

**МЕДИСТЫЕ СЛАНЦЫ ПРИКОЛЫМСКОГО ТЕРРЕЙНА (СЕВЕРО-ВОСТОК
РОССИИ): МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ
РУДООБРАЗОВАНИЯ**

Н.Е. Савва¹, А.В. Волков², А.Л. Галямов², Е.Е. Колова¹, К.Ю. Мурашов²

¹ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН,
ул. Портовая 16, г. Магадан, 685000; e-mail: nsavva7803@mail.ru

²ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
пер. Старомонетный 35, Москва, 119017; e-mail: tma2105@mail.ru

Поступила в редакцию 11 мая 2023 г.

Медная минерализация на территории Магаданской области (Северо-Восток России) установлена в кварц-хлоритовидных и хлоритовых сланцах среднего и верхнего рифея Приколымском террейна. Медистые сланцы месторождения Ороёк по сравнению с верхней корой заметно обогащены узким спектром микроэлементов: Cu, Ag, Au, Rh, Se, коэффициенты обогащения которых достигают от нескольких десятков (Se, Rh) до сотен (Ag, Au) и тысяч (Cu) раз, что, по-видимому, свидетельствует об их синхронном участии в рудообразовании. Кроме того, изученные образцы незначительно обогащены Cd, Li, Co, Zn, V, U, Sc, Y и REE. Для медистых сланцев характерен близкий к хондритовому слабонаклонный спектр REE, в котором отсутствуют отчетливые Eu минимумы и максимумы и преобладают легкие лантаноиды. Величины Ce/Ce* и Eu/Eu* указывают на окислительные условия, существовавшие при рудообразовании. Полученные геохимические данные показывают, что вмещающие рифейские толщи могли служить источником микроэлементов и REE рудообразующих флюидов. В рудах среди минералов меди преобладают ковеллин и халькоцит, незначительно развиты роксбиит, идаит, нукундамит, спионкопит, халькопирит, серебросодержащие (Ag около 1 мас. %) борнит и ярровит, а также самородное золото. По флюидным включениям в кварце определено, что медная минерализация формировалась при температурах 212–190 °С и давлении 1 кбар из гидротермальных растворов средней солености (от 13.8 до 12.4 мас. % экв. NaCl) и высокой плотности (0.95–0.98 г/см³), насыщенных хлоридами Ca, Mg и K. Медистые сланцы Приколымского террейна отличаются от медистых песчаников и сланцев Африканского пояса низкими содержаниями Co и Ni, а от Купфершифера – низкой концентрацией Pb и Zn. Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании новых месторождений.

Ключевые слова: медистые сланцы, минералого-геохимические особенности, флюидные включения, Приколымский террейн, Северо-Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

Месторождения медистых песчаников (МП) и сланцев (МС) – один из ведущих типов в мире по запасам и добыче Cu – около 13 и 20 %, соответственно. Кроме того, из руд этих месторождений добывается 80 % Co и заметное количество Ag, иногда Au и платиноиды. Наиболее крупные стратиформные месторождения медистых песчаников и сланцев находятся в Казахстане (Джезказган), Польше (Купфершифер), Замбии (Нчанга, Муфугир, Нкана и др.), Заире (Камото, Мусоши и др.), Афганистане (Айнак). Из российских МП наибольший интерес для горнодобывающей

промышленности представляет месторождение Удокан – одно из крупнейших в мире [4].

На территории Среднеканского района Магаданской области в 1930-х годах медистые песчаники и сланцы были выявлены в отложениях среднего и верхнего рифея Приколымского поднятия (рис. 1). Одно из перспективных и наиболее изученных рудопроявлений, получившее название Ороёк, располагается на правом берегу р. Колымы (рис. 2), в ее среднем течении, в 220 км к северу от пос. Сеймчан. По результатам атомно-абсорбционного анализа проб среднее содержание меди по одному из опробован-

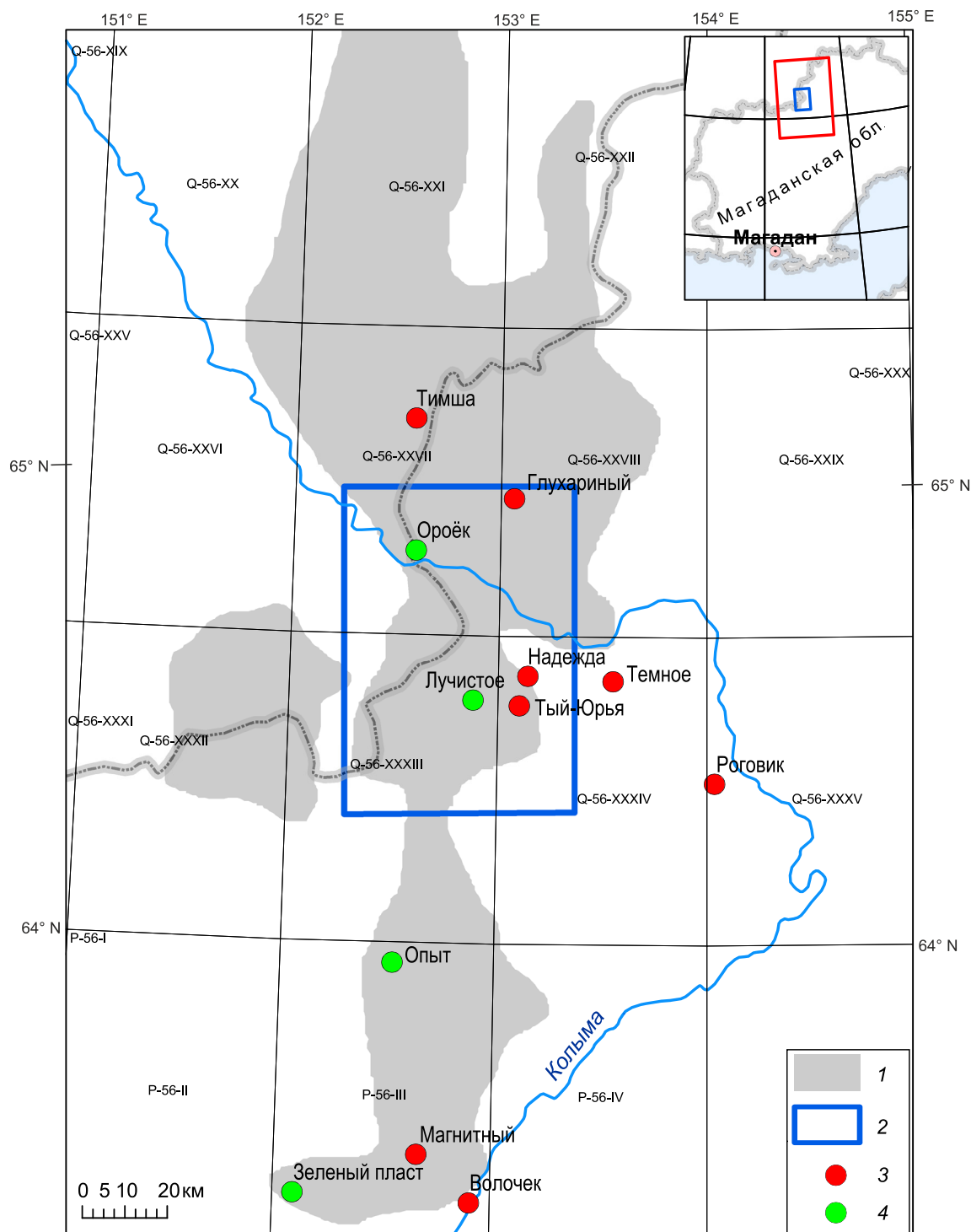


Рис. 1. Размещение среднерифейских медистых песчаников и сланцев ороёкской свиты (RF_{2or}) в южной части Приколымского поднятия. Схема составлена на основе [13].

1 – выходы на дневную поверхность меденосных верхнепротерозойских отложений (ороёкская металлогеническая зона), 2 – площадь Ороёкского рудного поля (см. рис. 2), 3–4 – рудопроявления: 3 – золото-кварцевые, 4 – медистых песчаников и сланцев.

ных рудных горизонтов потенциального месторождения Ороёк составило 0.92 % [3]. Высокие содержания меди по двум пробам (11.36 и 23.2 %) обусловлены маломощными кварц-карбонат-сульфидными про-

жилками. Содержание серебра в пробах варьирует от 2 до 70 г/т, золота – от 0.1 до 7 г/т, а в некоторых рудах установлены повышенные концентрации германия (3–13 г/т) и цинка (до 1.5 %) [3].

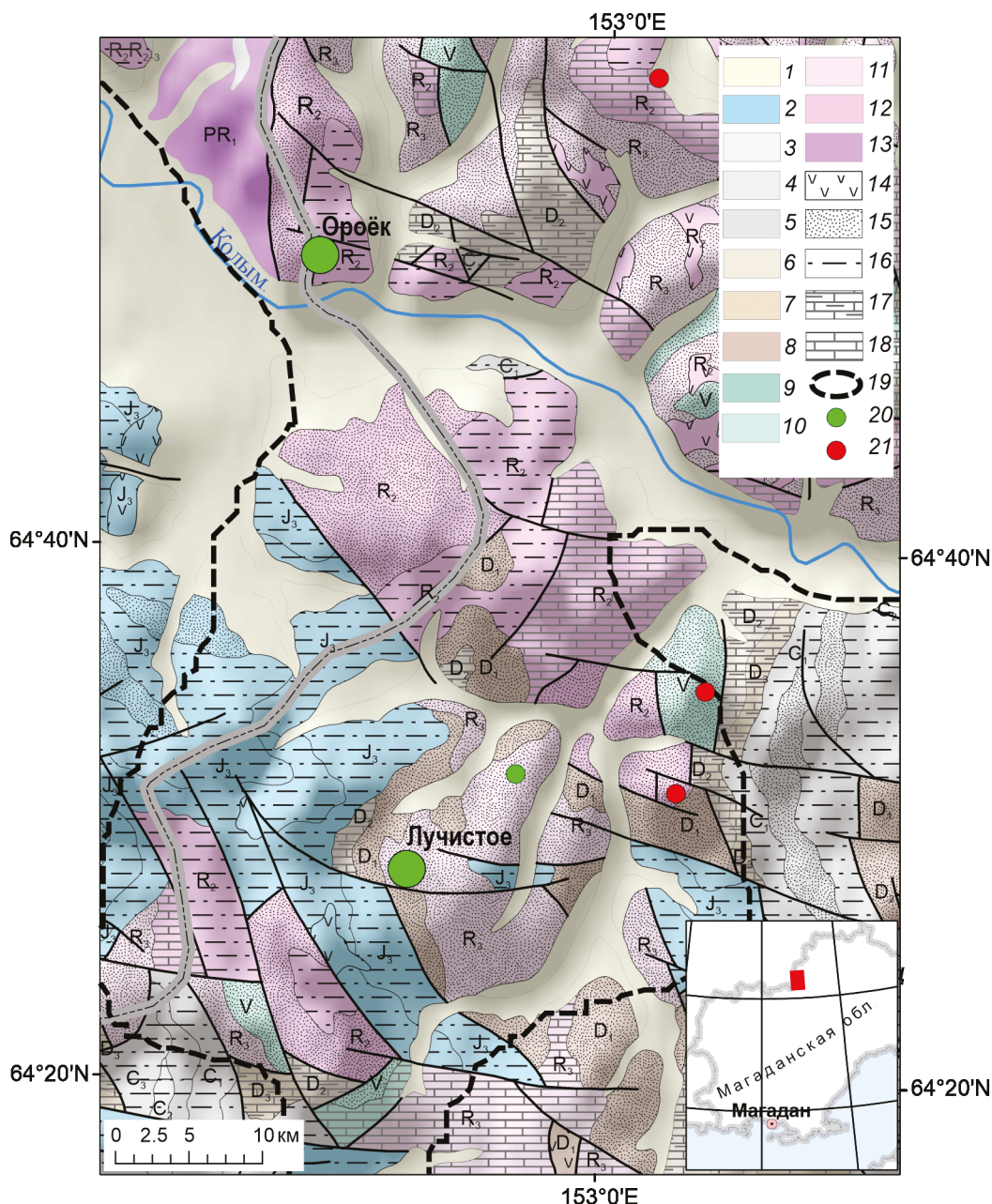


Рис. 2. Геологическое строение центральной части Ороёкской металлогенической зоны на основе пакета оперативной геологической информации «Геолкарта» (ДФО, Магаданская область, ВСЕГЕИ, 2022 г).

1–13 – геологический возраст пород: 1 – четвертичный, 2 – позднеюрский, 3–5 – каменноугольный, эпохи: 3 – поздняя, 4 – средняя, 5 – ранняя; 6–8 – девонский, эпохи: 6 – поздняя, 7 – средняя, 8 – ранняя; 9 – кембрийский, 10 – вендский, 11, 12 – рифейский, поздний и ранний, соответственно, 13 – раннепротерозойский; 14–19 – состав пород: 14 – базальты, 15 – песчаники, 16 – алевролиты, филлиты, 17 – глинистые известняки, 18 – известняки; 19 – ареал распространения медистых песчаников и сланцев; 20–21 – проявления рудной минерализации: 20 – медистых песчаников, 21 – золото-кварцевой формации.

Имеющаяся информация по медистым сланцам Приколымского террейна суммирована в монографии В.И. Шпикермана [13]. Геолого-генетические особенности рудопроявления Ороёк рассмотрены в публикации [5]. Последние поисково-разведочные работы были выполнены на Ороёкском рудном поле

летом 2016 г. АО «Дукатская ГГК» (Шубин и др., 2021ф).

В данной статье рассмотрены минералого-геохимические особенности медистых сланцев потенциального месторождения Ороёк. В ней представлены результаты выполненных исследований: текстур и

структур вмещающих пород, вещественного состава руд, последовательности минералообразования, флюидных включений; приводятся новые данные по составу и распределению микроэлементов и РЗЭ, сделаны выводы о модели рудообразования.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В обрыве р. Колыма С.А. Шубиным в 2016 году были опробованы несколько рудных горизонтов медистых сланцев, мощностью от 5 до 25 м. Коллекция из 12 образцов была передана авторам статьи на изучение. Из этого материала было изготовлено: аншлифов – 20, шлифов – 15, пластинок для изучения флюидных включений – 8, препаратов (фрагментов полированных шлифов) для рентгеноспектрального анализа – 6.

Для петрографического и минералогического изучения использовались прозрачные и прозрачно-полированные шлифы, а для микротермометрических исследований – полированные с двух сторон пластины толщиной порядка 0.3–0.5 мм. Оптическое изучение выполнено на микроскопе AxioPlan Imagin. Химический состав минералов изучался на рентгеновском электронно-зондовом микроанализаторе Camebax с приставкой INCA Instrument Oxford в СВКНИИ ДВО РАН (аналитик Е.М. Горячева).

Определение микроэлементов и РЗЭ проводилось в Институте экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского РАН (Черноголовка Московской области) с помощью масс-спектрометра ICP-MS XSeries 2 Thermo Electron, который позволяет выполнять высокоточный анализ в диапазоне элементов от Li до U, включая элементы с высокими потенциалами ионизации: РЗЭ, Zr, Nb, W и др. (аналитик В.К. Карандашев).

Определение концентрации главных и примесных элементов в пробах выполнено методом рентгеноспектрального флюоресцентного анализа (РФА) на вакуумном спектрометре последовательного действия (с дисперсией по длине волны), модель Axios mAX Advanced производства компании PANalytical (Нидерланды), в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН (аналитик А.И. Якушев).

Термобарогеохимические исследования флюидных включений выполнены в соответствии с методиками [7, 12]. Замеры температур фазовых изменений произведены с использованием измерительного комплекса на основе микротермокамеры THMSG-600 фирмы Linkam, микроскопа Motic, снабженного длиннофокусным объективом 50X фирмы Olympus и видеокамеры Moticam solution 3 M.px. Солевой состав

растворов и их концентрация определены согласно экспериментальным данным [1, 8, 16, 18]. Плотность флюида рассчитана с помощью программы FLINCOR [17].

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Потенциальное месторождение меди Ороёк приурочено к толще метаморфизованных кварцевых и полимиктовых песчаников и алевролитов среднего и верхнего рифея (рис. 1, рис. 2). В береговых обрывах р. Колыма установлены горизонты (до 25 м мощностью), обогащенные гипергенными минералами меди (рис. 3). Содержания меди в них 0.3–1.0 % (на отдельных интервалах до 6 %). С ними ассоциируют многочисленные метаморфогенные жилы розового кварца с крупными выделениями гематита и борнита. По простиранию и по падению рудная минерализация не изучена.

Границы Ороёкской металлогенической зоны определяются контурами Шаманихинского шельфового субтеррейна, расположенного в осевой части Приколымского террейна [14]. Сама зона, включающая месторождение Ороёк, протягивается в меридиональном направлении почти на 400 км. Ширина ее в средней части достигает 60 км, обычно же не превышает 35 км (рис. 1). В строении Ороёкской зоны участвуют шельфовые и прибрежно-морские отложения среднего и верхнего рифея, венда и карбона. В верхах рифея присутствуют метавулканические породы (метабаазальты и порфиroidы). Между рифеем и вендом установлено отчетливое структурное несогласие. Степень метаморфизма осадочных пород, лежащих выше несогласия, значительно меньше, чем нижележащих. Общая мощность верхнепротерозойских отложений 5 000–6 500 м, кембрия – 300 м [14].

Магматические породы представлены дайками и силлами позднепротерозойских метабаазитов и метальтрабаазитов, субвулканическими телами и малыми интрузивами позднеюрского возраста. В центральной части зоны выходят метаморфизованные гранитоиды и гранитогнейсы.

Геологическое строение зоны характеризуется сочетанием складок различной морфологии с чешуйчатыми надвигами и более поздними левосторонними косыми сдвигами северо-западного простирания и к настоящему времени до конца не расшифровано из-за плохой обнаженности [14].

Нижняя подсвита ороёкской свиты, по данным В.И. Шпикермана [14], представлена монотонной толщей кварцитов, в верхней части разреза отмечаются редкие горизонты филлитов. Отличительная черта кварцитов – практически монокварцевый состав и

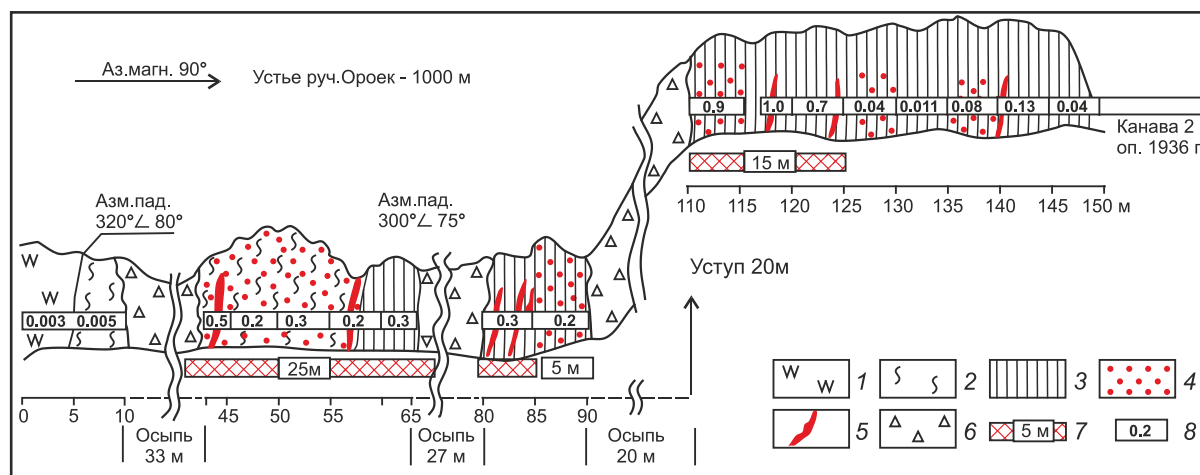


Рис. 3. Схема опробования в правом береговом обрыве реки Колымы, в 900 м ниже ручья Ороёк. Составлена на основе документация и опробования обнажения (Н.Е. Савва, В.И. Шпикерман, Н.А. Горячев, 1992 г).

1 – кварциты; 2 – кварц-хлоритоидные сланцы; 3 – хлоритовые сланцы, переслаивающиеся с филлитами; 4 – медная зелень; 5 – меденосные кварц-карбонатные жилы; 6 – делювиальные осыпи; 7 – выделенные интервалы меденосных горизонтов и их мощность; 8 – интервалы пунктирного сколового опробования с данными содержания Cu (%).

светло-серые, светло-кремовые, светло-розовые тона окраски. Мощность подсветы – около 1000 м. Мощность рудовмещающей верхнеороевской подсветы – 600–700 м, в ее строении преобладают различные серицит-хлоритовые, кварц-серицит-хлоритовые, хлоритоидные сланцы и филлиты, часто графитосодержащие. Реже встречаются прослои мраморов; при этом, роль кварцитов незначительна. Отложения верхнеороевской подсветы согласно залегают на подстилающих кварцитах. Красноцветные метапелиты интенсивно дислоцированы и характеризуются плейчатостью и скорлуповатой отдельностью. Визуально рудные горизонты выделяются по наличию обильных налетов медной зелени на плоскостях сланцеватости.

Медная минерализация Оройка сосредоточена в 150-метровом интервале разреза метаморфизованных осадочных пород среднего рифея, хорошо вскрытых на южном фланге рудного поля в береговых обрывах р. Колыма (рис. 3). Верхнеороевская толща смята в линейную синклинальную складку протяженностью 10 км [14]. На обоих крыльях синклинали выделяется от 3 до 5 рудных горизонтов мощностью от 5 до 25 м (рис. 3). Предполагается, что на глубине 150–250 м они соединяются [14]. К медистым горизонтам пород часто приурочены кварцевые прожилки мощностью от 1 см до 0.7 м, в которых визуально отмечаются вкрапленники и гнезда гематита, борнита и халькоцита.

ТЕКСТУРНО-СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Петрографические исследования показали, что рудовмещающие породы имеют преимущественно

слоистую текстуру, с линзами, обладающими лепидогранобластовой структурой (рис. 4). Они содержат будины продуктивного кварца, который катаклазирован, рассланцован и характеризуется отчетливым волнистым угасанием, указывающим на его вовлечение вместе с породами в процесс метаморфизма (рис. 4). Медная минерализация установлена в двух разновидностях метаморфических пород: в кварц-хлоритоидных и хлоритовых сланцах.

Кварц-хлоритоидные сланцы – зернистые серо-зеленые пятнистые породы порфиробластовой текстуры, содержащие, кроме кварца и хлоритоида, эпидот, хлорит и серицит. Местами в сланцах встречаются реликты первичных пород, представленные полимиктовыми алевролитами и песчаниками с горизонтально-слоистой и косослоистой текстурой. Пятнистую текстуру породы определяют порфиробласты темно-зеленого хлоритоида, размером 0.3–0.7 мм. Основная масса породы имеет лепидогранобластовую структуру, обусловленную сочетанием тонких чешуек хлорита и изометричных мелких зерен кварца.

Хлоритовые сланцы на 70 % состоят из темно-зеленого (иногда почти черного) хлорита. Кроме того, в составе породы участвуют кварц, эпидот, слюда и рутил. Сланцы тонкозернистые, полосчатой, сланцеватой и ленточной текстуры. Полосчатая текстура обусловлена чередованием слоев хлоритового состава с прослойками и линзами мелкозернистого кварцевого агрегата, дробленного и подвергнувшегося рекристаллизационному бластезу. Такая текстура, скорее всего, наследует первичную сланцеватость пелитовых пород.

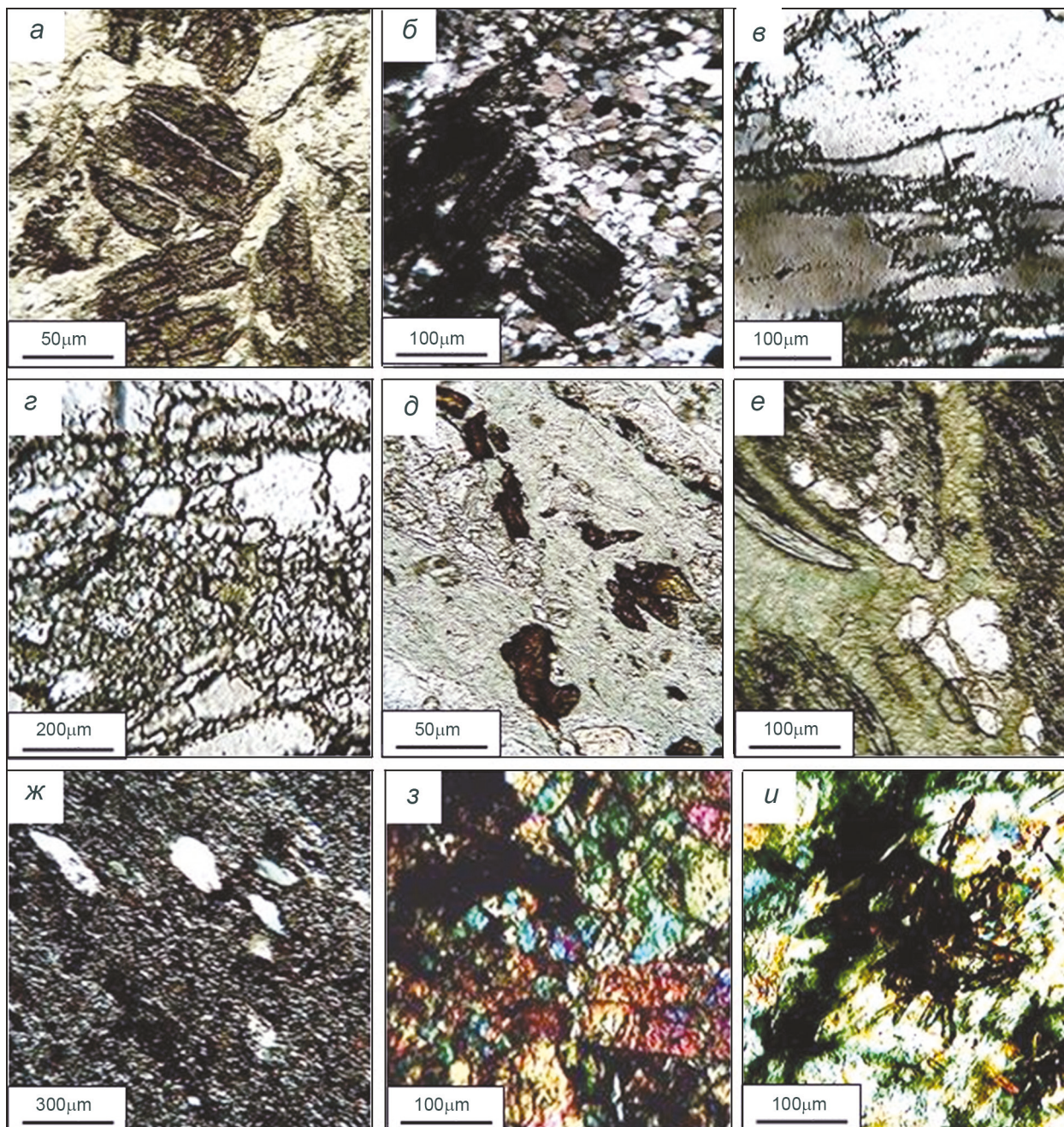


Рис. 4. Структурно-литологические особенности рудовмещающих хлорит-серицит-хлоритоидных сланцев).

a, б – порфиробласты хлоритоида и аллотриоморфнозернистая структура кватца в метапелитах; *в, з* – рассланцевание будинированного кварца и его волнистое угасание; *д* – скопления рутила вдоль сланцеватости; *е* – порфиробласты кварца в метапелите и обтекание их хлоритом и хлоритоидом; *ж* – порфиробласты кварца в метапелите; *з* – интенсивная эпидотизация песчаного метапелита; *и* – скопление турмалина в хлорит-серицитовоой массе, возможно узелковые сланцы, с отложением рутила вдоль сланцеватости.

Эпидот, слюда и рудные минералы – новообразования, наложенные на кварц-хлоритовые сланцы. Наиболее богатая медная минерализация приурочена к линзовидным прожилкам кварца мощностью 1–5 см.

Основная структура *медистых сланцев (руды)* – сланцеватая, а текстура – полосчатая. Последнюю в

медистых сланцах, как правило, создают гидроксиды меди, которые, проникая по наиболее компетентным слоям породы, окрашивают ее в сине-зеленые тона (рис. 5). Линзы будинированного кварца вмещают основную долю медной минерализации (рис. 5, рис. 6). Количество гипергенных минералов меди в

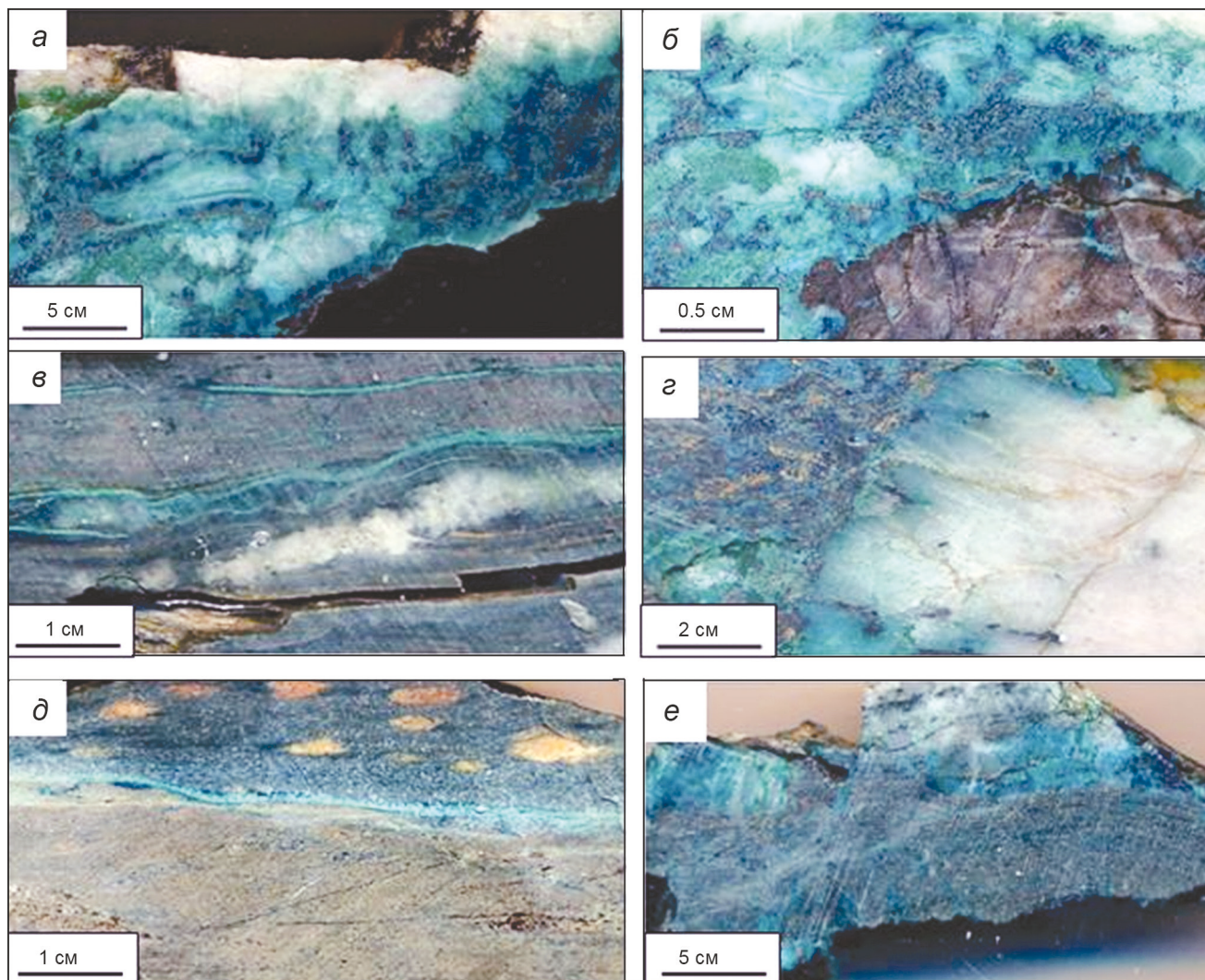


Рис. 5. Типичные текстуры медистых сланцев месторождения Ороёк.

a, б, e – крупные линзы будинированного кварца в хлоритовых сланцах с богатой гнездово-вкрапленной медной минерализацией; *в* – полосчатая текстура, представленная чередованием полосок кварца, гидроксидов меди и черных полосок углеродистого вещества; *z* – крупная будина кварца с мелкими гнездами рудных минералов меди; *д* – чередование хлорит-серицитового сланца с линзами более ранней метаморфизованной породы (риолитом?) с порфиробластами кварца; *e* – гнезда и вкрапленники сульфидов меди в кварце).

линзах кварца иногда достигает 10 %, поэтому последний также приобретает сине-зеленую окраску (рис. 5). Рудные минералы обычно слагают в сланцах гнездово-вкрапленную текстуру, а гипергенные минералы – тонко-прожилковую текстуру, параллельную сланцеватости.

Текстурный анализ позволил выделить два этапа метаморфизма: ранний, когда более древние, чем метапелиты (хлорит-серицитовые сланцы), вулканогенные породы (возможно, риолиты?) были метаморфизованы с образованием пород гнейсовидного облика с порфиробластами; поздний – образование хлорит-серицит-хлоритоидных сланцев с линзами пород

раннего этапа метаморфизма и будинами оруденелого метаморфогенного кварца

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕДИСТЫХ СЛАНЦЕВ

По данным РФА, в медистых сланцах изученных образцов содержание SiO_2 (табл. 1) варьирует от 37.86 до 65.4 % (в среднем – 58.56 %), CaO – 0.4–4.65 % (2.57 %), Al_2O_3 – 7.02–15.8 % (11.02 %), MgO – в среднем 4.81 %, Fe_2O_3 – 4.0–8.39 (6.52 %), Na_2O – 0.05–1.36% (0.4 %), K_2O – 0.08–1.3 % (0.49 %), TiO_2 – в среднем 1.21 %, MnO – 0.07–0.25 % (0.17 %), P_2O_5 – 0.1–0.23 % (0.14 %). Сульфиды в образцах в

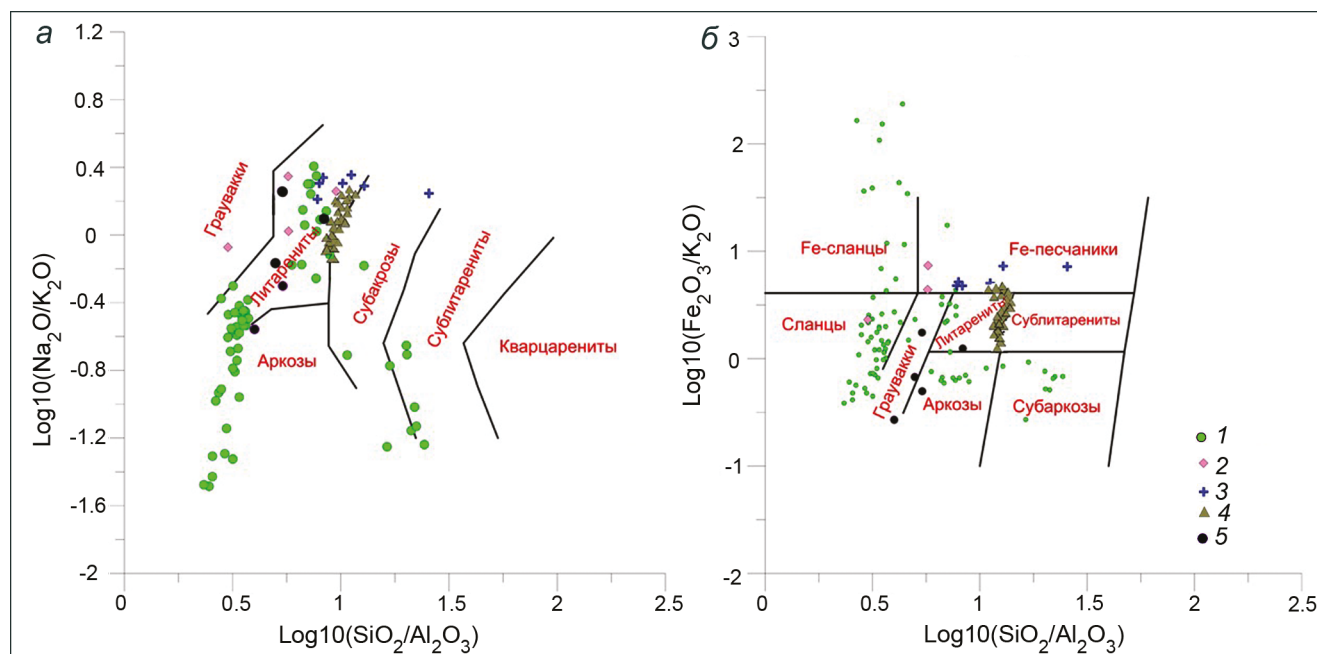


Рис. 6. Классификация проб медистых песчаников месторождения Ороёк на основе дискриминационных диаграмм: *a* – $\log_{10}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ – $\log_{10}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ [31]; *b* – $\log_{10}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ – $\log_{10}(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ [22].

1–5 – месторождения медистых песчаников и сланцев: 1 – Купершифер (Польша) [15]; 2 – Оренбургское Предуралье ($\text{Cu} < 0.3\%$) [2]; 3 – Оренбургское Предуралье ($\text{Cu} > 0.3\%$) [2]; 4 – Чешмеш-Конан (Иран) [32]; 5 – Ороёк (Магаданская область, Россия).

основном отсутствуют – $S_{\text{общ}}$ находится в диапазоне 0.02–1.37 %, в среднем – 0.41 % (табл. 1). По содержанию породообразующих оксидов изученные образцы месторождения Ороёк типичны для месторождений медистых песчаников и сланцев (рис. 6).

По данным таблицы 2, содержание полезных компонентов в медистых сланцах: Cu – 2.51–23.38 % (в среднем – 7.93 %); Au (г/т) – 0.05–0.5 (в среднем 0.16); Ag (г/т) – 8.39–70.87 (23.63); Rh (г/т) – 0.23–1.53 (0.61); Co (г/т) – 24.25–35.97 (31.57). Таким образом, изученные образцы характеризуются сходным химическим составом и представляют собой богатую медную руду (табл. 1, 2).

Как видно на рис. 7, образцы заметно обогащены узким спектром микроэлементов (по мере уменьшения коэффициента обогащения): Cu , Ag , Au , Rh , Se . Коэффициенты обогащения этих элементов достигают (рис. 7) от нескольких десятков (Se , Rh) до сотен (Ag , Au) и тысяч (Cu) раз, что свидетельствует о синхронном участии этих микроэлементов в рудообразовании, характерном для жесткой плиты – Приколымского террейна, в отличие от ступенчатого обогащения в зонах субдукции. Кроме того, образцы незначительно обогащены Cd , Li , Co , Zn , V , U , Sc , Y и REE (рис. 7).

Для образцов характерны близкие к хондритовому слабонаклонные спектры РЗЭ, конфигурация ко-

торого характеризуются отсутствием отчетливых Eu минимумов и максимумов (рис. 8). В них преобладают легкие «гидрофильные» лантаноиды [6] «цериевой» группы (табл. 3) [10].

Величина отношения Co/Ni в изученных образцах (табл. 3) оказалась близка к 1.0, что характерно для метаморфогенных гидротермальных флюидов [24].

Возможность эффективного использования отношения Y/Ho для оценки происхождения рудообразующих флюидов показана ранее [24, 29]. Величина отношения Y/Ho (табл. 3) в изученных рудах варьирует от 25.73 до 27.92, что соответствует диапазону флюида, сформировавшегося при параметрах низкоградного регионального зеленокаменного метаморфизма вмещающих пород [24, 29] и характерно для современных гидротермальных флюидов задуговых бассейнов [29]. Кроме того, обращает на себя внимание обратная корреляция $\sum\text{REE}$ от содержания меди: пробы с высокими содержаниями Cu характеризуются низкими величинами $\sum\text{REE}$ (табл. 3). Данный факт свидетельствует о наследовании медистыми песчаниками литогеохимических характеристик вмещающих пород.

Величина Ce/Ce^* и Eu/Eu^* варьирует от слабо отрицательных до умеренно положительных значе-

Таблица 1. Химический состав медистых песчаников (в мас. %) месторождения Ороёк.

№ пробы	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S _{общ.}
P-1-608	64.15	1.54	7.69	8.39	0.25	4.5	4.65	0.1	0.08	0.11	0.25
8-12/519	37.86	1.07	7.02	4.79	0,10	4.84	0.4	0.05	0.1	0.23	1.37
O 81/519	61.5	1.02	11.5	4.0	0.07	но	1.5	1.36	0.75	0.16	0.18
P-1-600	65.4	1.16	13.1	8.0	0.25	но	3.7	0.15	0.22	0.1	0.22
1005	63.1	1.25	15.8	7.4	0.20	но	2.6	0.36	1.3	0.11	0.02
Среднее	58.56	1.21	11.02	6.52	0.17	4.67	2.57	0.40	0.49	0.14	0.41

Примечание. H₂O – не определялся.

ний (Ce/Ce* = от 0.9 до 1.02, Eu/Eu* = от 0.81 до 0.88) (табл. 3). Такое сочетание Ce/Ce* и Eu/Eu* указывает на окислительные условия, существовавшие при рудообразовании [2, 24, 26]. Последнее не противоречит наблюдаемой структурной и пространственной связи Cu минерализации МП с разнообразными литохимическими восстановителями [11] на фоне значительного обогащения руд Ce, в меньшей степени Y и практически отсутствием Sc.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУД

Руды месторождений Ороёк представлены медистыми сланцами, сложенными гипогенными и гипергенными минералами (табл. 4). Соотношение гипергенных минералов к гипогенным составляет примерно 3:2, что говорит о высокой степени окисления руд на поверхности (рис. 4).

Характеристика основных минералов

Микроскопическое изучение в аншлифах, а также микрорентгеноспектральная диагностика позволили установить около 35 минеральных видов в рудах месторождения (табл. 4). Выявлены следующие рудные минералы: гематит (3–15 %), рутил (0.5–3 %), халькоцит, ковеллин, джарлеит, борнит, халькопирит (< 1 %).

Кварц – неравномернозернистый (размер зерен варьирует от 1–20 мкм до 0.1–1.0 мкм), слагает линзовидные прожилки (будины) мощностью 2–3 см, протяженностью 3–7 см, а нередко и нескольких метров. Окрашен медными гипергенными минералами. В будинированных крупных выделениях, как правило, рассланцован (испытал динамометаморфизм) и имеет отчетливое волнистое угасание (рис. 4, в-г). Содержит гнездовую вкрапленность рудных минералов 3–5 %.

Кварц метапелитов мелкозернистый, аллотриоморфный, катаклазированный, имеет волнистое угасание. В песчаных сланцах кварц распространен в качестве кластогенного минерала, трещиноватого и структурированного метаморфическими преобразованиями. Зерна кластогенного кварца имеют вытянутость

вдоль сланцеватости и обтекаются хлорит-эпидотовым агрегатом. В линзах метаморфизованных вулканогенных пород с гнейсовидной текстурой кварц слагает порфиробласты чечевицеобразной формы, имеющие вытянутость в одном направлении (рис. 4, ж). Также отмечаются тонкие прожилки позднего кварца (1–3 мм), секущие сланцеватость.

Хлорит – темно-зелёный до черного, образует слоистые скопления чешуйчатого агрегата, вытянутые параллельно сланцеватости. Размеры скоплений 2–3 мм по удлинению, а мощность отдельных слоев не превышает 0.5 мм. По оптическим свойствам ближе всего к клинохлору (оптически положительный, плеохроизм в зеленовато-желтых тонах). Минерал ассоциирует с серицитом, эпидотом и хлоритоидом, реже с дистеном, силлиманитом. В песчаных алевролитах хлорит псевдоморфно замещает хорошо окатанные кластиты размером 0.3–0.6 мм, сохраняя первичную зернистую структуру.

Эпидот – распространен в рассланцованных породах в различном количестве – от 2–3 % до 50–60 %, что указывает на неоднородный состав осадочных пород, в которых присутствуют высокоизвестковистые прослои. Эпидот мелкозернистый идиоморфный, в больших скоплениях образует радиально-лучистые стяжения. Чаще всего размеры его кристаллов по удлинению – 0.7–0.8 мм.

Серицит – приурочен к сланцеватости, образуя тончайшие просечки, подчеркивающие текстурный рисунок породы, также отлагается как поздний минерал по тонким прожилкам (не более 0.3 мм), секущим кварц и рудные минералы. Тесно сростается с хлоритом. В песчаных алевролитах отмечаются отдельные скопления серицита размером до 2 мм, замещающие кластогенные зерна. Серицит также участвует в сложении поздних хлорит-серицитовых прожилков, секущих сланцеватость. Мощность таких прожилков 1–2 мм.

Хлоритоид – образует порфиробласты в песчаниках и будинированном кварце. Он отмечается в сростании с хлоритом и в виде отдельных пятен (гнезд)

Таблица 2. Микроэлементы (г/т) в медистых песчаниках месторождения Ороёк.

Элементы, г/т	Пробы					С
	P-1-608	8-12/519	O 81/519	P-1-600	1005	
Cu	33949.93	233807.11	74258.02	25098.48	29527.55	79328.22
Ag	10.32	70.87	19.94	8.39	8.62	23.63
Au	0.05	0.08	0.09	0.07	0.50	0.16
Rh	0.23	1.53	0.74	0.24	0.30	0.61
Pb	12.77	4.40	9.94	10.05	10.75	9.58
Zn	108.23	140.56	115.86	128.86	142.86	127.27
Cr	91.22	57.77	50.80	44.92	47.15	58.37
Ni	47.16	27.09	34.99	42.82	51.48	40.71
Co	32.71	31.89	24.25	35.97	33.01	31.57
Rb	2.28	2.38	16.44	5.82	38.61	13.11
Sr	287.80	8.78	90.75	214.26	92.33	138.78
Ba	256.70	130.82	144.27	991.51	265.87	357.83
V	259.49	86.64	98.77	256.48	187.26	177.73
Ta	0.72	0.35	0.57	0.86	0.94	0.69
Zr	42.65	17.76	82.12	181.83	200.15	104.90
Nb	10.18	5.48	9.80	13.44	14.51	10.68
Hf	1.15	0.42	2.50	5.25	6.47	3.16
Be	0.38	0.13	0.60	0.54	0.96	0.52
Li	30.63	43.97	39.61	40.60	36.22	38.21
Sc	30.84	17.49	15.60	22.23	27.33	22.7
Ga	16.36	8.31	11.47	15.22	16.20	13.51
Y	36.66	13.51	24.50	27.10	28.67	26.09
Cd	0.35	0.28	0.12	0.29	0.19	0.25
Cs	0.10	0.10	0.49	0.17	0.76	0.32
La	24.17	4.76	11.06	19.78	21.76	16.31
Ce	50.97	9.82	21.35	39.41	45.09	33.33
Pr	5.70	1.30	2.77	4.58	5.84	4.04
Nd	25.32	6.48	12.13	19.10	24.19	17.44
Sm	6.05	1.79	3.42	4.85	5.33	4.29
Eu	1.59	0.50	0.84	1.29	1.30	1.1
Gd	6.19	2.12	3.89	5.00	5.12	4.46
Bi	0.13	0.06	0.06	0.11	0.16	0.10
Tl	0.02	0.02	0.08	0.03	0.21	0.07
Mo	0.61	0.47	1.10	1.49	1.30	0.99
W	0.46	0.38	0.54	0.51	0.88	0.55
Sn	1.94	0.74	0.57	1.15	1.26	1.13
Sb	0.31	0.26	0.12	0.08	0.10	0.17
As	< ПО	< ПО	2.58	0.70	0.41	1.23
Se	2.21	12.27	< ПО	< ПО	< ПО	7.24
Te	0.47	0.77	0.34	0.27	1.89	0.75
Tb	1.11	0.34	0.63	0.87	0.85	0.76
Dy	7.05	2.29	3.93	5.34	5.28	4.78
Ho	1.41	0.50	0.90	1.05	1.03	0.98
Er	3.63	1.56	2.97	3.27	3.31	2.95
Tm	0.49	0.26	0.39	0.46	0.47	0.41
Yb	2.86	1.97	2.46	2.87	3.33	2.7
Lu	0.32	0.30	0.35	0.44	0.51	0.38
Th	7.12	0.85	1.60	5.31	6.69	4.31
U	2.69	3.78	6.59	2.54	2.18	3.56

Примечание. ПО – предел обнаружения, С – среднеарифметическое.

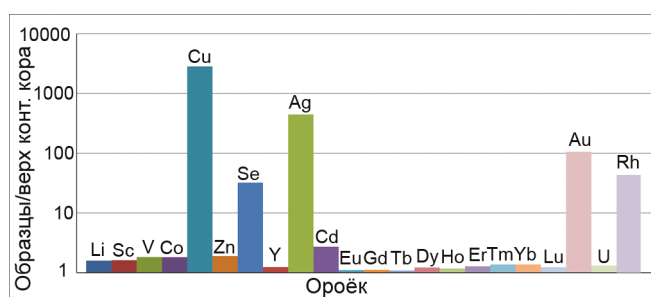


Рис. 7. Распределение микроэлементов (средние значения), нормированных по верхней коре [13], а для Rh – по примитивной мантии [30] в пробах медистых песчаников месторождения Ороёк.

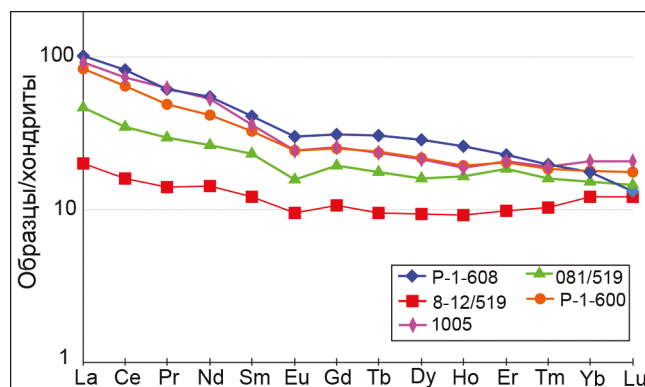


Рис. 8. Распределение РЗЭ, нормированных по хондриту [28], в медистых сланцах месторождения Ороёк.

Таблица 3. Индикаторные геохимические показатели изученных образцов.

	P-1-608	8-12/519	O 81/519	P-1-600	1005
Σ REE	136.88	33.97	67.09	108.31	123.40
Σ LREE	113.80	24.65	51.57	89.01	103.51
Σ HREE	23.08	9.32	15.52	19.30	19.90
Σ LREE/ Σ HREE	4.93	2.64	3.32	4.61	5.20
Y/Ho	25.95	27.10	27.25	25.73	27.92
U/Th	0.38	4.42	4.12	0.48	0.33
Rb/Sr	0.01	0.27	0.18	0.03	0.42
Co/Ni	0.69	1.18	0.69	0.84	0.64
Au/Ag	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06
Eu/Eu*	0.85	0.88	0.81	0.86	0.83
Ce/Ce*	1.02	0.92	0.90	0.97	1.00
La _N /Yb _N	5.74	1.64	3.05	4.68	4.44
La _N /Sm _N	2.49	1.66	2.02	2.55	2.55
Gd _N /Yb _N	1.75	0.87	1.28	1.41	1.24
La _N /Lu _N	7.79	1.66	3.24	4.71	4.39
Σ Ce	106.15	22.36	47.31	82.87	96.87
Σ Y	23.41	7.53	13.61	18.41	18.91
Σ Sc	7.31	4.08	6.18	7.03	7.62

Примечание. Предел обнаружения $Eu/Eu^* = Eu_N / (Sm_N \cdot (Tb_N \cdot Eu_N)^{1/2})$, $Ce/Ce^* = Ce_N / ((2La_N + Sm_N)/3)$.

Таблица 4. Минеральный состав руд месторождения Ороёк.

Группы минералов	Главные	Второстепенные	Редко встречающиеся
Жильные	Кварц	Хлоритоид	Кальцит
	Хлорит	Актинолит	Барит
	Серицит	Дистен	Апатит
	Эпидот		Силлиманит
Рудные	Ковеллин	Халькопирит	Идаит
	Халькоцит	Борнит	Нукундамит
	Гематит	Неодигенит	Спионкопит
		Роксбиит	Ярровит
		Джарлеит	Ag-борнит, Ag-ярровит
		Рутил	Самородное золото
Гипергенные	Спертинит	Брошантит	Армаколит
	Тенорит	Делафоссит	Гипс
	Антлерит	Вернадскит	
	Уприт		
	Хризокolla		

Таблица 5. Химический состав хлоритоида $H_2(Fe,Mn)Al_2SiO_7$ по данным микрорентгеноспектрального анализа.

№ п/п	Концентрация оксидов, мас. %							В пересчете на формулу				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	H ₂ O*	Сумма	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
1	23.92	40.64	22.11	1.78	3.95	7.2	99.6	7.886	15.794	6.098	0.498	1.94
2	23.32	39.85	23.49	1.7	3.15	7.2	98.71	7.834	15.779	6.6	0.485	1.578
3	23.15	39.87	24.06	1.58	3.42	7.2	99.26	7.752	15.736	6.738	0.447	1.706
4	23.36	39.94	23.88	1.51	3.37	7.2	99.26	7.809	15.735	6.675	0.428	1.677
5	23.38	39.62	22.18	2.34	3.25	7.2	99.97	7.894	15.764	6.262	0.668	1.636

Примечание. H₂O* – теоретическое значение концентраций (водород не анализировался)

размером до 0.5 см. Образует псевдогексагональные обособления и сноповидные выделения (0.5–1.0 мм). В ряде случаев в нем видна отчетливая сланцеватость и изгибы слоев. Минерал испытал метаморфизм. Кроме того, хлоритоид участвует в сложении поздних хлорит-серицитовых прожилков 1–3 мм, секущих сланцеватость. Химический состав хлоритоида приведен в табл. 5.

Карбонат – встречен в виде поздних прожилков 1–5 мм и образует линзовидные скопления размером 5×15 мм в эпидотизированном песчанистом метапелите. Отмечаются сростания карбоната с баритом.

Турмалин установлен только в одном образце, в виде радиально-лучистых скоплений диаметром 0.2–0.3 мм в сростании с серицитом (возможно он маркирует прослой узелковых сланцев).

Характеристика рудных минералов

Халькоцит – один из наиболее распространенных гипогенных медных минералов. Он образует ксеноморфные выделения размером до 5 мм. Тесно сростается с ковеллином и неодигенитом (рис. 9, а–з). Минерал слабо катаклазирован. Его выделения в основном приурочены к кварцу, реже он встречается в хлорит-эпидотовой матрице. Также отмечается в виде идиоморфно-зернистых таблитчатых вкрапленников (0.1–0.5 мм) с каймами голубого ковеллина (рис. 9, а). Химические составы рудных минералов приведены в табл. 6.

Борнит – встречается значительно реже халькоцита и ковеллина. Он образует ксеноморфные выделения 0.1–0.7 мм в массе ковеллина и развивается по нему, образуя пламенивидные и другие экзотические выделения размером 0.5–1.5 мм (рис. 9, з). Редкие находки этого минерала и в виде относительно крупных до 3 мм обособлений со структурами распада твердого раствора с халькопиритом, который образует в нем ламелли (рис. 9, д).

Халькопирит – встречается очень редко и установлен в виде мелких (10–30 мкм) ксеноморфных выделений, приуроченных к хлорит-эпидотовым прослоям (рис. 9, е). Также халькопирит образует ламел-

ли в борните (структуры распада твердого раствора) (рис. 9, д, ж). Ламелли халькопирита окружены каймой ковеллина (рис. 9, д). Изучение таких сростаний микрорентгеноспектральным анализом позволило установить промежуточные фазы идаит и нукундамит. Положение фаз показано на рис. 9 ж, з.

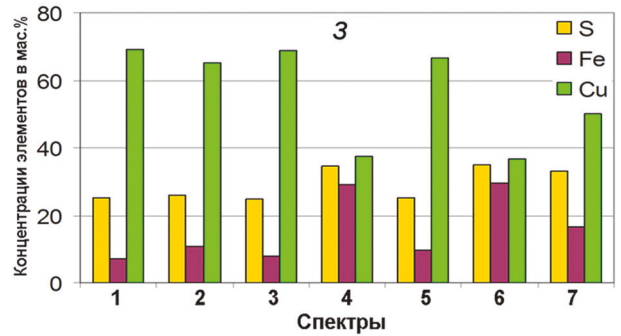
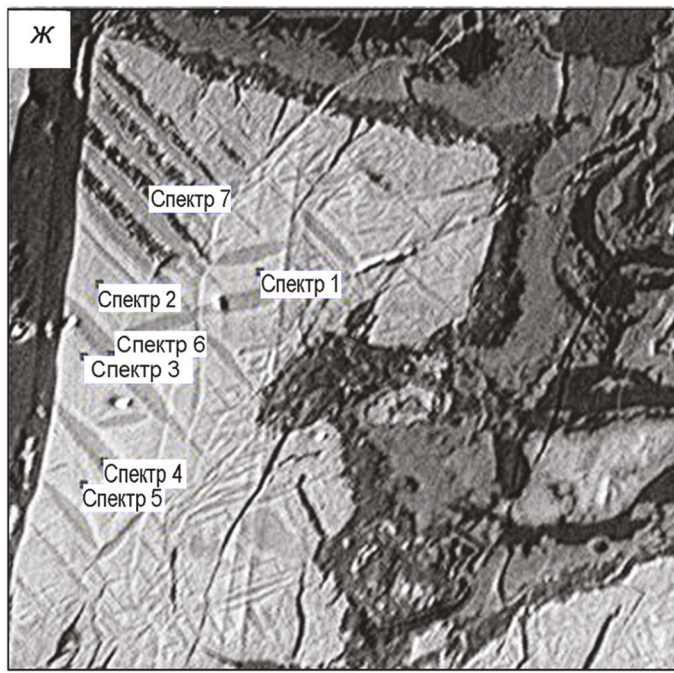
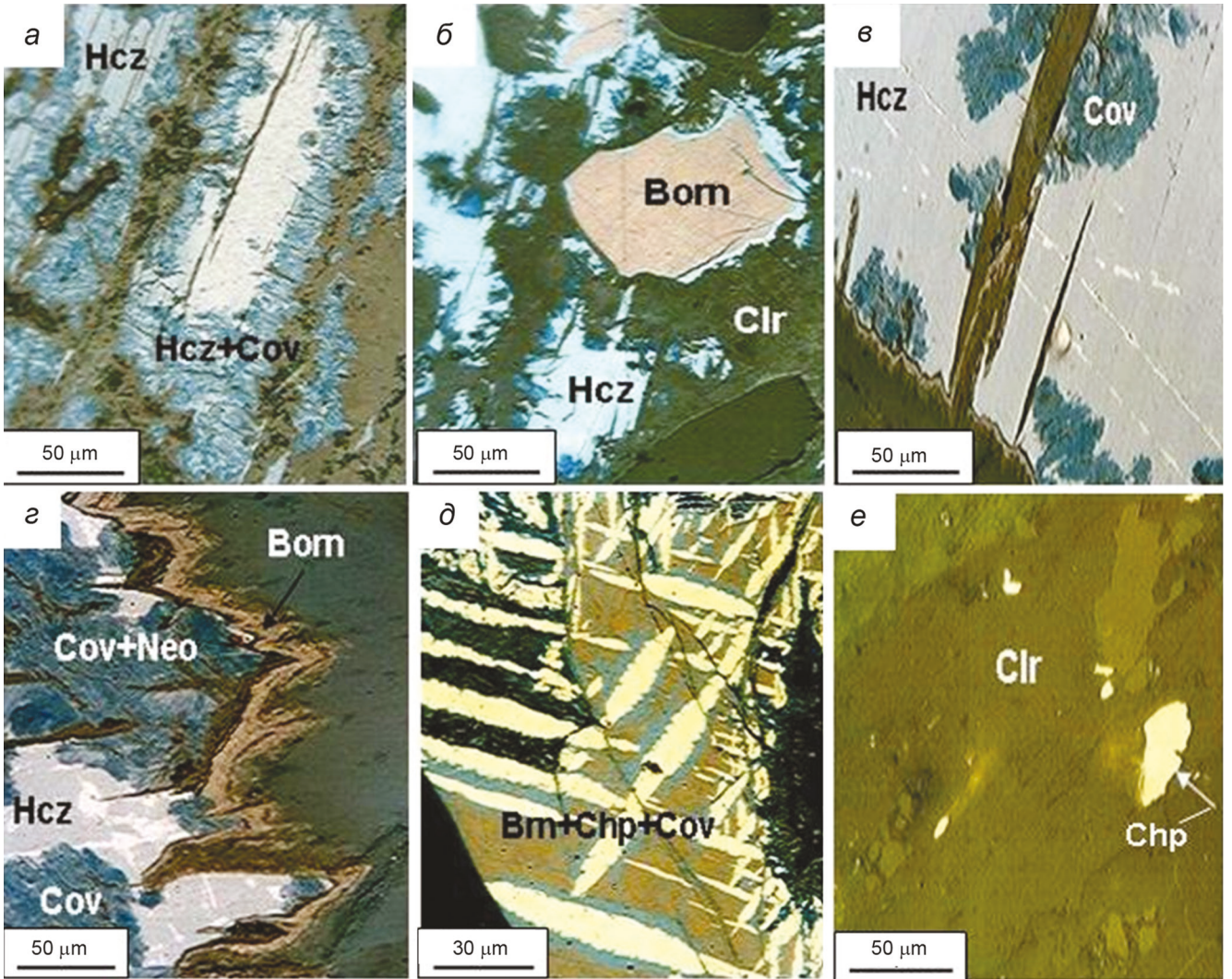
При распаде твердого раствора борнит-халькопирит возникают промежуточные фазы: идаит и нукундамит с низкими содержаниями железа: в отличие от халькопирита – 29.17 мас. %; борнит – 10.66; идаит – 16.44; нукундамит – от 7.21 до 8.08 мас. % (табл. на рис. 9, з). Распределение Fe в различных фазах при распаде твердого раствора показано на рис. 9, з, где преобладание Fe может указывать на присутствие значительного количества халькопирита, а Cu – халькоцина в тонкой минеральной смеси (рис. 9, д).

Гематит ванадийсодержащий – широко распространен в метапелитах. Он также метаморфизован вместе с вмещающими породами, и его кристаллы, подчиняясь сланцеватости, обычно имеют изогнуто-пластинчатую форму, нередко деформированную и закрученную при свилеватости сланцев. Размеры пластин гематита 0.3–1.2 мм. Как результат метаморфизма иногда вблизи пластин возникает переотложенный тонкочешуйчатый агрегат новообразованного гематита поздней генерации (рис. 10). Гематит отлагался раньше халькоцит-ковеллиновой минеральной ассоциации.

Рутил – располагается в виде цепочек мелких кристаллов параллельно сланцеватости в метапелите (рис. 10, з, д). Размеры кристаллов и сростков не превышают 150 мкм по удлинению.

Самородное золото – представлено мелкими выделениями размером 20–35 мкм, приуроченными к хлорит-серицитовому агрегату (реликтам вмещающей породы) в кварце (рис. 10, е, ж). Как правило, самородное золото отлагается вблизи гематита. Частицы имеют округлую форму и всегда ксеноморфны. Возможно, это кластогенное золото.

Серебросодержащие фазы минералов меди – среди них установлены Ag-борнит Cu_3FeS_4 и Ag-ярровит



Спектр	O	Si	S	Fe	Cu	Сумма
Спектр 1			25.27	7.21	69.08	101.56
Спектр 2			25.82	10.66	65.31	101.80
Спектр 3			24.72	8.08	68.73	101.52
Спектр 4			34.71	29.17	37.42	101.30
Спектр 5			25.25	9.60	66.64	101.50
Спектр 6			34.89	29.47	36.87	101.23
Спектр 7		1.48	33.33	16.44	49.92	101.17

50 мкм

Электронное изображение

Cu_9S_8 с концентрациями Ag – 0.86 и 0.96 мас. % (табл. 6). Размеры фаз не превышают 50 мкм.

Последовательность минералообразования

Выполненные исследования позволили наметить следующую последовательность минералообразования.

Первый этап – региональный зеленосланцевый метаморфизм пород, подстилающих хлорит-серицитовые сланцы. Реликты этих пород с бластопорфировой структурой и гнейсовидной текстурой встречаются в виде линз в медистых сланцах (**кварц + хлорит + рутил + дистен, апатит**)*.

Второй этап – проходил в три стадии:

1 стадия – регионального метаморфизма (более низкой степени, чем на первом этапе) осадочных пород с образованием хлорит-серицит-хлоритоидных сланцев с небольшим количеством дистена. С этим метаморфизмом связано образование жил и прожилков метаморфогенного кварца (**кварц + хлорит + хлоритоид + эпидот + кальцит + гематит + рутил + дистен, актинолит, серицит**).

2 стадия – метаморфогенно-гидротермальная – образование в метапелитах и кварце медной минерализации, которая большинством исследователей связывается с вовлечением в метаморфизм рудовмещающие красноцветные осадочные толщи, что также подтверждается отложением значительного количества гематита (**кальцит + гематит + халькоцит + борнит + ковеллин + джарлеит + халькопирит, самородное Au, неодигенит, роксбиит, идаит, нукундамит, спионкопит, ярровит**).

3 стадия – пострудной деформации – образование тонких (1–2 мм) прожилков кварца и хлорита, секущих сланцеватость (**кварц + хлорит + кальцит**).

Третий этап – гипергенный, проявленный весьма интенсивно и связанный с образованием большого количества гидроксидов и сульфатов меди (**спертинит + антлерит + тенорит + хризоколла + гипс + вернадскит, брошантит, делафоссит, армаколит**).

Результаты изучения флюидных включений

Пригодные для изучения первичные и первично-вторичные флюидные включения (ФВ), размером

5–12 мкм (рис. 11), были выявлены в среднекристаллическом продуктивном кварце. По фазовому составу при комнатной температуре ФВ – двухфазные газожидкие. ФВ имеют удлиненную, округлую форму, частую близкую к форме отрицательных кристаллов, и распространены неравномерно.

ФВ гомогенизируются в температурном интервале от 190 до 212 °С. Проведение криометрии показало, что плавление последнего кристаллика льда происходит при температурах -9.9...-8.6 °С, это соответствует концентрациям солей в растворах от 13.8 до 12.4 мас. % экв. NaCl. Плотность флюида составила 0.95–0.98 г/см³, расчетное давление порядка 1 кбар. Температуры эвтектики растворов во ФВ равны -62...-43.6 °С, что позволяет оценить состав водно-солевой системы как CaCl₂-MgCl₂-KCl-H₂O.

Таким образом, кварц из медистых сланцев месторождения Ороёк формировался при температурах 212–190 °С и давлении порядка 1 кбар из гидротермально-метасоматических растворов средней концентрации и высокой плотности, насыщенных хлоридами Ca, Mg и K.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Главные генетические особенности для рудной формации медистых сланцев [4, 9, 19, 23]: постоянная пространственная связь медного оруденения с красноцветными формациями, образовавшимися в сухом и жарком (аридном) климате; локализация руд в сероцветных осадочных породах в непосредственной близости от красноцветных; устойчивый состав главных рудных минералов; зональное расположение сульфидов меди в рудных телах. Все перечисленные выше признаки установлены на рудопроявлении Ороёк.

Выполненные текстурно-структурные исследования вмещающих пород показали, что медистые песчаники рудопроявления испытали многостадийный региональный метаморфизм и были преобразованы в медистые зеленые сланцы, насыщенные сульфидными и кварц-карбонатно-сульфидными линзами, жилами и прожилками.

* Жирным шрифтом выделены преобладающие минералы, обычным шрифтом – менее распространенные минералы.

Рис. 9. Основные минералы меди месторождения Ороёк.

a – пластинки халькоцита, с каймами ковеллина; *b* – ксеноморфное выделение борнита среди вкрапленников халькоцита; *в* – пятнистые выделения ковеллина в халькоците и тонкая кайма борнита (розовое) по краю выделения; *г* – сростание халькоцита, ковеллина и неодигенита с пламенивидными выделениями борнита; *д* – ламелли халькопирита в борните, окруженные тонкой каймой ковеллина (в сростаниях присутствуют и промежуточные фазы – идаит и нукундамит, установленные микронзондовым анализом (рис. 9, *ж*)); *е* – выделение халькопирита в хлорите; *ж* – электронное изображение упорядоченной структуры распада твердого раствора минералов меди; *з* – вариации содержаний элементов в минеральных фазах при распаде твердого раствора борнит-халькопирит и состав различных фаз (преобладание Fe может указывать на преобладание халькопирита, а Cu – халькоцина в минеральной смеси).

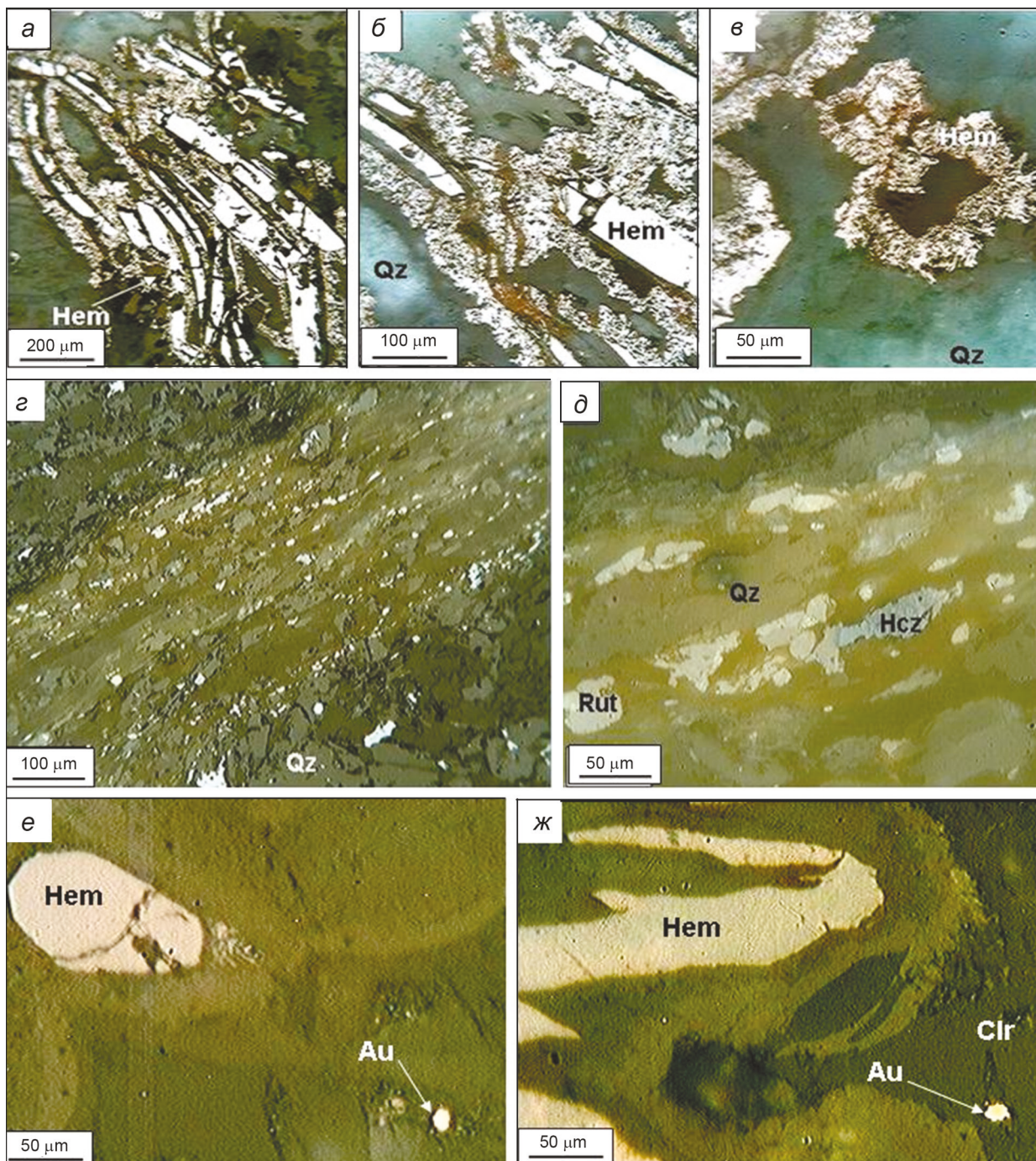


Рис. 10. Формы выделения гематита, рутила и самородного золота в медистых сланцах.

a–в – изогнутость пластинок гематита и тонкочешуйчатый агрегат гематита второй генерации; *г–д* – выделения рутила, приуроченные к сланцеватости породы (снято при разных увеличениях); *е–ж* – формы выделения самородного золота.

Важно отметить, что, согласно термодинамическим расчетам, основной фактор образования того или иного сульфида меди – окислительно-восстановительный потенциал [4, 9, 19, 23]. При смене красноцветных отложений сероцветными происходит постепенное уменьшение величины этого потенциала, и

поэтому при удалении от красноцветных отложений одновременно со сменой состава сульфидов падает содержание меди в рудах. Образуется ряд: халькоцит → борнит → халькопирит → пирит [4, 9, 19, 23]. Последнее звено этого ряда – пирит – на месторождении Ороёк полностью отсутствует, а халькопирита в

Таблица 6. Химический состав рудных минералов месторождения Ороёк по данным микрорентгеноспектрального анализа.

Концентрации элементов, мас. %						Формульные коэффициенты			
S	Cu	Si	Fe	O	Сумма	S	Cu	Si	Fe
Борнит Cu_5FeS_4									
26.02	63.23		10.87		100.12	3.97	4.86		0.95
25.85	63.16		11.36		100.37	4.03	4.97		1.02
Ковеллин Cu_2S_2									
32.56	62.47		5.23		102.74	1.97	1.84		0.17
33.01	66.54		0.67		100.23	1.98	2.01		0.10
Халькоцит Cu_2S									
20.49	79.34		0.56		100.39	0.92	1.79		0.01
20.99	78.81		0.61		100.41	1.04	1.97		0.02
20.97	78.58		0.84		100.38	1.03	1.95		0.02
Халькопирит $CuFeS_2$									
34.83	34.28		30.85		99.96	1.83	0.91		0.93
34.71	37.42		29.17		101.3	1.49	0.81		0.72
Джарлеит Cu_3S_{16}									
21.34	79.42				100.75	14.24	26.75		
21.05	80.76				101.81	15.95	30.88		
21.12	80.48				101.6	16.06	30.88		
Роксбеит Cu_9S_5									
21.96	79.68				101.64	4.79	8.77		
22.18	79.08				101.27	5.00	8.99		
Идаит Cu_3FeS_4									
33.93	51.95		14.91	2.48	100.79	4.02	3.11		1.01
32.74	54.63		12.53	1.46	102.22	3.99	3.36		0.88
Ag-борнит Cu_5FeS_4									
S	Cu	Ag	Fe	O	Сумма	S	Cu	Ag	Fe
32.74	54.63	0.86	12.33	1.46	102.22	5.27	4.44	0.04	
Ag-ярровит Cu_9S_8									
28.76	67.11	0.96			96.83	6.94	8.18	0.07	
Спертиниит $Cu(OH)_2$									
	Cu		Fe	O	Сумма		Cu	O	
	57.91			38.85	96.76		0.82	2.18	
	57.1		0.81	37.73	95.65		0.82	2.18	
Гематит $(Fe.V)_2O_3$									
Al	Cu	Si	Fe	O	V	Сумма	V	Fe	Fe
0.62		0.48	67.58	29.45	1.52	99.66	0.01	3.2	1.79
0.57	0.48	0.71	67.0	30.28	1.42	100.45	0.01	2.93	2.08

рудах ничтожно мало, следовательно, месторождение на вскрытом участке эродировано до уровня борнитовой зоны.

Предположение о появлении с глубиной халькопирита, высказанное В.И. Шпикерманом [14], может не оправдаться. Также нельзя ожидать, что рудоносные горизонты сланцев будут равномерно обогащены медью. Согласно А.М. Лурье [9], распределение концентраций меди в этом формационном типе месторождений чаще всего бонанцевое, что требует особого подхода при разведке бурением. В связи с этим перед началом последнего следует провести палеорекострукцию разреза осадочных толщ с целью

определения направления поступления меденосных рудоворов из красноцветных отложений.

Полученные в настоящее время данные позволяют говорить о том, что самородное золото, встречаемое в медистых сланцах Оройка – кластогенное. Преобладающие минералы меди в месторождении Ороёк – халькоцит и ковеллин с небольшим количеством борнита, которые сереброносны на отдельных участках, что возможно связано с повышенной известковистостью отдельных осадочных слоев (карбонаты – хорошие осадители серебра). В рудную стадию происходит перераспределение и мобилизация серебра из этих горизонтов.

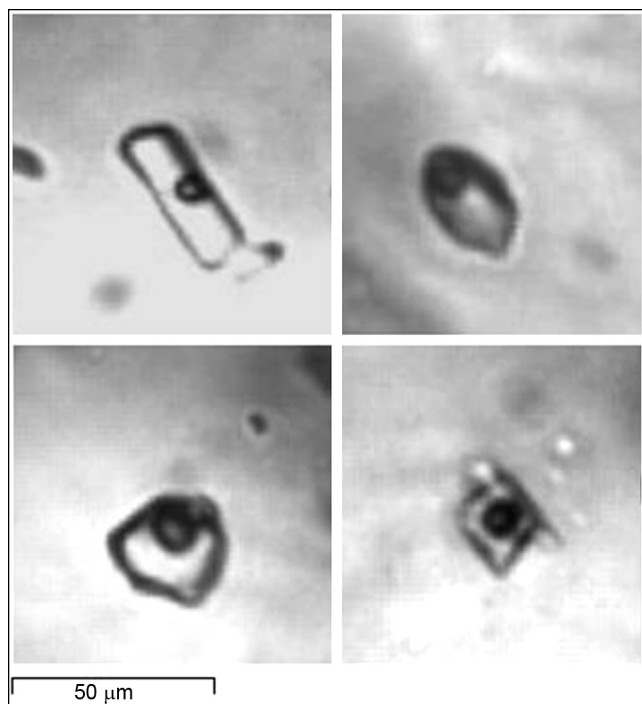


Рис. 11. Газово-жидкие флюидные включения в продуктивном кварце. Снято в проходящем свете ($\times 50$).

Медистые сланцы Оройка подверглись выветриванию во время их эксгумации. Интенсивные приповерхностные изменения не только сформировали многочисленные вторичные минералы меди (табл. 4), но этот процесс мог также привести к заметному увеличению ее содержания, что имеет большое экономическое значение. Обращает на себя внимание отсутствие типичных для зоны окисления медных руд минералов, таких как куприт, малахит и азурит.

На дискриминационных диаграммах (рис. 6) индикаторные показатели изученных образцов месторождения Ороёк компактно концентрируются в поле железистых песчаников и сланцев (рис. 6, б) и приурочены к полю литаренитов, так же как и месторождения Оренбургского Предуралья, Ирана и Польши (рис. 6, а).

Медистые сланцы Оройка по концентрации полезных элементов-примесей (табл. 2), исключая Rh, близки к медистым песчаникам и сланцами Оренбургского Предуралья, Ирана [2, 15, 21, 25, 27, 32] и отличаются низкими содержаниями Co и Ni от медистых песчаников Африканского пояса [20], а Zn и Pb – от Купершифера [15].

Присутствие редкого и дорогостоящего платиноида родия (Rh) во всех изученных образцах медистых песчаников рудопроявления Ороёк (табл. 2) заслужи-

вает проведения дополнительных специализированных минералого-геохимических исследований.

Результаты изучения флюидных включений из кварцев медистых песчаников рудопроявления Ороёк во многом аналогичны для месторождений Африканского медного пояса, также метаморфически преобразованных [20]. Эти флюиды по своим параметрам соответствуют орогенным метаморфогенным растворам [33]. При прогрессирующем метаморфизме флюиды, циркулирующие внутри осадочного бассейна, постепенно нагреваются и уравниваются окружающими метаморфическими породами. Соответственно, эти флюиды могли обогащаться металлами, отложившимися ранее в ходе стратиформной минерализации и переотлагаться в кварцевые жилы и прожилки.

Наше обсуждение указывает на то, что, хотя минерализация Оройка, в соответствии с общепринятой генетической моделью, произошла во время диагенеза, затем была ремобилизована и переотложена в течение многостадийного регионального метаморфизма, завершилась гипергенным обогащением.

Наличие нескольких импульсов минерализации, на которые указывают полученные нами результаты, может быть благоприятным фактором, повышающим потенциальную промышленную значимость рудопроявления Ороёк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории Магаданской области (Северо-Восток России) медистые песчаники и сланцы выявлены в отложениях среднего и верхнего рифея Приколымского террейна. Медная минерализация установлена в кварц-хлоритоидных и хлоритовых сланцах, основная структура которых – сланцеватая, а текстура – полосчатая. Кварц прожилков в медистых сланцах претерпел метаморфические изменения вместе с вмещающими породами.

Медистые сланцы месторождения Ороёк по сравнению с верхней корой заметно обогащены узким спектром микроэлементов: Cu, Ag, Au, Rh, Se, коэффициенты обогащения которых достигают от нескольких десятков (Se, Rh) до сотен (Ag, Au) и тысяч (Cu) раз, что, по-видимому, свидетельствует об их синхронном участии в рудообразовании, характерном для жесткой плиты – Приколымского террейна, в отличие от ступенчатого обогащения в зонах субдукции. Кроме того, изученные образцы незначительно обогащены Cd, Li, Co, Zn, V, U, Sc, Y и REE.

Для медистых сланцев характерны близкие к хондритовому слабонаклонные спектры REE, конфигурации которых характеризуются отсутствием отчетливых Eu минимумов и максимумов. В них преоблада-

ют легкие «гидрофильные» лантаноиды «цериевой» группы. Величины Ce/Ce^* и Eu/Eu^* указывают на окислительные условия, существовавшие при рудообразовании. Полученные геохимические данные показывают, что вмещающие рифейские толщи могли служить источником микроэлементов и REE рудообразующих флюидов.

В рудах среди минералов меди преобладают ковеллин и халькоцит; в незначительных количествах выявлены: роксбиит, идаит, нукундамит, спионкопит, халькопирит, серебросодержащие (Ag около 1 мас. %) борнит и ярровит, а также самородное золото. Обращает на себя внимание отсутствие типичных для зоны окисления медных руд минералов, таких как куприт, малахит и азурит.

В результате изучения флюидных включений в кварце определено, что медная минерализация в кварцевых жилах и прожилках отлагалась при средних температурах 212–190 °С и давлении около 1 кбар из гидротермальных растворов высокой плотности и средней солености, насыщенных хлоридами Ca, Mg и K.

По геохимическим индикаторным показателям установлено сходство медистых сланцев Приколымского террейна, Ирана и Купфершифера. Медистые сланцы Приколымского террейна отличаются от медистых песчаников Африканского пояса низкими содержаниями Co и Ni, а от Купфершифера – низкой концентрацией Pb и Zn.

На рудопроявлении Ороёк полностью отсутствует пирит, а количество халькопирита в рудах ничтожно мало, следовательно, месторождение на вскрытом участке эродировано до уровня борнитовой зоны.

Наличие нескольких импульсов минерализации – благоприятный фактор, повышающий потенциальную промышленную значимость рудопроявления Ороёк.

Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании новых месторождений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны С.А. Шубину за любезно предоставленную для изучения коллекцию образцов рудопроявления Ороёк.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 13.1902.21.0018, соглашение 075-15-2020-802).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисенко А.С. Изучение солевого состава газовой фазы включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
2. Волков А.В., Новиков И.А., Разумовский А.А., Мурашов К.Ю., Сидорова Н.В. Геохимические особенности и условия образования медистых песчаников Оренбургского Предураля // Литосфера. 2018. Т. 18, № 4. С. 593–606.
3. Волкодав И.Г., Горбунов А.И., Механошин В.Ф. Перспективы создания новой полиметаллической базы Якутии // Разведка и охрана недр. 1976. № 10. С. 6–10.
4. Гонгальский Б.И. Месторождения уникальной металлогенической провинции Северного Забайкалья. М.: ВИМС, 2015. 243 с.
5. Глухов А.Н., Тюкова Е.Э. Перспективы развития минерально-сырьевой базы меди Магаданской области // Руды и металлы. 2013. № 5. С. 21–33.
6. Жариков В.А., Горбачев Н.С., Латфутт П., Дохерти В. Распределение редкоземельных элементов и иттрия между флюидом и базальтовым расплавом при давлениях 1–12 кбар (по экспериментальным данным) // Докл. АН. 1999. Т. 366, № 2. С. 239–241.
7. Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. Термобарогеохимия. М.: Недра, 1979. 271 с.
8. Калюжный В.А. Основы учения о минералообразующих флюидах. Киев: Науч. думка, 1982. 240 с.
9. Лурье А.М. Генезис медистых песчаников и сланцев. М.: Наука, 1988. 180 с.
10. Минеев Д.А. Лантаноиды в рудах редкоземельных и комплексных месторождений. М.: Наука, 1974. 237 с.
11. Мирошников А.Е., Козлов Е.И. К характеристике верхнепермских красноцветных отложений восточной части Оренбургского Приуралья // Литология и полезные ископаемые. 1966. № 2. С. 50–56.
12. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987. Т. 1. 560 с.
13. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
14. Шпикерман В.И. Домеловая минерализация Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 333 с.
15. Bechtelet A., Gratzer R., Püttmann W. Geochemical characteristic across the oxic-anoxic interface within the Kupferschiefer of the Lubin-Sierosowice mining district // Chemical Geol. 2002. V. 185, N 1. 9–31.
16. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of Microthermometric Data for H₂O-NaCl Fluid Inclusions / Eds. De Vivo B., Frezzotti M.L. Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications, IMA Short Course Volume, Virginia Polytechnic Institute and State University Press, 1994. P. 117–130.
17. Brown P.E. FLINCOR; a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data // American Mineralogist. 1989. V. 74, N 11–12. P. 1390–1393.
18. Browne P.R.L. Hydrothermal alteration in active geothermal fields // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. (1) Kinetics of gold precipitation from experimental hydrothermal sulfide solutions // Economic Geology Monograph. 1989. V. 6. P. 320–327.
19. Cox D.P., Lindsey D.A., Singer D.A., Diggles M.F. Sediment hosted copper deposits of the world, deposit models and database. US Geological Survey, Open-file report 03-107, 2007. 50 p.
20. Greyling L.N. Fluid evolution and characterisation of mineralising solutions in the Central African Copper belt // Thesis of the Doctor of Philosophy in Science. Johannesburg: University of the Witwatersrand, 2009. 172 p.

21. Hassanpour S., Senemari S. Mineralogy and Geochemistry Studies of the Sorkheh Sediment-hosted Stratiform Copper (SSC) Deposit, NW Iran // *Iranian J. Earth Sci.* 2015. N 7. P. 89–105.
22. Herron M.M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // *J. Sediment. Petrol.* 1988. V. 58. P. 820–829.
23. Hitzman M., Kirkham R., Broughton D., Thorson J., Selley D., The sediment-hosted stratiform copper ore system // *Econ. Geol.* 100th Anniversary Volume, 2005. P. 609–642.
24. Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // *Chem. Geol.* 1994. V. 111. P. 111–129.
25. Konari M.B., Rastad E., Kojima S. Volcanic redbed-type copper mineralization in the Lower Cretaceous volcano-sedimentary sequence of the Keshtmahaki deposit, southern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. // *J. Min. Geochem.* 2013. V. 190, N 2. P. 107–121.
26. Kun L., Ruidong Y., Wenyong Ch. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province, China. // *Chin. J. Geochem.* 2014. V. 33. P. 109–118.
27. Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R., Moayyed M. Geology, mineralization and sulfur isotopes geochemistry of the Mari Cu (Ag) Manto-type deposit, northern Zanjan, Iran // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 81. P. 10–22.
28. McDonough W.F., Sun S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. V. 120. P. 223–253.
29. Monecke T., Kempe U., Gotze J. Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study // *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2002. V. 202. P. 709–724.
30. Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance: 1. Method and results // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. B03211.
31. Pettijohn F.J., Potter P.E., Silver R. *Sand and Sandstone*. New York: Springer, 1972. 618 p.
32. Rajabpour S., Abedini A., Alipour S., Yon S. Geology and geochemistry of the sediment-hosted Cheshmeh-Konan redbed-type copper deposit, NW Iran // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 86. P. 154–171.
33. Ridley J.R., Diamond L.W. Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models Gold in 2000 // *SEG Reviews*. 2000. V. 13. P. 141–162.

*Рекомендована к печати Н.А. Горячевым
после доработки 23.05.2023 г.
принята к печати 06.07.2023 г.*

N.E. Savva, A.V. Volkov, A.L. Galyamov, E.E. Kolova, K.Y. Murashov

Copper shales of the Prikolymy terrane (North-East of Russia): mineralogical and geochemical features and ore-forming conditions

Copper mineralization in the Magadan region (North-East of Russia) has been established in quartz-chloritoid and chlorite shales of the middle and upper Riphean of the Prikolymy terrane. Compared to the upper crust, copper shales of the Oroek deposit are noticeably enriched in a narrow range of trace elements: Cu, Ag, Au, Rh, and Se, with enrichment factors ranging from 10-fold (Se, Rh) to 100-fold (Ag, Au) and even 1000-fold (Cu) suggesting, apparently, their synchronous involvement in ore formation. In addition, the studied samples are slightly enriched in Cd, Li, Co, Zn, V, U, Sc, Y, and REE. Copper shales show relatively flat rare earth element (REE) patterns similar to the chondrite-normalized pattern having no distinct positive or negative Eu anomalies and dominated by light lanthanides. The Ce/Ce* and Eu/Eu* values indicate that ore formation proceeded under oxidizing conditions. The obtained geochemical data show that the Riphean host rocks could serve as a source of trace elements and REE ore-forming fluids. In the ores, covellin and chalcocite are the main copper minerals; less common are roxbyite, idaite, nukundamite, spioncopite, chalcopyrite, silver-bearing (Ag about 1 wt. %) bornite and yarrowite, as well as native gold. Fluid inclusions in quartz suggest that copper mineralization was formed at temperatures of 212–190 °C and a pressure of 1 kbar, from hydrothermal solutions of medium salinity (from 13.8 to 12.4 wt. % eq. NaCl) and high density (0.95–0.98 g/cm³) saturated with chlorides of Ca, Mg, and K. The copper shales of the Prikolymy terrane differ from sedimentary copper and copper shales of the African Belt by low Co and Ni contents and from the Kupfershifer by low concentrations of Pb and Zn. The obtained results can be used for prognosticating new deposits.

Key words: copper shales, mineralogical and geochemical features, fluid inclusions, Prikolymy terrane, North-East of Russia.