

УДК 553.041:553.2

ЗОЛОТО В РУДАХ ВЕРНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Николаева Анастасия Николаевна¹,
nikolaevaanas759@gmail.com

Мазуров Алексей Карпович¹,
akm@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена слабой изученностью вещественного состава руд Вернинского месторождения. Полученные данные являются важным инструментом не только для уточнения прогностико-поисковых критериев золоторудного месторождения углеродистых черносланцевых толщ, но также будут способствовать увеличению извлечения золота из руды за счет корректировки технологической схемы обогащения.

Основная цель: изучение минеральной формы золота в рудах.

Объектом исследования являются руды Северной зоны Вернинского месторождения.

Методы: стандартные петрографические и минераграфические анализы, а также сканирующая электронная микроскопия.

Результаты. Проведенными исследованиями установлено, что оруденение представлено двумя морфологическими типами: вкрапленный и прожилково-вкрапленный. Значительная часть рудной минерализации приурочена ко второму типу. Выявлено, что золото представлено в виде самородного с высокой пробой, большая его часть (75...80 %) приурочена к прожилково-вкрапленному типу. Самородное золото диагностировано преимущественно в ассоциации с арсенопиритом и пиритом. Многообразие форм выделений является одной из специфических особенностей самородного золота на данном месторождении, при этом отмечается господство в рудах золота неправильной формы. Для вариации диагностированных форм отмечается общая характерная черта – подчиненность полостям, существовавшим ранее, к началу или во время кристаллизации самого золота. При этом генезис данных полостей и непосредственно их очертания, а также расположение в рудах достаточно различны. Одной из наиболее распространенных морфологических разновидностей золота в рудах является проволочковидная форма, отличающаяся в трещинах катаклаза в арсенопирите, в меньшей степени диагностируются амебообразные и каплевидные формы, образующие многочисленные мельчайшие включения самородного металла в рудах.

Ключевые слова:

Восточная Сибирь, золото-сульфидный геолого-промышленный тип, углеродистые толщи, текстурно-структурные особенности, сульфиды, золото, минеральная форма.

Введение

Вернинское месторождение углеродистых терригенных толщ входит в состав Ленской золотоносной провинции, являющейся одной из крупнейших провинций по запасам золота во всем мире [1]. Золоторудное месторождение расположено в центральной части Бодайбинского района Иркутской области, в 146 км от города Бодайбо (рис. 1, а). Было открыто в 1974 г., и до 1999 г. с перерывами продолжалась его разведка. По существу, является западным флангом крупнейшего месторождения золота Сухой Лог.

По состоянию на 2019 г. оцененные и доказанные ресурсы золота составляли около 140 т при среднем содержании золота в руде 2,3 грамма на тонну. Большая часть запасов находится в трех рудных телах и представлена прожилково-вкрапленными рудами [2].

Для добычи золота в 2004 г. ОАО «Полюс золото» была создана Ленская золоторудная компания, а в 2005 г. приобретена лицензия на отработку Вернинского месторождения [2]. С середины 2006 г. было начато строительство горно-обогатительного комплекса, который в 2012 г. был введен в эксплуатацию по полной технологической схеме.

Материал и методика исследования

Морфология золота и вещественный состав руд были изучены по пробам, отобранным из керна скважин, пробуренных по Северной рудной зоне в 2005 г.

Вес керновых проб составлял 4...5 кг. Отбор материала в пробу производился после отбора керна на определение золота. Первоначально образцы были макроскопически описаны. Далее отобранные пробы были детально изучены и описаны с помощью петрографического и минераграфического исследований.

Все петрографические и минераграфические описания, включая фотодокументацию, были выполнены на исследовательском микроскопе Zeiss Imager 2m.

Для изучения минеральной формы золота, а также его морфологических особенностей и характера сростания с другими минералами была использована сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) на микроскопе Tescan Vega 3SBU с термоэмиссионным вольфрамовым катодом. В процессе исследований проводилась съемка поверхности руд и качественное определение состава зёрен по всей площади. Особое внимание уделялось разнообразным включениям золота и его взаимоотношению с другими минералами.

Геологическое строение

Месторождение сложено породами нижней и средней подсвиты Аунакитской свиты позднего рифея, образующих опрокинутую на юг Вернинскую антиклиналь субширотного простирания. Нижняя подсвита Аунакитской свиты (R_{3au}³) является основной рудовмещающей толщей (рис. 1, б) [3]. Мощность ее варьирует от 165 до 235 м.

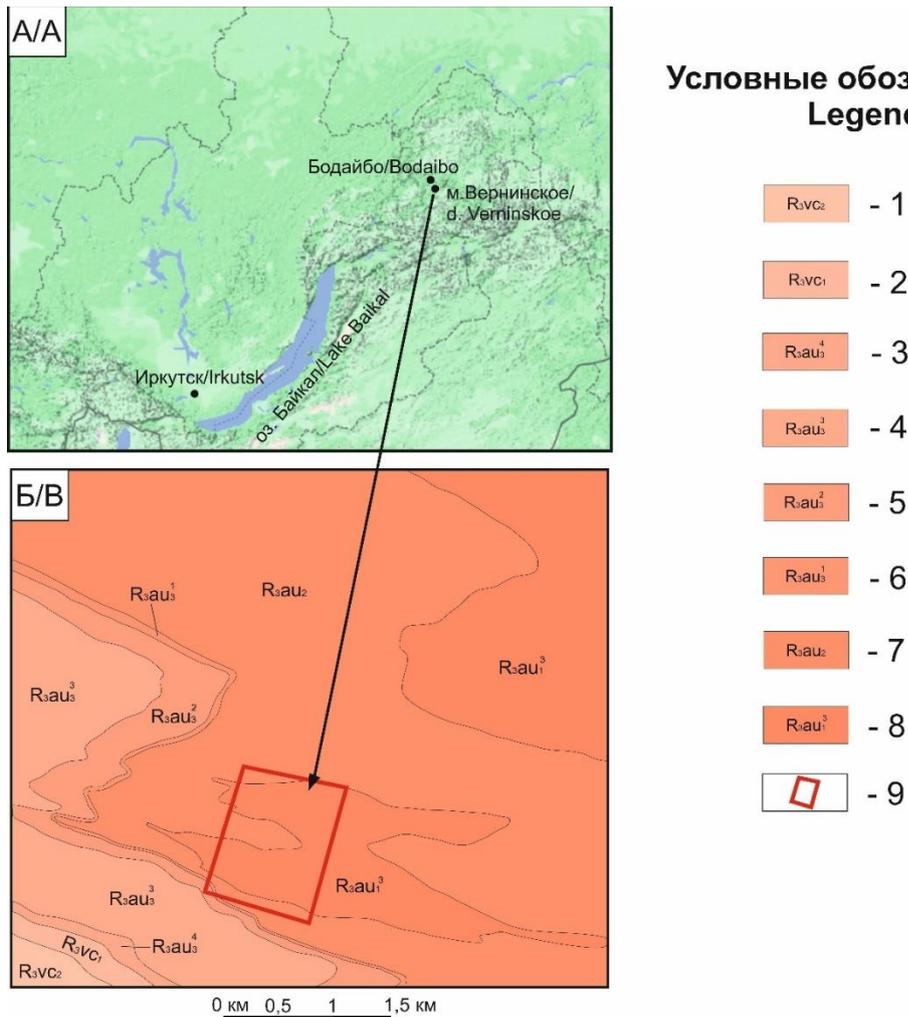


Рис. 1. Географическое положение (А) и геологическое строение (Б) месторождения [3] Вернинское. Условные обозначения: 1, 2 – Вачская свита: 1 – верхняя подсвита; 2 – нижняя подсвита; 3–6 – Аунакитская свита, верхняя подсвита: 3 – четвертая пачка; 4 – третья пачка; 5 – вторая пачка; 6 – первая пачка; 7, 8 – Аунакитская свита: 7 – средняя подсвита; 8 – нижняя подсвита; 9 – контур месторождения

Fig. 1. Geographical position (A) and geological structure (B) of the deposit [3] Verninskoye. Legend: 1, 2 – Vach formation: 1 – upper subformation; 2 – lower subformation; 3–6 – Aunakit formation, upper subformation: 3 – fourth pack; 4 – third pack; 5 – second pack; 6 – first pack; 7, 8 – Aunakit formation: 7 – middle subformation; 8 – lower subformation; 9 – deposit contour

Толща сложена ритмично переслаивающимися серицит-кварцевыми песчаниками и углеродистыми филлитовидными сланцами. Среди пород толщи отмечается маркирующий горизонт, сложенный известняками. Средняя подсвита Аунакитской свиты на 60...75 % сложена филлитовидными сланцами, остальное приходится на карбонат-серицит-кварцевые и кварцитовидные песчаники [3–10]. Исходные осадочные породы подверглись процессам регионального метаморфизма и околорудного метасоматоза. В результате указанных процессов были образованы минеральные комплексы, которые, по мнению И.В. Кучеренко [3, 11–14], представлены двумя тыловыми зонами, отражающими структуру рудовмещающего метасоматического ореола, а также схему минералого-петрохимической зональности околорудных метасоматических ореолов мезотермальных золоторудных месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате. Ми-

неральный состав тыловой зоны отвечает составу березита, смежной – березитоида (березита с альбитом) при унаследовании метасоматитами от черного до серого цветов в результате сохранения керогена или же частичного снижения его содержания при неполном окислении [14–18].

Оруденение представлено тремя пологозалегающими зонами с прожилково-вкрапленной кварц-сульфидной минерализацией. В целом мощность минерализованной зоны составляет более 500 м при протяженности более 2 км [14]. Параметры рудных тел колеблются в широких пределах, наиболее крупное из них по протяженности составляет 730 м по простиранию и 890 м по падению при мощности от 3,8 до 59,8 м.

Вмещающие породы в результате широко проявленного в районе коллизионного процесса превращены в метаосадки. В дальнейшем в процессе гидротермально-метасоматических изменений сформиро-

вались пропилитовая и березитовая формации. Слабо проявленная пропилитовая формация охватывает самую внешнюю зону гидротермально-измененных пород месторождения. В свою очередь, березитовая формация проявлена на месторождении наиболее широко и именно к ней пространственно приурочены все рудные тела [14–20].

Рудовмещающая толща представлена в доминирующем объеме тонко-среднезернистыми, реже средне-крупнозернистыми песчаниками, в меньшем объеме отмечаются аргиллиты и алевролиты, имеющие разную степень рассланцованности. Аналогично Сухому Логу, продолжение которого на юго-востоке представляет образование в схожих складчато-разломных структурах, в породах частично сохранилась обломочная фракция, представленная кварцем [14–23].

Минеральный состав алевролитов и песчаников представлен, помимо кварца, карбонатами, керогеном, серицитом, сульфидами, лейкоксеном, альбитом, при этом данные минералы содержатся в породах в переменных количествах и разных сочетаниях, часто образуя сложные сростания [12, 14, 18]. Содержание карбонатов в породах неустойчивое, может характеризоваться как их полным отсутствием, так и высоким присутствием (до 65...70 %), но обычно среднее содержание данного минерала составляет 5...20 %. По данным сканирующей электронной микроскопии карбонаты представлены анкеритом.

Результаты

В формировании руд Вернинского месторождения принимают участие минералы золото-пирит-арсенопиритовой ассоциации, которая в свою очередь контролируется зонами расланцевания на глубину 500 м и более.

Проведенными исследованиями установлено, что оруденение представлено двумя морфологическими типами: вкрапленный и прожилково-вкрапленный. Значительная часть рудной минерализации приурочена ко второму типу.

Во *вкрапленных рудах* отмечается преобладание нерудного материала, обычно занимающего до 55...75 % объема руды, над рудным (рис. 1, а, б).

Распределение минералов в руде неравномерное. В составе рудной минерализации преобладают пирит и арсенопирит, суммарно составляющие до 15...23 %, при этом обычно пирит доминирует над арсенопиритом, составляя примерно 18...20 % от общего объема руды.

Пирит характеризуется кристаллически-зернистой и тонкозернистой генерациями, при этом вторая достаточно распространена во вкрапленных рудах. Предположительно, именно данный тип сульфида имеет более раннее происхождение среди присутствующих сульфидных минералов, размеры его не превышают первых мкм.

Размер кристаллически-зернистой генерации варьирует в пределах 0,01...2,5 мм, при этом крупнозернистые фракции в рудах преобладают. Нередко встречаются дезинтегрированные индивиды с неправильной угловатой формой. Стоит отметить, что не все зерна сохранили цельный изометричный облик, в некоторых

раздробленных (катаклазированных) агрегатах по трещинам отмечается заполнение галенитом и реже сфалеритом. Диагностированы случаи образования фрамбозального пирита, обусловленного процессом собирательной кристаллизации (рис. 3, а) [24–26].

Арсенопирит является второстепенным сульфидом во вкрапленном типе руд. Отмечается в виде метакристаллов короткопризматической формы размером до 1,5 мм с хорошо выраженными гранями. Вкрапленности арсенопирита и пирита отмечаются как в свободном виде, так и в сростании друг с другом в кварце и анкерите, реже в ортоклазе [27].

Сфалерит во вкрапленных рудах обычно спорадически заполняет пустоты и трещины, как в рудных (пирит), так и в нерудных (кварц, анкерит) минералах. Выделения образуют неправильные формы (рис. 3, б).

Галенит диагностируется в данном типе руд в резко подчиненном количестве (1...3 %), при этом развит в виде разнообразных неправильных включений, заполняющих пустоты в пирите. Обычно данные агрегаты имеют соотношение длины и мощности 5:1, при этом по мощности они не превышают 1 мкм, а в длину 50 мкм.

Второстепенные минералы во вкрапленных рудах представлены рутилом TiO_2 , лейкоксеном $Fe_2Ti_3O_9$, цирконом $ZrSiO_4$ и минералами группы редкоземельных элементов (РЗЭ).

Прожилково-вкрапленные руды (рис. 2, в, г) по отношению к вкрапленным являются доминирующим типом. Прожилки сложены кварцем SiO_2 и карбонатом, по результатам сканирующей электронной микроскопии представленным анкеритом $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$. Мощность изучаемых прожилков достаточно не выдержана и не превышает 2,5...3 см. Карбонат образует гнездовые скопления размером до 1 см, при этом по составу достаточно однородные. Сульфиды представлены арсенопиритом, пиритом, сфалеритом и реже халькопиритом с галенитом.

Доминирующий сульфид в данном типе руд – арсенопирит, представлен крупнозернистыми агрегатами неправильной формы со средними размерами до 11 мм в длину и 5 мм в ширину. Редко в рудах встречаются двойниковые сростания сульфида. При изучении данного типа руд отмечался катаклиз арсенопирита (рис. 2, г), выраженный в раздроблении зерен и цементации частиц кварцем [27].

Пирит обычно представлен изометричными и слабоизометричными зёрнами размером от 0,1 мкм до 1 мм. Часто отмечается в ассоциации с арсенопиритом (в виде включений в самом минерале). Скопление зерен этого сульфида в данном типе руд достаточно редкое явление, но имеет место быть.

Сфалерит при изучении прожилково-вкрапленных руд диагностирован в достаточно малом количестве, представлен каплевидными и прожилковидными включениями в зёрнах пирита, подверженных процессу катаклаза.

Халькопирит при изучении руд диагностировался единично в виде неправильных образований, заполняющих пустоты других сульфидов, чаще всего арсенопирита.

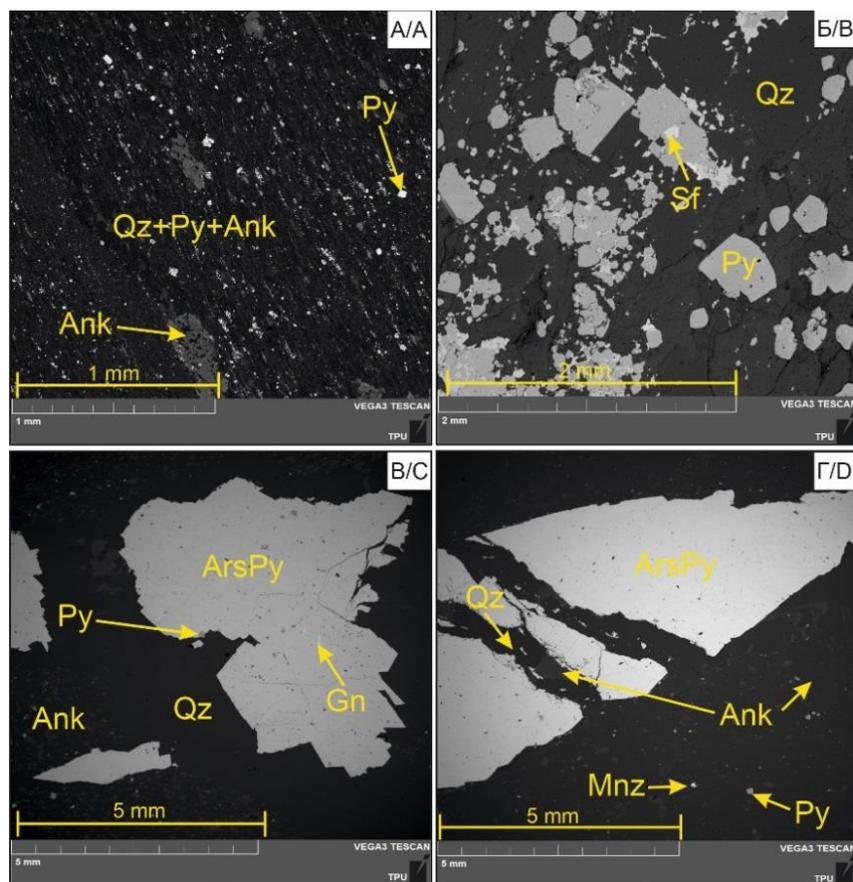


Рис. 2. Изображения сканирующего электронного микроскопа в обратно рассеянных электронах, демонстрирующие вкрапленную (А, Б) и прожилково-вкрапленную (В, Г) текстуру руд (увеличенный фрагмент прожилка). Qz – кварц, Py – пирит, Ank – анкерит, ArsPy – арсенопирит, Gn – галенит, Mnz – монацит

Fig. 2. SEM images in backscattered electrons, demonstrating disseminated (A, B) and vein-disseminated (C, D) texture of ores (enlarged veinlet fragment). Qz – quartz, Py – pyrite, Ank – ankerite, ArsPy – arsenopyrite, Gn – galena, Mnz – monazite

Аналогично вкрапленным, в прожилково-вкрапленных рудах отмечаются включения рутила TiO_2 , циркона $ZrSiO_4$, лейкоксена $Fe_2Ti_3O_9$, а также минералов группы редкоземельных элементов.

По химическому составу для пирита данных типов руд характерен состав: S – 52,47...53,01 %; Fe – 45,94...47,03 %. Из других элементов спародически отмечен в качестве примеси Ti (0,21...0,94 %), в единичном случае зафиксировано содержание As (1,2 %). В галените были встречены примеси Fe (2,77 %). Также в сфалерите единично диагностировано присутствие Fe (4,37 %).

В обоих типах руд отмечаются включения циркона $ZrSiO_4$ и рутила TiO_2 .

Циркон по своим морфологическим характеристикам представлен в преобладающем количестве неправильными зернами, реже изометричными кристаллами в виде короткостолбчатых призм с зональным строением, изредка полуразрушенными (рис. 3, в). Минерал представлен одной генерацией и отмечается в пустотах и трещинах кварца.

Для рутила в рудах характерна вытянутая призматическая, игольчатая, а также неправильная формы агрегатов (рис. 3, б, г). Последние, вероятнее всего, являются обломками кристаллов. Состав минерала:

Ti – 55...60 %; O – 40...45 %. Единоразы диагностирована примесь Ba (6,02 %). Данный минерал отмечается в трещинах и пустотах нерудных минералов: анкерита, ортоклаза и кварца. Помимо этого, в рудах диагностировались тонкоигольчатые агрегаты лейкоксена, являющиеся по своей природе продуктом изменения титанового минерала, в нашем случае рутила.

Минералы группы редкоземельных элементов (рис. 3, з-е) представлены зернами разнообразной формы выделения (округлые, амебообразные, каплевидные), по химическому составу (рис. 3, ж) сложные группой цериевых (легких) элементов: Ce, P, Nd, La, Pr, Sm и весьма редко в малом процентном количестве Ag (не более 0,1 %). Данному химическому составу соответствуют такие минералы группы РЗЭ, как монацит (Nd, Ce, La) $(P,Si)O_4$ (рис. 3, д) – минерал, относящийся к классу фосфатов лантаноидов, и рабдофан-(Ce) (Ce, La) $PO_4(H_2O)$ – минерал группы рабдофана (водных редкоземельных фосфатов). Отличительной характеристикой второго минерала является его слабо вытянутая форма с соотношением длины и ширины 2:1, где длина варьируется в пределах 5...125 мкм. Иногда данные зерна имеют слабопористую структуру (рис. 3, е), а также полуразрушены и дезинтегрированы.

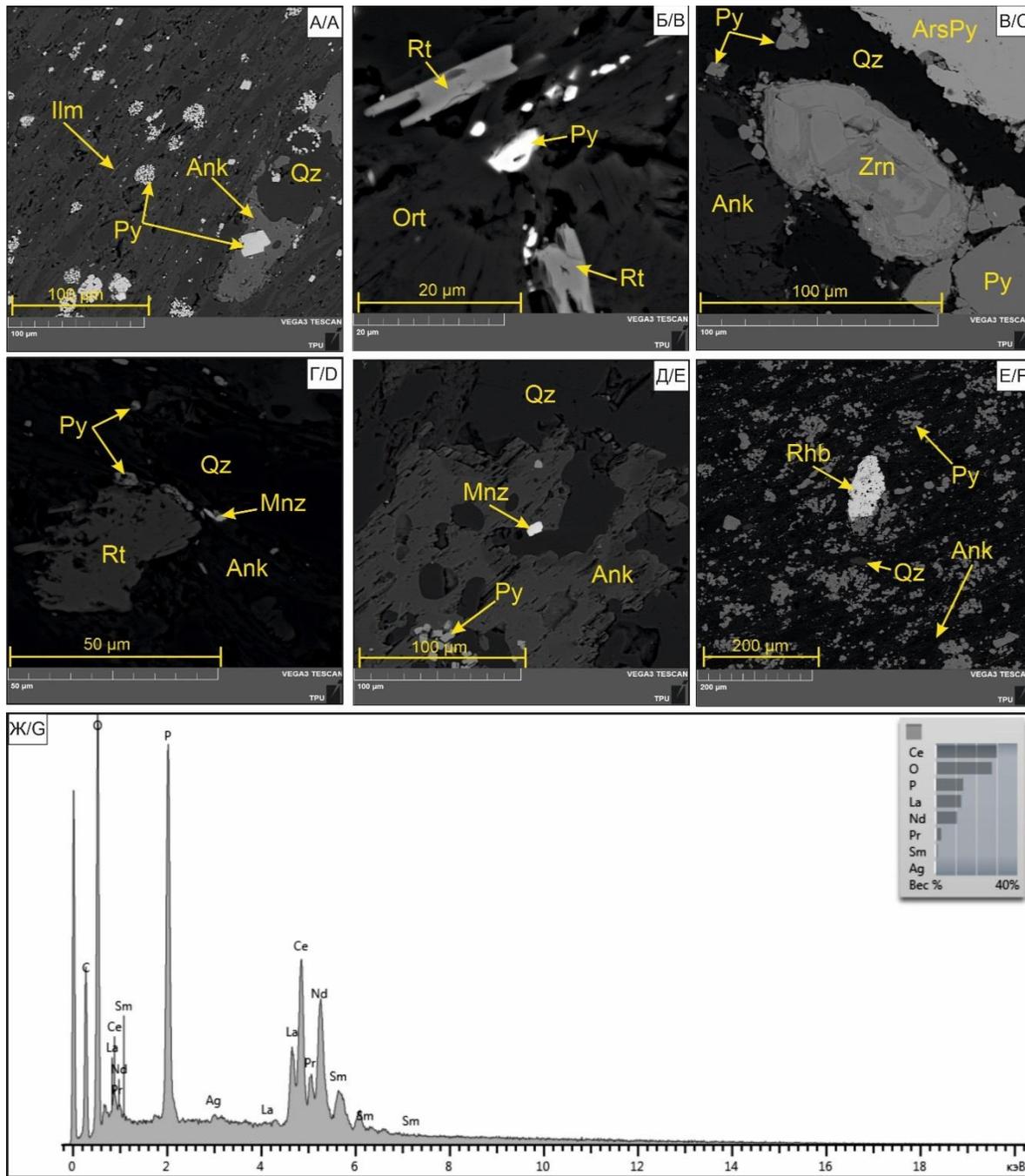


Рис. 3. Изображения сканирующего электронного микроскопа в обратно рассеянных электронах, демонстрирующие фрамбоэдальные скопления пирита (А), характерные вытянутые формы рутила (Б), зональность кристалла циркона (В), а также образование рутила неправильной формы с включениями монацита на периферии (Г), выделения монацита (Д), рабдофана-(Сс) (Е) и усредненный химический состав РЗЭ (Ж). Py – пирит, Qz – кварц, Ank – анкерит, Zrn – циркон, ArsPy – арсенипирит, Mnz – монацит, Rhb – рабдофан-(Ce), Rt – рутил, Gn – галенит, Ort – ортоклаз

Fig. 3. SEM images in backscattered electrons showing framboidal pyrite accumulations (A), characteristic elongated rutile shapes (B), zircon crystal zoning (C), and irregularly shaped rutile formation with monazite inclusions on the periphery (D), monazite exudations (E), rhabdophane-(Ce) (F), and the average chemical composition of rare earth elements (G). Py – pyrite, Qz – quartz, Ank – ankerite, Zrn – zircon, ArsPy – arsenopyrite, Mnz – monazite, Rhb – rhabdophane-(Ce), Rt – rutile, Gn – galena, Ort – orthoclase

В результате проведенного исследования было установлено, что золото в руде находится в виде самородного. При этом около 75...80 % диагностируемого золота приурочено к прожилково-вкрапленному типу. Установлено, что золото связано с сульфидами

и диагностировано преимущественно в ассоциации с арсенипиритом, пиритом и сфалеритом [28–38].

Одной из специфических особенностей самородного золота на данном месторождении является многообразие форм выделений, при этом отмечается гос-

подство в рудах золота неправильных форм, вариация которых заслуживает отдельного внимания.

Большая часть золотой минерализации приурочена к прожилково-вкрапленным рудам. При этом морфология данного самородного металла для каждого типа имеет отличительные характеристики.

Золото *прожилково-вкрапленных руд* в доминирующем количестве представлено проволочковидными формами, которые заполняют трещины арсенопирита, возникшие в результате катаклаза. Каплевидные и амeboобразные формы диагностируются в рудах намного реже.

Для *вкрапленного типа оруденения* характерно преобладание амeboобразных и каплевидных форм выделений минерала с размерностью от 1 до 55 мкм. При этом более мелкие образования доминируют в рудах и по размерам варьируют в пределах 30...40 мкм.

Для золота в рудах отмечается общая характерная черта – подчиненность полостям, существовавшим ранее, к началу или во время кристаллизации самого золота [29]. При этом генезис данных полостей и непосредственно их очертания и расположение в рудах различны. Одной из наиболее распространенных морфологических разновидностей являются гемидиоморфные частицы, которыми представлены многочисленные мельчайшие вкрапления золота в рудах.

В доминирующем количестве в рудах отмечаются трещинные проволочковидные выделения в арсено-

пирите, достаточно уплощенные и анизометричные за счет ограничения стенками самих трещин. Соотношение длины и мощности данных выделений колеблется от 1:3 до 1:25, при этом средняя мощность составляет 2 мкм. Контуры краев данных выделений обычно округлые либо извилистые, за счет неровностей стенок самих трещин. Также часто отмечается лишь частичное заполнение золотом трещин (рис. 3, в), оставляющее в них пустоты и образующее тупые, ровные и неправильные грани. Диагностированные удлиненные агрегаты золота проволочковидных форм, очевидно, имеют метасоматическое происхождение. Отличительной их характеристикой является ребристо-ямчатый рельеф поверхности [27].

Плохообразованные амeboобразные и каплевидные кристаллы диагностируются в рудах достаточно часто, при этом мелкие вкрапленности отмечаются в сульфидах. Размеры их обычно не превышают 1...55 мкм. В аншлифах данные формы золота диагностируются как в виде одиночных каплевидных и амeboобразных (рис. 4, а, б) зерен, так и в виде их скоплений и сростков. При сканировании руд отмечается, что данные агрегаты подчиняются трещинам или же интервенциям в сульфидах, при этом наблюдается сохраненность независимости границ зерен. Что касается сульфидных минералов, чаще всего для данных форм выделения золота характерна ассоциация со сфалеритом и пиритом (рис. 4, а, з).

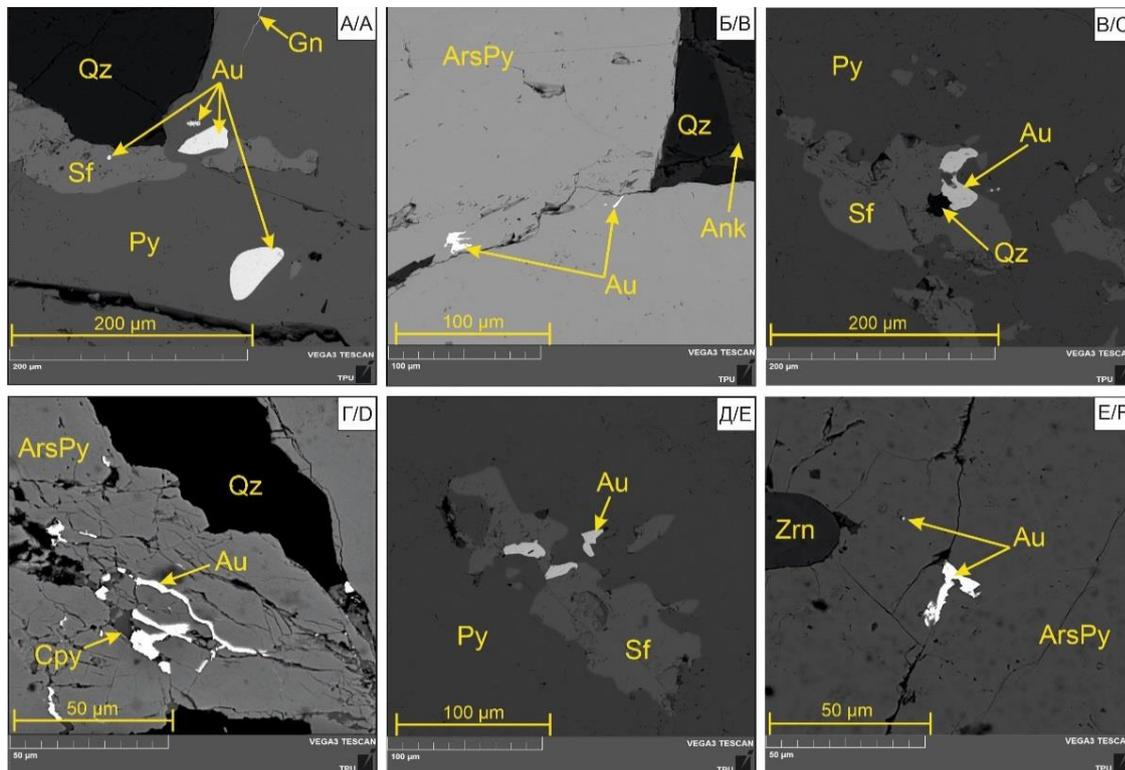


Рис. 4. Изображения сканирующего электронного микроскопа в обратно рассеянных электронах, демонстрирующие каплевидные (А), а также амeboобразные включения золота в пирите и сфалерите (В, Д) и трещинные проволочковидные (Б, Г, Е) формы распределения данного самородного металла в арсенопирите. Au – золото, Py – пирит, Qz – кварц, ArsPy – арсенопирит, Sf – сфалерит, Gn – галенит, Ank – анкерит

Fig. 4. SEM image in backscattered electrons, demonstrating drop-shaped (A), as well as amoeba-like inclusions of gold in pyrite and sphalerite (C, E) and cracked wire-like (B, D, F) forms of distribution of this native metal in arsenopyrite. Au – gold, Py – pyrite, Qz – quartz, ArsPy – arsenopyrite, Sf – sphalerite, Gn – galena, Ank – ankerite

Единично выявленные слабоокругленные формы золотин возникли исходно, вероятнее всего, по октаэдрическому габитусу в результате округления граней [29]. Обычно слабоограниченные золотишки располагаются вдоль трещин или вырастают в зерна сульфидов (арсенопирита, пирита и сфалерита). Поверхности золотин неровные, иногда мелкоячеистые. Обычно они концентрируются у границ зерен арсенопирита и пирита ранних генераций. Размер данных образований составляет 1...10 мкм.

При изучении состава золотоносных минеральных парагенезисов спорадически отмечалась примесь серебра в самородном металле, с которым золото в рудах

также образует интерметаллические соединения и твердые растворы. По результатам сканирующей электронной микроскопии среднее значение примеси серебра Ag в золоте колеблется в пределах 2,59...6,35 %. Назвать данные образования минералом электрумом (AuAg) будет неправильно из-за низкого содержания серебра, которое в данном минерале должно присутствовать в количестве 15 % и более [28, 29].

В таблице представлен усредненный состав золота в определенной ассоциации с минералами для вкрапленного и прожилково-вкрапленного типа руд. Данные получены по результатам сканирующей электронной микроскопии.

Таблица. Усредненный состав золота по данным сканирующей электронной микроскопии в каждом типе руд, мас. % [28–30]

Table. Average composition of gold according to scanning electron microscopy in each type of ores, wt. % [28–30]

В каком минерале находится золото What mineral contains gold	Компоненты (среднее значение)/Components (average)						Сумма Sum	Проба золота Gold content
	Au	Ag	Fe	Zn	As	Cu		
Прожилково-вкрапленный тип руд/Veinlet-disseminated ore type								
Арсенопирит/Arsenopyrite	90,69	6,35	–	–	2,96	–	100	935
Халькопирит/Chalcopyrite	92,71	4,92	1,55	–	–	0,56	99,74	950
Вкрапленный тип руд/Disseminated ore type								
На границе сфалерита с пиритом On the border between sphalerite and pyrite	95,61	3,71	0,07	0,61	–	–	100	963
Сфалерит/Sphalerite	93,07	5,05	1,89	–	–	–	100,1	949
Пирит/Pyrite	94,19	5,19	0,62	–	–	–	100	948
Арсенопирит/Arsenopyrite	93,7	4,34	–	–	1,86	–	99,9	956

По полученным данным, золото на месторождении является высокопробным Au_{935...963}.

По мнению многих исследователей, в их числе и Н.В. Петровская [29], в золоторудных месторождениях, как правило, присутствуют две главные генерации золота, первая из которых образует тонкодисперсную вкрапленность в сульфидной ранней ассоциации, а вторая в виде более крупных выделений сопровождается позднюю сульфидную ассоциацию. В результате коллизии процесса, протекающего на Вернинском месторождении, можно предположить, что обе генерации золота подверглись растворению и переотложению, в результате чего самородный минерал и характеризуется высокой пробой.

Обсуждение результатов

Полученные данные проведенных исследований коррелируются с данными по месторождениям-аналогам Чертово Корыто и Сухой Лог.

Золото в *Сухом Логу* встречается только во вкрапленном пирите или кварц-пирит-карбонатных жилах. Определены два генетических типа золота, различающихся по пробе. Высокопробное золото Au_{900...920} находится в виде каплеобразных частиц внутри пирита, находящегося в ассоциации с другими сульфидами и кварцем. Золото пробой Au_{840...880} было сформировано позже в виде крупных зерен в жилах и прожилках в ассоциации с пиритом. По данным granulometry, преобладающая часть самородного золота по своим размерам варьирует в пределах 40 мкм, остальная – менее 10 мкм. Золото ранних генераций в рудах стремится к «компактной» форме, а поздние зерна обычно вытянутые или проволочковидные, сформировавшиеся в трещинах и на контактах зерен сульфидов и кварца [33–35, 37].

На месторождении *Чертово Корыто* преобладает прожилково-вкрапленный золото-кварц-сульфидный тип минерализации. Золото представлено разными генерациями: в виде механических примесей в арсенопирите и пирите, а также включениями размером до 0,5 мм в арсенопирите. Некоторая часть золота содержит Ag и является наиболее высокопробным Au_{886,5...922,9}. Структура взаимных границ между минералами и золотом зазубренная, что свидетельствует о их одновременном выделении. По зонам катаклаза крупных кристаллов развиваются аллотриоморфные проволочковидные включения золота совместно с пиритом, реже галенитом [36, 38].

На *Вернинском месторождении* преобладает прожилково-вкрапленный золото-пирит-арсенопиритовой тип минерализации. Золото является высокопробным Au_{935...963} и представлено разнообразными формами выделения: каплевидной, амебообразной и проволочковидной. Золото каплеобразных и амебообразных форм имеет пробу Au_{936...963} и приурочено к пириту, сфалериту и арсенопириту. Размер частиц варьирует в пределах 50 мкм. Для проволочковидных форм выделения золота характерна проба Au_{935...952}. Агрегаты заполняют трещины в арсенопирите. Мощность данных выделений варьирует от 0,1 до 1 мкм, а длина до 50 мкм. Данная форма золота в рудах является доминирующей. Единично диагностированы агрегаты золота слабоокруглой формы размером менее 1 мкм.

По полученным данным отмечается достаточно большое сходство Вернинского месторождения с Чертовым Корытом. Для обоих месторождений характерно преобладание проволочковидной формы выделения золота и приуроченность его в большом количестве к арсенопириту. При этом проба золота на

Вернинском месторождении является наиболее высокой среди упомянутых месторождений.

Имеющиеся различия между данными месторождениями отмечаются за счет их принадлежности к разделенным в пределах разреза и во времени стратиграфическим единицам, сформировавшимся в различных геодинамических обстановках [38].

По полученным результатам можно сделать вывод, что все три месторождения имеют сходные процессы рудообразования, вероятно, за счет участия в одном палеозойском геодинамическом событии [37], повлекшем за собой формирование крупной Ленской золотоносной провинции, а также месторождений различных по масштабу [38].

Заключение

Руды Вернинского месторождения в основном сложены золото-пирит-арсенопиритовой минерализацией, которая контролируется зонами расланцевания на глубину 500 м и более. Вмещающие породы в результате широко проявленного в районе коллизионного процесса превращены в метаосадки. В дальнейшем в процессе гидротермально-метасоматических изменений сформировались пропилитовая и березитовая формации, ко второй из которых пространственно приурочены все рудные тела.

В ходе изучения Северной рудной зоны Вернинского месторождения по текстурно-структурным особенностям выявлены два типа руд: вкрапленный и прожилково-вкрапленный. Второй тип занимает доминирующую роль.

Нерудные минералы в рудах представлены кварцем SiO_2 , анкеритом $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$ и ортоклазом $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$. Рудные минералы включают в себя пирит FeS_2 , арсенопирит FeAsS , сфалерит ZnS , галенит PbS , рутил TiO_2 , циркон ZrSiO_4 , минералы группы РЗЭ и самородное золото Au . Впервые в рудах диагностированы циркон и минералы группы цериевых РЗЭ, представленные монацитом $(\text{Nd}, \text{Ce}, \text{La})(\text{P}, \text{Si})\text{O}_4$ и рабдофаном-(Ce) $(\text{Ce}, \text{La})\text{PO}_4(\text{H}_2\text{O})$.

Основу сульфидной минерализации представляет арсенопирит и пирит, в меньшей степени отмечается сфалерит, галенит и весьма редко халькопирит. Для вкрапленных руд характерно преобладание пирита, в прожилково-вкрапленных – арсенопирита.

Золото в рудах находится в самородном состоянии и парагенетически связано с сульфидными образованиями, преимущественно с прожилково-вкрапленным типом руд: в ассоциации с арсенопиритом, пиритом и в меньшей степени сфалеритом.

Для многообразных форм выделений золота на данном месторождении отмечается общая характер-

ная черта – подчиненность к полостям, существовавшим ранее, к началу или во время кристаллизации самого золота. При этом генезис данных полостей и непосредственно их очертания и расположение в рудах различны. Более распространенными морфологическими разновидностями являются аллотриоморфные частицы, которые представлены многочисленными мельчайшими вкраплениями проволочковидного, каплевидного и амебообразного золота в рудах. Размеры включений изменяются от 1 до 55 мкм.

Большая часть диагностируемого золота приурочена к прожилково-вкрапленному типу и характеризуется проволочковидными выделениями, заполняющими в свою очередь трещины катаклаза в арсенопирите. Самородные образования достаточно уплощенные за счет стенок трещин, а контуры их краев округлые либо извилистые также вследствие неровностей стенок самих трещин. Размер данных образований весьма невелик, соотношение длины и ширины варьирует от 1:2 до 1:25, где средняя длина составляет 25 мкм. Отмечаются случаи, когда длина достигала 55 мкм. Самородный металл в данном типе руд диагностируется в ассоциации с арсенопиритом. Достаточно редко отмечаются каплевидные и амебообразные формы выделения золота в пирите и спародически в сфалерите. Данные образования по своим размерам не превышают 10 мкм.

Вкрапленный тип руд характеризуется выделениями амебообразных и каплевидных форм золота, подчиненных трещинам и интервенциям в пирите и сфалерите. Размеры образований 1...50 мкм, единично выявлены золотишки размером до 55 мкм. Спародически во вкрапленных рудах выявлены слабоокруглые зерна золота, по своей природе, вероятнее всего, имеющие первоначально октаэдрический габитус. Данная форма выделения самородного металла отмечается в ассоциации с пиритом и весьма редко с арсенопиритом ранних генераций. Размер золотинок не превышает 10 мкм.

По классификации уровня пробности [29] золото относится к высокопробному ($\text{Au}_{935...963}$). Спародически диагностировались примеси серебра в самородном металле, среднее значение которого отмечалось в пределах 2,59...4,8 %.

По результатам проведенных работ отмечается схожесть в процессе рудообразования с месторождения Сухой Лог и Чертово Корято, также входящих в состав Ленской золоторудной провинции. Данный факт объясняется тем, что месторождения участвовали в одном палеозойском геодинамическом событии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2023-0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района / И.К. Рундквист, В.А. Бобров, Т.Н. Смирнова, М.Ю. Смирнов, М.Ю. Данилова, А.А. Ащевлов // Геология рудных месторождений. – 1992. – Т. 34. – № 6. – С. 3–15.
2. Годовой отчет ОАО «Полус золото» за 2010 год. URL: <https://www.e-dsbsure.ru/portal/FileLoad.aspx?Fileid=249021> (дата обращения 30.09.2022).
3. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в Вернинском золоторудном месторождении (Ленский

- район) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 22–33.
4. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кряжев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Алышева, С.Е. Борисовский // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–4.
5. Колмаков Ю.В., Потехина Е.В., Колмаков А.Ю. Геодинамические обстановки золотого оруденения Тонодского и Бодай-

- бинского районов (Патомское нагорье, Россия) // Вопросы естествознания. – 2016. – Т. 4. – № 12. – С. 73–80.
6. Новожилов Ю.И., Гаврилов А.М. Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. – М.: ЦНИГРИ, 1999. – 175 с.
 7. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
 8. 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) / A.V. Chugaev, A.E. Budyak, Y.O. Larionova, I.V. Chernyshev, A.V. Travin, Y.I. Tarasova, B.I. Gareev, G.A. Batalin, I.V. Rassokhina, T.I. Oleinikova // Ore Geology Reviews. – 2022. – V. 144. – 104855.
 9. Geological characteristics, modes of occurrence of gold and genesis of San' guanmiao gold deposit, Shangnan, Shaanxi Province / C. Wang, R. Wang, Y. Liu, Y. Xue, X. Hu, L. Niu // Mineral Deposits. – 2021. – V. 40 (3). – P. 491–508.
 10. Harris M.K., Thayer P.A., Amidon M.B. Sedimentology and depositional environments of middle Eocene terrigenous-carbonate strata, southeastern Atlantic coastal plain, USA // Ore Geology Reviews. – 2010. – V. 108. – P. 141–161.
 11. Taylor C.D., Lear K.G., Newkirk S.R. A genetic model for the greens creek polymetallic massive sulfide deposit, Admiralty island, southeastern Alaska // US Geological Survey Professional Paper. – 2010. – V. 1763. – P. 419–429.
 12. Кучеренко И.В. Теории, гипотезы гидротермального породорудообразования и реальность: факты и аргументы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 99–122.
 13. Новые данные о фемофильной специализации золотоносных березитов / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 26–29.
 14. Кучеренко И.В. Петролого-геохимические свидетельства геологической однородности гидротермальных месторождений золота, образованных в черсланцевом и несланцевом субстрате // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 25–35.
 15. Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. – Л.: Недра, 1978. – 215 с.
 16. Deep gold mineralization features of Jiaojia metallogenic belt, Jiaodong gold Province: based on the breakthrough of 3000 m exploration drilling / X. Yu, D. Li, J. Tian, D. Yang, W. Shan, K. Geng, Y. Xiong, N. Chi, P. Wei, P. Liu // Ore Geology Reviews. – 2020. – V. 3. – P. 385–401.
 17. Geochronology, isotopic chemistry, and gold mineralization of the black slate-hosted Haoyaoerhudong gold deposit, northern North China Craton / H. Zhang, J.-C. Liu, Q. Xu, J.-Y. Wang // Ore Geology Reviews. – 2020. – V. 117. – 103315.
 18. Кучеренко И.В. Петрогеохимические особенности рудообразования в сланцевых толщах // Разведка и охрана недр. – 1986. – № 12. – С. 24–28.
 19. Surour A.A., Bakhsh R.A., El-Nisr S.A. Ore microscopic characterization of mineralized rocks at the Bi'r Tawilah gold prospect, Saudi Arabia // Ore Geology Reviews. – 2014. – V. 2. – P. 41–55.
 20. Cerda L.P., Jones C., Kisters A. The effects of fault-zone architecture, wall-rock competence and fluid pressure variations on hydrothermal veining and gold mineralization along the Sheba Fault, Barberton Greenstone Belt, South Africa // Ore Geology Reviews. – 2022. – V. 192. – P. 104554.
 21. Oxidative dissolution of hydrothermal mixed-sulphide ore: an assessment of current knowledge in relation to seafloor massive sulphide mining / E.K. Fallon, S. Petersen, R.A. Brooker, T.B. Scott // Ore Geology Reviews. – 2017. – V. 86. – P. 309–337.
 22. Кряжев С.Г. Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // Отечественная геология. – 2017. – № 1. – С. 28–38.
 23. Ma Y., Jiang S.-Y., Li H.-L. Isotope geochemistry and genesis of the Liyuan gold deposit, Shanxi, North China // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 92. – P. 129–143.
 24. Родыгина В.Г. Начала минераграфии. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – 175 с.
 25. Geology, mineralogy and pyrite trace elements constraints on gold mineralization mechanism at the giant Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula, China / Y. Wei, L. Yang, K. Qiu, S. Wang, F. Ren, Z. Dai, D. Li, W. Shan, Z. Li, J. Wang, L. Tang // Ore Geology Reviews. – 2022. – V. 148. – 104992.
 26. Пшеничкин А.Я., Гаврилов Р.Ю. Пириты западного фланга Сухоложского золоторудного поля (Ленский рудный район) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 135–143.
 27. Золотоносный арсенопирит и условия его образования на золоторудных месторождениях Олимпиада и Велуга (Енисейский край, Сибирь) / А.Д. Генкин, Ф.Е. Вагнер, Т.Л. Крылова, А.И. Цепин // Геология рудных месторождений. – 2002. – Т. 44. – № 1. – С. 59–76.
 28. Шер С.Д. Металлогения золота. – М.: Недра, 1974. – 256 с.
 29. Петровская Н.В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). – М.: ИИСКЛ, 1973. – 347 с.
 30. Involvement of anomalously As-Au-rich fluids in the mineralization of the Heilan'gou gold deposit, Jiaodong, China: evidence from trace element mapping and in-situ sulfur isotope composition / K. Feng, H.-R. Fan, F.-F. Hu, K.-F. Yang, X. Liu, Y.-N. Shangguan, Y.-C. Cai, P. Jiang // Journal of Asian Earth Sciences. – 2018. – V. 160. – P. 304–321.
 31. Золото в рудах золото-колчеданного месторождения Абыз (Центральный Казахстан) / А.К. Мазуров, А.Н. Николаева, М.А. Рудмин, Т.Ю. Якич, А.С. Рубан, Ш.Ж. Байболова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 78–88.
 32. The noble metal distribution in the black shales of the Degdekan gold deposit in northeast Russia / A.I. Khanchuk, L.P. Plyusnina, E.M. Nikitenko, T.V. Kurmina, N.N. Barinov // Russia Journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 2. – P. 89–96.
 33. Вуд Б.Л., Попов Н.П. Гигантское месторождение золота Сухой Лог (Сибирь) // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 3. – С. 315–341.
 34. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia / R.R. Large, V.V. Maslennikov, R. Francois, L.V. Danyushevsky, Chang Zhaoshan // Economic Geology. – 2007. – V. 102. – № 7. – P. 1233–1267.
 35. Age and pyrite-Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia / S. Meffre, R.R. Large, R. Scott, J. Woodhead, Z. Chang, S.E. Gilbert, L.V. Danyushevsky, V. Maslennikov, J.M. Hergt // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 2008. – V. 72. – P. 2377–2391.
 36. Вагина Е.А. Минеральные комплексы руд и генезис месторождения золота Чертова Корято: Патомское нагорье: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2012. – 23 с.
 37. Изотопный состав свинца по данным высокоточного MS-ICP-MS-метода и источники вещества крупномасштабного благороднометалльного месторождения Сухой Лог (Россия) / И.В. Чернышев, А.В. Чугаев, Ю.Г. Сафонов, М.Р. Сароян, М.А. Юдовская, А.В. Еремина // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51. – № 6. – С. 550–559.
 38. Тарасова Ю.И. Вещественный состав руд и пород месторождения Чертова Корято, Восточная Сибирь // Металлогения древних и современных океанов. – 2016. – № 1. – С. 192–196.

Поступила 05.10.2022 г.

Прошла рецензирование 08.11.2022 г.

Информация об авторах

Николаева А.Н., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального и исследовательского Томского политехнического университета.

Мазуров А.К., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.041:553.2

GOLD IN ORES OF THE VERNINSKOE DEPOSIT (IRKUTSK REGION)

Anastasiya N. Nikolayeva¹,
nikolaevaanas759@gmail.com

Aleksey K. Mazurov¹,
akm@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by poor knowledge of the material composition of the ores of the Verninskoe deposit. The data obtained are an important tool not only for clarifying the predictive and prospecting criteria for gold ore deposits of carbonaceous black shale strata, but also will help increase gold extraction from ore by adjusting the enrichment process scheme.

The main aim of the research is to study the mineral form of gold in ores.

The object of the research is the ores of the Northern zone of the Verninskoe deposit.

Research methods included standard petrographic and mineragraphic analyzes, as well as scanning electron microscopy.

Results. Conducted researches have established that mineralization is represented by two morphological types: disseminated and vein-disseminated. A significant part of ore mineralization is confined to the second type. It was revealed that gold is presented in the form of native gold and has a high fineness, most of it (75...80 %) is confined to the vein-disseminated type. Native gold is diagnosed mainly in association with arsenopyrite and pyrite. The variety of forms of segregations is one of the specific features of native gold at this deposit, while gold of irregular shape predominates in the ores. For the variation of the diagnosed forms, a common characteristic feature is noted – subordination to cavities that existed earlier, at the beginning or during the crystallization of gold itself. At the same time, the genesis of these cavities and their outlines and location in the ores are quite different. One of the most common morphological varieties in ores is a wire-like form, observed in cataclasis cracks in arsenopyrite; to a lesser extent, amoeba-like and tear-shaped forms are diagnosed, forming numerous tiny inclusions of gold in ores.

Key words:

Eastern Siberia, gold-sulfide geological-industrial type, carbonaceous strata, textural and structural features, sulfides, gold, mineral form.

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSWW-2023-0010).

REFERENCES

- Rundkvist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Smirnov M.Yu., Danilova M.Yu., Ashcheulov A.A. Stages of formation of the Bodaibo gold ore region. *Geology of ore deposits*, 1992, vol. 34, no. 6, pp. 3–15. In Rus.
- Polyus Gold Annual Report 2010*. Available at: <https://www.edisclosure.ru/portal/FileLoad.aspx?Fileid=249021> (accessed 9 September 2022).
- Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petrological and geochemical features of near-ore metasomatism in the Verninskoe gold deposit (Lensky district). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 22–33. In Rus.
- Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolkov Yu.V., Alysheva E.I., Borisovsky S.E. Ring-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore region. *Geology of ore deposits*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–4. In Rus.
- Kolmakov Yu.V., Potekhina E.V., Kolmakov A.Yu. Geodynamic settings of gold mineralization in the Tonodsky and Bodaibo regions (Patom highlands, Russia). *Questions of natural sciences*, 2016, vol. 4, no.12, pp. 73–80. In Rus.
- Novozhilov Yu.I., Gavrilov A.M. *Zoloto-sulfidnye mestorozhdeniya v uglerodisto-terrigennykh tolshchakh* [Gold-sulfide deposits in carbonaceous-terrigenuous strata]. Moscow, TSNIGRI Publ., 1999. 175 p.
- Buryak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
- Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Y.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Y.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Ras-sokhina I.V., Oleinikova T.I. ⁴⁰Ar-³⁹Ar 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, vol. 144, 104855.
- Wang C., Wang R., Liu Y., Xue Y., Hu X., Niu L. Geological characteristics, modes of occurrence of gold and genesis of San'guanmiao gold deposit, Shannan, Shaanxi Province. *Mineral Deposits*, 2021, vol. 40 (3), pp. 491–508.
- Harris M.K., Thayer P.A., Amidon M.B. Sedimentology and depositional environments of middle Eocene terrigenous-carbonate strata, southeastern Atlantic coastal plain, USA. *Ore Geology Reviews*, 1997, vol. 108, pp. 141–161.
- Taylor C.D., Lear K.G., Newkirk S.R. A genetic model for the greens creek polymetallic massive sulfide deposit, Admiralty island, southeastern Alaska. *US Geological Survey Professional Paper*, 2010, vol. 1763, pp. 419–429.
- Kucherenko I.V. Theories, hypotheses of hydrothermal rock formation and reality: facts and arguments. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 10, pp. 99–122. In Rus.
- Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. New data on the femophilic specialization of gold-bearing beresites. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 26–29. In Rus.
- Kucherenko I.V. Petrological and geochemical evidence of the geological and genetic homogeneity of hydrothermal gold deposits formed in black shale and non-shale substrate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2007, vol. 311, no 1, pp. 25–35. In Rus.
- Safonov N.I., Meshcheryakov S.S., Ivanov N.P. *Energiya rudoobrazovaniya i poiski poleznykh iskopayemykh* [Energy of ore formation and prospecting for minerals]. Leningrad, Nedra Publ., 1978. 215 p.
- Yu X., Li D., Tian J., Yang D., Shan W., Geng K., Xiong Y., Chi N., Wei P., Liu P. Deep gold mineralization features of Jiaojia metallogenic belt, Jiaodong gold Province: based on the breakthrough of 3000 m exploration drilling. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 3, pp. 385–401.

17. Zhang H., Liu J.-C., Xu Q., Wang J.-Y. Geochronology, isotopic chemistry, and gold mineralization of the black slate-hosted Haoyaoerhudong gold deposit, northern North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 117, 103315.
18. Kucherenko I.V. Petrogeokhimiicheskie osobennosti rudoobrazovaniya v slantsevyykh tolshchakh [Petrogeochemical features of ore formation in shale strata]. *Razvedka i okhrana neдр*, 1986, no. 12, pp. 24–28.
19. Surour A.A., Bakhsh R.A., El-Nisr S.A. Ore microscopic characterization of mineralized rocks at the Bi'r Tawilah gold prospect, Saudi Arabia. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 2, pp. 41–55.
20. Cerda L.P., Jones C., Kisters A. The effects of fault-zone architecture, wall-rock competence and fluid pressure variations on hydrothermal veining and gold mineralization along the Sheba Fault, Barberton Greenstone Belt, South Africa. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 192, 104554.
21. Fallon E.K., Petersen S., Brooker R.A., Scott T.B. Oxidative dissolution of hydrothermal mixed-sulphide ore: an assessment of current knowledge in relation to seafloor massive sulphide mining. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 86, pp. 309–337.
22. Kryazhev S.G. Izotopno-geokhimiicheskie i geneticheskie modeli zolotorudnykh mestorozhdeniy v uglerodisto-terrigenykh tolshchakh [Isotope-geochemical and genetic models of gold deposits in carbonaceous-terrigenous strata]. *Otechestvennaya geologiya*, 2017, no. 1, pp. 28–38.
23. Ma Y., Jiang S.-Y., Li H.-L. Isotope geochemistry and genesis of the Liyuan gold deposit, Shanxi, North China. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 92, pp. 129–143.
24. Rodygina V.G. *Nachala minerografii* [Beginnings of mineralog-raphy]. Tomsk, NTL Publ., 2006. 175 p.
25. Wei Y., Yang L., Qiu K., Wang S., Ren F., Dai Z., Li D., Shan W., Li Z., Wang J., Tang L. Geology, mineralogy and pyrite trace elements constraints on gold mineralization mechanism at the giant Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula, China. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 148, 104992.
26. Pshenichkin A.Ya., Gavrilov R.Yu. Pyrites of the western flank of the Sukholozhsky gold field (Lensky ore region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 135–143. In Rus.
27. Genkin A.D., Vagner F.E., Krylova T.L., Tsepin A.I. Gold-bearing arsenopyrite and the conditions of its formation at the Olimpiada and Veduga gold deposits (Yenisei Ridge, Siberia). *Geology of ore deposits*, 2002, vol. 44, no. 1, pp. 59–76. In Rus.
28. Sher S.D. *Metallogeniya zolota* [Metallogeny of gold]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 256 p.
29. Petrovskaya N.V. *Samorodnoe zoloto (obshchaya kharakteristika, tipomorfizm, voprosy genezisa)* [Native gold (general characteristics, typomorphism, issues of genesis)]. Moscow, NShKL Publ., 1973. 347 p.
30. Feng K., Fan H.-R., Hua F.-F., Yang K.-F., Liu X., Shangguane Y.-N., Cai Y.-C., Jiang P. Involvement of anomalously As-Au-rich fluids in the mineralization of the Heilan'gou gold deposit, Jiaodong, China: evidence from trace element mapping and in-situ sulfur isotope composition. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, vol. 160, pp. 304–321.
31. Mazurov A.K., Nikolaeva A.N., Rudmin M.A., Yaki ch T.Yu., Ruban A.S., Baibolova Sh.Zh. Gold in the ores of the Abyz gold-pyrite deposit (Central Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 78–88. In Rus.
32. Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Nikitenko E.M., Kurmina T.V., Barinov N.N. The Noble Metal Distribution in the Black Shales of the Degdekan Gold Deposit in Northeast Russia. *Russia Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 89–96.
33. Wood B.L., Popov N.P. Gigantskoe mestorozhdenie zolota Sukhoy Log (Sibir) [Giant gold deposit Sukhoi Log (Siberia)]. *Geologiya i geofizika*, 2006, vol. 47, no. 3, pp. 315–341.
34. Large R.R., Maslennikov V.V., Francois R., Danyushevsky L.V., Chang Zhaoshan. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, no. 7, pp. 1233–1267.
35. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M. Age and pyrite-Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log Sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2008, vol. 72, pp. 2377–2391.
36. Vagina E.A. *Mineralnye komplekсы rud i genezis mestorozhdeniya zolota Chertovo Koryto: Patomskoe nagorye*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Mineral complexes of ores and the genesis of the Chertovo Koryto gold deposit: Patomskoe highland: Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2012. 23 p.
37. Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Safonov Yu.G., Saroyan M.R., Yudovskaya M.A., Eremina A.V. Isotopic composition of lead according to high-precision MC-ICP-MS-method and sources of matter of the large-scale noble metal deposit Sukhoi Log (Russia). *Geology of ore deposits*, 2009, vol. 51, no. 6, pp. 550–559. In Rus.
38. Tarasova Yu.I. Veshchestvenny sostav rud i porod mestorozhdeniya Chertovo Koryto, Vostochnaya Sibir [Material composition of ores and rocks of the Chertovo Koryto deposit, Eastern Siberia]. *Metallogeny of ancient and modern oceans*, 2016, no. 1, pp. 192–196.

Received: 5 October 2022.

Reviewed: 8 November 2022.

Information about the authors

Anastasiya N. Nikolayeva, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksey K. Mazurov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.