

УДК 549

РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОЖЕРЕЛЬЕ: СОПОСТАВЛЕНИЕ С ОБЪЕКТАМИ “СУХОЛОЖСКОГО” ТИПА

© 2023 г. А. Е. Будяк^{1,2}, Ю. И. Тарасова^{1,2,*}, академик РАН Н. А. Горячев^{1,4}, А. В. Блинов^{1,2},
А. В. Игнатъев³, Т. А. Веливецкая³, В. Д. Абрамова⁵, Д. Ю. Щербаков¹

Поступило 18.10.2022 г.

После доработки 13.12.2022 г.

Принято к публикации 15.12.2022 г.

В пределах Ленской золоторудной провинции, кроме широко известных крупнообъемных месторождений золота “сухоложского” типа, таких как Сухой Лог, Вернинское и др. выделяется ряд объектов, существенно отличающихся по стратиграфической, минералого-петрографической, изотопной, геохимической характеристикам и объемам запасов. Наиболее известным из них является месторождение Ожерелье. В статье показаны основные характеристики месторождения Ожерелье, с выделением схожих и отличительных его черт с месторождениями “сухоложского” типа. Результаты, полученные в ходе минералого-петрографических и изотопных исследований, не дают оснований для отнесения месторождения Ожерелье к “сухоложскому” генетическому типу.

Ключевые слова: орогенные золоторудные месторождения, источники металлов, черносланцевые толщи, Байкало-Патомская провинция

DOI: 10.31857/S268673972260223X, **EDN:** NXIYAA

Ленская золоторудная провинция (ЛЗП) является одной из богатейших в России. Наиболее известными золоторудными месторождениями данной территории являются месторождения Сухой Лог, Голец Высочайший, Вернинское, Красный. Согласно преобладающему в настоящее время мнению исследователей, все золоторудные месторождения в пределах Бодайбинского региона, связанные с черносланцевыми породами и сформированными в результате метаморфических преобразований верхнеордовикского–раннесилурийского времени, относятся к “сухоложскому” генетическому типу (СГТ), названному так по названию наиболее известного месторож-

дения гиганта Сухой Лог [1]. Тем не менее на территории ЛЗП расположен ряд объектов (Ожерелье, Догадлынская Жила, Кавказ, Копыловское), чья стратиграфическая позиция (юдомский стратиграфический горизонт), структурные и вещественные характеристики отличаются от перечисленных выше месторождений. Важной характеристикой данной группы месторождений является их относительно низкая продуктивность (запасы золота <10 т). Ввиду вышесказанного, данные объекты требуют дополнительного рассмотрения. Основной целью данной статьи является определение основных минералогических характеристик месторождения Ожерелье, с выделением схожих и отличительных черт месторождения с месторождениями СГТ, детально описанных в работах [2, 3].

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение Ожерелье расположено в Бодайбинском районе Иркутской области в бассейне р. Маракан. Рудное поле месторождения локализовано в пределах Мамско-Бодайбинского синклинария, характеризующегося развитием линейно-складчатых и разрывных структурных комплексов. В пределах рудного поля месторождения, вмещающие породы, представлены метаморфизованными в условиях эпидот-амфиболитовой

¹ Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

³ Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

⁴ Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук, Магадан, Россия

⁵ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: j.tarasova84@yandex.ru

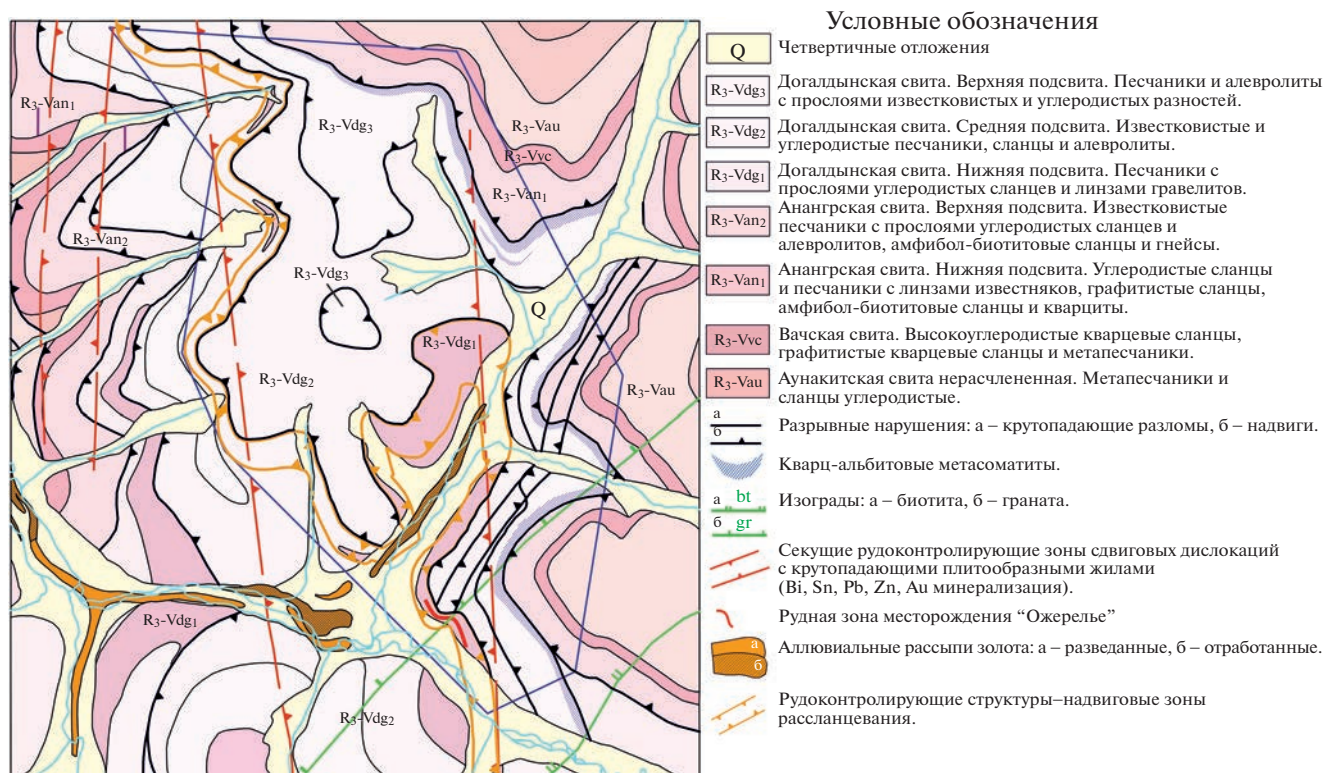


Рис. 1. Схематическая геологическая карта месторождения Ожерелье [3].

и амфиболитовой фаций [3] метатерригенными отложениями юдомской группы (анангская и догалдынская свиты) эдиакарского периода неопротерозойской эры (560–540 млн лет) [4]. Накопление данных отложений происходило в изолированном морском бассейне типа “foreland”, формирование которого связано с непрерывной субдукцией-аккрецией крупных неопротерозойских террейнов (формирование орогена в южной части палеобассейна) к Сибирской платформе на ранней стадии развития центрального Азиатского складчатого пояса [5–7].

В структурном отношении рудное поле месторождения Ожерелье расположено в пределах северо-западного замыкания Маракано-Тунгусской синклинали Мамско-Бодайбинского синклинали. Рудная зона локализована в междвиговом пространстве, мощностью от 20 до 120 м.

Вмещающие отложения догалдынской свиты сложены биотитовыми и хлорит-биотитовыми сланцами, в пределах которых отмечаются мусковит, кварц, кальцит, сидерит, анкерит, гранат, амфибол, кианит. Количество Fe—Mg-карбонатов достигает 10–30%. Содержание C_{org} в отложениях догалдынской свиты варьирует от 0.5 до 2.6%.

Рудные тела представлены протяженными (первые сотни метров) золотоносными жильно-прожилковыми минерализованными зонами, ло-

кализованными в надвиговой зоне, крупной Маракано-Тунгусской синклинали (структура II порядка) [3]. Вмещающие черносланцевые породы нижней подсвиты догалдынской свиты (dg₁) представлены переслаиванием углеродсодержащих сланцев хлорит-кварц-мусковит-карбонатного, двуслюдяного мусковит-кварц-биотитового, кремнисто-слюдисто-карбонатного составов (рис. 1).

Золоторудная минерализация месторождения представляет собой зону интенсивной гидротермально-метасоматической переработки (минерализованные зоны), проявленной в виде Fe–Mg-карбонатизации и мусковитизации, на которую наложена золотоносная жильно-прожилковая минерализация. В пределах рудной зоны месторождения отмечается сочетание золотоносных жил и прожилков согласных со сланцеватостью с более поздними кососекущими жилами, не несущими рудной нагрузки.

Жилы и прожилки представлены несколькими генерациями, имеют различную морфологию и ориентировку. 1) Первая наиболее ранняя синметаморфическая генерация представлена кианит-кварцевыми жилами и прожилками. Мощность таких жил обычно не превышает 0.4–0.5 м, они могут как залегать субсогласно сланцеватости и слоистости, так и сечь ее под разными углами.

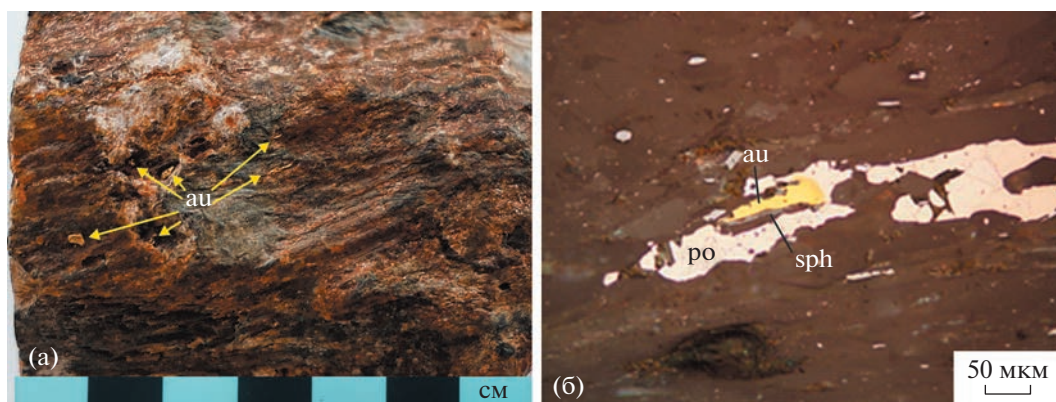


Рис. 2 Самородное золото в рудах месторождения Ожерелье. а) Видимое золото в карбонат-кварцевом прожилке с ксенолитом интенсивно метаморфизованных черных сланцев; б) самородное золото в ассоциации с пирротинитом и сфалеритом.

2) Вторая (рудная) генерация представлена сидерит-кварцевыми жилами и прожилками, которые в основном и образуют рудную жильно-прожилковую зону. Данная генерация содержит основную массу рудной минерализации (пирротин, арсенопирит, сфалерит). 3) Третья генерация жил и прожилков — секущие по отношению к складчатой структуре жилы, имеющие обычно субвертикальное залегание и плитообразную морфологию, иногда с апофизами по сланцеватости. В ассоциации с данной кварц-карбонатной жильно-прожилковой генерацией отмечен новообразованный пирит.

Золотая минерализация приурочена к мало-сульфидным карбонатно-кварцевым жилам и зонам прожилкования в метасланцах, в основном к приконтактовым зонам и ксенолитам метасланцев в жилах (рис. 2 а). Рудные тела характеризуются отчетливыми геологическими границами — наличием значительного количества жильно-прожилкового материала и рыжим цветом рассланцованных пород за счет разложения Fe—Mg-карбонатов и сульфидных минералов. Устанавливается прямая зависимость между насыщенностью минерализованной зоны жильно-прожилковым материалом и золотоносностью: в рудных интервалах количество жильно-прожилкового материала достигает 5–15% (max — 30%). Сульфидная минерализация жильно-прожилкового материала имеет весьма убогое содержание и представлена пирротинитом, пиритом и марказитом, в меньшей степени распространены арсенопирит, халькопирит, ильменит, рутил, висмутин, турмалин, а также зерна видимого золота, которое в некоторых случаях встречается в ассоциации с пирротинитом, в единичных случаях со сфалеритом и арсенопиритом (рис. 2 б). Пирротинит и арсенопирит в зальбандах жил часто образуют скопления ксеноморфных и правильных кристаллов — как друг с другом, так и с золотом [8]. Отдельные золотины часто включа-

ют в себя вкрапленность пирротина, однако была отмечена и обратная ситуация, когда мелкие золотины обрастают пирротинитом. Золото может быть, как неправильной ветвистой, так и комковатой формы. Преобладающим размером, дающим весовые количества свободного металла, является крупность от 0.2 до 1.5 мм.

Золотоносные кварц-карбонатные жилы сложены ксенобластовыми зёрнами кварца удлиненной неправильной формы с неровными извилистыми границами, с размером зёрен в основном от 3×2 — до 4×3 мм (рис. 3). На стыке зёрен кварца и по трещинам внутри них отмечаются частицы углеродистого вещества и развиты единичные мелкие до 0.2×0.02 мм пластинки мусковита. Сульфидная минерализация на месторождении Ожерелье проявлена слабо, доля сульфидов в пределах жильно-прожилкового материала составляет от 0.5 до 2%. Наиболее часто отмечаются линзы пирротина, в меньшей мере проявлены пирит, халькопирит, арсенопирит, сфалерит, марказит, а также единичные находки глаукодота. Рудные минералы образуют выделения удлиненной линзовидной неправильной формы с размерами около 0.6×0.4 мм, расположенные согласно со сланцеватостью. Золото развивается по зальбандам кварцевых жил в ассоциации с железосодержащими карбонатными минералами и чешуйками мусковита, реже рудными минералами (пирротин, арсенопирит, сфалерит). Крупность золотинов может достигать 2 мм, редко 3 мм.

Пирит представлен двумя морфотипами. Реликты первичных фрамбоидов пирита-1 удалось установить, в единичных случаях. Они отмечаются в виде редких округлых включений в пирротинит или в виде самостоятельных округлых включений во вмещающих породах (рис. 4 а). Размер их не превышает 50 мкм. Состав минералов определен с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMN, оснащён-

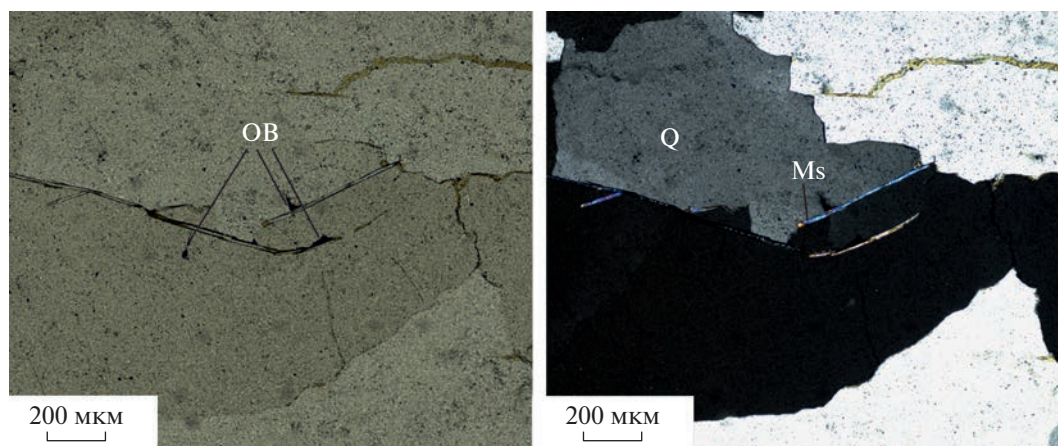


Рис. 3. Участок кварцевой жилы с органическим веществом и частичками мусковита в межзерновом пространстве.

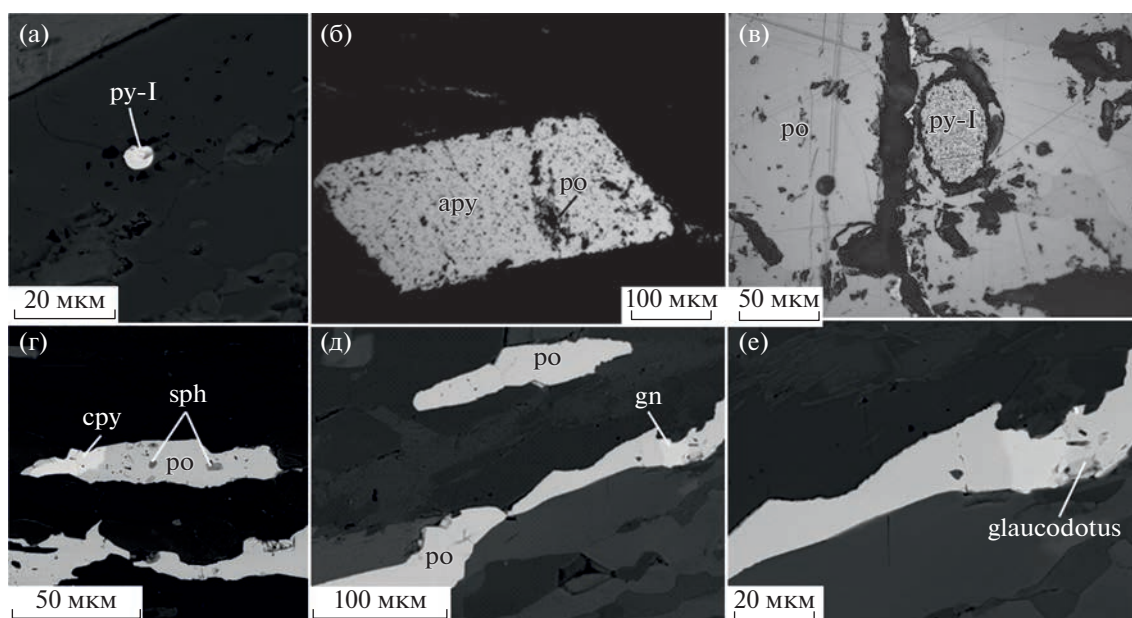


Рис. 4. Сульфиды месторождения Ожерелье: а – реликт фрамбоидного пирита-1; б – включение пирротина в ромбическом кристалле арсенопирита; в – реликты пирита-1 в пирротине; г – халькопирит и галенит в ассоциации с пирротинном; д – галенит в ассоциации с пирротинном; е – включение глаукодота в пирротине.

ного системой энергодисперсионного микроанализа AztecLive Advanced Ultim Max 40 (Oxford Instruments Analytical Ltd.) в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН. Подготовка материала проведена на анализаторе фрагментов микроструктуры твердых тел Минерал С7 с линией пробоподготовки в МНОЦ «Байкал». Результат микроанализа «Aztec Energy» XMax 50+ в ИГХ СО РАН приведен в табл. 1. В виде включений микронного размера отмечаются оксиды урана (настуран).

Арсенопирит на месторождении Ожерелье представлен редкими крупными ромбическими кристаллами размером до 2.0 мм (рис. 4 б) во вме-

щающих породах вблизи кварцевых жил. В кристаллах арсенопирита присутствует пирротин неправильной формы, развивающийся по трещинам.

В пределах рудной зоны месторождения Ожерелье наибольшее распространение имеет пирротинная минерализация, которая чаще всего представляет собой линзовидные выделения размером 0.5–0.7 мм (рис. 4 в–е). Линзы пирротина приурочены к сланцеватости. В крупных зёрнах пирротина присутствуют единичные включения рутила, округлые включения арсенопирита, халькопирита, сфалерита и ранней разновидности пирита-1. По кайме пирротина в единичных слу-

Таблица 1. Состав сульфидов на месторождении Ожерелье, мас. %

	Fe	S	Ni	Co	As	Cu	Zn	Au г/т
Пирит-1 (24)	<u>42.3</u> 37.4–46.1	<u>51.7</u> 45.2–56.1	<u>3.7</u> 2.9–4.8	<u>2.2</u> 1.8–3.1				<u>0.14</u> 0.07–0.19
Арсенопирит (19)	<u>36.7</u> 29.9–40.1	<u>20.5</u> 18.7–23.2			<u>43.5</u> 40.9–48.6			
Пирротин (22)	<u>63.2</u> 58.7–67.1	<u>36.4</u> 32.6–38.9	<u>0.4</u> 0.0–0.8					
Глаукоdot (2)		<u>20.5</u> 18.2–13.5	<u>8.3</u> 6.3–11.0	<u>18.4</u> 16.2–22.4	<u>40.7</u> 37.7–47.2			
Халькопирит (14)	<u>31.7</u> 27.9–37.1	<u>34.6</u> 31.5–37.4				<u>34.2</u> 30.4–38.4		
Сфалерит (6)	<u>13.3</u> 9.6–15.4	<u>30.4</u> 28.7–35.2					<u>56.1</u> 52.7–60.7	
Марказит (12)	<u>44.2</u> 41.3–48.2	<u>54.0</u> 50.3–57.8						
Пирит-2 (18)	<u>45.7</u> 42.1–48.9	<u>53.6</u> 49.4–58.3						

Примечание. Пределы обнаружения основных и примесных компонентов составляют 0.3 мас. % для метода энергодисперсионной спектроскопии.

чаях отмечается марказит. В составе пирротина присутствует незначительная примесь Ni, кобальт не отмечен. При этом содержания Ni установлены в центральной части минеральных зёрен, по которым отмечались реликты ранних пиритов. В значительной степени линзовидные выделения пирротина имеют сетчатую структуру, часто по периферии развиваются каймы рутила.

Также на месторождении установлены единичные находки глаукодота, представленные включениями округлой формы размером до 10 мкм, развивающимися по периферии линз пирротина (рис. 3 е).

Халькопирит и сфалерит находятся в сростаниях с пирротинном, полностью подчиняясь морфологии линзовидных выделений. Размер включений халькопирита около 40 мкм, сфалерита до 100 мкм. Характерно то, что в составе сфалерита полностью отсутствует примесь кадмия, что характерно для высокотемпературных условий. Полученный химический состав сфалерита отличается от стехиометрического повышенным содержанием железа. Согласно экспериментальным работам [9], кристаллизация высокожелезистого сфалерита (Fe – 13.3 мас. %) происходит в интервале температур 580–640°C. При изучении минералогии руд месторождения Ожерелье установ-

лено, что формирование сульфидной ассоциации пирротин, арсенопирит, халькопирит, сфалерит, глаукоdot и самородное золото происходило субодновременно и, по всей вероятности, отражает наиболее высокотемпературную стадию формирования месторождения.

Самородное золото наиболее часто встречается в зальбандах кварцевых жил в ассоциации с мусковитом в карбонатной оторочке. Преобладает крупное золото (свыше 0.5 мм). Поверхность золотин неровная, форма комковатая или чешуйчатая (рис. 2 а). По пробности золото относится к высокопробному в среднем 850‰ (от 770 – до 920‰).

Марказит представлен в виде кайм, развивающихся по пирротину. Мощность оторочки составляет обычно первые сотые доли мм. Наличие марказита в изученных образцах указывает на то, что на момент его формирования температура не превышала 350°C, а температурный режим последующего этапа активизации не достигал критических условий его перекристаллизации [9].

Процесс формирования сульфидной минерализации завершается образованием крупных кубических кристаллов пирита-2 размером до 1 см. Поверхность кристаллов характеризуется характерной штриховкой на гранях. Пирит-2 в основ-

ном встречается в общей массе породы, гораздо реже в ассоциации с наиболее поздней генерацией кварц-карбонатных жил. Часто кристаллы находятся в кварцевой оторочке мощностью до 1 мм в виде вкрапленности во вмещающих породах. Наиболее часто отмечается развитие пирита-2 по трещинам и в виде колломорфно-зональных агрегатов по кайме линз пирротина.

Рутил развивается в виде тонкой каймы вокруг сульфидов, чаще пирротина, аналогичные выделения установлены практически на всех золоторудных объектах Бодайбинского района.

Для определения возможного источника золота, параметров его миграции и отложения были изучены изотопные характеристики $\delta^{34}\text{S}$ в сульфидах. Исследование проводилось локальным методом в лаборатории стабильных изотопов в ЦКП ДВГИ ДВО РАН с использованием фемтосекундного комплекса лазерной абляции NWR Femto [10]. Изотопный состав серы был проанализирован в обеих разновидностях пирита (пирит-1, пирит-2), марказите и пирротине. Всего было проанализировано 83 точки, по 4 образцам в пределах рудной зоны месторождений, а также 51 точка по 3 образцам догалдынской свиты, отобранным за пределами месторождения Ожерелье (расстояние от 2 до 60 км от месторождения Ожерелье). По изотопному составу серы сульфидные минералы оказались весьма однородны. Независимо от близости к рудной зоне месторождения, значения $\delta^{34}\text{S}$ для пирротина, варьировали в пределах от -11.9‰ , до -13.0‰ (среднее по 39 точек в 7 образцах -12.4‰), для пирита-1 и пирита-2, вариации $\delta^{34}\text{S}$ оказались полностью идентичны, укладываясь в рамки значений от -12.0 до -12.6‰ (среднее по 73 точкам из 7 образцов -12.5‰), для марказита разброс значений составил от -11.5 до 12.6‰ .

ОБСУЖДЕНИЕ

В пределах рудной зоны месторождения эволюция минералообразования представляет следующий ряд: пирит-1 → пирротин, арсенопирит, глаукодот, халькопирит, сфалерит → марказит → пирит-2 (табл. 2).

Реликты первичного фрамбоидного пирита-1 отмечаются на всех золоторудных объектах Бодайбинского района и идентифицируется как пириты ранней диагенетической стадии [2, 16]. В пределах месторождения Ожерелье воздействие метаморфизма амфиболитовой фации на более ранние минеральные фазы привело к практически полному замещению раннего диагенетического пирита-1 наложенным пирротинном. Степень проявления раннедиагенетического пирита на прочих месторождениях Бодайбинского синклинория значительно варьирует, т.к. напрямую

зависит от поздних высокотемпературных процессов. Следующая морфологическая разновидность пирита, отмечаемая абсолютно на всех месторождениях Бодайбинского района, относимых к “сухоложскому” генетическому типу, идентифицируется как пирит катагенной стадии [16]. Однако на месторождении Ожерелье данная морфологическая разновидность пирита не установлена вообще. Отсутствие катагенного пирита связано с его появлением на прочих объектах на этапе регионального метаморфизма погружения (~ 555 млн лет [13]), во время накопления маласоидных отложений анагрской свиты. Соответственно, догалдынская свита вмещающая месторождение Ожерелье, в этот этап развития задугового бассейна, еще не накопилась. Таким образом, при формировании месторождения Ожерелье процесс нагнетания рудоносного катагенного флюида в антиклинальные структуры, по аналогии с месторождениями дальнетайгинского-жуинского стратиграфических уровней, исключается. Пирит-2 является завершающей стадией формирования сульфидной минерализации месторождения Ожерелье. По своей морфологии его можно отнести к поздней (пострудной) генерации пирита месторождений СГТ (табл. 2).

Формирование сульфидной ассоциации пирротин, арсенопирит, халькопирит, сфалерит и глаукодот происходила субодновременно и, по всей вероятности, отражает наиболее высокотемпературную стадию формирования месторождения в условиях метаморфизма амфиболитовой фации, что подтверждается наличием глаукодота и появлением высокожелезистого сфалерита. Нахождение золота в данной высокотемпературной ассоциации говорит о том, что именно эту стадию развития месторождения Ожерелье можно считать наиболее рудопродуктивной. Данная ассоциация с пирротинном хорошо соотносится с раннерудной высокотемпературной ассоциацией (пирротин, халькопирит, арсенопирит-1), выделяемой в пределах месторождений СГТ. Марказит, который в пределах месторождения Ожерелье обрастает пирротин, является завершающей низкотемпературной рудной стадией формирования на ретроградном этапе метаморфизма. Соответственно, при сопоставлении с минерализацией месторождений СГТ, марказит месторождения Ожерелье может быть соотнесен с рудоносным пиритом, также сформированным на ретроградной стадии метаморфизма [16]. Однако в отличие от пирита СГТ месторождений, марказит месторождения Ожерелье золоторудной нагрузке не несет. В свою очередь пострудная стадия формирования месторождения Ожерелье, фиксирующаяся по появлению поздних кварцевых жил и пирита-2, сопоставима с пострудной стадией формирования месторождений СГТ.

Таблица 2. Сопоставление минералогических характеристик месторождений СГТ и Ожерелье

Стадии формирования месторождения	Событие	“сухоложский” генетический тип	Ожерелье
Гранитоидный магматизм	Конкудеро-мамаканский гранитоидный батолит	Q-жилы, Пирит-4 320–270 млн лет [11]	Q-жилы, Пирит-2 320–270 млн лет [12]
Метаморфизм (регрессивный)	Мамский плутоно-метаморфический комплекс ~450–420 млн лет [11–13]	ЗОЛОТО Пирит-3 Галенит Арсенопирит-2 Халькопирит Герсдорфит Сфалерит Блеклые руды Марказит (220–320°C) 440–420 млн лет [11]	Марказит (280–350°C)
Метаморфизм (прогрессивный)		Пирротин-2 Арсенопирит-1 Пирротин-1 (~390–420°C) 450–440 млн лет [11]	ЗОЛОТО Арсенопирит Пирротин Глаукодот Сфалерит Халькопирит (580–640°C)
седиментация	догалдынская свита ~550 млн лет	—	Пирит-1 (м-е Ожерелье)
	анангрская свита ~555 млн лет [4, 13]	Пирит-2 (катагенный) (м-я СГТ)	—
	аунакитская свита ~590 млн лет	Пирит-1 (м-е Красный)	
	хомолхинская свита 610–600 млн лет [4]	Пирит-1 (м-я Сухой Лог; Г. Высочайший)	

Примечание. Обобщенная стратиграфическая схема с расположением отложений Бодайбинского синклинория и месторождений “сухоложского” генетического типа, в сопоставлении с месторождением Ожерелье. Составлена по материалам и геохронологическим оценкам [4, 11–15], данная работа].

Значения $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов по результатам локального анализа попали в интервал от -11.5 до -13.0‰ . В среднем для рудной зоны месторождения значения $\delta^{34}\text{S}$ составляют -12.4‰ (от -11.7 — до -12.9‰) и для сульфидов за пределами рудной зоны месторождения -12.5‰ (от -11.5 — до -13.0‰). Узкий

диапазон вариаций $\delta^{34}\text{S}$ всех изученных сульфидных минералов независимо от стадийности их формирования указывает на единый источник серы при их формировании. Разброс полученных значений $\delta^{34}\text{S}$ укладывается в рамки значений, полученных для сульфидной минерализации в

породах догалдынской свиты за пределами рудной зоны от -8.9 до -15.5% (среднее $\sim 12.0\%$) [6], что также может свидетельствовать о заимствовании серы из вмещающих отложений догалдынской свиты. Необходимо отметить, что сидеро-халькофильная геохимическая специализация догалдынской свиты сопоставима с черносланцевыми толщами хомолхинской и аунакитской свит.

Данные значения $\delta^{34}\text{S}$ отличаются от большинства золоторудных объектов СГТ Бодайбинского района как по величине разброса вариаций, так и потому, что значения $\delta^{34}\text{S}$ значительно легче (месторождения дальнотайгинской группы — от $+4$ до $+21\%$ [17]; месторождения жуинской группы — от $+2$ до -6%). Кроме того, в пределах месторождения Сухой Лог значения $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов за пределами месторождения демонстрируют более тяжелый изотопный состав серы и более широкий диапазон их вариаций (12.5 – 21.6%), относительно значений $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов из рудной зоны $\delta^{34}\text{S}$ (5.8 – 10.6%) [18]. В своих работах Е.О. Дубинина и соавт. [19, 20] такую закономерность объясняют тем, что “гомогенизация и изотопное облегчение серы пирита в рудной зоне могли возникнуть вследствие переноса и отложения сульфидов с участием флюида”. Ввиду вышесказанного можно предположить, что формирование сульфидной минерализации месторождения Ожерелье произошло за счет потенциала серы вмещающих отложений догалдынской свиты, что согласуется с мнением, высказанным в работе А.В. Чугаева [12], которое базируется на изучении изотопного состава Pb, Sr, Nd, O, C в рудных и жильных минералах поздних кварцевых жил. Несмотря на однотипный с месторождениями СГТ процесс гоомогенизации серы необходимо отметить отсутствие тенденции к облегчению значений $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов рудной зоны месторождения Ожерелье, относительно сульфидов, отобранных из пород догалдынской свиты за его пределами. По всей вероятности, флюидоперенос серы, а соответственно и золота, в пределах месторождения Ожерелье, отличался от флюидного режима формирования рудных тел основной группы месторождений СГТ. Возможно, это связано с отсутствием катагенной стадии, флюидоперенос которой осуществлялся посредством миграции подвижной фазы органического вещества. Косвенным подтверждением данного предположения может являться тот факт, что в пределах изучаемых ранее месторождений СГТ пирит катагенной стадии характеризуется более легким изотопным составом серы, относительно значений $\delta^{34}\text{S}$ как валовой серы из вмещающих отложений, так и более поздней метаморфогенной генерации пирита, изученных локальным методом [11, 16].

В результате проведенного сопоставления можно разделить полученные минералогические

и изотопно-геохимические характеристики на схожие с месторождениями “сухоложского” типа и на отличающиеся от них.

Сходство:

(1) литологическая приуроченность рудной зоны месторождения к черносланцевой пачке, либо к ее контакту с вышележащей пачкой, сложенной алевролитами, метапесчаниками.

(2) Присутствие диагенетического пирита, обогащенного Au — 0.14 г/т; Co — 2.21 мас. %; Ni 3.77 мас. %.

(3) Наличие позднего пострудного пирита, без золота.

(4) Гомогенизация изотопного состава серы сульфидов относительно вмещающих пород. Согласно значениям $\delta^{34}\text{S}$, сера пирротина, марказита и пострудного пирита месторождения Ожерелье, заимствована из вмещающих пород.

Отличие:

(1) Нет обязательной структурной приуроченности к апикальной части антиклинальной складки 3-го порядка.

(2) Отсутствует катагенная стадия перераспределения вещества, что подтверждается отсутствием катагенного пирита.

(3) Основная масса золоторудной минерализации ($>90\%$) находится в самородной форме в кварцевых жилах и не имеет сростаний с пиритовой минерализацией.

(4) Значения $\delta^{34}\text{S}$ в пределах рудной зоны месторождения независимо от морфологических разновидностей сульфидных минералов, не имеют тенденции к облегчению изотопного состава относительно сульфидов за пределами месторождения.

ВЫВОДЫ

Таким образом, сопоставление состава рудной минерализации месторождения Ожерелье с типовыми месторождениями СГТ показывает, что несмотря на определенные элементы сходства, руды этого месторождения отличаются заметным распространением кварцевожильной минерализации, отсутствием характерной генерации пирита (катагенного пирита месторождений СГТ), свободной формой нахождения самородного золота, что позволяет отнести их к прожилково-вкрапленному золото-кварцевому типу золоторудной минерализации.

Учитывая разницу в структурных и минералогических характеристиках, а также параметрах продуктивности данных месторождений с месторождениями СГТ, необходим пересмотр поисковых критериев, используемых для поисков месторождений в Бодайбинском районе связанных с юдомским стратоуровнем (догалдынская свита).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-27-00074.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буряк В.А., Гончаров В.И., Горячев Н.А. Эволюционный ряд крупнообъемных золото-платиноидных месторождений в углеродистых толщах // ДАН. 2002. Т. 387. № 4. С. 512–515.
2. Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Плотинская О.Ю., Новоселов К.А., Масленников В.В., Котляров В.А., Блинов И.А., Кузьменко А.А., Грибоедова И.Г. Эволюция состава пирита на золоторудных месторождениях Копыловское и Кавказ в черносланцевых толщах (Бодайбинский район, Россия) по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 1. С. 71–92.
3. Иванов А.И. Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). М.: ФГУП ЦНИГРИ, 2014. 215 с.
4. Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N. Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia // Precambrian Res. 2015. V. 267. № 1. P. 39–71.
5. Рыцк Е.Ю., Ковач В.П., Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Богомолов Е.С., Котов А.Б. Изотопная структура и эволюция континентальной коры Восточно-Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геотектоника. 2011. № 5. С. 17–51.
6. Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Дубинина Е.О., Гареев Б.И., Шатагин К.Н., Тарасова Ю.И., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. Изотопные (Sm–Nd, Pb–Pb и $\delta^{34}\text{S}$) и геохимические характеристики метасадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) и эволюция осадочного бассейна в неопротерозойское время // Петрология. 2018. Т. 26. № 3. С. 213–244.
7. Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И., Ванг К.-Л. (Kuo-Lung Wang), Горячев Н.А. Единая неопротерозой-раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского кратона // ДАН. 2019. Т. 484. № 3. С. 80–84.
8. Бабяк В.Н., Блинов А.В., Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Новые данные о геолого-структурных особенностях золоторудных месторождений Ожерелье, Ыканское, Угахан и Голец Высочайший // Науки о земле и недропользование. 2019. Т. 42. № 4. С. 388–412. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412>
9. Burton P.B., Jr., Toulmin P. Experimental determination of the reaction chalcopyrite+sulfur=pyrite+bornite from 350°C to 500°C // Econ. Geol. 1964. № 59. P. 747–752.
10. Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V. An Improved Femtosecond Laser-ablation Fluorination Method for Measurements of Sulfur Isotopic Anomalies ($\Delta^{33}\text{S}$ and $\Delta^{36}\text{S}$) in Sulfides with High Precision // Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2019. V. 33. P. 1722–1729. <https://doi.org/10.1002/rcm.8528>
11. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Иванов А.В., Горячев Н.А., Игнатиев А.В., Веливецкая Т.А., Радомская Т.А., Блинов А.В., Бабяк В.Н. Типоморфизм, типохимизм и изотопно-геохимические характеристики сульфидов железа месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь) // Записки Российского минералогического общества. 2021. 150(1): 63–75. <https://doi.org/10.31857/S0869605521010123>
12. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Rassokhina I.V., Oleinikova T.I. ^{40}Ar – ^{39}Ar and Rb–Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) // Ore Geology Reviews. 2022. V. 144. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>
13. Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В., Мохов А.В., Антонов А.В., Сергеев С.А. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U–Th–Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов // Геология рудных месторождений. 2011. Т. 53. № 1. С. 32–64.
14. Чумаков Н.М., Семихатов М.А., Сергеев В.Н. Опорный разрез вендских отложений юга средней Сибири // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2013. Т. 21 № 4. С. 26.
15. Чугаев А.В., Плотинская О.Ю., Чернышев И.В., Котов А.А. Неоднородность изотопного состава Pb в сульфидах различных парагенетических ассоциаций на золоторудном месторождении Вернинское (Байкало-Патомское нагорье, Россия) // ДАН. 2014. Т. 457. № 3. С. 337–342.
16. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Игнатиев А.В., Веливецкая Т.А., Блинов А.В., Горячева Е.М. Типоморфизм сульфидов золоторудного месторождения Угахан (Байкало-Патомское нагорье) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 1. С. 8–13.
17. Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А. Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным // Геохимия. 2009. № 10. С. 1108–1117.
18. Дубинина Е.О., Чугаев А.В., Иконникова Т.А., Авдеев А.С., Якушев А.И. Источники вещества и флюидный режим формирования кварц-карбонатных жил на месторождении золота Сухой Лог, Байкало-Патомское нагорье // Петрология. 2014. Т. 22 № 4. С. 347–379.
19. Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г., Щегольков Ю.В., Альшеева Э.И., Борисовский С.Е. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 1. С. 3–46.
20. Дубинина Е.О., Иконникова Т.А., Чугаев А.В. Неоднородность изотопного состава серы пирита на месторождении Сухой Лог и определяющие ее факторы // ДАН. 2010. Т. 435. № 6. С. 786–790.

ORE MINERALIZATION OF THE OZHEREL'E DEPOSIT: COMPARISON WITH OBJECTS OF THE "SUKHOI LOG" TYPE

A. E. Budyak^{a,b}, Yu. I. Tarasova^{a,b,#}, Academician of the RAS N. A. Goryachev^{a,d}, A. V. Blinov^{a,b},
A. V. Ignatiev^c, T. A. Velivetskaya^c, V. D. Abramova^e, and D. Yu. Shcherbakov^a

^a Vinogradov Institute of Geochemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation

^b Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

^c Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

^d N.A. Shilo North-Eastern Integrated Research Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Magadan, Russian Federation

^e Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

[#] E-mail: j.tarasova84@yandex.ru

Within the Lena gold province, in addition to the well-known large-volume gold deposits of the "Sukhoi Log" type, such as Sukhoi Log, Verninskoye, etc. there are a number of objects that differ significantly in stratigraphic, mineralogical-petrographic, isotopic, geochemical characteristics and the volume of reserves. The most famous of them is the Necklace deposit. The article shows the main characteristics of the Ozherel'e deposit, highlighting its similar and distinctive features with deposits of the "Sukhoi Log" type. The results obtained in the course of mineralogical-petrographic and isotope studies do not give grounds for attributing the Necklace deposit to the "Sukhoi Log" genetic type.

Keywords: orogenic gold deposits, sources of metals, black shale strata, Baikal-Patom province