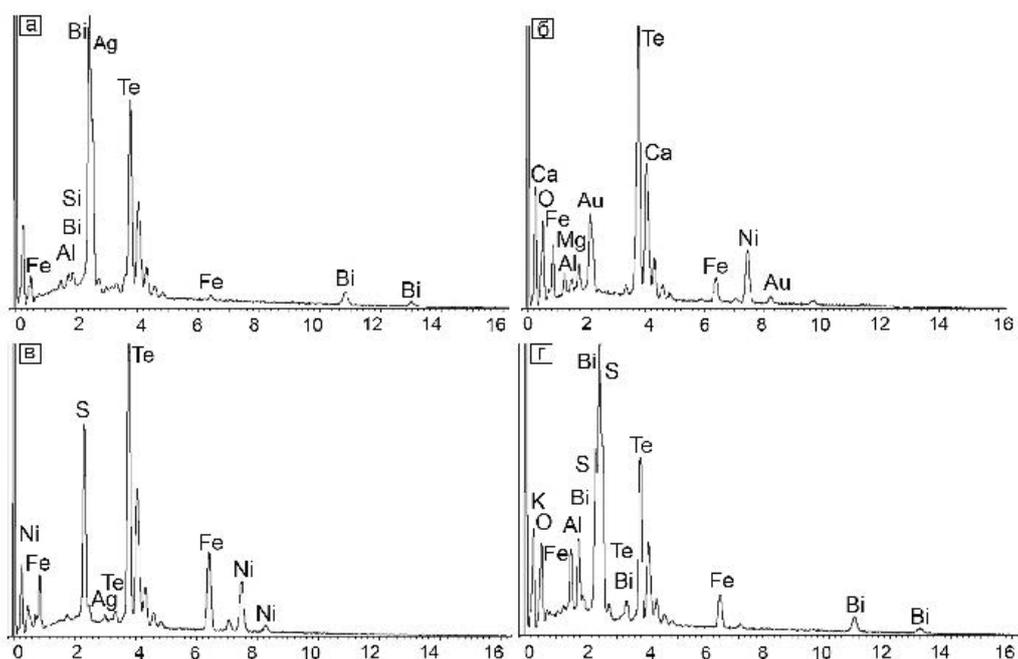


Рис. 10. Энергодисперсионные спектры вольтинскита среди нерудных минералов (а), мелонита в нерудной массе (б) и в пирите (в) и минерала Bi-Te-S (г) среди нерудных минералов.

Fig. 10. Energy-dispersive spectra of volynskite in gangue minerals (а), melonite in gangue minerals (б) and pyrite (в), and a Bi-Te-S mineral (г) in gangue minerals.

пирите (рис. 9в, и). В отраженном свете вольтинскит имеет характерный розоватый цвет; он существенно темнее сосуществующего минерала Bi. Минерал диагностирован по характерным оптическим свойствам и энергодисперсионному спектру, который содержит линии Bi, Ag и Te (рис. 10а).

Мелонит $NiTe_2$ наблюдается в виде угловатого зерна (2–3 мкм) на контакте самородного золота и анкерита, заключенных в пирите (рис. 9г). Иногда мономинеральные пластинчатые зерна мелонита наблюдаются в пирите (рис. 9е). Размер таких зерен по удлинению может достигать 6 мкм. Минерал определен на основании энергодисперсионных спектров, которые содержат линии Ni и Te (рис. 10б, в). Присутствие на спектрах линий Ca, Fe, Mg и Al обязано нерудной матрице (рис. 10б), а S и Fe – пириту (рис. 10в).

Минерал Bi-Te-S встречен в виде пластинчатого зерна (2 мкм по удлинению) на контакте пирита и нерудной массы (рис. 9д), а также в сростании с вольтинскитом в пирите (рис. 9и). Мелкий размер зерен позволил получить только энергодисперсионные спектры. Учитывая, что зерна находятся в ассоциации с пиритом, однозначно сказать, что это Bi-Te-S или Bi-Te минерал, невозможно.

Петцит Ag_3AuTe_2 , гессит Ag_2Te и Ag-содержащий галенит установлены в пирите в ассо-

циации с самородным золотом и в виде самостоятельных зерен. Зерна петцита, гессита и самородного золота располагаются по контурам овальных включений пирротина в пирите, формируя включения размером до 5 мкм или кайму мощностью не более 2 мкм (рис. 9ж). Также петцит встречается в виде мономинеральных угловатых включений (до 5 мкм) в пирите или удлинённых зерен (до 30 мкм) среди нерудных минералов (рис. 9з). В ассоциации с петцитом встречено пластинчатое зерно мелонита (рис. 9е). Петцит имеет умеренную отражательную способность, близкую к гесситу, но хорошо отличим от последнего благодаря изотропности. Гессит встречается в виде округлых мономинеральных включений (3–4 мкм) в пирите. Оптически гессит хорошо отличается от соседствующих с ним рудных минералов по цветным эффектам анизотропии (коричневатые и сине-фиолетовые тона). Ag-содержащий галенит найден в виде единственного вытянутого включения в пирите. По удлинению минерал достигает 10 мкм, в ширину менее 2 мкм. Примесь Ag в минерале диагностирована по энергодисперсионному спектру.

Торий-уран-редкоземельная минерализация представлена разнообразными по составу минералами РЗЭ, Th и U (рис. 11). В слюдястых сланцах установлены гидроксилбастнезит-(Ce),

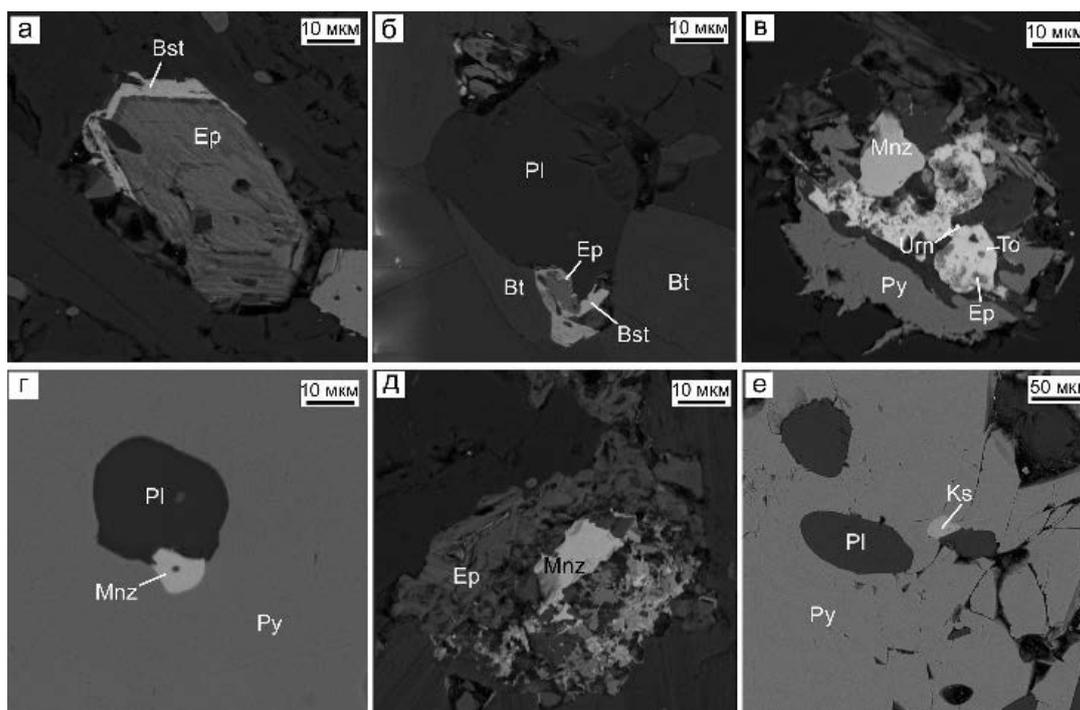


Рис. 11. Торий-уран-редкоземельная минерализация в рудовмещающих отложениях Осиновского месторождения: а – кристалл эпидота (Ep) с каймой гидроксилбастнезита-(Ce) (Bst); б – сростки эпидота и гидроксилбастнезита-(Ce) между кристаллами плагиоклаза (Pl) и биотита (Bt); в – РЗЭ-минералы (Mnz) и РЗЭ-содержащие минералы (Urn, To) в окружении эпидота, пирита (Py) и хлорита (черное); г – включение монацита-(Ce) в сростании с плагиоклазом в пирите; д – сросток монацита-(Ce) и эпидота в окружении слюды и хлорита; е – включение ксенотима-(Y) (Ks) в пирите. BSE фото.

Fig. 11. Th-U-REE mineralization in host rocks of the Osinovskoe deposit: а – epidote crystal (Ep) with a hydroxylbasnäsite-(Ce) (Bst); б – intergrowths of epidote and hydroxylbasnäsite-(Ce) between plagioclase (Pl) and biotite (Bt) crystals; в – REE minerals (Mnz) and REE-bearing minerals (Urn, To) surrounded by epidote, pyrite (Py) and chlorite (black); г – monazite-(Ce) inclusion intergrown with plagioclase in pyrite; д – monazite-(Ce) and epidote intergrowth surrounded by mica and chlorite; е – xenotime-(Y) (Ks) inclusion in pyrite. BSE photo.

монацит-(Ce) и ксенотим-(Y), алланит-(Ce), РЗЭ-содержащие эпидот, циркон и апатит, торит и уранинит. Перечисленные минералы тесно ассоциируют с пиритом и пирроотином.

РЗЭ-содержащий эпидот – распространенный минерал изученных пород. Он образует зерна размером до 100–120 мкм среди плагиоклаза, хлорита, слюды и пирита (рис. 11а–в, д). В тесной ассоциации с эпидотом всегда встречается гидроксилбастнезит-(Ce), реже – монацит и торит. Эпидот образует зональные и неоднородные в отраженных электронах кристаллы с гексагональным сечением (размер до 100 мкм) (рис. 11а), а также пористые ксеноморфные зерна иногда тонкопластинчатого строения (рис. 11д). Эпидот, как правило, замещается гидроксилбастнезитом-(Ce) по внешним контурам. В центральной части эпидота встречаются хлорит и слюда. В составе эпидота диагностированы легкие РЗЭ (ЛРЗЭ) и Th (0.55–1.22 мас. % ThO₂)

(табл. 3). В одном из анализов содержание РЗЭ + Th достигает 0.58 формульных единиц (ф.е.) (табл. 3, ан. 4), что позволяет отнести минерал к алланиту-(Ce) (>0.5 ф.е. (Giere, Sorensen, 2004)).

Гидроксилбастнезит-(Ce) встречается всегда в виде кайм обрастания мощностью до 4 мкм вокруг эпидота (рис. 11а, б). В одном из образцов гидроксилбастнезит-(Ce) почти полностью замещает эпидот. Минерал содержит 2.81–3.16 мас. % SrO и 1.55 мас. % ThO₂ (табл. 3).

Торит встречен в виде субгедральных кристаллов размером до 40 мкм в ассоциации с эпидотом, монацитом и пиритом (рис. 11в). В химическом составе торита установлены примеси Y, ЛРЗЭ и Pb (табл. 3).

Монацит-(Ce) встречается часто в составе сложных сростков с эпидотом, торитом, хлоритом и пиритом (рис. 11в), реже – в сростании с округлыми зернами плагиоклаза в пирите (рис. 11г, д). В пер-

Таблица 3

Химический состав РЗЭ минералов, РЗЭ-содержащих минералов и минерала Th (мас. %)

Table 3

Chemical composition of REE minerals, REE-bearing minerals and Th mineral (wt. %)

Минерал	Эпидот			Алланит	Гидроксилбастнезит	Торит	Монацит			Ксенотим	
Лабораторный номер	23255i	23254e	23254c	23256e	23256d	23256f	23255n	23257j	23255k	23255o	23256f
Оксиды											
№ анализа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
MgO	0.53	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Al ₂ O ₃	21.65	24.38	20.97	20.05	–	–	–	–	–	–	–
SiO ₂	35.11	37.15	34.36	33.44	–	–	14.73	–	–	–	–
FeO	10.64	9.73	12.16	12.33	–	–	1.05	–	–	–	–
P ₂ O ₅	–	–	–	–	–	–	2.94	30.48	30.44	30.85	34.73
CaO	12.64	15.92	14.33	13.61	7.58	7.39	1.78	0.52	0.87	0.66	–
SO ₃	–	–	–	–	–	–	1.68	–	–	–	–
Y ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	3.32	–	–	–	44.30
La ₂ O ₃	2.48	1.97	3.68	3.98	10.00	9.53	–	13.64	13.56	13.74	–
Ce ₂ O ₃	6.49	4.91	7.63	8.19	24.68	26.15	0.58	29.70	28.99	30.38	–
Pr ₂ O ₃	0.90	0.25	0.57	0.89	2.59	2.88	–	2.81	3.12	3.48	–
Nd ₂ O ₃	3.82	1.99	3.99	4.07	10.93	10.61	1.44	14.73	14.29	13.88	–
Sm ₂ O ₃	–	0.36	–	0.78	–	0.95	0.74	1.83	2.44	2.21	–
Gd ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	2.47	3.19	3.32	2.67	1.66
Dy ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2.87
Ho ₂ O	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.37
Er ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	4.72
Tm ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.70
Yb ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	8.97
ThO ₂	1.22	0.55	–	–	–	1.55	60.29	2.98	3.46	2.55	–
PbO	–	–	–	–	–	–	0.69	–	–	–	–
UO ₂	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.87
SrO	–	–	–	–	2.81	3.16	–	–	–	–	–
CO ₂ расч.	–	–	–	–	20.02	20.78	–	–	–	–	–
H ₂ Oрасч.	1.90	2.03	1.85	1.81	7.73	8.03	–	–	–	–	–
Сумма	97.38	99.23	99.55	99.15	86.34	94.03	91.73	99.87	100.48	100.41	100.22

Кристаллохимические формулы

1. (Ca_{1.16}Ce_{0.20}Nd_{0.12}La_{0.08}Mg_{0.07}Pr_{0.03}Th_{0.02})_{1.67}(Al_{2.18}Fe_{0.76})_{2.93}[Si₂O₇] [SiO₄]O[OH]
2. (Ca_{1.38}Ce_{0.15}La_{0.06}Nd_{0.06}Pr_{0.01}Sm_{0.01}Th_{0.01})_{1.67}(Al_{2.32}Fe_{0.66})_{2.97}[Si₂O₇] [SiO₄]O[OH]
3. (Ca_{1.34}Ce_{0.24}La_{0.12}Nd_{0.12}Pr_{0.02})_{1.85}(Al_{2.15}Fe_{0.88})_{3.04}[Si₂O₇] [SiO₄]O[OH]
4. (Ca_{1.31}Ce_{0.27}La_{0.13}Nd_{0.13}Pr_{0.03}Sm_{0.02})_{1.89}(Al_{2.12}Fe_{0.92})_{3.04}[Si₂O₇] [SiO₄]O[OH]
5. (Ce_{0.33}Ca_{0.30}Nd_{0.14}La_{0.13}Sr_{0.06}Pr_{0.03})_{1.00}(CO₃)(OH)
6. (Ce_{0.34}Ca_{0.28}Nd_{0.13}La_{0.12}Sr_{0.06}Pr_{0.04}Sm_{0.01}Th_{0.01})_{1.00}(CO₃)(OH)
7. (Th_{0.73}Ca_{0.10}Fe_{0.05}Gd_{0.04}Nd_{0.03}Ce_{0.01}Pb_{0.01})_{1.07}(Si_{0.78}P_{0.13}S_{0.07})_{0.98}O_{4.00}
8. (Ce_{0.43}Nd_{0.21}La_{0.20}Gd_{0.04}Pr_{0.04}Th_{0.03}Ca_{0.02}Sm_{0.02})_{0.98}P_{1.01}O_{4.00}
9. (Ce_{0.41}Nd_{0.20}La_{0.19}Gd_{0.04}Pr_{0.04}Ca_{0.04}Sm_{0.03}Th_{0.03})_{1.00}P_{1.00}O_{4.00}
10. (Ce_{0.43}La_{0.20}Nd_{0.19}Pr_{0.05}Ca_{0.03}Sm_{0.03}Gd_{0.03}Th_{0.02})_{0.98}P_{1.01}O_{4.00}
11. (Y_{0.79}Yb_{0.09}Er_{0.05}Dy_{0.03}Gd_{0.02}Ho_{0.01}Tm_{0.01}U_{0.01})_{1.01}P_{0.99}O_{4.00}

Примечание. Кристаллохимические формулы эпидота, алланита рассчитана с нормализацией на анион (сумма анионов = 3), добавочный кислород и OH – теоретические; формулы гидроксилбастнезита рассчитана с нормализацией на катион (сумма = 1), анион (CO₃) и добавочный анион (OH) – теоретические; формулы для монацита, ксенотима и торита рассчитаны по зарядам, количество кислорода = 4.

Note. The formulas of epidote are recalculated with normalization for anion (anion sum of 3), additional oxygen and OH are theoretical; the formulas of hydroxylbastnäsite-(Ce) are recalculated with normalization for cation (sum of 1), anion (CO₃) and additional anion (OH) are theoretical; the formulas for monazite, xenotime and thorite are recalculated to charges, the amount of oxygen = 4.

вом случае минерал образует хорошо оформленные кристаллы размером 30–35 мкм, во втором – сглажено-угловатые зерна размером 12 мкм. Несмотря на различные минеральные ассоциации и морфологию химический состав монацита не отличается. Минерал содержит примеси РЗЭ, ThO₂ (2.55–3.46 мас. %) и CaO (0.52–0.87 мас. %) (табл. 3).

Ксенотим-(У) встречается крайне редко, образуя сглажено-угловатые зерна размером до 30 мкм в пирите (рис. 11е). В химическом составе ксенотима обнаружены примеси преимущественно тяжелых РЗЭ и U (0.87 мас. % UO₂) (табл. 3).

Редкие циркон и уранит образуют мелкие включения в эпидоте, не превышающие 2–5 мкм.

Обсуждение результатов и выводы

Проведенные исследования показывают, что вмещающие сланцы Осиновского золото-кварцевого месторождения на Среднем Урале интенсивно изменены под действием динамометаморфизма и последующего метасоматического преобразования. Среди этих процессов на первое место следует поставить процессы пластических деформаций, которые сопровождаются физико-химическими преобразованиями.

Пластическая деформация минералов с сохранением кристаллического состояния в условиях относительно небольших температур и давлений осуществляется тремя главными способами (Вернон, 1980; Никола, 1992): «1 – дислокационным скольжением, при котором некоторый слой кристаллической решетки смещается по отношению к другому слою на расстояние кратное параметру элементарной ячейки (в шлифах отражается волнистым погасанием зерен); 2 – двойниковым скольжением, или механическим двойникованием, при котором происходит сдвиг каждого слоя кристаллической решетки на расстояние, обеспечивающее точное зеркальное отображение исходного кристалла (появление механических двойников в зернах плагиоклаза); 3 – образованием полос излома, возникающих при существенном изгибе решетки (изгибы в зернах кварца, наблюдаемые в зернах кварца при исследовании с анализатором)». Воздействие давления проявлялось по-разному и зависело не только от интенсивности и длительности процесса, но и от температурного режима и состава исходных пород (Маркс, 1969; Маракушев, Бобров, 2005).

Типичные полосчатые текстуры и порфирибластовые структуры исходных пород под действием давления превращались в катакlastические, брекчиевые, линзовидно-полосчатые, плейчатые, пятнистые. Возникали ослабленные зоны в виде трещин и зон дробления. Минералы в породах также претерпели интенсивные деформации, как хрупкие, так и пластические. Особенно чувствительным в этом отношении является кварц, зерна которого чутко реагируют на тектоническое воздействие. Для кварца при температуре до 300 °С наиболее характерны структуры дробления зерен и структуры растворения под давлением (Елисеев, 1959; Кирмасов, 2011). Хрупкое разрушение проявляется при высоких скоростях деформации. Кварц без флюидных включений или с их небольшим содержанием рекристаллизуется с образованием новой генерации мелких кварцевых зерен с однородным погасанием и без примесей. Местами формируется псевдопорфирибластовая структура. При наличии флюидных включений и низкой скорости деформации в низкотемпературных условиях признаками растворения в кварце являются тени растворения, пустоты и щелевидные трещины (Кирмасов, 2011; Граменицкий, 2012). Плагиоклаз под воздействием давления ведет себя по-разному. В низкотемпературных условиях преобладает дробление (Флинн, 1967), при высоких температурах и умеренных деформациях отмечаются механические двойники и волнистое погасание фрагментированных зерен, часто окруженных рекристаллизованными мелкими зернами (Елисеев, 1959; Кирмасов, 2011; Граменицкий, 2012). Слюды деформируются с образованием структур фрагментации, микрокливажной плейчатости и микроскладок. Кальцит и хлорит, которые образовались в процессе метасоматоза, также содержат признаки воздействия давления. При растворении кальцита на границах зерен могут возникать микростилолитовые швы, а дислокационное скольжение и фрагментация зерен отмечается в условиях низких и средних ступеней метаморфизма (Елисеев, 1959). При низких температурах и давлении в зернах кальцита и клинохлора нередко возникает двойникование. Все эти «ослабленные» зоны являются путями для проникновения рудообразующих флюидов. Кристаллизация новых минералов в процессе метаморфизма происходила в условиях одностороннего давления, о чем свидетельствует интенсивная деформация новообразованных минералов (мусковита, биотита, хлорита, кальцита, турмалина, апатита), иногда с

элементами вращения, с микрокливажными зонами и следами растворения. В наиболее интенсивно деформированных участках сформировались сульфидно-кварцевые, сульфидно-кварц-карбонатные и сульфидно-слюдисто-хлоритовые минеральные ассоциации. Именно к таким участкам и ассоциациям приурочены находки минералов Au и Te.

Метаморфическая ремобилизация подтверждается наложенными деформациями и появлением пирита с псевдографической структурой, обусловленной замещением его нерудными минералами или халькопиритом местами по отдельности. Такие структуры, характерны для регенерированных колчеданных руд, например, Западного медно-скарнового проявления на Полярном Урале (Сафина и др., 2015а). Пиритовые агрегаты со структурой «птичьего глаза» широко распространены в пирротинсодержащих рудах колчеданных месторождений, метаморфизованных в различных условиях (Маукское, Тарньерское, Ишкининское и др.), и медно-скарновых объектах (Западное) (Ярош, 1973; Буслаев и др., 1988; Мелекесцева, 2007; Сафина и др., 2010; Сафина и др., 2015б). Пластинчатое строение некоторых кристаллов пирита, вероятно, унаследовано от пирротина.

Особенностью вмещающих пород Осиновского месторождения является присутствие многочисленных минералов РЗЭ в тесной ассоциации с минералами U и Th. Подобные ассоциации известны в метаосадках (черных сланцах), претерпевших диагенетические и начальные метаморфические изменения в пределах Бодайбинского рудного района (Шепель и др., 2021; Паленова и др., 2022), Удоканских железистых песчаниках (Belogub et al., 2022; Novoselov et al., 2023), тонкослоистых сульфидных рудах Талганского колчеданного месторождения (Аюпова и др., 2019), рудовмещающей толще Сафьяновского колчеданного месторождения (Сорока и др., 2023). Отличием Осиновского месторождения является то, что минералы РЗЭ и Th обнаружены в интенсивно измененных в условиях метаморфизма (от зеленокаменной фации до эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций) вулканических породах. Замещение эпидота гидроксилбастнезитом-(Ce), вероятно, приводило к высвобождению элементов и формированию торита и уранинита (Сердюченко и др., 1967; Gieré, Sorensen, 2004; Паленова и др., 2022).

Таким образом, проведенные оптико-минералогические исследования позволили установить генетическую связь золотого оруденения с про-

цессами динамометаморфизма и сопряженного метасоматоза, выявить особенности минерального состава вмещающих пород Осиновского месторождения, установить новые для объекта минералы и минеральные ассоциации благородных металлов. Полученные данные могут быть полезны при разработке золоторудных месторождений и разведке многочисленных рудопроявлений золота.

Авторы благодарны сотрудникам ООО «Геопроиск» за предоставленные материалы, а также рецензенту, Е.В. Белогуб и И.Ю. Мелекесцевой за замечания, которые были учтены при подготовке окончательного варианта статьи. Часть аналитических работ и обобщение результатов выполнено в рамках государственного задания ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (темы № 122031600292-6, № 122040600006-1).

Литература

- Аюпова Н.Р., Масленников В.В., Филиппова К.А.** (2019) Геохимия и минералогия редкоземельных элементов в рудах Талганского медно-цинково-колчеданного месторождения, Южный Урал. *Доклады Академии наук*, 487(6), 659–662.
- Буслаев Ф.П., Маркс В.А., Прахова Е.В.** (1988) Маукское месторождение / Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение. Свердловск, УНЦ АН СССР, 164–171.
- Ведерников В.В., Двоглазов Д.А.** (1997ф) Отчет по опережающим геофизическим и геохимическим работам и геологическому доизучению масштаба 1 : 50000 с общими поисками золота и меди в пределах Соосновской площади (топопланшеты О-41-123-А, Б, В, Г и О-41-135-А) за 1987–1995 гг. Верхняя Пышма, 1474 с.
- Вернон Р.Х.** (1980) *Метаморфические процессы*. М., Недра, 226 с.
- Галкин В.Н.** (1993) Роль флюидов в формировании структурных парагенезисов. *Вестник МГУ, Геология*, (5), 59–70.
- Граменицкий Е.Н.** (2012) *Петрология метасоматических пород*. М., ИНФРА-М, 221 с.
- Елисеев Н.А.** (1959) *Метаморфизм*. Москва, МГУ, 415 с.
- Кирмасов А.Б.** (2011) *Основы структурного анализа*. Москва, Научный мир, 368 с.
- Коровко А.В., Двоглазов Д.А., Кузовков Г.Н. и др.** (2015) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Среднеуральская. Лист О-41-XXXII. Объяснительная записка. М., ВСЕГЕИ, 274 с.
- Маракушев А.А., Бобров А.В.** (2005) *Метаморфическая петрология*. М., Наука, 256 с.

Маркс В.А. (1969) Метаморфизм альбит-эпидот-амфиболитовой фации горных пород зеленокаменной зоны в Верхне-Уфалейском районе на Среднем Урале / Метаморфизм горных пород главной вулканогенной зоны Урала. М., Наука, 120–207.

Мелекесцева И.Ю. (2007) Гетерогенные кобальт-медноколчеданные месторождения в ультрамафитах палеоостроводужных структур. М., Наука, 245 с.

Николя А. (1992) Основы деформации горных пород. М., Мир, 167 с.

Паленова Е.Е., Рожкова Е.А., Белогуб Е.В., Рассомахин М.А. (2022) Минералы РЗЭ в черных сланцах раннепротерозойской михайловской свиты (Байкало-Патомское нагорье, Сибирь). *Минералогия*, **8**(3), 47–66.

Сафина Н.П., Кабанова Л.Я., Кузнецов Д.А., Блинов И.А. (2015а) Метаморфизованные сульфидные руды проявления меди Лучистое, Южный Урал. *Минералогия*, (4), 79–90.

Сафина Н.П., Масленников В.В., Масленникова С.П., Глушков А.Н. (2010) Минералого-геохимические особенности сульфидных руд рудопроявления «Западное», Приполярный Урал. *Материалы XIII научно-практической конференция «Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО-Югры»*, Ханты-Мансийск, 492–501.

Сафина Н.П., Масленников В.В., Масленникова С.П., Котляров В.А., Данюшевский Л.В., Ларж Р.Р., Блинов И.А. (2015б) Сульфидно-магнетитовые руды Маукского медноколчеданного месторождения (Средний Урал): состав и генезис. *Геология рудных месторождений*, **57**(3), 221–238.

Сердюченко Д.П., Лутц Б.Г., Минеев Д.А., Кочетков О.С., Павлов В.А. (1967) Редкие элементы в породах различных метаморфических фаций. М., Наука, 199 с.

Сорока Е.И., Притчин М.Е., Леонова Л.В., Булатов В.А. (2023) Редкоземельные фторкарбонаты в породах Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения (Средний Урал). *Доклады Академии наук*, **508**(1), 50–57.

Флинн Д. (1967) Деформации при метаморфизме / Природа метаморфизма. Москва, Мир, 49–78.

Шепель Е.В., Аюпова Н.Р., Рассомахин М.А., Хворов П.В. (2021) Торий-уран-редкоземельная минерализация Угаханского золоторудного месторождения в углеродистых сланцах, Бодайбинский рудный район (Иркутская обл.). *Минералогия*, **7**(3), 78–93.

Ярош П.Я. (1973) Диагенез и метаморфизм колчеданных руд на Урале. Москва, Наука, 240 с.

Belogub E.V., Novoselov K.A., Shilovskikh V.V., Blinov I.A., Palenova E.E. (2022) Rare-earth elements and Th minerals in the metasandstones of the Udokan Basin (Russia). *Geology of Ore Deposits*, **64**(7), 125–140.

Gieré R., Sorensen S.S. (2004) Allanite and other REE-rich epidote-group minerals. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, **56**, 431–493.

Novoselov K., Belogub E., Shilovskikh V., Artemyev D., Blinov I., Filippova K. (2023) Origin of ironstones of the Udokan Cu deposit (Siberia, Russia): A key study using SEM and LA-ICP-MS. *Journal of Geochemical Exploration*, **249**, 107–221.

References

Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Filippova K.A. (2019) REE geochemistry and mineralogy in ores of the Talgan Cu-Zn massive sulfide deposit, Southern Urals. *Doklady Earth Sciences*, **487**, 973–975.

Belogub, E.V., Novoselov, K.A., Shilovskikh, V.V., Blinov, I.A., Palenova, E.E. (2022) Rare-earth elements and Th minerals in the metasandstones of the Udokan Basin (Russia). *Geology of Ore Deposits*, **64**(7), 125–140.

Buslaev F.P., Marx V.A., Prakhova E.V. (1988) [Mauk deposit] In: *Mednokolchedannye mestorozhdeniya Urals: Geologicheskoe stroenie [Massive sulfide deposits of the Urals: Geological structure]*. Sverdlovsk, UNTs AN USSR, 164–171. (in Russian)

Eliseev N.A. (1959) [Metamorphism]. Moscow, MGU, 415 p. (in Russian)

Flynn D. (1967) [Deformations under metamorphism]. In: *Priroda metamorfizma [The Nature of Metamorphism]*. Moscow, Mir, 49–78. (in Russian)

Galkin V.N. (1993) The role of fluids in formation of structural assemblages. *Vestnik MGU. Geologiya [Bulletin of Moscow State University. Geology]*, (5), 59–70 (in Russian)

Gieré R., Sorensen S.S. (2004) Allanite and other REE-rich epidote-group minerals. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, **56**, 431–493.

Gramenitsky E.N. (2012) [Petrology of metasomatic rocks]. Moscow, INFRA-M, 221 p. (in Russian)

Kirmasov A.B. (2011) [Basics of structural analysis]. Moscow, Nauchny mir, 368 p. (in Russian)

Korovko A.V., Dvoeglazov D.A., Kuzovkov G.N. et al. (2015) [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200000. Second edition. Central Urals Series. Sheet O-41-XXXII. Explanatory note]. Moscow, VSEGEI, 274 p. (in Russian)

Marakushev A.A., Bobrov A.V. (2005) [Metamorphic petrology]. Moscow, Nauka, 256 p. (in Russian)

Marx V.A. (1969) [Metamorphism of albite-epidote-amphibolite facies of rocks of the greenstone zone in the Verkhny Ufaley district in the Central Urals]. In: *Metamorfizm gornykh porod glavnoy vulkanogennoy zony Urals [Metamorphism of Rocks of the Main Volcanic Zone of the Urals]*. Moscow, Nauka, 120–207. (in Russian)

Melekstseva I.Yu. (2007) [Heterogeneous Co-bearing massive sulfide deposits in ultramafic rocks of paleoisland-arc structures]. Moscow, Nauka, 245 p. (in Russian)

Nicolas A. (1992) [Basics of rock deformations]. Moscow, Mir, 167 p. (in Russian)

Novoselov K., Belogub E., Shilovskikh V., Blinov I., Filippova K. (2023) Origin of ironstones of the Udokan Cu deposit (Siberia, Russia): A key study using SEM and LA-ICP-MS. *Journal of Geochemical Exploration*, **249**, 107–221.

Palenova E.E., Rozhkova E.A., Belogub E.V., Rassomakhin M.A. (2022) [REE minerals in black shales of the Paleoproterozoic Mikhailovka Formation (Baikal-Patom Highland, Siberia)]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **8**(3), 47–66. (in Russian)

Safina N.P., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Glushkov A.N. (2010) [Mineralogical and geochemical features of sulfide ores of the Zapadnoye ore occurrence, Subpolar Urals]. *Materialy of XIII nauchno-prakticheskoy konferentsii "Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala KHMAO-Yugry" ["Materials of the XIII Scientific-Practical Conference Ways to Implement the Petroleum and Ore Potential of KhMAO-Ugra"]*, Khanty-Mansiysk, 492–501. (in Russian)

Safina N.P., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Kotlyarov V.A., Danyushevsky L.V., Large R.R., Blinov I.A. (2015) Banded sulfide-magnetite ores of Mauk copper massive sulfide deposit, Central Urals: composition and genesis. *Geology of Ore Deposits*, **57**, 191–212.

Safina N.P., Kabanova L.Ya., Kuznetsov D.A., Blinov I.A. (2015) [Metamorphosed sulfide ores of the Luchistoye Cu occurrence, South Urals]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, (4), 79–90. (in Russian)

Serdyuchenko D.P., Lutz B.G., Mineev D.A., Kochetkov O.S., Pavlov V.A. (1967) [Rare elements in rocks of various metamorphic facies]. Moscow, Nauka, 199 p. (in Russian)

Shepel E.V., Ayupova N.R., Rassomakhin M.A., Khvorov P.V. (2021) [Thorium, uranium and rare-earth mineralization of the Ugakhan gold deposit, Bodaibo ore region]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **7**(3), 78–93. (in Russian)

Soroka E.I., Pritchkin M.E., Leonova L.V., Bulatov V.A. (2022) Rare-earth fluorocarbonates in rocks of the Saf'yanovka Cu–Zn massive sulfide deposit, Middle Urals. *Doklady Earth Sciences*, **507**, S262–S268.

Vedernikov V.V., Dvoeglazov D.A. (1997) [Unpublished report on advanced geophysical and geochemical works and additional geological exploration on a scale of 1 : 50 000 with a general search for gold and copper within the Sosnovskaya area (topographic sheets O-41-123-A, B, C, D and O-41-135-A) for 1987–1995]. Verkhnyaya Pyshma, 1474 p. (in Russian)

Vernon R.H. (1980) [Metamorphic processes]. Moscow, Nedra, 226 p. (in Russian)

Yarosh P.Ya. (1973) [Diagenesis and metamorphism of sulfide ores in the Urals]. Moscow, Nauka, 240 p. (in Russian)