

На правах рукописи



СИЛЬЯНОВ СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ
ГЕНЕЗИСА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОЛИМПИАДА
(ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Специальность 25.00.11 – «Геология, поиски и разведка твердых полезных
ископаемых, минерагения» (геолого-минералогические науки)

Красноярск, 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» (ФГАОУ ВО «СФУ»)

Научный руководитель:

Сазонов Анатолий Максимович

доктор геолого-минералогических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Горячев Николай Анатольевич

доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, профессор, ФГБУН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН», лаборатория петрологии, изотопной геохронологии и рудогенеза, главный научный сотрудник

Неволько Петр Александрович

кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН «Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН», лаборатория рудообразующих систем, старший научный сотрудник

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск)

Защита состоится «29» апреля 2021 года в 13 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.099.23 при ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г. Красноярск, пр-т им. газеты «Красноярский рабочий», 95, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте университета: <http://research.sfu-kras.ru>

Автореферат диссертации разослан: «__» _____ 2021 года

Ученый секретарь

диссертационного совета



С. С. Бондина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. На территории Красноярского края заключено 16 % российских запасов золота (более 2 300 т). По добыче благородного металла край лидирует с показателем ~110 т за 2019 г. Основная часть запасов и ресурсов коренного золота сосредоточена в металлогенических зонах Енисейского кряжа (О состоянии и использовании..., 2020).

Олимпиадинское месторождение является крупнейшим золоторудным объектом Енисейского кряжа и входит в число уникальных месторождений России и мира. В рудах Олимпиады сосредоточено порядка 1 000 т благородного металла, добыча на 2019 г. составила около 70 т золота. Выявленные запасы месторождения позволяют производить его разработку на протяжении как минимум 25 лет без существенных снижений уровня добычи. Рудный потенциал месторождения не ограничен учтенными на данный момент запасами. Пробуренные в начале 2018 г. глубокие скважины подсекли рудные тела с промышленными параметрами на глубине около 1 700 м.

Месторождение характеризуется полистадийной и полихронной историей формирования золото-сульфидных комплексов, что обусловило разнообразный вещественный состав его руд. Несмотря на долгую историю изучения (начиная с 1968–1974 гг.), многие вопросы остаются открытыми: термодинамика рудообразования, положение и связь «невидимого» упорного золота и арсенопиритовой минерализации, источник рудного вещества, время и длительность формирования месторождения.

В работе рассмотрено геологическое строение месторождения, охарактеризованы минералогия и геохимия рудных комплексов глубоких горизонтов.

Цель и задачи. Целью диссертационного исследования являются минералого-геохимическая аттестация минеральных комплексов руд и отдельных рудных минералов, установление термодинамических параметров, существовавших во время отложения руд, состава минералообразующего флюида и его источника, а также определение временных интервалов золоторудного процесса, преимущественно на материалах разведки глубоких горизонтов месторождения (от отметки +300 до –400 м). В связи с поставленной целью были решены следующие задачи:

1. Изучение минералогии месторождения и восстановление последовательности рудообразования.

2. Изучение типохимизма главных рудных минералов месторождения.

3. Изучение минералогических особенностей и кристаллохимии арсенопирита месторождения, а также его связи с «невидимым» золотом.

4. Определение термодинамических параметров формирования рудной минерализации и состава флюида.

5. Изучение изотопных и геохимических характеристик рудных минералов и выявление вероятностного источника вещества.

6. Абсолютное датирование рудного процесса.

Фактический материал, методы исследования и личный вклад автора. В исследовании использован каменный и графический материал, полученный в ходе выполнения работ по теме «Геолого-генетическая модель Олимпиадинского рудного поля (Енисейский кряж)» под руководством А. М. Сазонова при участии автора. При разведке глубоких горизонтов месторождения (от отметки +300 до -400 м) коллективом исследователей проведена документация керна 21 скважины (8 000 п. м), а также отобрано около 1 500 проб для изготовления шлифов, аншлифов и специализированных препаратов.

Руды и породы месторождения изучены с применением современных методов: оптической микроскопии (~1 000 шлифов и аншлифов); SEM EDS/WDS (более 500 образцов и 5 000 анализов); ICP-MS (41 анализ); LA-ICP-MS (более 200 анализов); рентгеноструктурного анализа (7 образцов); мессбауэровской спектроскопии (7 анализов); изотопных исследований Pb, S, He (~70 определений); датирования Ar-Ar методом (16 анализов); микротермометрических исследований флюидных включений в кварце (~500 определений); Рамановской спектроскопии флюидных включений в кварце, а также углеродистого вещества (~100 определений); газовой хромато-масс-спектрометрии флюидных включений в кварце, карбонате и сульфидах (18 анализов).

Лично автором определены цель и задачи диссертационного исследования, проанализирован обширный фондовый и опубликованный научный материал предыдущих исследований по различным областям (более 270 наименований), связанный с темой диссертационной работы, а также сформулированы защищаемые положения и выводы. Автором лично составлены коллекции для изучения руд глубоких горизонтов, а также подготовлены мономинеральные фракции и специализированные препараты. Автором выполнены минераграфическое изучение руд, электронно-микроскопические и микрорентгеноспектральные исследования, часть термобарогеохимических и изотопных исследований. Получены и обработаны геохимические данные по распределению элементов-примесей в рудах месторождения, а также сульфидах и самородном золоте. В ходе диссертационного исследования автор занимался обработкой аналитических данных с использованием специализированных программ (Statistica, Origin Pro, Surfer и др.) и их интерпретацией, подготовкой текста диссертационной работы и графического материала к ней.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения (5 с.), шести глав (150 с.), заключения (2 с.), одного приложения (10 с.) и списка

литературы, включающего 273 наименования (16 с.). Общий объем работы 185 с., диссертация содержит 64 иллюстрации и 18 таблиц.

В первой главе приведены сведения об истории открытия и изучения месторождения. На основе документации керн разведочных скважин и анализа работ предшественников охарактеризовано его положение в региональных структурах, составлен геологический очерк рудного поля, описана геология и петрография месторождения.

Вторая глава посвящена рудной минералогии. Дано авторское описание коренных и окисленных руд. Охарактеризованы рудные минералы и самородное золото месторождения, приведена схема стадийности рудообразования. Глава содержит материал, обосновывающий первое защищаемое положение.

В третьей главе представлены результаты геохимического изучения рудных минералов (пирротин, арсенопирит, пирит, сфалерит, халькопирит, ульманит, тетраэдрит, бертьерит, стибнит, гудмундит, джемсонит, самородные сурьма и золото) глубоких горизонтов месторождения с использованием ICP-MS и LA-ICP-MS. Показаны закономерности распределения Au, Ag и других элементов-примесей в разновозрастных минеральных ассоциациях. Материал, приведенный в главе, использован при обосновании первого защищаемого положения.

Четвертая глава содержит результаты изучения типоморфных особенностей арсенопирита, который является главным минералом руд и основным концентратом «невидимого» золота. Охарактеризованы морфология, химический состав и кристаллохимия минерала, предложены формы нахождения «невидимого» Au. Приведенные данные служат обоснованием первого защищаемого положения.

В пятой главе рассмотрены термодинамические условия образования рудной минерализации месторождения, а также состав рудоносного флюида. Материалы главы использованы при обосновании второго защищаемого положения.

В шестой главе на базе собственных результатов и анализа работ предшественников дано авторское представление о вероятном источнике рудного вещества, а также возрасте и продолжительности формирования месторождения. Материалы главы использованы при обосновании третьего защищаемого положения.

Научная новизна. Диссертационное исследование содержит актуальные данные о геологическом строении, минералогии и геохимии Олимпиадинского месторождения, а также стадийности формирования руд, полученные в результате доразведки глубоких горизонтов и публикуемые впервые. С высокой детальностью охарактеризован арсенопирит – главный минерал-концентрат «невидимого» золота в рудах месторождения. Приведены новые данные о его кристаллохимических особенностях,

полученные с помощью рентгеноструктурного анализа и мессбауэровской спектроскопии. Впервые выполнены масштабные исследования типохимизма сульфидных минералов и самородного золота с использованием ICP-MS и LA-ICP-MS. Приведены новые сведения о составе рудного флюида, полученные путем изучения флюидных включений в кварце и сульфидных минералах методом газовой хромато-масс-спектрометрии. Обобщены литературные и представлены авторские изотопно-геохимические данные о рудном процессе. Показан возрастной интервал формирования рудной минерализации, определенный Ar-Ar методом по слюдам из минеральных комплексов.

Практическая значимость. Полученные в ходе выполнения диссертационного исследования данные использованы в производственной работе АО «Полюс Красноярск», а также могут быть применены для выделения критериев при прогнозно-поисковых работах на рудное золото. Данные о возрасте и вероятностном источнике вещества месторождения способствуют развитию представлений о генезисе золоторудных месторождений, что позволит прогнозировать их расположение в регионе. Характеристика структурной неоднородности арсенопирита и ее связи с «невидимым» золотом может обусловить появление новых технологий обогащения сырья с упорным золотом.

Апробация работы. Автором лично и в соавторстве опубликовано более 50 научных работ: 35 – по теме диссертации, из них 8 – в журналах перечня ВАК. Материалы диссертации публично представлялись на конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых, семинарах, симпозиумах и конгрессах: *международные* – 12th and 14th International Congress for Applied Mineralogy (Istanbul, Turkey, 2015; Belgorod, Russia, 2019), Международный конгресс «Цветные металлы и минералы» (Красноярск, 2016–2019), Международная конференция памяти академика А. П. Карпинского (Санкт-Петербург, 2017), 15th SGA Biennial Meeting (Glasgow, UK, 2019); *с международным участием* – «Перспектив Свободный» (Красноярск, 2016, 2019); *всероссийские* – «Уральская минералогическая школа» (Екатеринбург, 2015), «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2017), ВСЭМПГ (Москва, 2018), «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (Екатеринбург, 2019), «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче» (Москва, 2020).

Благодарности. Автор благодарит своего научного руководителя *Анатолия Максимовича Сазонова* за помощь в организации и проведении исследования, обсуждение основных результатов и защищаемых положений, а также за постоянное внимание к выполняемой работе. Глубокую благодарность автор выражает Арнольду Вильгельмовичу Мацюшевскому, который многие годы

поддерживал и помогал в исследованиях, с великим умением обучал минераграфии и работе в научной лаборатории.

Автор благодарен сотрудникам кафедр ГМиП и ГМиМР ИГДГиГ СФУ Е. А. Звягиной, С. И. Леонтьеву, Т. В. Полевой, Н. А. Некрасовой, Б. М. Лобастову, М. С. Сазонову, Н. Н. Поповой, В. А. Макарову, П. Н. Самородскому, В. Н. Князеву и другим за обсуждение результатов исследований, организацию, помощь и внимание к выполняемой работе. Автор признателен д-ру хим. наук С. Д. Кирику (СФУ), д-ру физ.-мат. наук О. А. Баюкову и канд. физ.-мат. наук Ю. В. Князеву (ИФ СО РАН) за совместную плодотворную работу по изучению кристаллохимии арсенопирита.

Свою признательность автор выражает специалистам ИГМ СО РАН А. А. Томиленко, Н. А. Гибшер, М. А. Рябухе, Е. О. Шапаренко и другим за возможность совместных исследований флюидного режима золоторудных объектов Енисейского кряжа; Г. А. Пальяновой и Ю. А. Калинину за внимание к работе и конструктивную критику; В. Н. Королюку за помощь при выполнении микрорентгеноспектрального анализа.

Автор благодарит П. А. Тишина, Е. В. Корбовяка, К. В. Бестемьянову (ТГУ) за помощь в выполнении аналитических работ; Е. А. Наумова (ЦНИГРИ), К. В. Лобанова (Orsu Metals Corporation), А. А. Савичева (СПбГУ) за ценные рекомендации и советы; геологов АО «Полюс Красноярск» за помощь в работе.

Выбором профессии автор обязан своей матери, инженеру-геологу Ф. Н. Сильяновой, и благодарит ее и свою семью за поддержку и понимание.

На завершающем этапе выполнение диссертационного исследования осуществлялось при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90017.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОЛИМПИАДА

Начиная с середины XIX в. геологическое строение и золотоносность Енисейского кряжа изучали многие геологи: Э. Гофман, Л. А. Ячевский, А. К. Мейстер, Н. Н. Горностаев, Ф. Н. Шахов, В. А. Неволин, Ф. П. Кренделев, М. И. Волобуев, М. А. Семихатов, В. Г. Петров, О. А. Вотах, А. Д. Ножкин, Т. М. Дембо, Н. С. Пенн, П. С. Бернштейн, Н. В. Петровская, Г. И. Кириченко, Л. В. Ли, Г. Н. Бровков, Т. Я. Корнев, В. М. Даценко, А. И. Вызу, А. И. Забияка, В. А. Верниковский и др. Наиболее полные сведения о геологии региона и месторождениях золота сосредоточены в рукописных отчетах производственных геологических организаций. Изучением Олимпиадинского месторождения (начиная с 1968–1974 гг.) занимались геологи Северной ГРЭ и научных организаций

(Л. В. Ли, Г. П. Круглов, В. Г. Михеев, Е. А. Звягина, В. П. Василенко, В. А. Попереков, Ю. М. Новожилов, А. М. Гаврилов, С. В. Яблокова, З. Б. Афанасьева, А. М. Сазонов и многие другие).

Олимпиадинское месторождение расположено в центре Енисейского кряжа, являющегося неопротерозойским (860–800 млн лет) коллизийным орогеном, перешедшим к рифтогенной стадии развития на рубеже ~750–680 млн лет (Kuzmichev, Sklyarov, 2016), с которым совпадает возраст формирования золото-сульфидного и золото-сурьмяного оруденения (Ножкин и др., 2011).

Рудное поле месторождения расположено в субизометричном структурном блоке, ограниченном с СВ и ЮЗ крупными разломами СЗ простирания (Татарский глубинный разлом), а с Ю-ЮВ и СЗ – гранитоидами Чиримбинского и Тырадинского массивов (рисунок 1). Структура рудного поля представляет собой ансамбль сопряженных складок W-образной формы, крылья которых трассируются крупными разломами СЗ, СВ и З-В простирания (рисунок 1).

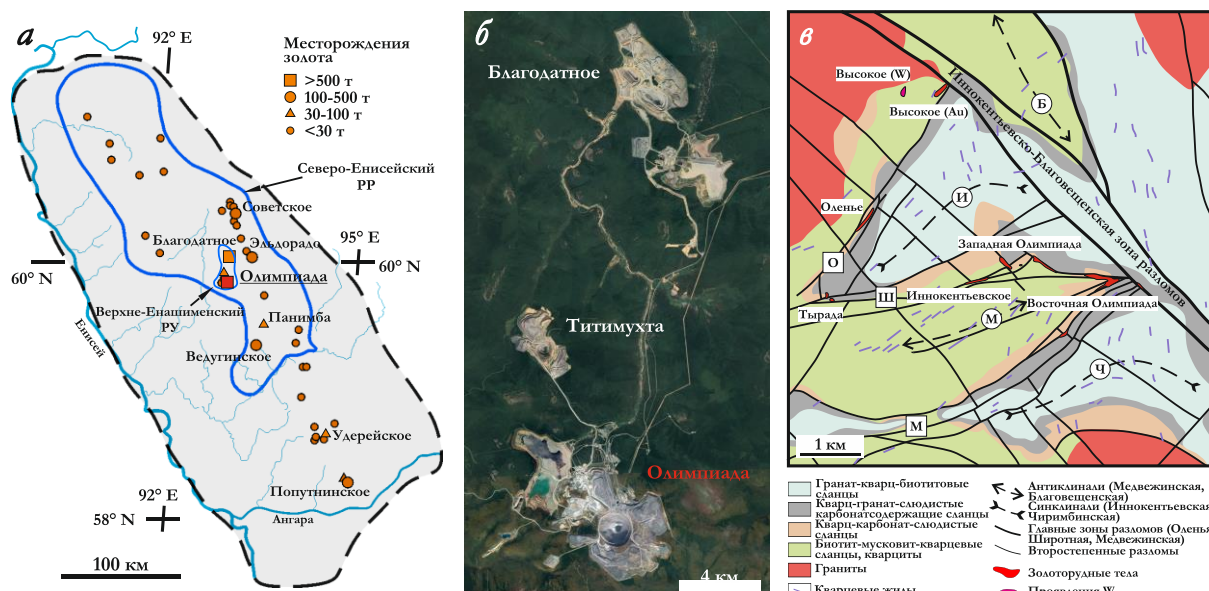


Рисунок 1 – Распределение золоторудных объектов в Заангарской части Енисейского кряжа (а), космоснимок Олимпиадинского добычного кластера компании «Полюс», Верхне-Енашименский РУ (б) и геологическая схема Олимпиадинского рудного поля (в) (Sazonov et al., 2020 с изменениями)

На поверхности месторождение состоит из двух пространственно разобщенных частей – Западной и Восточной Олимпиады, которые соединяются на глубине (участок Промежуточный). Месторождение находится в пределах Медвежинской антиклинали, осложненной узлом сочленения нарушений субширотного, СВ и СЗ направлений. Ядро складки сложено кварц-двусланцевыми сланцами, а крылья – кварц-слюдяно-карбонатными и кварц-слюдяно-углеродистыми сланцами (рисунок 1).

Рудные тела месторождения приурочены к крыльям и пришарнирной части этой блоково-антиклинальной структуры.

Основные запасы благородного металла Олимпиадинского месторождения заключены в первичных (сульфидных) рудах Восточного участка месторождения, минералогия которых очень разнообразна. На сегодня диагностировано около 48 минералов (сульфиды, сульфосоли, стибниды, сульфоарсениды, сульфостибниды, теллуриды, самородные элементы и др.), среди которых преобладают пирротин, арсенопирит, стибнит, пирит. Главным полезным элементом руд является Au с попутными Ag и Sb.

На месторождении выделен ряд минеральных комплексов, которые отвечают разновозрастному проявлению гидротермальной активности рудной системы, разделенному тектоническими перерывами (таблица 1).

Таблица 1 – Парагенетическая схема (по А. М. Сазонову с дополнениями и уточнениями С. А. Сильянова)

Ассоциация Минерал	Ранних сульфидов	Сульфидов полиметаллов	Поздних сульфидов	Пострудных минералов
УВ	_____	_____	_____	
Кварц	_____	_____	_____	_____
Карбонаты		_____	_____	_____
Флюорит				_____
Вольфрамит* (Fe,Mn)WO ₄	—			
Шеезит* CaWO ₄	—			
Пирротин Fe ₍₁₋₃₎ S	_____	_____	_____	
Арсенопирит FeAsS	_____	_____	_____	
Золото (Au,Ag)	_____	_____	_____	
Пирит FeS ₂	_____	_____	_____	
Халькопирит CuFeS ₂	_____	_____	_____	
Сфалерит ZnS		_____	_____	
Галенит PbS		_____	_____	
Кубанит CuFe ₃ S ₄		_____	_____	
Борнит Cu ₃ FeS ₄		_____	_____	
Тетраэдрит (Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₄		_____	_____	
Плагионит Pb ₃ Sb ₈ S ₁₇			_____	
Кобальтин CoAsS			_____	
Герсадорфит (Ni,Co)AsS			_____	
Виллиамит (Co,Ni)SbS			_____	
Макинавит (Fe,Ni) ₄ S ₈			_____	
Ульманит NiSbS			_____	
Брейтгауптит NiSb			_____	
Алтаит PbTe			_____	
Колорадоит HgTe			_____	
Хеддейт Bi ₂ Te ₃			_____	
Марказит FeS ₂			_____	
Гумундит FeSbS			_____	
Бертьерит FeSb ₂ S ₄			_____	
Джемсонит Pb ₄ FeSb ₆ S ₁₄			_____	
Ауростибит AuSb ₂			_____	
Стибнит Sb ₂ S ₃			_____	
Сурьма Sb			_____	
Ртуть Hg			— ?	

*По данным предшественников.

Ранний вкрапленный сульфидный комплекс золото-мышьяковых руд представлен игольчатым арсенопиритом, пиритом, пирротином и более поздней наложенной минерализацией сульфидов полиметаллов (рисунок 2). Минеральный комплекс картируется в окварцованных и мусковитизированных метасоматитах и двуслюдяно-кварц-карбонатных сланцах. Поздний золото-сурьмяный комплекс проявлен со значительным отрывом и наложен на парагенезисы раннего, он развит преимущественно в

Южном блоке Восточной Олимпиады, в зоне влияния Медвежьего разлома. Текстуры руд вкрапленно-прожилковые, гнездовые, с массивными сливными выделениями сурьмяных минералов и с крупным видимым самородным золотом и ауристобитом (рисунок 2). Отличительной особенностью руд является наличие никель-кобальтовой и теллуридной минерализации (ульманит, герсдорфит, алтаит, хедлейит и др.). Эта ассоциация распространена повсеместно, но в малых количествах. Ее формирование предшествовало началу стадии поздних сульфидов (Сильянов, Некрасова, 2018). Пострудный прожилковый флюорит-карбонатный минеральный комплекс широко развит в пределах рудного поля, однако его значение невелико.

Рудные минералы на месторождении распространены в виде полосчатой вкрапленности зернистых агрегатов, располагающихся вдоль трещин кливажа, механической сланцеватости и полосчатости пород. Также развиты прожилковые и гнездовые выделения сульфидов мощностью от первых миллиметров до первых сантиметров (рисунок 2).

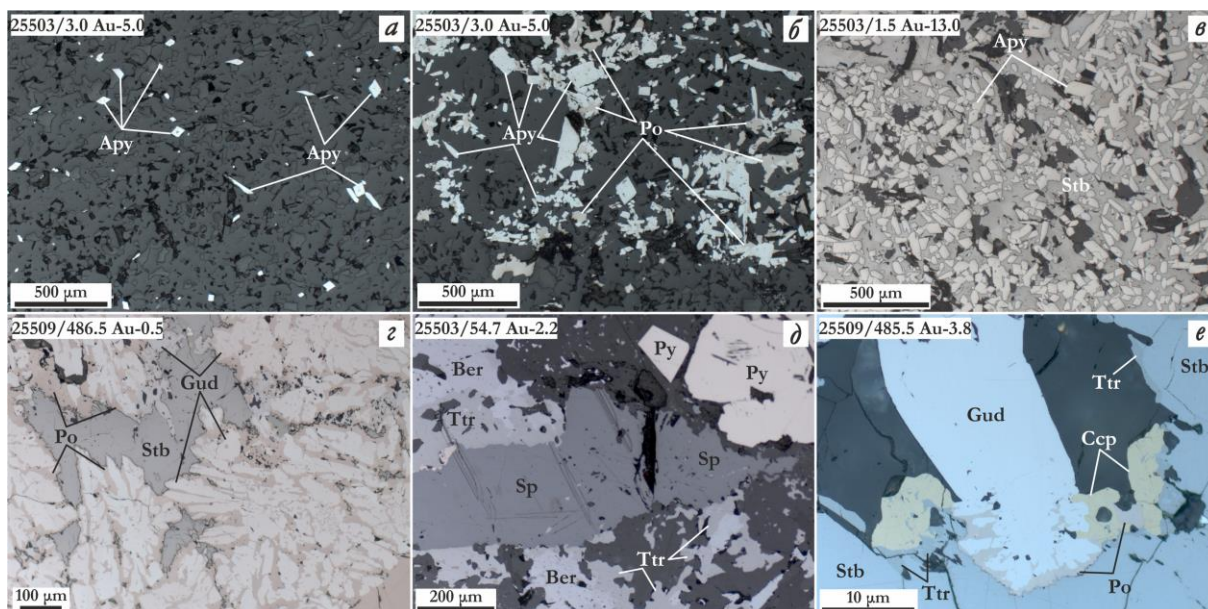


Рисунок 2 – Ассоциации рудных минералов: *a* – игольчатый арсенопирит (Apy); *б* – пирротин (Po) и перекристаллизованный арсенопирит; *в* – игольчатый арсенопирит в стибните (Stb); *г* – пирротин и гудмундит (Gud) со стибнитом; *д* – сросток сфалерита (Sp), тетраэдрита (Ttr) и бертьерита (Ber), пирит (Py); *е* – пирротин, халькопирит (Ccp) и тетраэдрит по контакту гудмундита со стибнитом

Преобладающими структурами руд являются тонкозернистые метакристаллические с элементами перекристаллизации и укрупненно-зернистыми гнездово-агрегатными скоплениями вблизи разлинзованно-будинированного жильного кварца в шовных тектонических межслоевых зонах.

Изучение материалов разведки руд глубоких горизонтов, а также обобщение фондовых и опубликованных работ по уже отработанной части

месторождения позволило сформулировать выносимые на защиту положения.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

Первое защищаемое положение. Промышленные концентрации золота образовались на стадии ранних сульфидов в структурно-связанной и наноразмерной металлической форме в игольчатом арсенопирите. Развитие рудного процесса с формированием полиметаллической и стибнит-бертьеритовой минерализации привело к перекристаллизации ранних сульфидов, ремобилизации и переотложению золота в самородной форме.

Преобладающая часть золота месторождения сформирована на стадии ранних сульфидов в «невидимой» форме. Главным минералом-носителем металла является ранний игольчатый арсенопирит с содержаниями Au 12,5–1 512,0 ppm (рисунок 3).

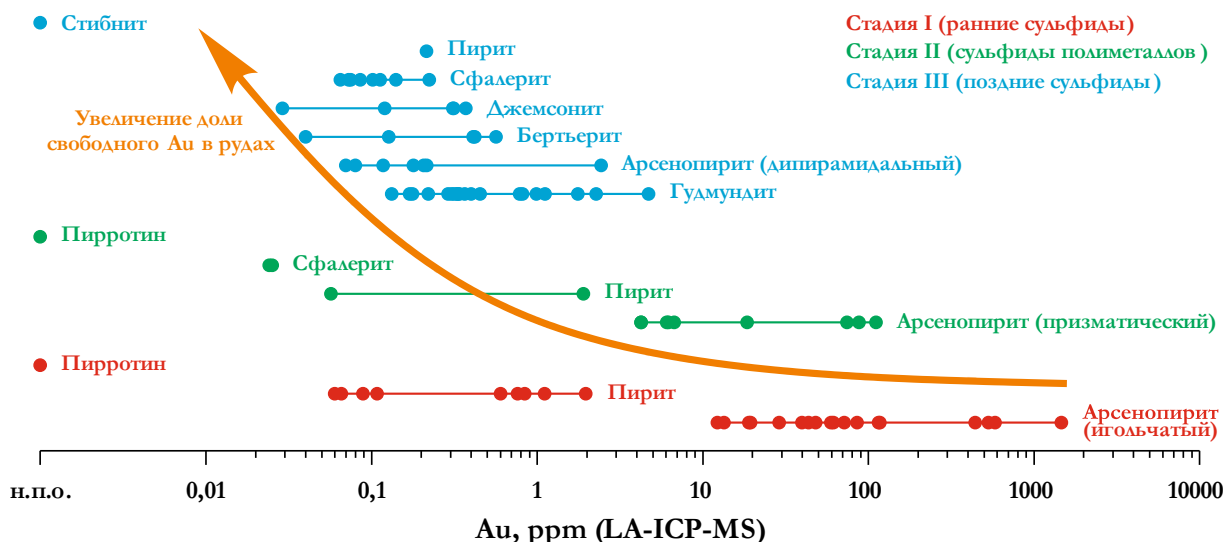


Рисунок 3 – Содержание золота в разновозрастных сульфидах месторождения

Графики LA-ICP-MS арсенопиритов показывают, что большая часть золота находится в структурно-связанной форме, о чем свидетельствует ровный характер сигнала ^{197}Au (рисунок 4, а). Этот вывод подтверждает и расположение анализов на диаграмме Au–As ниже линии растворимости Au (Reich et al., 2005). Однако наличие единичных пиков и «пилообразный» профиль сигнала указывают на присутствие нановключений Au^0 (рисунок 4, а, б), что согласуется с данными мессбауэровской спектроскопии ^{197}Au (Genkin et al., 1998).

Игольчатый арсенопирит-I характеризуется сернистым составом ($\text{S}/\text{As} \sim 1,12$; $(\text{S} + \text{As})/\text{Fe} \sim 2,05$). Мессбауэровская спектроскопия фиксирует уменьшение количества атомов Fe, находящихся в стехиометричном окружении $\{3\text{S}3\text{As}\}$, до 65 % и увеличение доли нестехиометричных позиций $\{6\text{S}\}$ и $\{5\text{S}1\text{As}\}$ в сумме до 20 %, а также появление железа в

тетраэдрических позициях (5 %). Снижение структурной и химической стехиометрии сопровождается увеличением количества «невидимого» Au.

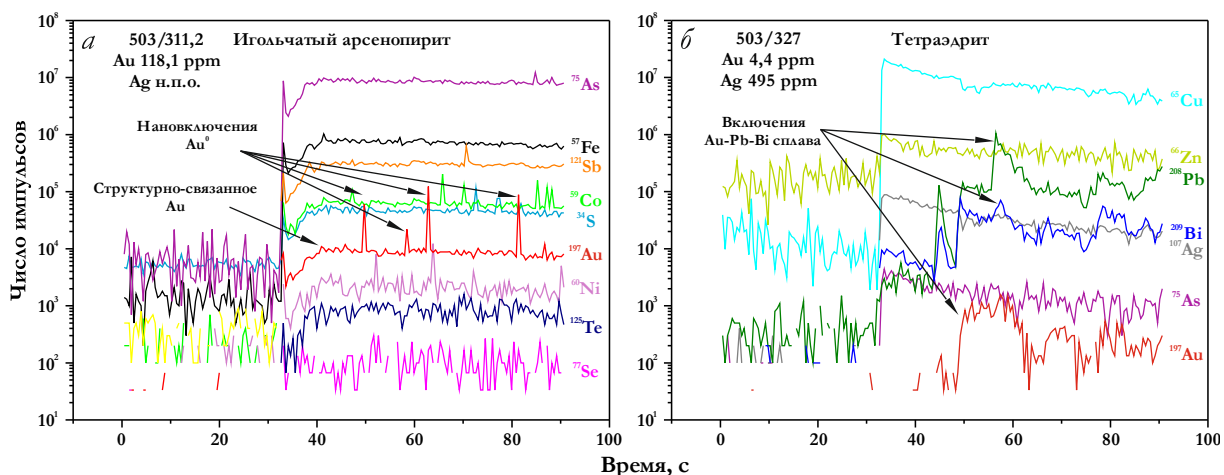


Рисунок 4 – LA-ICP-MS графики арсенопирита (а) и тетраэдрита (б)

Пирит-I отличается незначительными содержаниями «невидимого» Au (~0,6 ppm), а пирротин не содержит благородного металла. Максимальное количество Au в арсенопирите, коррелирующее с содержанием W (до 15,4 ppm), а также повышенные содержания Se и Te в арсенопирите-I (до 127,0 и 379,0 ppm) и пирите-I (до 143,9 и 40,0 ppm) определяют As-Au-W-Se-Te специализацию стадии, при этом As выступает в роли минералообразующего элемента, а Au, W, Se и Te – в роли примесных.

Основным минералом-концентратором «невидимого» Au на стадии сульфидов полиметаллов является призматический арсенопирит, однако концентрации благородного металла в нем понижены (4,3–114,0 ppm). Наложение минерализации этой стадии на ранние парагенезисы приводит к перекристаллизации игольчатого арсенопирита, высвобождению и сегрегации части «невидимого» Au. Видимое золото стадии, как правило, встречается в виде микронных включений в пирите, пирротине, арсенопирите, халькопирите, сфалерите, галените, а также агрегатов (до 10–30 мкм) в трещинах и на поверхностях зерен этих минералов (рисунок 5, а–в). Золото высокой пробы (985–1 000 ‰), в качестве примесей преобладает Ag.

Призматический арсенопирит-II характеризуется приближением к химической стехиометрии ($S/As \sim 1,01$; $(S + As)/Fe \sim 2,03$) и увеличением доли Fe в позиции $\{3S3As\}$ до ~74 %. Приближение к структурной и химической стехиометрии сопровождается уменьшением доли «невидимого» Au.

Пирит-II содержит низкие концентрации Au ~0,9 ppm; единичные анализы устанавливают присутствие благородного металла в сфалерите (~0,03 ppm); пирротин не содержит золота.

В сульфидах стадии также отмечено появление примеси Ag до ~3 ppm (халькопирит). Сфалерит стадии характеризуется максимальными (или близкими к ним) содержаниями Hg (до 1 690,0 ppm), Cd (до 290,7 ppm) и In (до 18,5 ppm). Наличие сульфидов полиметаллов и их микроэлементный состав позволяют обозначить **Cu-Zn-Pb**-Cd-In специализацию стадии, где Cu, Zn, Pb образуют собственные минералы, а Cd и In распространены как примесные.

Минерализация стадий ранних сульфидов и сульфидов полиметаллов определяет золото-мышьяковый (Au-As) тип руд с преобладанием «невидимого» и тонкого субмикронного упорного Au со средним содержанием 3,9 г/т.

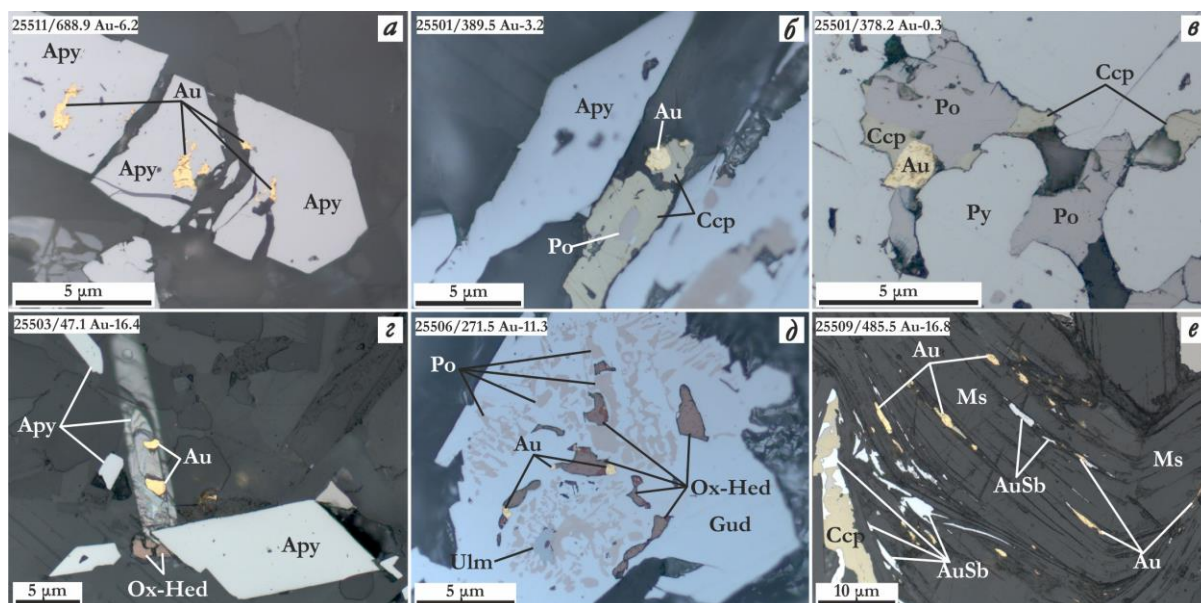


Рисунок 5 – Ассоциации золота: а–в – стадии сульфидов полиметаллов: а – включения и трещинные выделения золота в призматическом арсенопирите; б – арсенопирит, пирротин, халькопирит и золото; в – включения халькопирита, пирротина и золота в пирите; г–е – стадии поздних сульфидов: г – золото и окисленный хедлейит (Ox-Hed) на гранях арсенопирита; д – симплектит гудмундита и пирротина с включениями ульманита (Ulm), хедлейита и золота; е – золото и аурустибит (AuSb) по спайности мусковита (Ms)

Стибнит-бертьеритовая минерализация сопровождалась образованием сульфосолей, Co-Ni минералов, теллуридов, перекристаллизацией ранних генераций арсенопирита, пирита и пирротина. Здесь преобладают видимые выделения Au в трещинах и гнездах совместно с минералами сурьмы и теллуридами. Самородное золото и аурустибит образуют сростания и включения в стибните, бертьерите, тетраэдрите, ульманите, халькопирите, карбонатах, слюдах; встречаются тонкие сростания с минералами Co и теллуридами (рисунок 5, г–е). Форма выделений ксеноморфная, каемочная, каплевидная, пластинчатая, с размерами 0,0n–n мм. Аурустибит распространен в подчиненном количестве и проявляется в основном в ассоциации со стибнитом,

бертьеритом, сульфостибнидами, карбонатами и поздним кварцем. В качестве элементов-примесей в золоте установлены Sb, Cu, Hg, в меньшей степени – Ag, Ni. Частицы золота с примесями Hg, Cu, Ni обычно имеют неоднородный состав, с колебаниями концентраций этих элементов в пределах зерна. Единичные зерна представлены частицами низкой пробы (734–825 ‰), однородного строения с повышенным содержанием Sb (до 16,6 ‰) и примесью Ni (до 6,5 ‰).

Главным минералом-концентратором «невидимого» Au в этой ассоциации является гудмундит (~1 ppm). Минерал изоструктурен арсенопириту, что может объяснять относительно высокие концентрации в нем Au. Содержания благородного металла определены почти во всех анализах джемсонита (0,03–0,40 ppm) и сфалерита (0,07–0,20 ppm). Реже устанавливается примесь Au в бертьерите (до 0,6 ppm); единично в тетраэдрите (0,2 и 4,4 ppm) и пирите-III (0,2 ppm).

Перекристаллизация арсенопирита, продолжающаяся на этой стадии, сопровождалась дальнейшим высвобождением Au и его переотложением в металлической форме, а также выравниванием химического состава (S/As ~0,99; (S + As)/Fe ~2,03) и упорядочением структуры арсенопирита-III. Только половина анализов дипирамидального арсенопирита показала наличие «невидимого» Au (0,07–2,40 ppm). Ремобилизации и переотложению Au на этой стадии могли способствовать Bi и Pb, также высвобождающиеся при перекристаллизации или вновь привнесенные в систему. Взаимодействие этих элементов с Au могло приводить к формированию их обособлений в гидротермальном растворе (Tooth et al., 2013 и др.) и образованию сплавов Au-Bi-Pb состава, наличие которых показано при абляции тетраэдрита (см. рисунок 4, б). С этим механизмом также может быть связано отложение Bi-Te минерализации месторождения. В итоге рудный метаморфизм приводил к обогащению поздних стадий самородным золотом, в противовес ранним, где преобладало «невидимое».

Особенностями стадии являются максимальные концентрации Ag – 3 811 ppm (тетраэдрит), Pb – 4 310 ppm (бертьерит), Bi – 3 262 ppm (джемсонит), Te – 882 ppm (джемсонит) и повышенные Hg – 1 123 ppm (сфалерит). Это вместе с минералогическими особенностями определяет **Sb-Co-Ni-Te-Bi-Pb-Hg-Ag** специализацию стадии, при этом только для Ag пока не установлено наличие собственных минеральных фаз.

Минерализация этой стадии отвечает золото-сурьмяному (Au-Sb) типу руд, как правило, с видимым золотом при содержаниях до 2,9 г/т. Участки совмещения минерализации всех трех продуктивных стадий формируют смешанные золото-мышьяк-сурьмяные (Au-As-Sb) руды с повышенным содержанием металла (до 5,4 г/т).

В целом для «невидимого» Au характерно отсутствие корреляции с Ag; положительная – с W в ранних ассоциациях; слабые положительные с –

Co, Ni, Se, Te. Пары Au-Sb, Au-Pb, Au-Bi проявляют признаки положительных трендов, но характеризуются наличием двух популяций, отвечающих ранним и поздним стадиям.

Второе защищаемое положение. Безрудная кварцево-жильная и рудные золото-мышьяковая и золото-сурьмяная минеральные ассоциации сформированы флюидами, отличающимися по составу газовой и жидкой фаз, а также PT-параметрам.

Параметры гидротермального рудообразования оценены по результатам изучения флюидных включений (ФВ) в кварце, карбонате, арсенопирите, пирите, пирротине и стибните руд методами термокриометрии, Рамановской спектроскопии, беспиролизной газовой хромато-масс-спектрометрии (GC/MS), а также химизма сульфидных минералов с применением геотермометров и фазовых диаграмм. Данные суммированы в таблице 2 и на рисунке 6.

Таблица 2 – Параметры гидротермального рудообразования

Параметр	Стадии				
	дорудная	ранние сульфиды	сульфиды полиметаллов	поздние сульфиды	пострудная
Давление, кбар	0,6–2,2	1,1–2,5		1,8–2,1	???
Температура, °C: Кварц (ФВ) Арсенопирит ¹ Пирротин ² Сурьмяный парагенезис ³	200–325 (290)	260–470 (350) 418–459 352–418 419–545 345–487		240–300 (260) ~225–350	110–180 (150)
Состав флюида: Соленость, мас. % NaCl-экв. Растворенные соли Газовая фаза Комплексы рудных элементов ⁴ fS_2 , бар ^{1,2,3}	10,0–16,0 (12,5) NaCl CO ₂ (±CH ₄ ±H ₂ O)	9,5–20,0 (16,0) NaCl + MgCl CO ₂ -CH ₄ -N ₂ (±H ₂ O) Au(HS) ₂ ⁻ As(OH) ₃		5,5–8,0 (7,0) NaCl + MgCl CO ₂ -CH ₄ -H ₂ O (±N ₂) Au(HS) ₂ ⁻ Sb(OH) ₃ , Sb(OH) ₃ Cl ⁻	0,5–3,0 (2,0) NaCl + KCl ???
		~10 ^{-5,0} ~10 ^{-7,9}		~10 ^{-13,0} -10 ^{-17,0}	

¹Арсенопиритовый геотермометр (Kretschmar, Scott, 1976). ²Пирит-пирротинный геотермометр (Toulmin, Barton, 1964; Lambert et al., 1998). ³Температура стабильности сурьмяных минералов (Williams-Jones, Normand, 1995). ⁴Предполагаемые по литературным данным (Pal'yanova, 2008; Pokrovski et al., 2002, 2006, 2008).

В дорудном жильном кварце преобладают первичные и вторичные газовой-жидкие и существенно газовой или плотные жидкие ФВ. В жильном кварце ранней продуктивной ассоциации первичные ФВ газовой-жидкие с различным соотношением фаз и высокоплотные (Г, Ж), содержащие CO₂, CH₄ и N₂. Также присутствуют вторичные существенно газовой, газовой-жидкие с преобладанием жидкости (H₂O) и трехфазные (Ж + Г + КР) ФВ. Поздний брекчированный рудный кварц, сцементированный агрегатами

минералов стибнит-бертьеритовой ассоциации, содержит первичные газопо-жидкие ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \Gamma$) ФВ с преобладанием жидкой фазы и CO_2 . Вторичные ФВ высокоплотные, заполнены смесью CH_4 , N_2 , CO_2 в разных пропорциях. В кварце пострудных кварц-карбонатных прожилков отмечены газопо-жидкие ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \Gamma$) ФВ.

Полученные данные (рисунок 6, таблица 2) позволяют предположить, что гидротермальная минерализация месторождения сформирована в интервале температур 110–470 °С (кварц) и 225–459(545) °С (сульфиды) и давлений 0,6–2,5 кбар флюидами изменчивого во времени состава, содержащими H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2 , сложные углеводороды, S-, N- и галогенсодержащие (F, Cl) соединения, с различным парциальным давлением серы $\sim 10^{-5,0}$ – $10^{-17,0}$ бар. Минерализация стадий ранних сульфидов, сульфидов полиметаллов и поздних сульфидов образована флюидами, имеющими характерный для них состав и *PT*-параметры, а также различный источник.

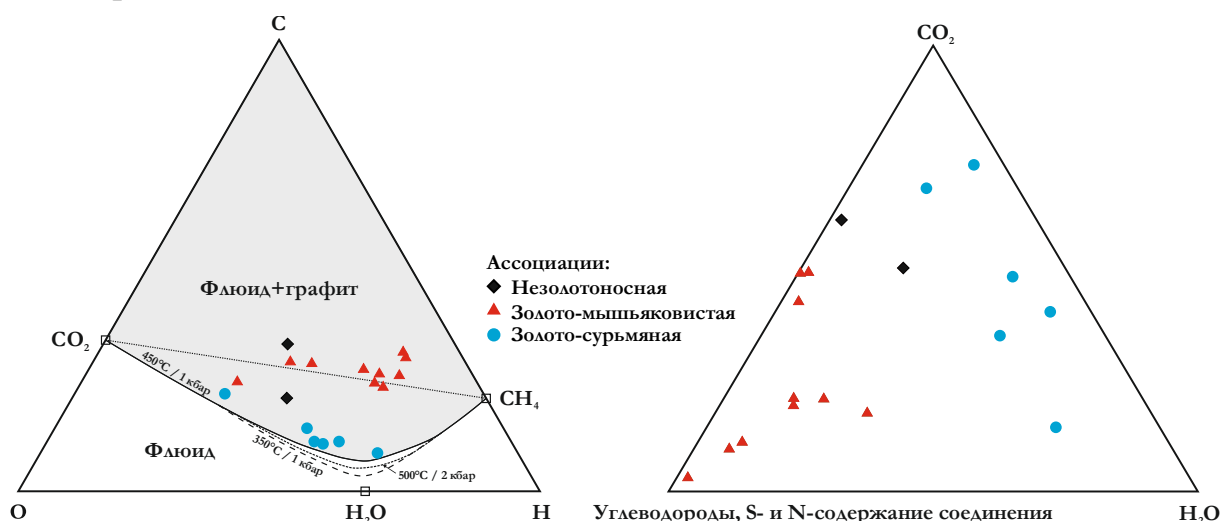


Рисунок 6 – Состав газовой фазы флюидных включений в минералах месторождения по данным GC/MS (Гибшер и др., 2019 с дополнениями; COH-диаграмма – Martz et al., 2017)

Ранний (дорудный) флюид, сформировавший метаморфогенный жильный кварц, среднетемпературный, среднесоленый, с преобладанием CO_2 в газовой фазе и подчиненным количеством углеводородов и H_2O .

Образование золото-мышьяковой минерализации происходило из гетерофазного флюида, что могло быть вызвано гетерогенизацией исходного флюида при его вскипании либо функционированием двух различных флюидов, проявившихся последовательно внутри стадии. На наличие гетерофазного флюида указывают два типа ФВ, обнаруженных в кварце этой стадии – газопо-жидких и существенно газовых. Это высокотемпературный (260–470 °С кварц; 345–459(545) °С сульфиды) и высокосоленый флюид CO_2 – CH_4 – N_2 состава с переменным содержанием H_2O . Во флюиде отмечены галогенсодержащие углеводороды (1-фторбутан, 1-хлорбутан, 1,1-дихлор-1-фторэтан).

Флюид, сформировавший золото-сурьмяную ассоциацию также представляется гетерофазным. Это среднетемпературный (240–300 °С кварц; ~225–350 °С сульфиды) и низкосолёный раствор, содержащий в газовой фазе $\text{CO}_2\text{--CH}_4\text{--H}_2\text{O}$ с подчиненным количеством N_2 . Пострудный флюид низкотемпературный и низкосолёный с преобладанием H_2O (рисунок 6, таблица 2).

Изучение химического состава сульфидов и их парагенезисов указывает на снижение фугитивности серы от ранних к поздним ассоциациям ($\sim 10^{-5,0} \rightarrow \sim 10^{-7,9} \rightarrow \sim 10^{-13,0}\text{--}10^{-17,0}$ бар).

Методом GC/MS во ФВ в арсенопирите и стибните установлены повышенные содержания H_2O , которые могут быть вызваны разложением доминирующих комплексов $\text{As}(\text{OH})_3$ и $\text{Sb}(\text{OH})_3$ при образовании минералов. Существующие параметры флюида позволяют предполагать присутствие золота в растворе в виде бигидросульфидного комплекса $\text{Au}(\text{HS})_2^-$.

Включения углеродистого вещества (УВ) в кварце, по результатам Рамановской спектроскопии, представлены графитом высокой степени (двумерной и трехмерной) упорядоченности с варьирующей долей внутриплоскостных дефектов. Температура образования УВ (335–527 °С±50 °С), а также положение состава флюида стибнит-бертьеритовой ассоциации у границы поля стабильности графита (рисунок 6) не исключают возможность его отложения при восстановлении флюида.

Третье защищаемое положение. Формирование месторождения происходило на протяжении 150 млн лет (предрудная ассоциация – 817–808 млн лет; ранние сульфиды – 803–758 млн лет; поздние сульфиды – 660–615 млн лет). Ранние и поздние ассоциации имели собственный полигенный (смешанный мантийный и коровый) источник вещества.

Геохронологические (Ar-Ar) исследования проведены на 16 образцах мусковита и серицита, отобранных из керна девяти скважин в интервале глубин от 39,0 (503/39) до 718,5 м (510/718,5). В возрастных спектрах всех исследованных образцов можно выделить возрастное плато (рисунок 7). Учитывая, что температуры закрытия изотопной системы слюд сопоставимы с температурами гидротермальных преобразований, датировки должны соответствовать времени возникновения минеральных парагенезисов.

Из полученных данных следует, что гидротермальная деятельность на месторождении началась с формирования незолотоносных кварц-слюдно-сульфидных ассоциаций с возрастом (817,1±6,3)–(808,4±7,7) млн лет. Ранний рудный золото-арсенопиритовый парагенезис сформировался в интервале (803,0±6,1)–(758,0±6,0) млн лет. Для поздней золото-сурьмяной ассоциации получен интервал (795,2±5,8)–(660,0±19,0) млн лет с преобладанием молодых датировок в 757–718 млн лет (Гибшер и др., 2019),

что в сочетании с ранними данными о Rb-Sr возрасте сурьмяной минерализации (615 ± 15) млн лет (Новожилов, Гаврилов, 1999) позволяет предполагать ее образование в период ~ 660 – 615 млн лет.

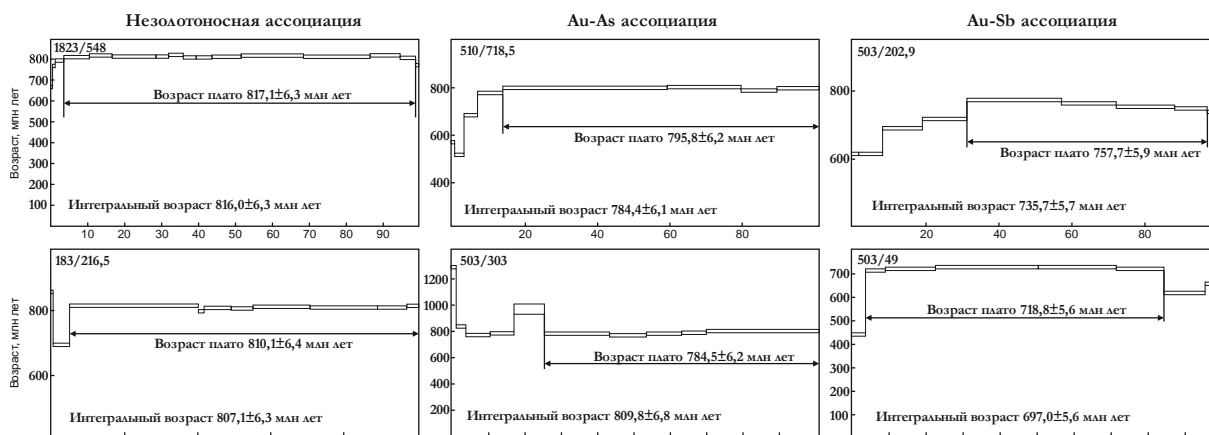


Рисунок 7 – Спектры $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастов слюд рудных комплексов месторождения (Гибшер и др., 2019)

Время формирования руд (~ 810 – 640 млн лет) хорошо согласуется с современными представлениями о возрастных рубежах образования золоторудных месторождений Енисейского кряжа (Ножкин и др., 2011; Полева, Сазонов, 2012).

Изотопные характеристики рудного свинца (Савичев и др., 2006 и неопубликованные данные автора) указывают на различие его состава и модельного возраста для разных минеральных ассоциаций (рисунок 8, а). Минерализация Au-Sb отличается от Au-As низким отношением $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, что указывает на источник, не связанный с гранитоидами (Савичев и др., 2006). Это может быть мантийный изотопный резервуар, что подтверждается присутствием мантийного гелия в рудообразующих флюидах сурьмяной стадии.

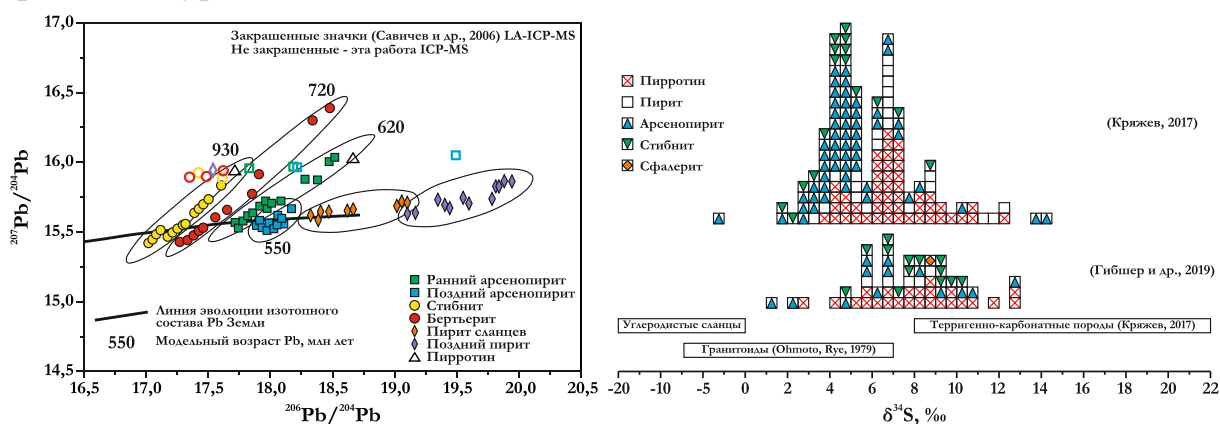


Рисунок 8 – Изотопный состав: а – Pb (Савичев и др., 2006 и неопубликованные данные автора); б – S (Кряжев, 2017; Гибшер и др., 2019; неопубликованные данные автора)

Сульфиды из углеродистых сланцев характеризуются отрицательными значениями $\delta^{34}\text{S}$ ($-21,8$ ‰), указывающими на ее осадочно-диагенетическое происхождение, в то время как карбонатные породы имеют

положительные значения $\delta^{34}\text{S}$ (+21,8 ‰), при этом максимальные вариации устанавливаются на границе этих пород (Кряжев, 2017). Сера сульфидов рудных тел несет признаки эндогенных процессов, при этом комбинирование наших данных (Гибшер и др., 2019; неопубликованные данные автора) и результатов С. Г. Кряжева указывает на наличие трех пиков в распределении $\delta^{34}\text{S}$ (рисунок 8, б). При этом для пирротина зафиксирован максимум в районе ~7 ‰ и намечающийся пик при ~9 ‰, а для большей части арсенопирита и стибнита характерны значения $\delta^{34}\text{S}$ 4–5 ‰.

Значения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ игольчатого арсенопирита и минералов сурьмы близки и в среднем составляют $0,17 \pm 0,02$, что свидетельствует о мантийном источнике осмия. Перекристаллизованный дипирамидальный арсенопирит имеет коровые значения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 14,3, источником в этом случае могли быть коровые гранитоидные расплавы либо осмий мог быть заимствован из вмещающих пород (Naumov et al., 2015).

Для флюида включений в кварце с игольчатым арсенопиритом и стибнитом, а также в самом стибните характерен легкий состав He ($^3\text{He}/^4\text{He}$ $2,9 \cdot 10^{-6}$ и $2,1 \cdot 10^{-6}$ соответственно), что указывает на значительную долю мантийного гелия во флюиде (Naumov et al., 2015). По нашим данным, во флюидных включениях в кварце золото-сурьмяных ассоциаций установлено коровое отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ $0,05 \cdot 10^{-6}$, при этом доля мантийного гелия составляет всего 0,25 % (Гибшер и др., 2019). Гелий флюидов из включений в кварце с крупнокристаллическим арсенопиритом и из включений в этом арсенопирите имеет коровый состав, $^3\text{He}/^4\text{He} < 0,035 \cdot 10^{-6}$ (Naumov et al., 2015).

Геохимическая спецификация ранней стадии (Au, W, Se) может указывать на связь с магматическим источником; ассоциация золота с W, Bi и Pb характерна для месторождений группы Reduced Intrusion-Related Gold Systems (RIRGS), также связанных с магматизмом. Селен и теллур могли быть также заимствованы из метаосадочных толщ, что привело к обогащению ими минералов ранней стадии. Повышенные фоновые содержания Au в углеродистых сланцах месторождения (~26–47 ppb) не исключают первично-осадочный источник части золота.

Указанием на собственный источник при образовании поздних ассоциаций может являться и поведение серебра в сульфидах месторождения. Почти полное отсутствие этого благородного металла в ранних минералах, а также корреляции между золотом и серебром свидетельствует о том, что на ранних этапах рудная система была истощена относительно Ag.

Полученные геохимические данные позволяют предположить связь рудного процесса как с метаосадочными вмещающими породами, так и с магматическими породами и глубинными мантийными явлениями.

Изотопные и геохимические данные указывают на наличие собственных различных источников вещества при образовании золото-мышьяковистой и золото-сурьмяной минерализаций месторождения. При этом для ранней и поздней ассоциаций существуют указания на связь как с коровыми, так и с глубинными (мантийными) процессами, т. е. на полигенность их источников. Эти факты хорошо согласуются с предполагаемым временем образования месторождения, охватывающим промежуток в ~150 млн лет, в течение которого была возможна смена доминирующих источников вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщение опубликованных материалов по уже отработанной части месторождения и авторских результатов аналитических исследований руд глубоких горизонтов дало возможность обосновать защищаемые положения, касающиеся минералогии, геохимии и генезиса месторождения.

Впервые приведены результаты детальных LA-ICP-MS и ICP-MS исследований сульфидов и самородного золота месторождения, которые позволили на качественно новом уровне охарактеризовать геохимию рудного процесса; обосновать главные минералы-носители и концентраторы золота; дать типохимическую аттестацию наиболее распространенных минералов (арсенопирит, пирит, пирротин, сфалерит, халькопирит, ульманит, тетраэдрит, бертьерит, стибнит, гудмундит, джемсонит, самородные сурьма и золото), а также стадий рудообразования.

Детально исследован арсенопирит – главный носитель «невидимого» золота на месторождении. Комплексное минералогическое, геохимическое и структурное изучение позволило показать его эволюцию от раннего игольчатого нестехиометричного, структурно неоднородного, обогащенного золотом к поздним призматическому и дипирамидальному химически и структурно стехиометричным, но обедненным золотом. Исследования кристаллохимии арсенопирита с применением мессбауэровской спектроскопии и рентгеноструктурного анализа дали возможность обосновать наличие неэквивалентных позиций атомов железа, заселенность которых варьирует в существенных пределах при сохранении структуры.

Выполненные ранее исследования ФВ (Прокофьев и др., 1994; Баранова и др., 1997; Генкин и др., 2002) базировались на материале руд верхней части месторождения (до отметки –200 м). В основу настоящей работы положен материал изучения глубоких горизонтов (от отметки +300 до –400 м), что существенно расширяет представления о флюидном режиме формирования месторождения. В соответствии с уточненной парагенетической схемой показано участие флюидов изменчивого состава в

формировании разновозрастных ассоциаций месторождения, раскрыт их состав и термодинамика.

Параметры рудообразования определены по результатам термобарогеохимических исследований ФВ, с привлечением данных сульфидных геотермометров и фазовых диаграмм устойчивости рудных парагенезисов. Представлены новые данные по участию углеводородных соединений в формировании месторождения. Описаны жидкие и газообразные углеводороды, являющиеся частью рудообразующих флюидов, а также твердое УВ. Пионерными исследованиями УВ с применением Рамановской спектроскопии определены структурные особенности, температура и механизм его формирования из рудного флюида.

Обобщение опубликованного материала и полученные нами изотопно-геохимические данные позволили сформировать авторское представление о возрастных рубежах и источниках рудного вещества. Подтверждая геологические наблюдения текстур и структур руд, абсолютные датировки свидетельствуют о существенном временном интервале формирования месторождения (~150 млн лет). Геохимические особенности рудной минерализации, а также поведение стабильных изотопов позволяют предположить различные источники вещества при образовании золото-мышьяковистой и золото-сурьмяной минерализаций месторождения.

ОСНОВНЫЕ ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях перечня ВАК РФ

1. Элементы-примеси в сульфидах и золоте месторождения Олимпиада (Енисейский кряж): источники вещества и параметры флюида / **С. А. Сильянов**, А. М. Сазонов, П. А. Тишин [и др.] // Геология и геофизика. – 2021. – № 3. DOI 10.15372/GiG2020152. (В печати)

2. Gold in the Oxidized Ores of the Olympiada Deposit (Eastern Siberia, Russia) / **S. A. Silyanov**, A. M. Sazonov, E. A. Zvyagina [et al.] // Minerals. – 2021. – № 11(2). – 190.

3. Olympiada Gold Deposit, Yenisei Ridge, Russia / A. M. Sazonov, K. V. Lobanov, E. A. Zvyagina, S. I. Leontiev, **S. A. Silyanov** [et al.] // Geology of the world's major gold deposits and provinces / eds. R. H. Sillitoe, R. J. Goldfarb, F. Robert, S. F. Simmons : Soc. of Econ. Geologists Spec. Publ. 23. – 2020. – P. 203–226.

4. Composition and Ligand Microstructure of Arsenopyrite from Gold Ore Deposits of the Yenisei Ridge (Eastern Siberia, Russia) / A. M. Sazonov, **S. A. Silyanov**, O. A. Bayukov [et al.] // Minerals. – 2019. – № 9. – 737.

5. Олимпиадинское золоторудное месторождение (Енисейский кряж): температура, давление, состав рудообразующих флюидов, $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов, $^3\text{He}/^4\text{He}$ флюидов, Ag-Ag возраст и продолжительность формирования / Н. А. Гибшер, А. А. Томиленко, А. М. Сазонов, Т. А. Бульбак, М. А. Рябуха, **С. А. Сильянов** [и др.] // Геология и геофизика. – 2019. – № 9. – С. 1310–1330.

6. Возраст и продолжительность формирования Олимпиадинского золоторудного месторождения (Енисейский кряж, Россия) / Н. А. Гибшер, А. М. Сазонов, А. В. Травин, А. А. Томиленко, А. В. Пономарчук, **С. А. Сильянов** [и др.] // Геохимия. – 2019. – Т. 64, № 5. – С. 548–553.

7. Изучение форм нахождения золота в рудах и хвостах ЗИФ Олимпиадинского ГОКа / А. М. Сазонов, Е. А. Звягина, **С. А. Сильянов**, Д. Е. Бабенков // Горный журнал. – 2019. – № 4. – С. 54–59.

8. Исследование разупорядочения в структуре природного арсенопирита рентгеноструктурным анализом поликристаллов и ядерным гамма-резонансом / С. Д. Кирик, А. М. Сазонов, **С. А. Сильянов**, О. А. Баюков // Журнал Сибирского федерального университета. Серия Техника и технология. – 2017. – Т. 10, № 5. – С. 578–592.

В прочих изданиях (выборочно)

9. **Сильянов, С. А.** Геохимия вмещающих пород и руд Олимпиадинского месторождения золота / **С. А. Сильянов** // Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче : сб. тез. докл. I Молодеж. науч.-образоват. конф. ЦНИГРИ. – М. : ЦНИГРИ, 2020. – С. 173–176.

10. Рудогенез месторождения золота Олимпиада (Енисейский кряж, Россия) / А. М. Сазонов, Е. А. Звягина, **С. А. Сильянов** [и др.] // Геосферные исследования. – 2019. – № 1. – С. 17–43.

11. **Silyanov, S. A.** REE geochemistry of the sulfides and native gold of the Olympiada deposit (Russia, Siberia) / **S. A. Silyanov**, A. M. Sazonov, P. A. Tishin // Proceedings of the 15th SGA Biennial Meeting Glasgow, 2019. – P. 264–266.

12. **Сильянов, С. А.** Тетраэдрические позиции атомов железа в структуре природного арсенопирита / **С. А. Сильянов**, Ю. В. Князев // Минералы: строение, свойства, методы исследования : материалы X Всерос. молодеж. науч. конф. – Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2019. – С. 223–224.

13. Геохимические показатели генезиса месторождения золота Панимба в Енисейском кряже (Сибирь, Россия) / **С. А. Сильянов**, А. М. Сазонов, П. А. Тишин [и др.] // Геосферные исследования. – 2018. – № 3. – С. 6–21.

14. **Сильянов, С. А.** Термодинамические обстановки рудообразования месторождений золота Енисейского кряжа / **С. А. Сильянов**, Н. А. Некрасова // Тр. Всерос. ежегод. семинара по

экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. – М. : ГЕОХИ РАН, 2018. – С. 232–235.

15. **Сильянов, С. А.** Структура арсенопирита золоторудных месторождений Енисейского кряжа по данным мессбауэровской спектроскопии / **С. А. Сильянов**, Ю. В. Князев, Н. А. Некрасова // Материалы V Междунар. конф. памяти акад. А. П. Карпинского. – СПб., 2017. – С. 813–815.

16. **Сильянов, С. А.** Кристаллическая структура арсенопиритов месторождений золота Енисейского кряжа / **С. А. Сильянов**, Ю. В. Князев, Н. А. Некрасова // Новое в познании процессов рудообразования : сб. материалов VII Рос. молодеж. науч.-практ. шк. – М. : ИГЕМ РАН, 2017. – С. 263–266.

17. Некрасова, Н. А. КР-спектроскопия твердого углеродистого вещества в жильном кварце золоторудного месторождения Панимба (Енисейский кряж) / Н. А. Некрасова, **С. А. Сильянов**, М. А. Рябуха // 6-й Сиб. семинар по спектроскопии комбинационного рассеяния света. – Красноярск : Ин-т физики им. Л. В. Киренского СО РАН, 2017. – С. 160–165.

18. Типоморфизм арсенопирита золоторудных месторождений Благодатное и Олимпиада (Енисейский кряж) / А. М. Сазонов, С. Д. Кирик, **С. А. Сильянов** [и др.] // Минералогия. – 2016. – № 3. – С. 53–70.

19. **Сильянов, С. А.** Распределение РЗЭ в арсенопиритах золоторудных месторождений Олимпиадинское и Благодатное / **С. А. Сильянов**, Н. А. Некрасова // Проспект Свободный-2016 : материалы науч. конф. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. – С. 68–71.

20. Сазонов, А. М. РТХ-параметры образования золотосодержащего кварца енисейских месторождений по термобарогеохимическим данным / А. М. Сазонов, **С. А. Сильянов**, Н. А. Некрасова // Сб. тез. докл. VIII Междунар. конгресса. – Красноярск : Науч.-инновац. центр, 2017. – С. 348–349.

21. **Сильянов, С. А.** Типоморфизм арсенопирита золоторудных месторождений Северо-Енисейского рудного района / **С. А. Сильянов**, Н. А. Некрасова // Уральская минералогическая школа – 2015 : XXI Всерос. науч. конф., посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечественной войне : сб. ст. студентов, аспирантов, науч. сотрудников акад. ин-тов и преподавателей вузов геол. профиля. – Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2015. – С. 89–93.

22. **Сильянов, С. А.** Химическая неоднородность гранатов – показатель условий их образования // Проблемы геологии и освоения недр : Тр. XVIII Междунар. симп. им. акад. М. А. Усова студентов и молодых ученых. Т. I. – Томск : ТПУ, 2014. – С. 164–166.