

**О ФОРМАХ НАХОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА В РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
НАТАЛКИНСКОЕ И МАЙСКОЕ (СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)**

А.В. Волков¹, А.Д. Генкин¹, В.И. Гончаров²

¹*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва*

²*Владикавказский научный центр РАН и РСО-А, г. Владикавказ*

В настоящей статье, помимо краткого геологического очерка, основное внимание уделено результатам изучения золотоносных сульфидов руд Наталкинского и Майского месторождений с использованием современных аналитических методов, таких как электронный зонд, нейтронно-активационный анализ, атомная абсорбция, метод индуктивно связанной плазмы, позволяющие определять состояние золота в рудных минералах. Для выяснения условий образования руд Наталкинского и Майского месторождений наряду с другими показателями проводился анализ изотопии серы в сульфидах. Полученные данные сопоставлены с более ранними результатами авторов и других исследователей.

Ключевые слова: невидимое золото, вкрапленные сульфиды, крупные месторождения, Северо-Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

В многочисленных коренных месторождениях различного минерального состава золото находится в нескольких формах: в виде самородного золота, минералов золота и в рассеянной форме в тесной связи с сульфидами. Рассеянное в сульфидах золото одними исследователями считалось присутствующим в виде субмикроскопического или коллоидального размера частиц, другими – входящим в кристаллическую структуру сульфидов.

Н.В. Петровская в своей монографии “Самородное золото” [16] использовала понятие “тонкодисперсное золото”, к которому она относила частицы (но не атомы золота) размером от долей микрона до 10 микрон, и подчеркивала, что эта форма нахождения золота в эндогенных месторождениях является универсально распространенной.

Таким образом, понятие “невидимое золото” включает тонкодисперсное золото, не выявляемое оптическими методами, коллоидальное, кластерное и химически связанное золото в сульфидах.

В настоящее время выяснено, что невидимая форма нахождения золота во вкрапленных сульфидных рудах связана с мелкокристаллическим арсенипиритом и тонкозернистым пиритом. Наиболее высокие содержания невидимого золота установлены в игольчатом арсенипирите.

Присутствие невидимого золота в сульфидах придает рудам упорные свойства, затрудняя извлечение из них золота и исключая обычно используемое и цианидное выщелачивание. Поэтому данные по распределению невидимого золота в рудах и отдельных минералах имеют большую ценность для разработки рациональных схем обогащения руд. Проблема невидимого золота приобрела большое значение в связи с тем, что во многих странах месторождения вкрапленных золотых руд с упорными свойствами, обладающие большими запасами, являются основным источником золота.

Невидимому золоту в месторождениях посвящены многочисленные публикации [18, 24–26, 28 и др.]. В СССР тонкодисперсное золото (“невидимое”) в сульфидах изучалось в минералогической лаборатории ЦНИГРИ [5, 6 и др.]. В последние 15 лет исследования невидимого золота проводятся в секторе минералогии лаборатории геологии рудных месторождений ИГЕМ РАН.

Невидимое золото широко распространено в сульфидах как собственно золоторудных, так и колчеданных, медно-порфировых и медно-никелевых месторождений. Во многих мезотермальных месторождениях золото-сульфидных жилково-вкрапленных руд с ограниченным развитием кварцевых жил невидимое золото преобладает.

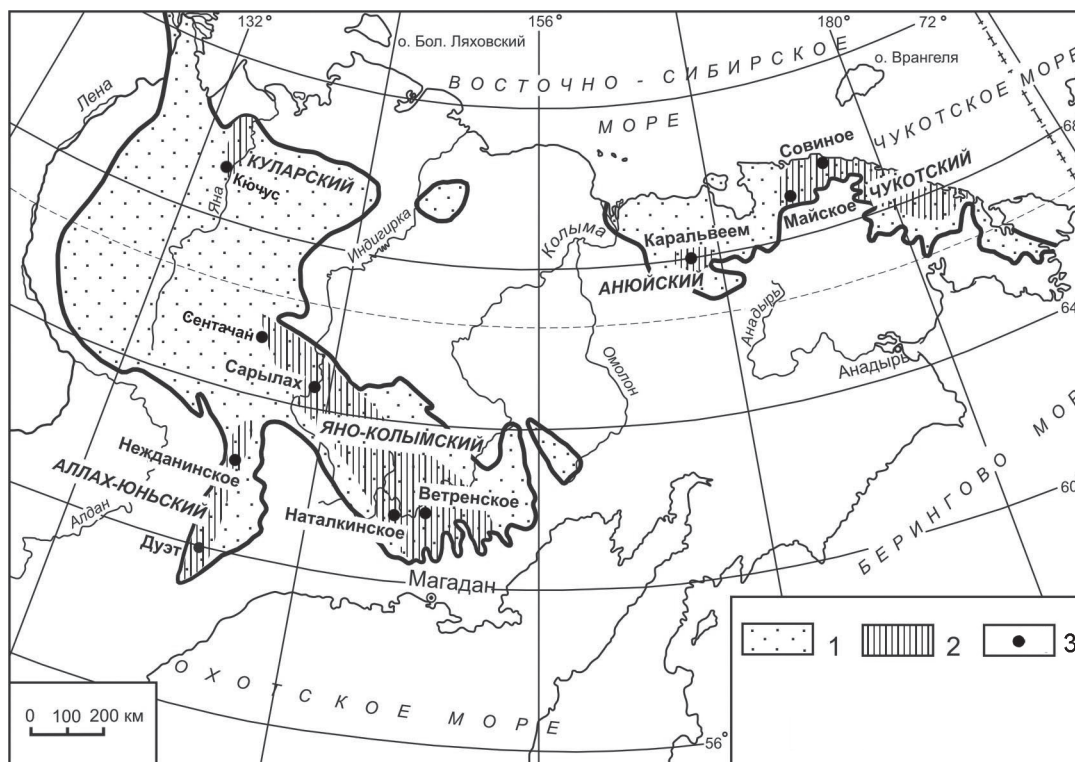


Рис. 1. Распространение пород черносланцевой формации (1) на Северо-Востоке России и положение в них золотоносных районов (2) и основных месторождений (3).

Золоторудные месторождения Наталкинское и Майское относятся к крупномасштабным по запасам золота, представленным вкрапленными, прожилково-вкрапленными, реже жильными рудами. Геологическая позиция и строение этих месторождений достаточно детально освещены в литературе [1–3, 9]. В перечисленных публикациях рассматривается и минеральный состав руд этих месторождений, однако формы нахождения золота и особенно состояние золота в золотоносных сульфидах детально не обсуждаются.

Вкрапленные сульфидные руды рассматриваемых месторождений не имеют принципиальных отличий от руд месторождений Якутии (Нежданинское, Кючус, Мало-Тарынское), Казахстана (Бакырчик), Узбекистана (Даугызгау, Кокпатас), Енисейского края (Олимпиадинское, Ведуга), Читинской области (Итакинское), Таджикистана (Чоре, Кончоч), Финляндии (Сурикусико), Австралии (Форстевил), США (Донлин Крик), Ганы (Ашанти) и др.

Проведенные ранее исследования золоторудных месторождений Сибири (Олимпиада, Ведуга, Нежданинское) показали, что применявшиеся аналитические методы позволяют выяснять формы нахождения золота в рудах и устанавливать невидимое золото в арсенопирите [8, 27].

Формы нахождения золота в рудах Наталкинское и Майское месторождений изучались инструментальным нейтронно-активационным и микрорентгено-спектральным аналитическими методами. Содержание золота в монофракциях сульфидов определялось атомно-абсорбционным и ICP анализами.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Наталкинское месторождение (рис. 1) приурочено к тектоническому блоку с отчетливой надинтрузивной позицией в Тенькинской металлогенической зоне, совпадающей с юго-западным ограничением Аян-Юрхского антиклинория, и является типичным представителем большеобъемных штокверковых месторождений на Северо-Востоке России [9, 10, 14].

Майское месторождение (рис. 1) – типичный представитель золото-сульфидного минерального типа вкрапленных руд [2]. Район месторождения расположен в пределах Чукотской складчатой области мезозойд вблизи ее сочленения с Охотско-Чукотским вулканогенным поясом и приурочен к Кукенейской интрузивно-купольной структуре сателлитного типа, образовавшейся в одноименной зоне ТМА [2]. Вмещающие породы представлены флишoidalными углеродистыми песчано-глинистыми толщами.

ЭТАПЫ И СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

По времени проявления и отношению к основному периоду рудоотложения в пределах *Наталкинско-го и Майского месторождений* выделяются дорудные, рудные и пострудные гидротермальные образования. К дорудным на обоих месторождениях относятся маломощные метаморфогенно-кварцевые и кварц-полевошпатовые жилы.

Продуктивный этап рудообразования *Наталкинско-го месторождения* представлен тремя последовательными стадиями, которым отвечают разновременные минеральные ассоциации: арсенопирит-пиритовая с тонкодисперсным золотом, золото-полиметаллическая и золото-антимонит-кварцевая. Причем 70 % золота было отложено во вторую продуктивную стадию. Возрастные взаимоотношения между сульфидами ранней и поздней минеральных ассоциаций подтверждаются замещениями минералов первой минералами второй ассоциации [13]. Кристаллизация ранних сульфидов происходила в последовательности арсенопирит – пирит. В последнем отмечаются включения идиоморфных зерен арсенопирита, и тонкозернистые его агрегаты пятнами замещаются пиритом. Количественно преобладает арсенопирит, составляющий в среднем 2–6 % от массы вкрапленной руды. Среднее содержание пирита обычно не превышает 0,5–1%. Выделения арсенопирита характеризуются развитием кристаллографических форм и обладают отчетливыми признаками метакристаллов, ромбовидной и игольчатой формами. Пирит обычно образует кубические кристаллы. Расчеты показывают, что в сульфидах месторождения сосредоточено до 50 % всего золота. Однако в оконтуренных рудных телах доля золота в сульфидах не превышает 20–30 %, т.к. в них доминирует золото-полиметаллическая ассоциация, связанная с кварцевыми жилами и прожилковыми зонами. Кристаллизация самородного золота в кварцевых жилах выполнения и кварцевых прожилковых зонах относится к золото-полиметаллической стадии минералообразования.

Таким образом, интенсивная вкрапленная сульфидная минерализация рудных зон, обусловленная гидротермально-метасоматическими процессами, имела весьма важное значение в формировании *Наталкинско-го месторождения*. Гипертрофированное развитие вкрапленного оруденения ставит это месторождение, как и *Нежданинское*, в особое положение по сравнению с другими золото-кварцевыми месторождениями. По характеру вкрапленного сульфидного оруденения *Наталкинское месторождение* прибли-

жается к золото-сульфидным месторождениям вкрапленных руд, в которых практически все золото связано с вкрапленными сульфидами (типичный представитель – месторождение *Майское*).

В последние годы в рудах *Наталкинско-го месторождения* выявлена примесь Pt и Pd, наибольшие содержания которых пространственно приурочены к дайкам спессартитов, локализованным в структуре рудной зоны *Участковая* [9]. Не исключено, что платиноиды были сформированы в самостоятельный этап рудообразования.

В послерудный период на месторождении сформировались кварцевые, пирит-кварцевые и карбонатно-кварцевые прожилки.

Оруденение *Майско-го месторождения* формировалось в три основных этапа, последовательно сменявших друг друга: редкометалльный, золоторудный и сурьмяный [2]. Минеральные ассоциации, свойственные первому и второму этапам, отлагались в различных структурах и разобщены в пространстве. В ранний, редкометалльный этап формировались молибденит-кварцевые и вольфрамит-кварцевые прожилки, приуроченные к ореолу серицитолитов в центральной части месторождения. Установлено пересечение этих прожилков дайками лампрофиров [15], а вкрапленные золото-сульфидные руды являются наложенными по отношению ко всем магматическим образованиям месторождения. Вместе с тем, редкометалльное и золотое оруденение структурно и пространственно разобщены в пределах месторождения. При пересечении даек несколько сокращается мощность рудного тела и резко падает содержание золота. В этих местах в дайках развиваются прожилково-вкрапленные руды с крупнокристаллическим арсенопиритом, пиритом и антимонитом.

На *Майском месторождении*, как и *Наталкинском*, также устанавливаются две продуктивные минеральные ассоциации: более ранняя – пирит-арсенопиритовая с невидимым золотом и поздняя – кварц-полиметаллическая с микроскопическим золотом. Наличие последней в участках рудных тел определяет их сереброносность (до 700 г/т). В некоторых рудных телах эта минеральная ассоциация пользуется значительным распространением. В этих телах количество свободного золота достигает, по данным технологического опробования, 65–80 %, а пробность золота составляет 804–820.

В сурьмяный этап в рудных телах формировались кварц-антимонитовые жилы и прожилки, которые отчетливо пересекают и брекчируют ранние образования. В центральной части рудного тела I выявлена наиболее крупная кварц-антимонитовая жила,

размером по простиранию и падению более 100 м, мощность ее в раздувах достигает 1,5 м. Содержание золота и серебра в поздних антимонитовых рудах, как правило, коррелирует с содержанием этих металлов во вкрапленных пирит-арсенопиритовых рудах [19]. За пределами рудных тел кварц-антимонитовые жилы и прожилки обычно не содержат золота. Золото в кварц-антимонитовых рудах имеет довольно высокую пробность – 920–950, довольно мелкого размера, комковатой формы. В этих рудах часто отмечается халькостибит и ауристибит. Встречаются три разновидности антимонита: игольчатый, крупнокристаллический и массивный чугунного облика. Часто на кварц-антимонитовые жилы накладывается более поздняя диккит-самородномышьяковая, иногда с кинноварью и реальгаром минеральная ассоциация.

В рудных телах восточного фланга месторождения встречаются кварцевые прожилки, отличающиеся повышенной сереброносностью, обусловленной серебросодержащими минералами, типичными для золото-серебряного близповерхностного оруденения (аргентит, миаргирит, фрейбергит, электрум, пробностью 590–620).

Послерудные образования на месторождении представлены гипсо-карбонатной прожилковой минерализацией.

СТРУКТУРА РУД

Формирование руд Наталкинского и Майского месторождений – следствие интенсивного проявления процессов рассланцевания, дробления, будинирования и метасоматического замещения вмещающих пород, а также образования брекчий, жил и прожилков выполнения пустот и трещин.

На рис. 2 показаны два типа руд *Наталкинского месторождения*: основной золото-кварцевый прожилковый (рис. 2а, б) и вкрапленный золото-сульфидный (рис. 2в). Высокие содержания невидимого золота характерны для вкрапленного типа руд, который представлен черносланцевой породой, импрегнированной выделениями арсенопирита и пирита, местами с прожилками кварца (рис. 2в). В прожилковом типе руд арсенопирит и пирит образуют относительно крупные зерна в зальбандах и в самих кварцевых прожилках (рис. 3а). Для вкрапленного типа руд характерны выделения арсенопирита и пирита, располагающиеся часто вдоль плоскостей рассланцевания. Особенно это типично для более мелких зерен этих сульфидов (рис. 3б).

Известно, что месторождения золото-кварцевой формации, к которой многие исследователи относят и *Наталкинское*, характеризуются исключительно

убого-сульфидными кварцевыми жилами, выполняющими трещины скола или отрыва. Сульфиды в рудах этой формации не превышают 2–3 %. Однако часть рудных зон Наталкинского месторождения в противоположность многим месторождениям золото-кварцевой формации представляет пример заметной роли в рудообразовании вкрапленных золотоносных сульфидов, главным образом арсенопирита игольчатого облика и редко встречающегося пирита, импрегнирующих рассланцованные, смятые, будинированные породы в зонах динамометаморфизма. По нашим данным, содержание вкрапленных сульфидов в прожилково-вкрапленном типе руд обычно составляет 3–3,5 %, а местами превышает 6,1 % (рис. 2б, в).

На *Майском месторождении* первичные руды – прожилково-вкрапленные сульфидные (пирит, арсенопирит, антимонит). Строение типичных руд, на 90 % слагающих рудные тела, достаточно простое (рис. 4): темно-серые рассланцованные алевролиты, черные углисто-глинистые сланцы и мелкозернистые песчаники, местами слабо окварцованные, содержащие тонкую, иногда не видимую невооруженным глазом вкрапленность игольчатого арсенопирита и тонкозернистого пирита. Местами в этих рудах отмечается ранний метаморфогенный кварц, иногда они пересекаются поздними кварц-сульфидными и кварц-антимонитовыми прожилками и жилами. Обычно вкрапленные сульфиды не ассоциируют с кварцем (рис. 4). Содержание сульфидов в среднем составляет 6–8 % при заметном, в 2–3 раза, преобладании пирита (рис. 4а). Золото на 90 % присутствует в невидимой (тонкодисперсной) форме в пирите и арсенопирите. Наиболее обогащены золотоносным арсенопиритом черные углисто-глинистые сланцы (рис. 4б). Более сложное брекчиевое строение руд наблюдается крайне редко, главным образом в рудных столбах.

На поверхности и до глубины 80–100 м руды полностью или частично окислены. Среднее содержание золота в окисленных рудах – 22 г/т. Размеры выделений золота здесь – 0,01–0,1 мм, пробность – 950 [2].

В результате проведенных технологических исследований установлено, что первичные и частично окисленные руды месторождения являются упорными. Попутно с золотом из них могут извлекаться сурьма, серебро и сера. Вредными примесями в рудах являются мышьяк и углеродистое вещество.

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД

В *Наталкинском месторождении* главными рудными минералами являются арсенопирит, пирит, самородное золото, галенит, пирротин. Спорадичес-

ки встречаются шеелит, касситерит, ильменит, рутил, сфалерит, халькопирит, антимонит, электрум. Золото ассоциирует с кварцем и сульфидами. Размеры выделений золота колеблются от 0.2–0.5 до 2 мм, преобладает золото интерстициальной, губчатой и комковатой формы, его пробность – от 620 до 800, в среднем по месторождению – 750. Среди жильных минералов резко преобладает кварц, подчиненное значение имеют альбит, ортоклаз, адуляр (на верхних горизонтах месторождения), кальцит, анкерит, доломит, широко распространены серицит и хлорит.

В Майском месторождении минеральный состав руд представлен значительно большим по сравнению с Наталкинским месторождением числом минералов. В статье Н.С. Бортникова и др. [1] в рудах Майского месторождения отмечается более 60-ти гипогенных минералов.

Главные минералы рудных тел представлены арсенопиритом, пиритом, антимонитом, серицитом, кварцем, гидромусковитом, диккитом, каолинитом. В зоне окисления главными минералами являются лимонит, ярозит, скородит, валентинит.

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА В РУДАХ НАТАЛКИНСКОГО И МАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные выше данные по минеральному составу руд показывают, что золото присутствует в них в двух формах: в виде самородного золота и золотоносных сульфидов, преимущественно арсенопирита.

Состав арсенопирита и содержание в нем золота изучались на рентгеноспектральном микроанализаторе "Самбах-Мисго". Условия анализа: напряжение – 20 кВ, время счета – 10 с, при определении Au – 100 с. Пределы обнаружения для Au – 0.005 мас. %, для остальных элементов – 0.02 мас. % (аналитик А.И. Цепин (ИГЕМ РАН)). Кроме того, содержание золота определялось в монофракциях арсенопирита атомно-абсорбционным и ИСР методами, а в отдельных кристаллах методом инструментального нейтронно-активационного анализа. Последний обладает высокой чувствительностью, позволяющей определять содержание золота в мельчайших зернах арсенопирита и пирита весом до нескольких микрограмм. В использовавшейся в ИГЕМ РАН методике отдельные зерна сульфидов размером до 30–70 мкм взвешивались на микроаналитических весах и заделывались в полиэтиленовую пленку. Для активации полиэтиленовые пакетики заворачивались в фильтровальную бумагу и алюминиевую фольгу. Таким же образом поступают с пробами стандартов. Пробы активировались 17 часов в реакторе потоком нейтронов. Используемая для анализов гамма-линия и время

охлаждения после активации составляли для ^{197}Au соответственно 412 (КеV) и от 8 до 10 дней. Анализ нескольких индивидуальных зерен из одной и той же навески позволял получить представление о вариации содержания золота в отдельных зернах.

Наталкинское месторождение. Арсенопирит анализировался в трех образцах, отобранных по зоне «Участковая» на горизонте 650 м. Два образца (Н-1 и Н-2) представляли типичные для месторождения бедные прожилковые руды, в которых черные сланцы пересекают редкие субпараллельные кварцевые прожилки мощностью 0.3–1.0 см. Содержание игольчатого и короткопризматического арсенопирита, развитаго в зальбандах прожилков, по данным сканирования аншлифов, составило в них 2.6 и 1.7 %, соответственно (рис. 2). Образец Н-3 практически не содержал кварцевых прожилков, однако количество вкрапленного игольчатого арсенопирита, по данным сканирования двух аншлифов, составило 4.3. и 6.1 % (рис. 2б).

Содержание золота, определенное микрорентгеноспектральным методом в арсенопирите из образцов Н-1 и Н-2, из 20 замеров в Н-1 установлено в 6 зернах (140–220 г/т), а в Н-2 из 19 замеров определено в 8 точках (110–310 г/т), в Н-3 из 37 замеров определено в 14 зернах (150–470 г/т). Только в трех зернах арсенопирита из четырнадцати (Н-3) содержания золота составили 400, 440 и 470 г/т (табл. 1). В образце вкрапленных руд (Н-3) установлен нестехиометрический состав арсенопирита с преобладанием серы над мышьяком (табл. 1).

Методом нейтронно-активационного анализа в кристаллах арсенопирита из образцов Н-1 и Н-2 обнаружены содержания золота 18.75 и 94.65 г/т, соответственно, а в арсенопирите (Н-3) – 482.6 г/т. В монофракции арсенопирита из образца Н-3 содержания золота, определенные атомно-абсорбционным методом, составили 470 г/т, а методом ИСР – 460 г/т.

Таким образом, высокие содержания золота, по данным микрорентгеноспектрального анализа в арсенопирите вкрапленных руд Наталкинского месторождения (табл. 1), были подтверждены результатами определений нейтронно-активационным, атомно-абсорбционным и ИСР методами.

Майское месторождение. Арсенопирит анализировался из образцов вкрапленных руд и монофракций из концентратов двух малых технологических проб по рудному телу № 1 (рис. 4, 5).

В арсенопирите Майского месторождения содержания золота, определенные микрорентгеноспектральным методом, составили от 0 до 1100 г/т (среднее по 10 зернам – 320 г/т). В пяти зернах содержание находится в диапазоне от 500 до 600 г/т (табл. 1).

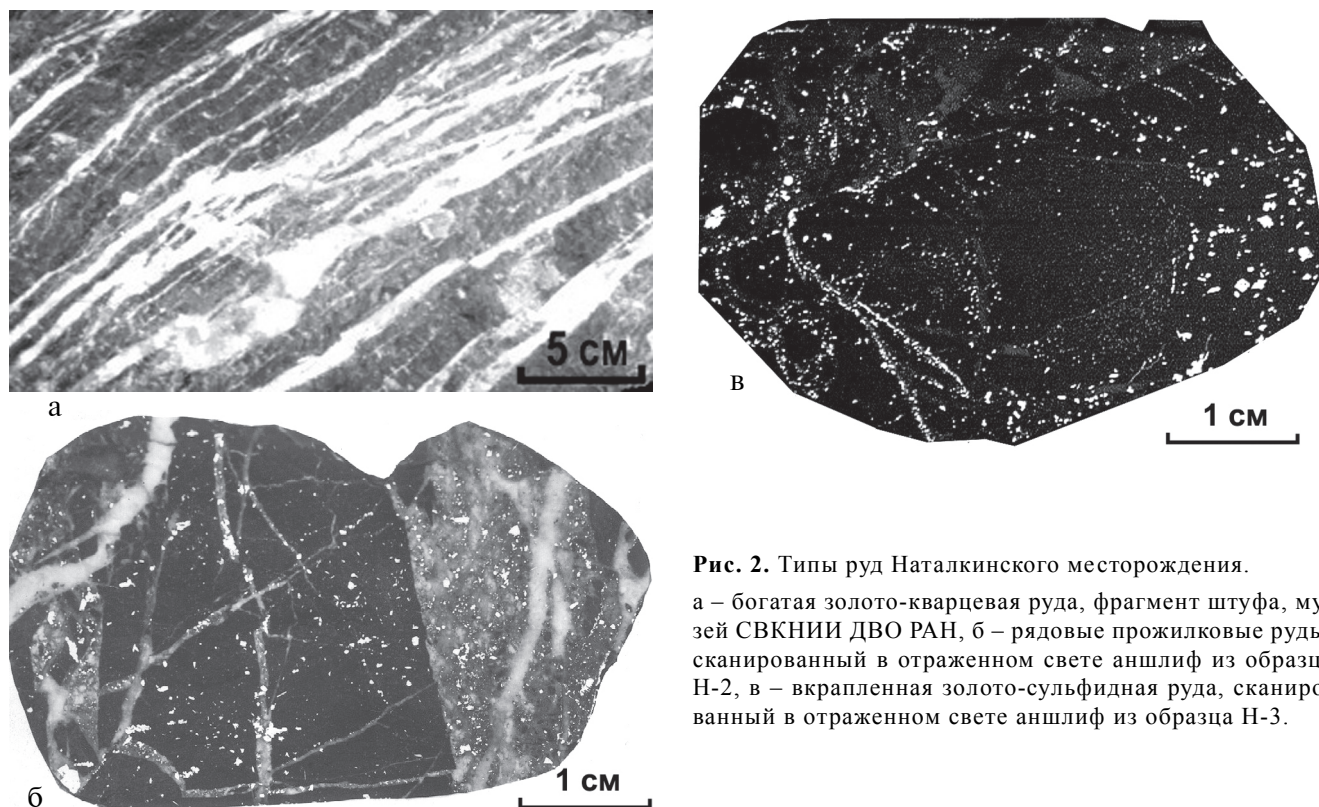


Рис. 2. Типы руд Наталкинского месторождения.

а – богатая золото-кварцевая руда, фрагмент штуфа, музей СВКНИИ ДВО РАН, б – рядовые прожилковые руды, сканированный в отраженном свете аншлиф из образца Н-2, в – вкрапленная золото-сульфидная руда, сканированный в отраженном свете аншлиф из образца Н-3.

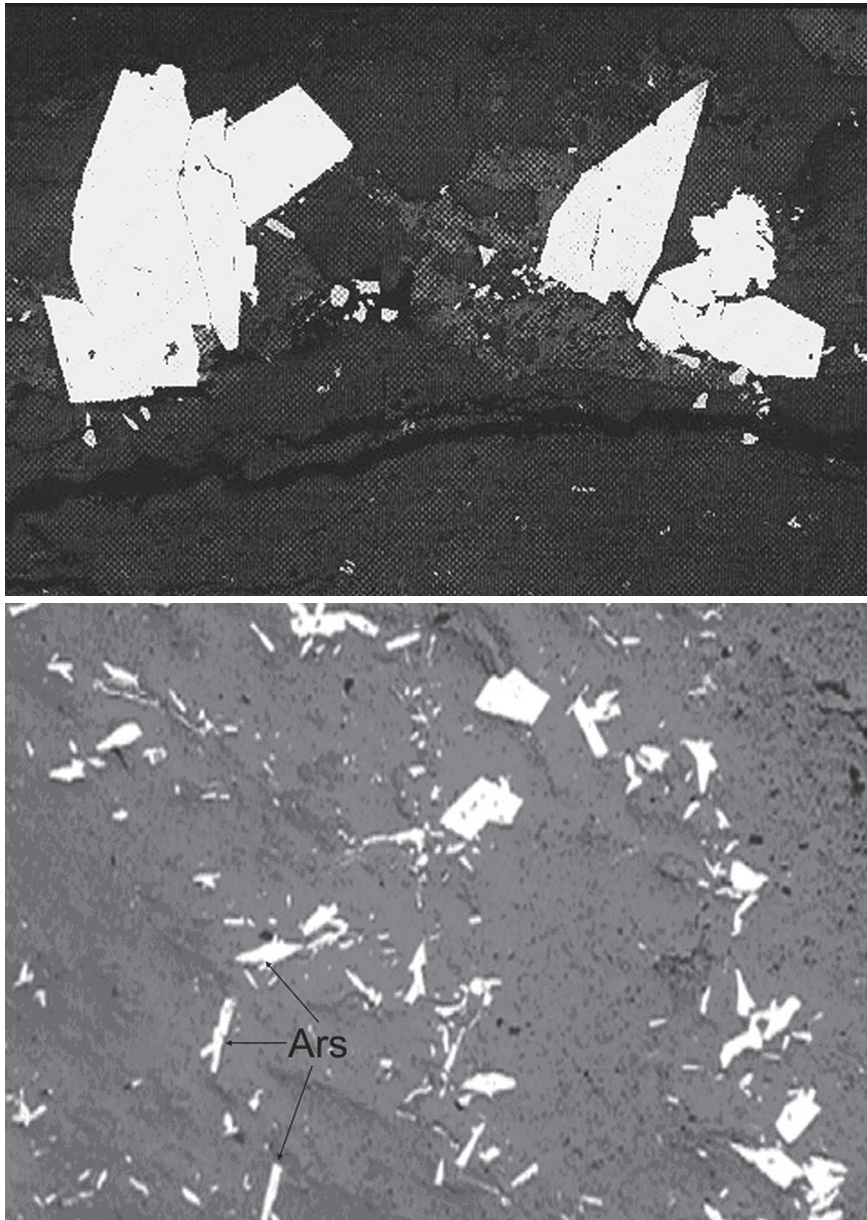
Таблица 1. Состав арсенипирита Майского и Наталкинского месторождений по данным микрорентгеноспектрального анализа.

№	Fe, (ат.%)	As, (ат.%)	S, (ат.%)	Co, (ат.%)	Sb, (ат.%)	Ag, (мас.%)	Au, (мас.%)	S/As	Сумма
Майское месторождение									
1	31.72	30.76	37.35	0.03	0.16	0.010	0.110	1.21	100.02
2	32.11	29.62	38.04	0.00	0.23	0.002	0.050	1.28	100.00
3	31.92	29.64	38.36	0.02	0.08	0.001	0.053	1.29	100.01
4	31.83	30.25	37.88	0.02	0.03	0.000	0.060	1.25	100.01
5	31.67	30.53	37.71	0.06	0.07	0.005	0.060	1.24	100.05
Наталкинское месторождение									
1	38.57	27.62	33.79	0.03	0.01	0.008	0.047	1.22	100.02
2	37.94	27.20	34.86	0.00	0.00	0.005	0.023	1.28	100.00
3	36.82	27.23	35.95	0.00	0.00	0.004	0.040	1.32	100.00
4	37.22	27.53	35.25	0.00	0.00	0.010	0.014	1.28	100.00
5	36.66	27.82	35.52	0.01	0.00	0.000	0.044	1.28	100.01
6	35.14	27.57	37.25	0.00	0.03	0.000	0.019	1.35	100.00
7	32.85	32.63	34.52	0.00	0.00	0.008	0.026	1.06	100.00
8	32.82	32.62	34.55	0.00	0.00	0.001	0.031	1.06	100.00
9	32.76	32.64	34.60	0.01	0.00	0.006	0.022	1.06	100.00

Примечание. Анализы выполнены на рентгеноспектральном микроанализаторе «Самбах-Мисго». Условия анализа: напряжение – 20 кВ, время счета – 10 с, при определении Au – 100 с. Пределы обнаружения для Au – 0.005 мас. %, для остальных элементов 0.02 мас. %. Аналитик А.И. Цепин (ИГЕМ РАН).

Размер зерен арсенипирита, в которых определялось золото, варьировал от 20×25 до 25×150 микрон. Содержание основных компонентов в арсенипирите выявляет его нестехиометрический состав с преобладанием серы над мышьяком (табл. 1). Методом нейт-

ронно-активационного анализа в четырех зернах арсенипирита определены следующие содержания золота: 300; 482.6; 794.5; 1685; 1975 г/т, которые подтверждают определения, сделанные микрорентгеноспектральным методом.



а

б

Рис. 3. Арсенопирит руд Наталкинского месторождения.

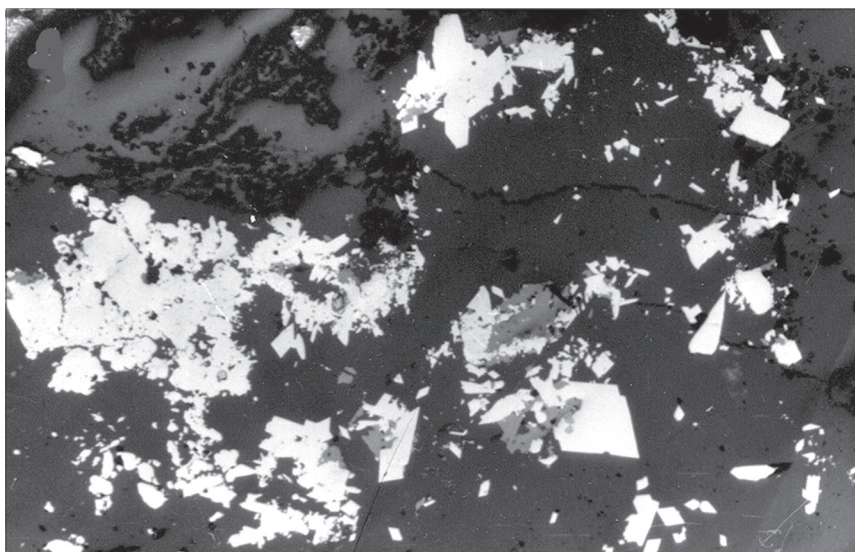
а – крупнозернистый арсенопирит в кварцевом прожилке, аншлиф Н-2, ув. 40; б – вкрапленный игольчатый высокозолотоносный арсенопирит, аншлиф Н-3, ув. 40.

По данным Ю.И. Новожилова и А.М. Гаврилова [15], содержание золота в сульфидах первичных руд Майского месторождения в среднем составляет: в пирите – 60 г/т, в арсенопирите – 660 г/т.

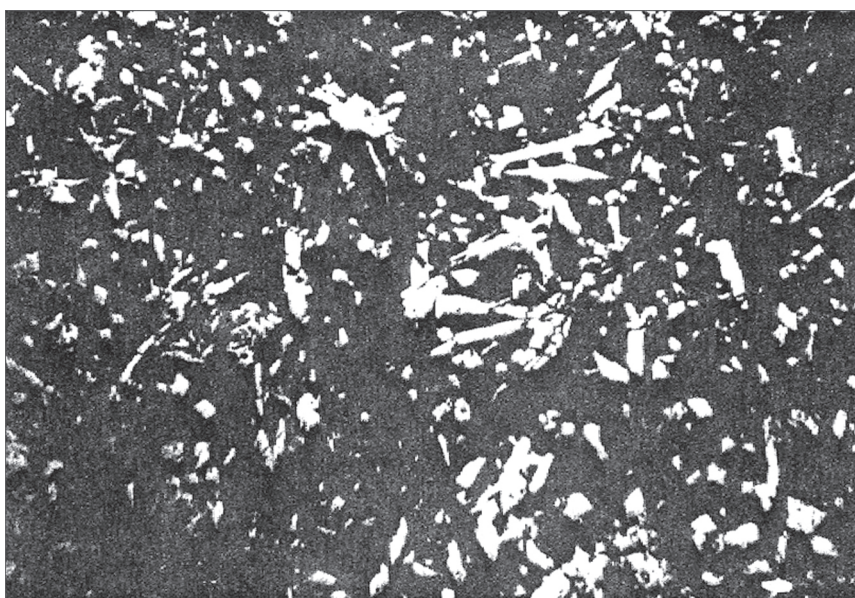
По данным микрорентгеноспектрального сканирования пирита Майского месторождения, высокие содержания мышьяка приурочены к периферии метакристаллов и образуют тонкую кайму вокруг них. По данным фотоэлектронной спектроскопии, именно к этим узким каемкам (1–4 микрона) метакристаллов в рудах Карлина приурочены высокие содержания наночастиц золота и сурьмы [23]. Содержание золота в пирите вкрапленных руд Майского месторождения оказалось ниже уровня обнаружения

на электронном зонде. Однако отмеченная особенность указывает на сходство условий формирования майских и карлинских руд.

В результате микрорентгеноспектрального изучения и нейтронно-активационного анализа выявлены аналогии в составе арсенопирита Майского и Наталкинского месторождений (табл. 1): высокие величины серно-мышьякового отношения (1.28–1.35), высокая золотоносность, (Майское – 500–1100 г/т, Наталкинское – 140–470 г/т), высокая примесь сурьмы (Майское – 0.07–0.53 %, Наталкинское – 0.01–0.07 %). Содержания главных компонентов арсенопирита (Fe, As, S), по данным микрорентгеноспектрального анализа, свидетельствуют о его нестехио-



а



б

Рис. 4. Типы руд Майского месторождения.

а – рядовые вкрапленные руды р.т.1 – выделения игольчатого золотосодержащего арсенопирита и тонкозернистого мышьяковистого пирита в алевролите (ув. 50); б – длиннопризматический (игольчатый) арсенопирит в обломке черных углисто-глинистых сланцев из кварцевой брекчии, богатое рудное гнездо в р.т.1, штрек 1-ю, рассечка 17-в (ув. 50).

метрическом составе как в Наталкинском, так и в Майском месторождении (табл. 1). При 19.7 % серы для стехиометрического состава, в Наталкинском месторождении содержание серы оказалось до 23.22 %, а в Майском – до 24.66 %.

Таким образом, в арсенопирите этих месторождений обнаружено явное преобладание серы над мышьяком. Максимальную золотоносность имеют арсенопириты с наиболее высоким серно-мышьяковым отношением. Такой же “сернистый” арсенопирит был установлен ранее в месторождениях Нежданинское, Олимпиада и Ведуга в Енисейском крыже (табл. 2).

Из таблицы 2 видно, что в отличие от золото-кварцевых и золото-редкометалльных месторождений, где состав арсенопиритов жильных и прожилковых руд близок к стехиометрическому ($S/As - 0.9-1.14$), высокзолотоносные арсенопириты вкраплен-

ных руд золото-сульфидных месторождений имеют нестехиометрический состав ($S/As - 1.21-1.35$). Необходимо отметить, что арсенопириты разных типов руд Наталкинского месторождения, как и Нежданинского, также отличаются по составу и отношению серы к мышьяку (табл. 2). Выявленные отличия свидетельствуют о разных условиях образования жильных и вкрапленных руд на этих месторождениях.

Следует заметить, что в мире встречаются месторождения со значительно более высоким содержанием золота в арсенопирите [8]. Наиболее высокие содержания обнаружены в месторождениях Ле Шантеле и Виллеранж (Франция) – 12000–13000 г/т – и в месторождении Конгресс (Канада) – 13000 г/т. Однако эти месторождения характеризуются высоким отношением мышьяка к сере [2], что может свидетельствовать о метаморфизме руд.

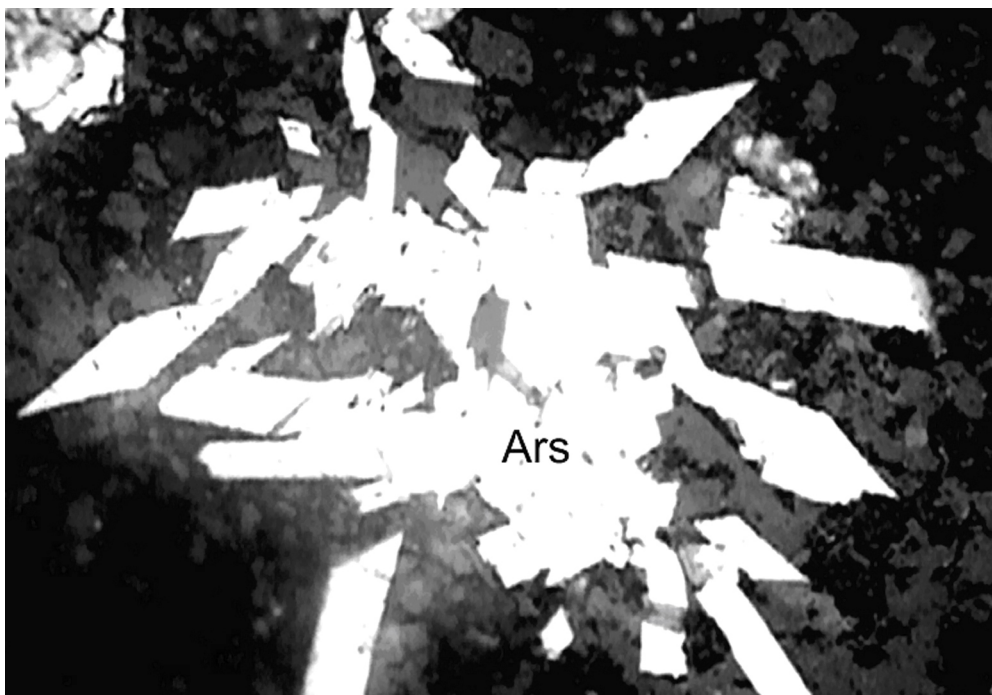


Рис. 5. Характер выделений золотоносного игольчатого арсенопирита, р.т. 1, скв.19, Майское месторождение. Ув. 100.

Таблица 2. Средний состав арсенопирита месторождений различных формационных типов по данным микро-рентгеноспектрального анализа.

По данным месбауэровской спектроскопии, в большинстве золото-сульфидных месторождений вкрапленных руд золото находится в арсенопирите в виде химически связанного в его структуре или в металлическом состоянии с размером частиц 2 наномикрона [27].

Как и в других месторождениях с невидимым золотом, в российских месторождениях главным носителем его является золотоносный арсенопирит. Содержание золота в нем, определенное с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии, составляет

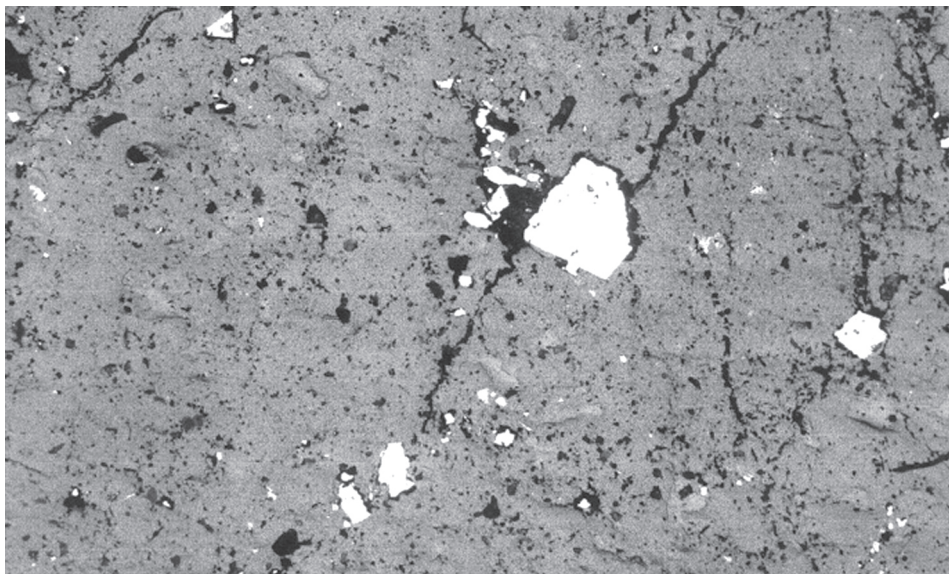


Рис. 6. Переотложенный арсенопирит, ассоциирующий с кварцевыми прожилками в рудах месторождения Майское. Ув. 50.

в Олимпиаде 4700 г/т, в Ведуге – 1140 г/т, в Нежданском – 1400 г/т [27].

С помощью мессбауэровской спектроскопии [28] установлено, что в большинстве месторождений с невидимым золотом оно находится в арсенопирите в химически связанной форме. Наряду с этой формой нахождения почти во всех месторождениях находится самородное золото. Важно отметить, что самородное золото образуется позже золотоносного арсенопирита. Мессбауэровские спектры показывают, что золото в арсенопирите месторождений Ведуга и Нежданском находится полностью в химически связанной форме. В месторождении Олимпиада спектры более сложные [8].

Вслед за Н.В. Петровской [16] многие исследователи полагают, что преимущественная концентрация золота в ранних сульфидах обусловлена избирательным осаждением золота на сульфидах при воздействии на них поздних золотоносных растворов, как это установлено для золото-кварцевых месторождений. Полученные нами данные подтверждают другое представление [6] – о формировании основной части золота в изученных арсенопиритах в процессе совместной кристаллизации на ранней стадии рудообразования. Эти данные подтверждают также предположение [20], что золото переносилось в форме серно-мышьяковых комплексных соединений.

На Майском месторождении вкрапленные пирит-арсенопиритовые руды, прослежены без изменения состава с поверхности до глубины 1300 м и снизу не оконтурены. Таким образом, вертикальный размах рудной колонны весьма значителен и возможно

достигает нескольких километров, что невозможно объяснить рудоотложением из обычных гидротермальных флюидов. Весьма мелкие размеры золотоносных сульфидов свидетельствуют о высокой скорости их кристаллизации. Вполне вероятно предположить, учитывая вышеизложенные факты, перенос золота и серно-мышьяковых комплексов высокотемпературными газовыми флюидами. На эту возможность указывают результаты исследования современной рудообразующей системы вулкана Кудрявый [22] и специализированное изучение состава флюидных включений Олимпиадинского месторождения [4].

В образце из рудного тела 1 Майского месторождения (образец представлен Г.Д. Киселевой) наблюдалось своеобразное строение руд. В алевролите развиты субпараллельные прожилки кварца, к которым были приурочены мельчайшие (от 10 до 50 мкм) кристаллики арсенопирита, буквально переполняющие прожилки (рис. 6). Изредка около этих прожилков наблюдались более крупные зерна арсенопирита (рис. 6). Такие структуры руд свидетельствуют об одновременном образовании кварца и арсенопирита в прожилках. По-видимому, арсенопирит в эти кварцевые прожилки был переотложен из более ранней вкрапленности. Поскольку арсенопирит в рудах Майского месторождения – один из главных носителей невидимого золота, а такие однозначные соотношения с кварцем редко устанавливаются в рудах, была предпринята попытка определить температуру образования кварцевых прожилков. В пластинках кварца из этих прожилков Т.Л. Крыловой было выявлено несколько очень мелких газовой-жид-

ких включений размером 5–9 мкм, температура гомогенизации которых оказалась 117–128° С, а концентрация солей – 1.2–2.2 % NaCl экв.

Изучение изотопии серы золотоносных арсенипиритов проведено в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН (Аналитик Л.П. Носик). Данные по изотопии серы рассматриваемых золотоносных арсенипиритов вкрапленных руд месторождений: в Наталкинском $-7.61 \div -3.05$ (6 проб), в Майском $-0.22 \div -5.28$ (4 пробы) – находятся в близких отрицательных областях и свидетельствуют о вероятном коровом происхождении серы.

Проведенные ранее А.М. Гавриловым и А.П. Плешаковым специальные исследования, с применением растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа, позволили выявить в арсенипирите вкрапленных руд Майского месторождения неравномерные, в том числе кучные скопления округлых включений золота размером 0.04–0.3 микрон, которые являются основной и, вероятно, единственной формой нахождения невидимого золота в сульфидах [17]. В месте с тем, исследования арсенипиритов, содержащих невидимое золото в химически связанной форме (Олимпиадинское и другие месторождения), показали достаточно равномерное распределение содержаний золота [8].

Таким образом, выявленное микрорентгеноспектральным анализом неравномерное распределение содержаний золота в арсенипиритах Наталкинского и Майского месторождений, вероятно, указывает на металлическую форму его нахождения.

В заключение отметим, что в пределах Наталкинского месторождения установлена высокая золотоносность вкрапленного арсенипирита. Кроме того, выявлено, что содержание сульфидов во вкрапленном типе руд может достигать 4–6 %, при средних по месторождению 2.5–3 %. Эти данные имеют важное значение для разработки технологии переработки руд. Масштабы вкрапленного типа руд в пределах Наталкинского месторождения также необходимо изучить.

Особенности процесса рудообразования Наталкинского месторождения позволяют выделить в составе группы золото-сульфидных месторождений вкрапленных руд золото-сульфидно-кварцевый подтип.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 04–05–64359) и Программы ОНЗ № 2 “Фун-

даментальные проблемы геологии, условия образования и принципы прогноза традиционных и новых типов крупномасштабных месторождений стратегических видов минерального сырья”.

Авторы особенно благодарны А.М. Гаврилову и Г.Д. Киселевой за предоставленные образцы, А.Л. Керзину, Л.П. Носику, Л.Ф. Карташовой, А.И. Цепину за аналитические исследования, Г.Ю. Акимову за помощь в обработке результатов анализов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бортников Н.С., Брызгалов И.А., Кривицкая И.И. и др. Майское многоэтапное прожилково-вкрапленное золото-сульфидное месторождение (Чукотка, Россия): минералогия, флюидные включения, стабильные изотопы (D и S), история и условия образования // Геология руд. месторождений. 2004. Т. 46. № 6. С. 475–509.
2. Волков А.В., Сидоров А.А. Уникальный золоторудный район Чукотки. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, М: ИГЕМ РАН, 2001. 180 с.
3. Волков А.В., Сидоров А.А., Гончаров В.И. и др. Золото-сульфидные месторождения вкрапленных руд Северо-Востока России // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44, № 3. С. 179–197.
4. Волков А.В., Сидоров А.А. Об условиях образования золото-сульфидных вкрапленных руд // Докл. РАН. 2005. Т. 403, № 2. С. 220–223.
5. Гаврилов А.М., Плешаков А.П., Бернштейн П.С. и др. Субмикроскопическое золото в сульфидах некоторых месторождений вкрапленных руд // Сов. геология. 1982. № 8. С. 81–86.
6. Гаврилов А.М. Выявление сингенетичной природы дисперсного золота в сульфидах по данным его распределения // Труды ЦНИГРИ. 1983. Вып. 178. С. 33–40.
7. Гамянин Г.Н., Бортников Н.С., Алпатов В.В. Нежданское золоторудное месторождение – уникальное месторождение Северо-Востока России. М.: ГЕОС, 2000. С. 220–226.
8. Генкин А.Д., Вагнер Ф.Е., Крылова Т.Л., и др. Золотоносный арсенипирит и условия его образования на золоторудных месторождениях Олимпиада и Ведуга (Енисейский край, Сибирь) // Геология руд. месторождений. 2002. Т. 44, № 1. С. 59–76.
9. Гончаров В.И., Ворошин С.В., Сидоров В.А. Наталкинское золоторудное месторождение Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2002. 249 с.
10. Горячев Н.А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 210 с.
11. Горячев Н.А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. 143 с.
12. Давиденко Н.М. Минеральные ассоциации и условия формирования золотоносных кварцевых жил Мало-Ануйского района Западной Чукотки. Новосибирск, Наука, 1975.
13. Еремин Р.А., Осипов А.П. К проблеме генезиса Наталкинского золоторудного месторождения // Колыма. 1974. № 6. С. 41–44.

14. Калинин А.И. Золото-кварцевые месторождения Центрально-Колымского района. Наталкинское месторождение // Многофакторные прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России. М.: ЦНИГРИ, 1992. С. 5–17
15. Новожилов Ю.И., Гаврилов А.М. Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. М.: ЦНИГРИ, 1999.
16. Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука, 1973.
17. Поисково-оценочные критерии золоторудных месторождений перивулканических зон (методические рекомендации). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1982.
18. Рудаков В.В., Казимиров М.П., Григоров С.А. О новом экономическом классе коренных месторождений золота России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. Спец. выпуск. Драгоценные металлы, 2004. С. 49–52.
19. Сидоров А.А., Новожилов Ю.И., Гаврилов А.М. О связи месторождений золотоносных вкрапленных сульфидных руд с вулканогенным золото-серебряным оруденением // ДАН СССР. 1981. Т. 261, № 6. С. 1398–1401.
20. Сорокин В.Н. Об одной из возможной форм переноса золота в гидротермальных растворах // Геохимия. 1973. № 12. С. 1892–1894.
21. Тюкова Е.Э. Состав и парагенезисы арсенопирита в реконструкции геологической истории месторождений (Верхне-Колымский регион) // Проблемы металлогении рудных районов Северо-Востока России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2005. С. 125–156.
22. Юдовская М.А., Дистлер В.В., Чаплыгин И.В. и др. Формы нахождения золота в продуктах кристаллизации современных высокотемпературных газовых флюидов вулкана Кудрявый, Курильские острова // Докл. РАН. 2003. Т. 391, № 4. С. 535–539.
23. Arehart G.B., Chrysoulis S.L., Kesler S.E. Gold and arsenic iron sulfides from sediment-hosted disseminated gold deposits // Econ. Geol. 1993. V. 88. P. 171–196.
24. Cabri L.G., Chrysoulis S.L., De Villers P.L. et al. The nature of “invisible” gold in arsenopyrite // Canad. Mineralogist. V. 27. Pt. 3. P. 353–362.
25. Cathelinean, Boiron M.C., Holiger P. et al. Gold arsenopyrite: crystal-chemistry, location and state, physical and chemical conditions of deposition // Economic Geology. 1989. Monog. P. 328–341.
26. Chrysoulis S.L., Cabry L.G. The significance of gold mineralogical balances in mineral processing // Institution of Mining and Metallurgy Teanoscobides. 1990. P. 99. С. 1–10.
27. Genkin A.D., Bortnicov N.S., Cabry L., Wagner F.E., Stanleg C.Y., Safonov Y.G., Freedl J., Mohen M., Kerzin A.L., Gamyani G.N. A multilevel study of invisible gold in arsenopyrite from four mesothermal gold deposits in Siberia Russian Federation // Economic Geology. 1998. V. 93. N 24. P. 463–487.
28. Wagner E.E., Marion P., Regward J.R. et al. Moesbauer study of chemical state of gold in ores // Gold R.O. Proc. Int. Conf. on Gold Extractive metallurgy. Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy. 1986. V. 20. P. 435–443.

Поступила в редакцию 12 июля 2006 г.

Рекомендована к печати С.М. Родионовым

A.V. Volkov, A.D. Genkin, V.I. Goncharov

The forms of the presence of gold in the ores of the Natalka and May deposits (Northeast Russia)

In addition to a brief geological essay, the paper focuses on the results of the study of gold-bearing sulfides of ores at the Natalka and May deposits using modern analytical methods, such as electronic probe, neutron activation analysis, atomic absorption, and the method of inductively coupled plasma, allowing us to determine the condition of gold in the ore minerals. To define the conditions of the formation of ores at the Natalka and May deposits the analysis of sulfur isotopes in sulfides was carried out alongside other parameters. The data obtained have been compared with the earlier results of the authors and other researchers.

Key words: invisible gold, impregnated sulfides, large deposits, Northeast Russia.