

УДК 553.441:553.499

“НЕВИДИМОЕ” ЗОЛОТО И ДРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В ПИРИТЕ И АРСЕНОПИРИТЕ ВКРАПЛЕННЫХ РУД ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАЙСКОЕ (ЧУКОТКА)

© 2025 г. Н. В. Сидорова^{а, *}, А. В. Волков^{а, **}, Е. Э. Тюкова^{а, b}, Е. Н. Кайгородова^а,
Е. В. Ковальчук^{а, c}, Е. А. Минервина^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

^bНаучный геоинформационный центр РАН, ул. Новый Арбат, 11, Москва, 119091 Россия

^cРоссийский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе,
ул. Миклухо-Маклая, 23, Москва, 117997 Россия

*E-mail: nsidorova989@mail.ru

**E-mail: tma2105@mail.ru

Поступила в редакцию 08.08.2024 г.

После доработки 28.10.2024 г.

Принята к публикации 01.11.2024 г.

С помощью современных прецизионных методов (рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерным пробоотбором (ЛА-ИСП-МС)) проведено изучение состава золотоносных сульфидов (пирита и арсенопирита) вкрапленных упорных руд золоторудного месторождения Майское (Центральная Чукотка). Установлены закономерности распределения как макрокомпонентов (As, Fe, S), так и элементов-примесей (Ni, Zn, Sb, Co, Cu, Ag) в пирите и арсенопирите, в том числе определено содержание “невидимого” Au и его корреляционные связи с другими элементами. На основании полученных данных установлена последовательность кристаллизации и взаимоотношения золотоносных сульфидов для основного и самого продуктивного золото-сульфидного этапа образования месторождения.

Ключевые слова: Чукотка, месторождение Майское, пирит, арсенопирит, “невидимое” золото, РСМА, ЛА-ИСП-МС

DOI: 10.31857/S0016777025020025, **EDN:** TWJPVH

ВВЕДЕНИЕ

Майское месторождение (Чукотка), наряду с такими объектами, как Олимпиада, Ведуга (Красноярский край); Нежданинское, Кючус (Якутия), Албазино (Хабаровский край), является одним из наиболее известных отечественных месторождений, содержащих основную или значительную часть золота в рассеянном виде в сульфидах (так называемое “невидимое” золото) (Волков, Сидоров, 2007). Исследование золотоносных сульфидов для этих объектов актуально как с научной, так и с практической точки зрения. Присутствие невидимого золота в сульфидах придает рудам упорные свойства, поэтому данные по распределению такого золота в отдельных минералах имеют ценность для разработки схем обогащения руд. Изучение распределения микроэлементов в золотоносных

сульфидах, образующих промышленные скопления, может дополнить известную информацию об условиях формирования таких уникальных объектов.

Золотоносные сульфиды вкрапленных руд Майского месторождения, в особенности тонкоигльчатый арсенопирит, привлекали внимание многих исследователей. Одним из первых был А.М. Гаврилов (ЦНИГРИ). В арсенопирите А.М. Гавриловым и А.П. Плешаковым (Гаврилов и др., 1982) с помощью методов растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа выявлено неравномерное, кучное скопление округлых включений золота размером 0.04–0.3 мкм. Было установлено, что тонкодисперсное золото распределено по всему объему зерен арсенопирита. По данным атомно-абсорбционного и нейтронно-активационного

анализов, средние содержания золота для арсениопирита составили 620 г/т, а для пирита — 40 г/т (Новожилов, Гаврилов, 1999).

Кроме того, исследования золотоносных сульфидов месторождения Майское проводились сотрудниками МГУ под руководством М.С. Сахаровой, результаты подробно рассмотрены в монографии (Шило и др., 1992). Геохимические особенности сульфидов изучались лазерным микроспектральным анализом мономинеральных фракций. По данным авторов, максимальная концентрация золота в арсениопирите составляет 500 г/т. В пирите максимальные концентрации золота (до 156 г/т) отмечены в округлых осадочно-диагенетических разновидностях.

Сканирующим электронным микроскопом на поверхности кристаллов тонкокристаллического арсениопирита и, в меньшей степени, пирита обнаружены мелкие частицы округлой и изометричной формы размером до 6 мкм, обладающие повышенной эмиссией вторичных электронов. Поскольку это явление характерно для самородных химических элементов с высоким средним атомным номером (Au, Ag, Pt), а также по сходству с морфологией видимого золота было сделано предположение, что это и есть частицы тонкодисперсного золота (Шило и др., 1992).

В работе (Бортников и др., 2004) приведены результаты рентгеноспектрального и атомно-абсорбционного исследования пирита и арсениопирита кварц-пирит-арсениопиритовой минеральной ассоциации с тонкодисперсным золотом Майского месторождения. По данным РСМА, в удлиненно-призматическом арсениопирите отношение S/As колеблется от 1.054 до 1.482, а содержание золота достигает 1.2 мас. %. В пирите этим методом установлено до 6.5 мас. % As и до 0.4 мас. % Au. Диапазон концентраций золота, полученный атомно-абсорбционным анализом, составляет 182.4–1030 г/т для арсениопирита и 1.44–42.74 г/т для пирита. Авторами отмечено, что в зернах арсениопирита с максимальным содержанием золота при микроскопических исследованиях самородного золота не было обнаружено.

Согласно (Волков и др., 2007), в арсениопирите из образцов вкрапленных руд Майского месторождения микрорентгеноспектральным методом было установлено содержание золота от 0 до 1100 г/т при среднем 320 г/т по 10 зернам. По данным нейтронно-активационного анализа, содержание золота в арсениопирите варьирует

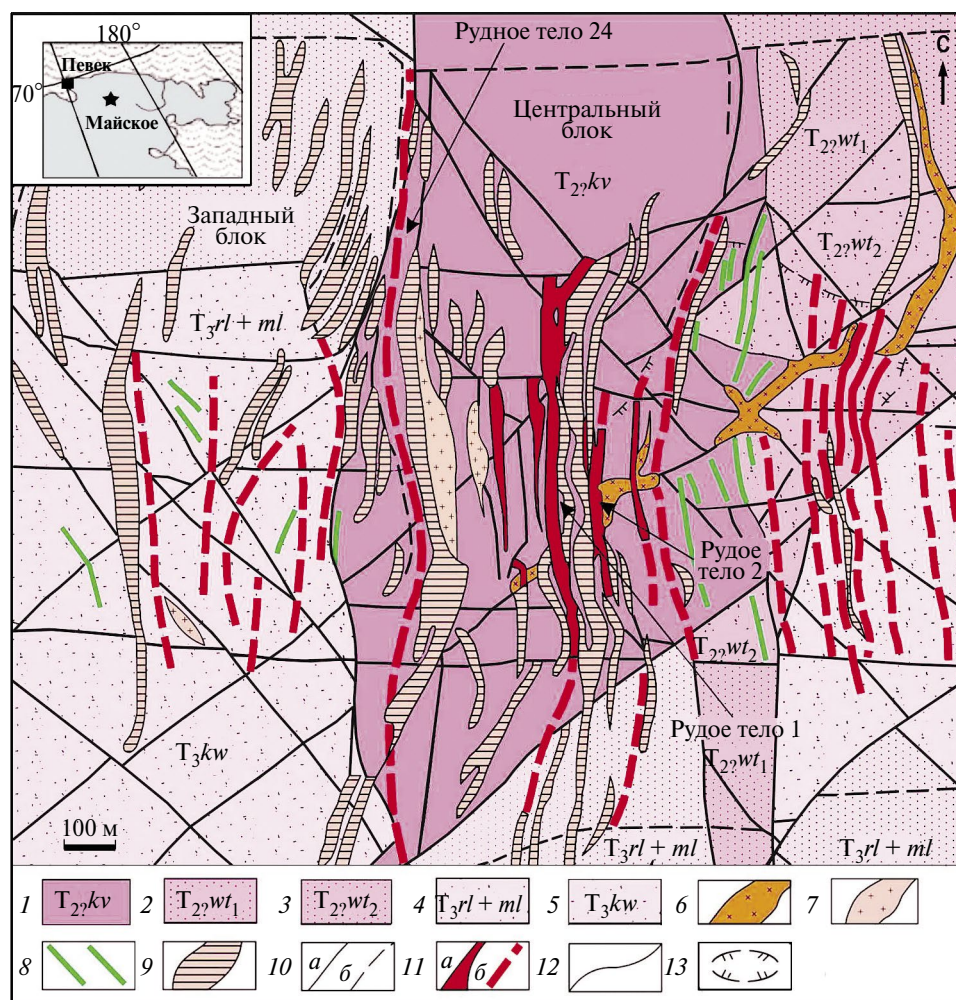
от 300 до 1975 г/т. Также авторами отмечено, что максимальную золотоносность имеют арсениопириты с наиболее высоким серно-мышьяковым отношением. По данным авторов, в пирите вкрапленных руд Майского месторождения содержание золота оказалось ниже предела обнаружения рентгеноспектральным микроанализатором. Однако были установлены высокие содержания мышьяка на периферии метакристаллов пирита.

В данной работе изложены результаты исследования золотоносных сульфидов (пирита и арсениопирита) Майского месторождения рентгеноспектральным методом и масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой и лазерным пробоотбором. Основной целью работы являлось определение типоморфных характеристик распределения микроэлементов в золотоносных сульфидах с “невидимым” золотом.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАЙСКОЕ

Месторождение Майское расположено в 180 км восточнее г. Певек — административного центра Чаунского района Чукотского автономного округа (фиг. 1, врезка). Месторождение открыто в 1972 г. в результате геологической съемки масштаба 1 : 50000 геологами Чаунской ГРЭ ПГО “Севвостгеология” С.А. Григоровым и Н.М. Саморуковым (Григоров и др., 1973). Разведка месторождения осуществлялась до 1982 г. (Новожилов и др., 1983). Майское — одно из пяти крупнейших золоторудных месторождений России по запасам. В 2009 г. оно было приобретено компанией «Полиметалл», с 2010 г. на месторождении работает подземный рудник, а с 2016 г. — карьер. Флотационная фабрика мощностью 850 тыс. тонн в год вступила в строй в 2013 г. Запасы и ресурсы месторождения, по данным компании (www.polymetal.ru), на конец 2021 г. составляют 155 т золота. В 2021 г. рудник произвел 4.3 т золота.

Упорные руды Майского месторождения перерабатываются методом флотации с получением сульфидного золотосодержащего концентрата, который затем транспортируется морем на Амурский металлургический комбинат для извлечения золота методом автоклавного окисления и цианирования или продается на мировом рынке (www.polymetal.ru).



Фиг. 1. Схематическая геологическая карта Майского месторождения по (Новожилов, Гаврилов, 1999; Волков и др., 2006), дополненная. На врезке показано географическое местоположение месторождения.

Средний триас: 1 – алевролиты кевеемской свиты; 2 – разномерные песчаники ватапваамской свиты, нижней подсвиты; 3 – разномерные песчаники ватапваамской свиты, верхней подсвиты. Верхний триас: 4 – переслаивающиеся песчаники и алевролиты рельеувеемской и мелювеемской свит; 5 – переслаивающиеся песчаники и алевролиты кувеемской свиты; 6–9 – магматические породы ранне-позднемеровые: 6 – гранодиориты и гранит-порфиры; 7 – аплиты; 8 – лампрофиры; 9 – риолит-порфиры; 10 – разломы установленные (а) и предполагаемые (б); 11 – рудные тела, выходящие на поверхность (а), слепые (б); 12 – геологические границы; 13 – контур серицитовых метасоматитов (березитов).

Геологическое строение

Майское рудное поле находится в границах Кукенейской сателлитной интрузивно-купольной структуры (ИКС), расположенной в центральной части Чукотской складчатой системы мезозой в пограничной зоне с Охотско-Чукотским вулканическим поясом (Волков и др., 2006). Рудное поле сложено дислоцированными песчано-сланцевыми породами среднего и верхнего триаса, прорванными многочисленными дайками и субвулканическими телами кислого состава и единичными дайками лампрофиров мелового возраста.

Месторождение Майское приурочено к дочернему купольному поднятию в пределах ИКС. Структура месторождения определяется горст-антиклинальной складкой (эродированным куполом) северо-восточного простирания с южным погружением шарнира под углом 15°–20°, осложненной блоковыми подвижками по широтным и субмеридиональным разломам, обусловившим возникновение линейных зон динамометаморфизма, вмещающих рудные тела.

Около 30% объема месторождения занимают дайки, которые представлены полем 3 × 3 км сближенных субпараллельных тел общего

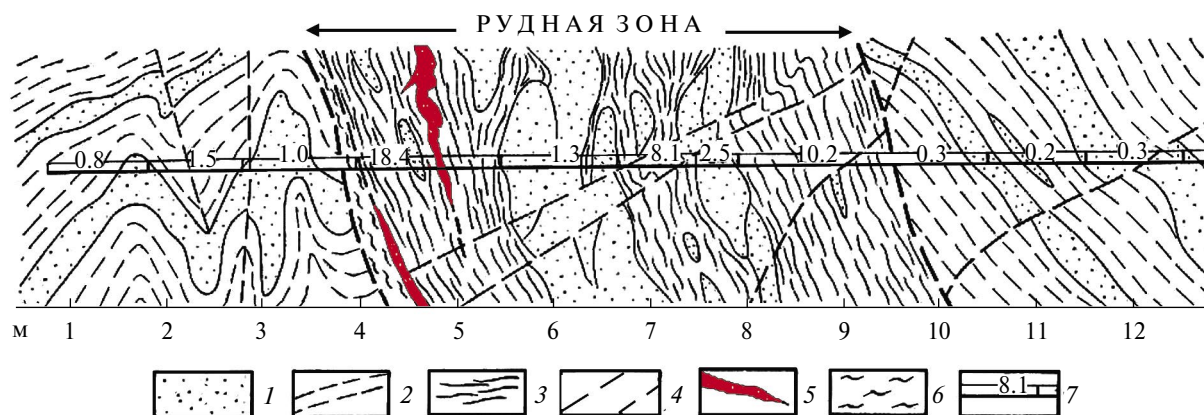
меридионального простирания. Выделяются две генерации даек, последовательно сменявших друг друга: 1) гранит-гранодиорит-порфиры, аплиты и лампрофиры; 2) субвулканические риолит-порфиры. Мощность даек варьирует от первых метров до 50–60 м, падение их в основном юго-восточное, под углами 50–70°. Основную массу магматических пород месторождения составляют поздние дайки риолит-порфиров. Время внедрения дайковых тел, по данным определений изотопного возраста (К-Аг метод, лаборатория изотопной геохронологии СВКНИИ ДВО РАН (Волков и др., 2006)), относится к рубежу раннего и позднего мела. На месторождении поле даек сопровождается широким развитием эксплозивных брекчий, распространенных преимущественно в центральной его части. Брекчии залегают в виде сближенных ветвящихся тел жилообразной формы и распространяются на глубину более 700 м от поверхности. Общее их простирание также субмеридиональное, преобладающее падение восточное, под углом 60–75°. Брекчии состоят из обломков всех типов осадочных пород разреза, сцементированных в различной степени измельченными и плотно соприкасающимися частицами тех же пород, которые встречаются в обломках.

В центральной части месторождения распространены осветленные метасоматические породы кварц-серицитового состава (редко с карбонатом), отнесенные к березитам (Новожилов, Гаврилов, 1999; Артемьев, 2016), с которыми парагенетически связано редкометальное

оруденение. Переход к неизмененным породам постепенный на расстоянии 30–50 м. Контур метасоматитов имеет форму овала, вытянутого в северо-восточном направлении и расширяющегося книзу. По данным (Волков и др., 2006), золоторудные тела находятся вне поля метасоматитов данного типа.

В пределах месторождения установлено более 30 рудных тел, 70% которых не выходят на поверхность. Длина рудных тел по простиранию от 200 до 1200 м. По падению большинство из них не оконтурено. Средняя мощность тел – 2 м, среднее содержание золота – 11.5 г/т. Рудные тела имеют четкие геологические границы и представлены минерализованными зонами дробления пород, местами подвергшихся сульфидизации, прожилковому окварцеванию и в меньшей степени серицитизации и каолинизации. Контуров рудных тел определяют как геологическими границами, выделяющими зоны наиболее динамометаморфически переработанных сульфидизированных пород (фиг. 2), так и по данным опробования (Новожилов и др., 1988).

Рудовмещающими породами служат алевролиты, глинистые сланцы и мелкозернистые песчаники кевеевской, релькувеевской-мелювеевской, реже – ватапваамской свит, редко дайки риолит-порфиров, импрегнированные тонкокристаллической вкрапленностью золотоносных сульфидов (пирита и арсенопирита).



Фиг. 2. Строение рудной зоны (рудное тело 1) Майского месторождения (Новожилов и др., 1988). 1 – мелкозернистые песчаники; 2 – переслаивающиеся алевролиты и алевро-глинистые сланцы; 3 – интенсивно кливажированные алевролиты с вкрапленной рудной минерализацией; 4 – разрывные нарушения; 5 – кварц-антимонитовые жилы; 6 – зоны милонитизации с зеркалами скольжения; 7 – бороздовые пробы и результаты их пробирного анализа на золото (г/т).

Минеральный состав руд

Минералогия руд месторождения Майское подробно рассмотрена в ряде работ (Андреев, 1984; Шило и др., 1992; Новожилов, Гаврилов, 1999; Бортников и др., 2004:).

Было установлено (Гаврилов и др., 1982; Гаврилов и др., 1986), что золото на месторождении встречается как в свободной форме, так и в “невидимой” в сульфидах. Основная масса золота в рудах (до 90%) заключена в сульфидах, преимущественно в арсенопирите.

Первичные руды представлены вкрапленностью мельчайших (десятые-сотые-тысячные доли миллиметра) кристаллов и сростков золотоносного арсенопирита и пирита в темноокрашенных, нередко слабо окварцованных осадочных породах (фиг. 3). Встречаются также микропрожилки кварца, содержащие золотоносные сульфиды.

Содержание сульфидов во вкрапленных рудах составляет в среднем 6–8 об. %, при заметном (в 2–3 раза) преобладании пирита. Содержание в руде сурьмы достигает 0.2 мас. %, органического углеродистого вещества в среднем 0.3 мас. %, мышьяка 1.5 мас. %, серебра 4 г/т. Пирит содержит до 5–7 мас. % мышьяка.

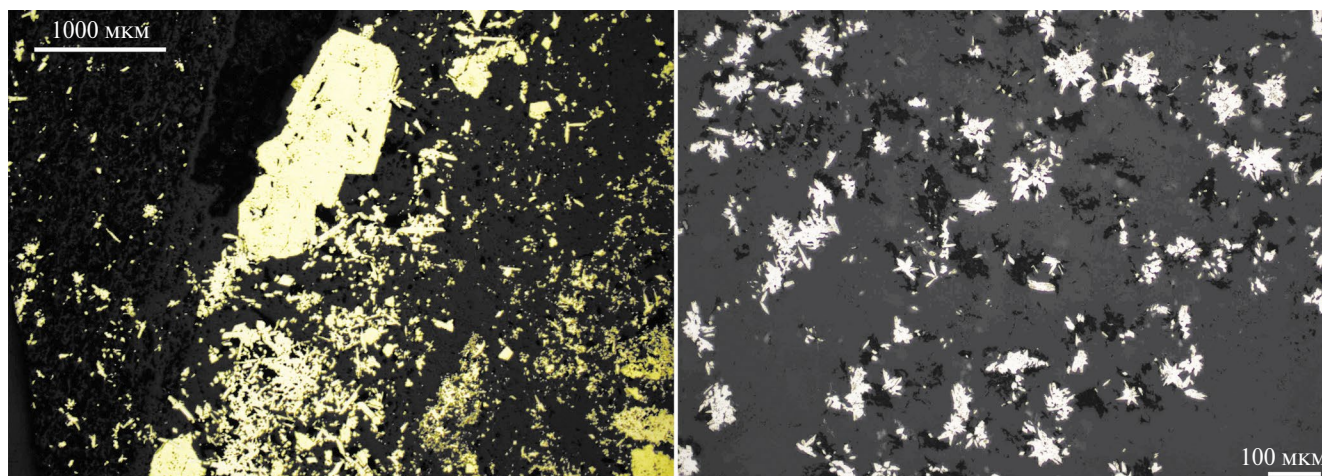
В пределах некоторых рудных тел наблюдаются также кварц-сульфидно-полиметаллические и кварц-антимонитовые жилы, прожилки и гнезда, нередко с мелкой вкрапленностью самородного золота, содержание которого более 20 г/т, а содержание серебра местами достигает 700 г/т. Золото в этих рудах крупное > 1 мм, пробность – 850–950‰.

Верхняя часть рудных тел месторождения, выходящих на поверхность, окислена до глубины 80 м. Среднее содержание золота в окисленных рудах – 22 г/т. Размеры выделений золота в окисленных рудах – 0.01–0.1 мм, пробность – 950‰. (Новожилов, Гаврилов, 1999; Волков и др., 2006).

По данным исследований Андреева Б.С. (Андреев, 1984), на стадии разведки месторождения установлено в самом общем виде зональное распределение ассоциаций двух минеральных комплексов: редкометалльно-полиметаллического (Mo-W-Sn-Zn-Pb) и сурьмяного с преимущественным смещением редкометалльного к восточному флангу проявления, а сурьмяного – к западному.

В результате минералогических исследований сотрудников ЦНИГРИ (Новожилов, Гаврилов, 1999) была предложена следующая схема развития рудного процесса на месторождении Майское: 1) формирование штокверкового пирротин-молибденит-кварцевого редкометалльного оруденения, связанного с плутоногенной группой даек в центральной части месторождения; 2) образование золото-сульфидных (золото-пирит-арсенопиритовых) вкрапленных руд в минерализованных зонах дробления; 3) развитие сереброносной кварц-полисульфидной жильной минерализации; 4) формирование кварц-антимонитовых жил и самородно-мышьяковой минерализации.

Согласно исследованиям сотрудников кафедры минералогии МГУ (Бортников и др., 2004), предполагается, что Майское месторождение сформировалось в три следующих этапа: 1) золото-сульфидный с вкрапленной



Фиг. 3. Богатая вкрапленная пирит-арсенопиритовая руда Майского месторождения, рудное тело 1. Фото в отраженном свете поляризационного микроскопа.

пирит-арсенопиритовой ассоциацией с “невидимым” золотом; 2) редкометальный, с кварц-молибденитовой кварц-вольфрамитовой ассоциацией и сульфидами (галенит, сфалерит, сульфосоли Pb и Cu); 3) золото-антимонитовый с кварц-антимонитовой ассоциацией с блеклой рудой, халькостибитом, халькопиритом.

Петрография и минералогия рудоносных метасоматитов охарактеризована в (Артемьев, 2016). Технологические свойства упорных золото-сульфидных руд приведены в работе (Толканов и др., 2019).

Совмещение различных минеральных и структурных типов оруденения в пределах Майского месторождения обуславливает морфологическое разнообразие руд и существенно затрудняет их генетическую интерпретацию

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения были взяты образцы из коллекции Б.С. Андреева (СВКНИИ ДВО РАН) (Андреев, 1984), отобранные из рудного тела 1, они представлены окварцованными алевритами с вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализацией.

Химический состав исследуемых сульфидов был определен с помощью рентгеноспектрального микроанализатора JXA-8200 (JEOL) (метод РСМА) в ИГЕМ РАН (аналитик — Ковальчук Е.В.). Помимо макрокомпонентов (As, Fe, S) и основных элементов-примесей (Ni, Zn, Sb, Co, Cu, Ag) в пирите и арсенопирите было измерено содержание Au (предел обнаружения (3 σ) 45 ppm) по методике, подробно описанной в (Ковальчук и др., 2019).

Элементы-примеси в сульфидах изучались методом ЛА-ИСП-МС на квадрупольных масс-спектрометрах Agilent 7700х в ИМинУрО РАН (аналитик — Д.А. Артемьев) и ThermoXSeries 2 в лаборатории ИГЕМ РАН (аналитик — Минервина Е.А.), оснащенных лазерной абляционной системой NewWaveResearch UP-213. Настройки плотности потока составляют 1.8–5.5 Дж/см² для пирита и 3.0–4.5 Дж/см² для арсенопирита. Каждый анализ проводился точечно или линией с размером лазерного пятна 30–55 мкм. С помощью лазерного пробоотбора было проанализировано 15 точечных и 13 профильных проб пирита и 12 точечных и 11 профильных проб арсенопирита. Внешний калибровочный стандарт USGS MASS-1 и UQAC FeS-1.

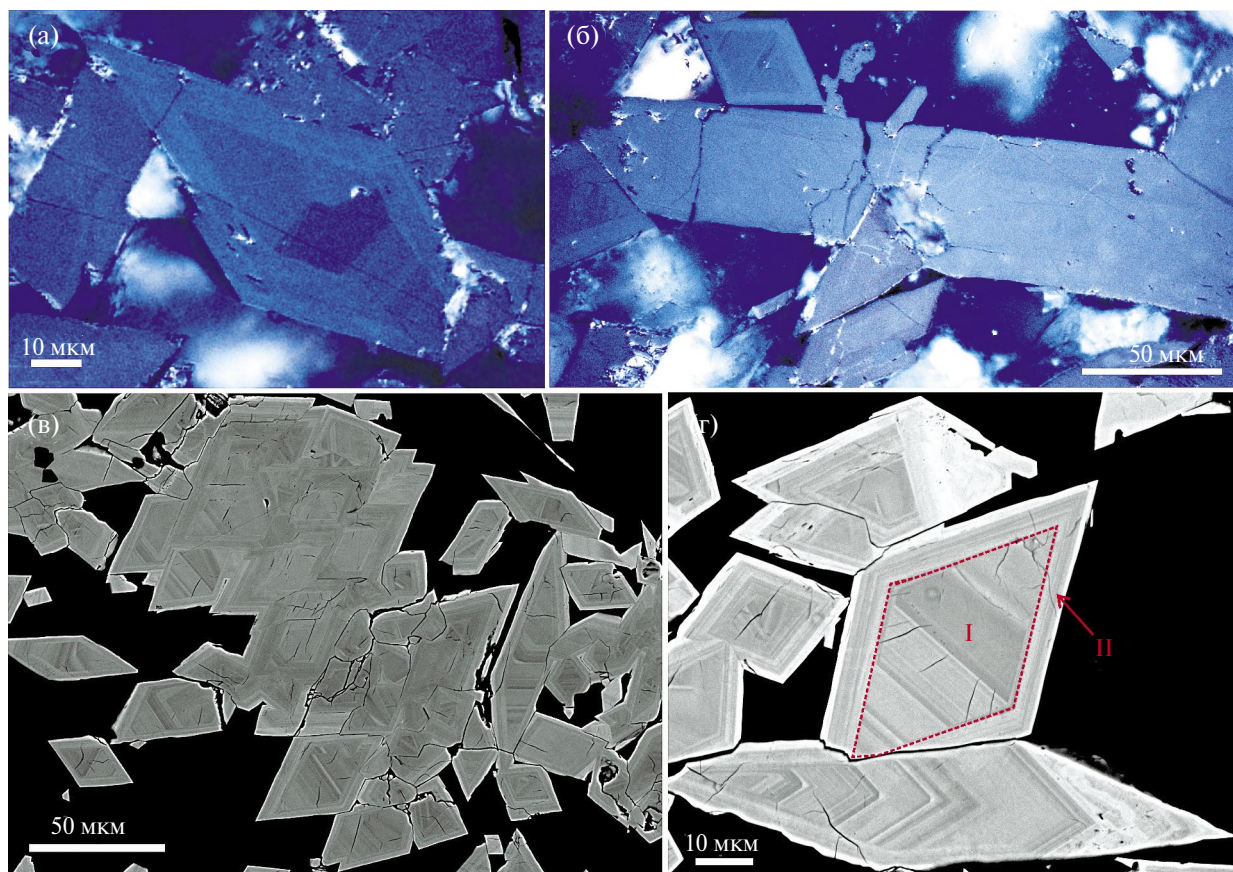
Внутренний стандарт (IS) для пирита и арсенопирита — ⁵⁷Fe. Для количественного расчета использовалось содержание железа, полученное методом РСМА.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АРСЕНОПИРИТА

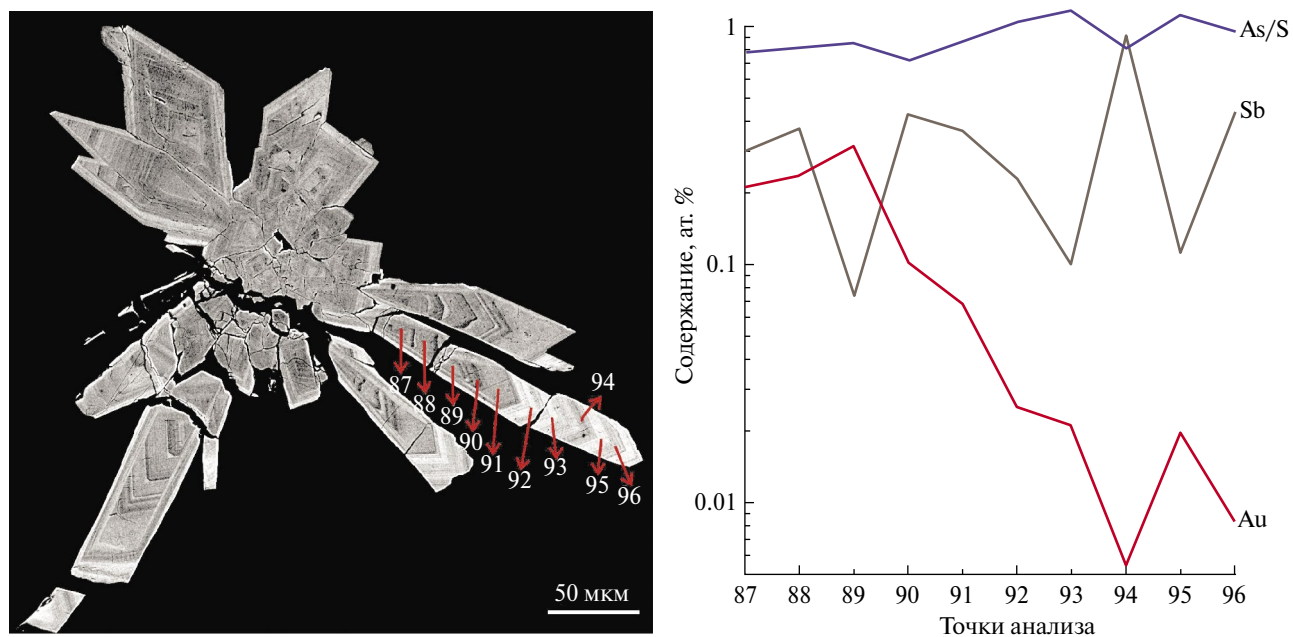
Арсенопирит представлен идиоморфными и гипидиоморфными кристаллами удлиненно-призматического габитуса длиной ~150 мкм (коэффициент удлинения до 1 : 10), образующими характерные звездчатые агрегаты (фиг. 3).

Арсенопирит имеет, как правило, сложное зональное строение, видимое при скрещенных николях поляризованного микроскопа (фиг. 4а, б). Помимо тонкой осцилляторной зональности, в кристаллах арсенопирита наблюдается изменение кристаллографической ориентировки роста, из-за чего четко прослеживаются центральная (I) и внешняя (II) зоны (фиг. 4в, г). Сканирование поверхности поперечных ромбовидных срезов кристаллов арсенопирита в обратно-рассеянных электронах подтвердило этот рисунок зональности (фиг. 4–6), вызванный вариацией количества As и S. Соотношение As/S в центральной, более темной (в обратно-рассеянных электронах) зоне-I составляет 0.7–0.8. К краям кристаллов, в более светлой зоне-II, соотношение As/S скачкообразно увеличивается до 1.17. Количество Fe в зоне-I варьирует (ат. %) от 34.8 до 35.2, в светлой внешней зоне-II — от 34.07 до 35.4. По данным РСМА, в единичных аналитических точках арсенопирит содержит Co (0.07–0.08 мас. %), Ni (0.07–0.08 мас. %) и Cu (0.09–0.15 мас. %). Повсеместной примесью является сурьма (0.06–2.06 мас. %), при этом ее распределение имеет осцилляторный характер с тенденцией увеличения содержания от центра к краю кристаллов (фиг. 5).

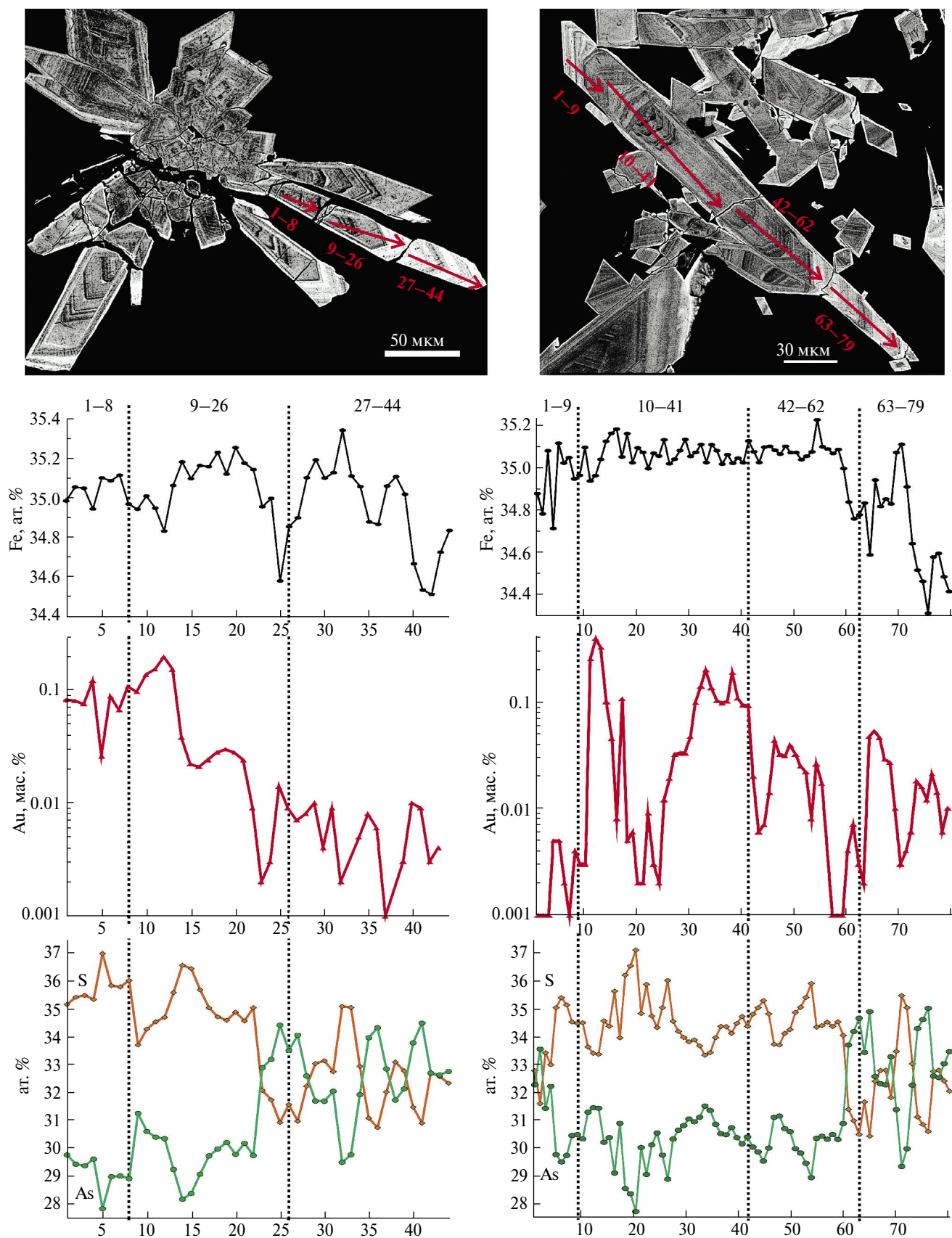
По данным РСМА, золото в арсенопирите установлено выше предела обнаружения в 75% всех аналитических точек и достигает 0.47 мас. %. При профильном зондировании продольных срезов индивидуальных кристаллов по основным макрокомпонентам и золоту было выявлено, что последним обогащены более темные (в обратно-рассеянных электронах), то есть более сернистые, центральные части кристаллов. К краям, в более светлых (в BSE), соответственно более мышьяковистых, зонах содержание золота уменьшается на порядок (фиг. 5, 6). При этом распределение Au крайне неравномерно даже в пределах центральных зон кристаллов и, как видно из графиков



Фиг. 4. Зональный арсенопирит месторождения Майское: (а), (б) — фото при скрещенных николях поляризационного микроскопа в отраженном свете; (в), (г) — изображение в обратно-рассеянных электронах, красным цветом обозначены центральная зона-I и внешняя зона-II.

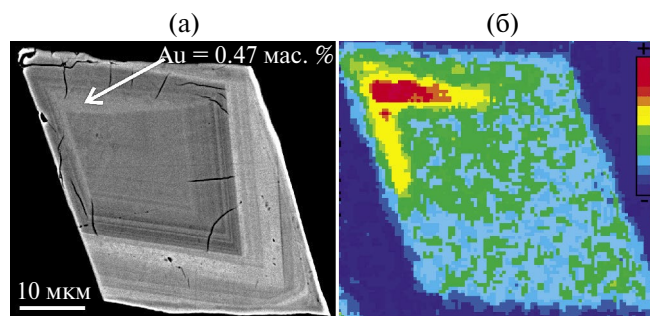


Фиг. 5. Распределение золота, сурьмы, мышьяка и серы (соотношение As/S) в кристалле арсенопирита (BSE-изображение), по данным PCMA. Цифры на фото соответствуют точкам анализа на графике.



Фиг. 6. Профили зондирования в кристаллах арсенопирита с графиками распределения Fe, S, As (ат. %) и Au (мас. %). Цифрами отмечены номера анализов, указанные на профиле.

на фиг. 6, максимальные содержания золота приурочены к определенным участкам в зоне-I. На карте распределения золота (фиг. 7) по площади поперечного среза кристалла арсенопирита также видно, что максимальные содержания Au сконцентрированы в более светлых (=более мышьяковистых) тонких участках в пределах центральной зоны-I.



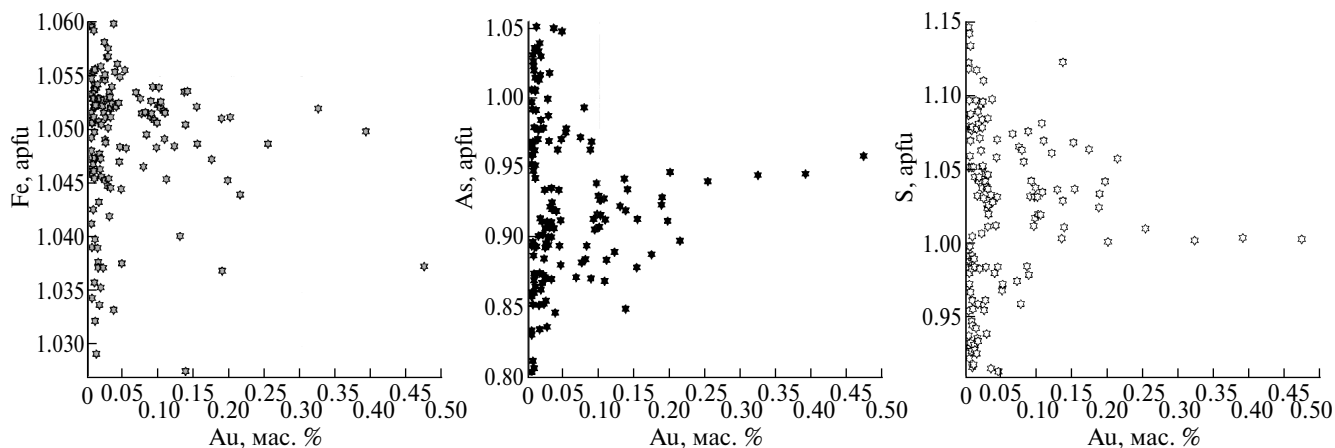
Фиг. 7. Зональный метакристалл арсенопирита. а — изображение в обратно-рассеянных электронах, б — карта распределения Au, полученная при условии съемки РСМА: Au (Mα, РЕТН), ток 20 нА, время в точке 100 мс.

По всей выборке полученных данных не отмечено значимой корреляции золота с макрокомпонентами (фиг. 8), хотя при содержании золота > 0.1 мас. % коэффициент корреляции для пары Au-As составляет 0.5 (при $n=24$). Максимальным содержаниям золота (от 0.25 до 0.47 мас. %) соответствуют значения As/S, равные 0.93–0.96. Содержаниям Au от 0.1 до 0.21 мас. % отвечает диапазон значений As/S = 0.8–0.95. Содержаниям Au от 0.0045

до 0.1 мас. % соответствует диапазон значений As/S = 0.7–0.92. В профилях зондирования индивидуальных кристаллов прослеживается обратная корреляция золота и сурьмы (фиг. 5).

В поперечных срезах кристаллов арсенопирита отчетливо видны трещины, не выходящие за пределы темной зоны. Это позволяет предположить, что внешние мышьяковистые зоны нарастали на ранние более сернистые с некоторым перерывом. В подтверждение этому на фиг. 4г заметны неровные пористые светлые участки, разделяющие внешние и внутренние зоны, что может указывать на растворение кристалла при перерыве или изменении условий кристаллизации.

Методом ЛА-ИСП-МС было выполнено 35 анализов арсенопирита. Содержания наиболее распространенных элементов-примесей (Co, Ni, Cu, Ag, Sb, Au, Tl, Pb, Bi), встречающихся в 70–90% проб, указаны в таблице 1. В 20–40% проб обнаружены следующие элементы (максимальное значение, в г/т): Zn (40); Se (39); Sn (12); W (9); Hg (30). Хотя аналитический пучок лазера не улавливает тонких зон, тем не менее по результатам лазерного профилирования были выявлены некоторые закономерности распределения микроэлементов. Центральные, более сернистые зоны арсенопирита содержат повышенные концентрации золота и свинца. Содержания Co и Ni здесь ниже предела обнаружения. Также в центральных темных (BSE) частях зерен обычно наблюдается пониженное содержание Cu (50–60 г/т). Во внешних мышьяковистых зонах концентрируются Co, Ni, растет содержание сурьмы. Медь и висмут имеют относительно равномерное распределение, однако повышенные концентрации также приурочены к краям



Фиг. 8. Диаграммы содержаний макрокомпонентов (в формульных единицах) и золота (в мас. %) в арсенопирите, по данным РСМА.

Таблица 1. Содержание элементов-примесей в арсенопирите и пирите месторождения Майское по данным ЛА-ИСП-МС.

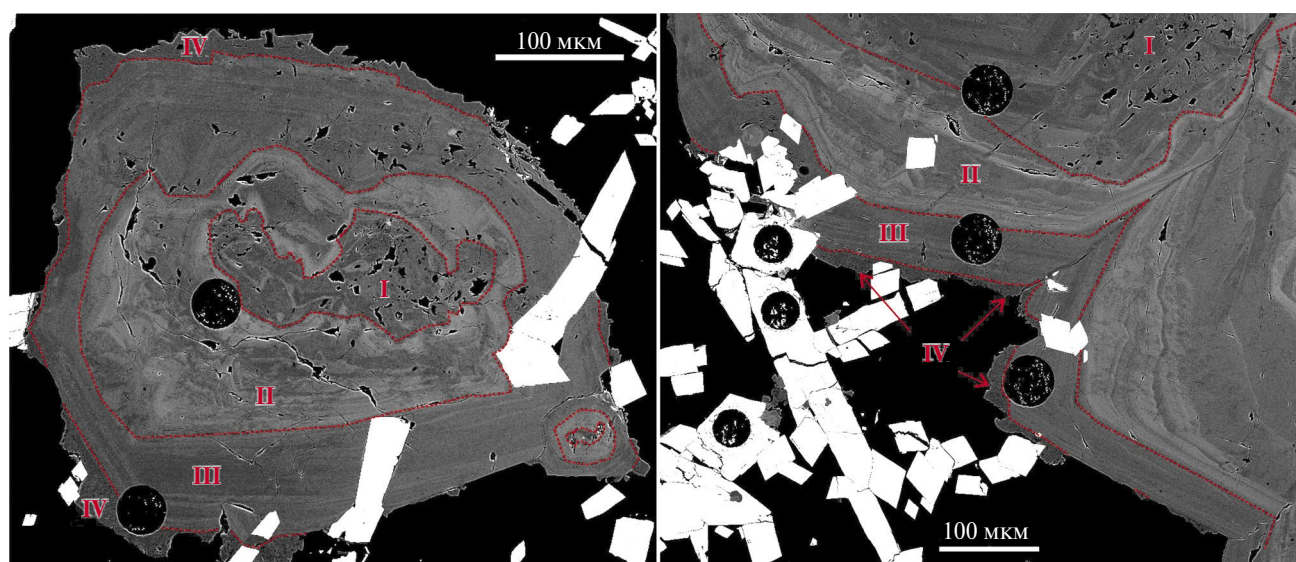
Минерал	C, г/т	Co	Ni	Cu	Ag	Sb	Au	Tl	Pb	Bi
Арсенопирит (<i>n</i> = 35)	мин.	0.4	8.6	50	0.7	978	52	0.01	2.3	1.7
	макс.	70	370	892	117	10 702	922	42	270	32.3
	ср. геом.	11	84	202	3.7	4 409	340	1.7	37	8.0
	ч. встр., %	79	85	97	74	100	100	91	100	91
Пирит (<i>n</i> = 46)	мин.	0.3	4	47	0.1	1	0.3	0.01	0.7	0.2
	макс.	83	307	693	6.1	321	55	13	716	18
	ср. геом.	10.5	46	169	1	40	8	0.2	25	1.5
	ч. встр., %	100	98	100	78	100	100	80	100	70

Примечание. Содержания элементов указаны в г/т; ср. геом. — среднее геометрическое, определяется как корень *n*-й степени из произведения *n* чисел; ч. встр. — частота встречаемости компонента.

зерен. При прохождении профиля через трещины и пористые зоны в арсенопирите, или при захвате вмещающей арсенопирит среды, группа элементов Tl-Co-Ni-Pb-Cu±Bi±Ag±W образуют в спектрах абляции совместные всплески сигналов. Значимая положительная корреляция в арсенопирите установлена для пар Ni-Co ($r = 0.95$); Co-Bi ($r = 0.71$); Ni-Bi ($r = 0.77$); Cu-Ag ($r = 0.84$); Cu-Tl ($r = 0.7$); Ag-Tl ($r = 0.76$) при $n = 35$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПИРИТА

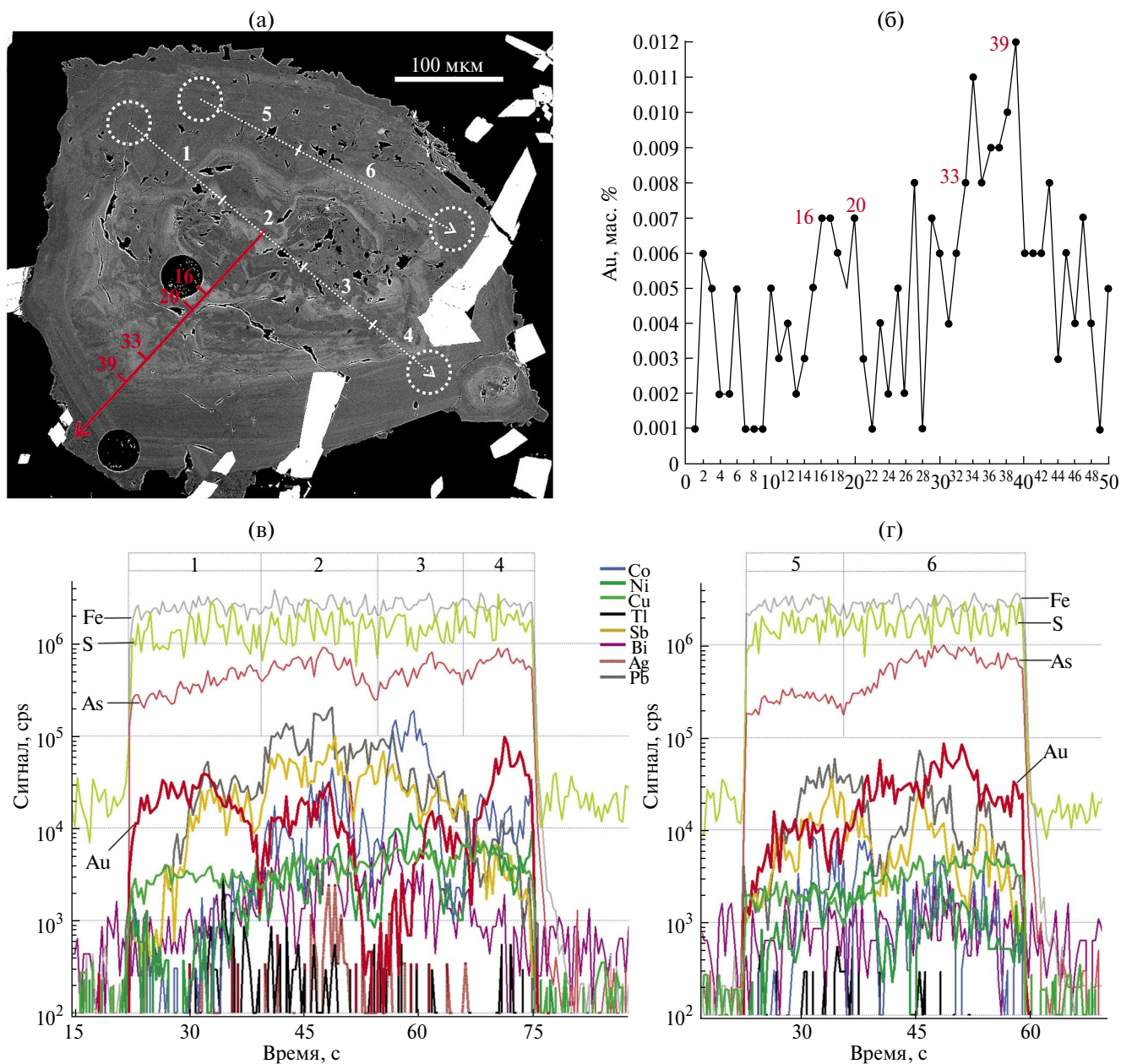
Ксеноморфные агрегаты пирита имеют зональное строение с пористыми центральными и ровными внешними зонами с кристаллографическими очертаниями. В обратно-рассеянных электронах выявлен неоднородный состав зерен пирита с варьирующим содержанием мышьяка. По составу и текстурным особенностям в пирите выделено 4 зоны (фиг. 9): I — центральная



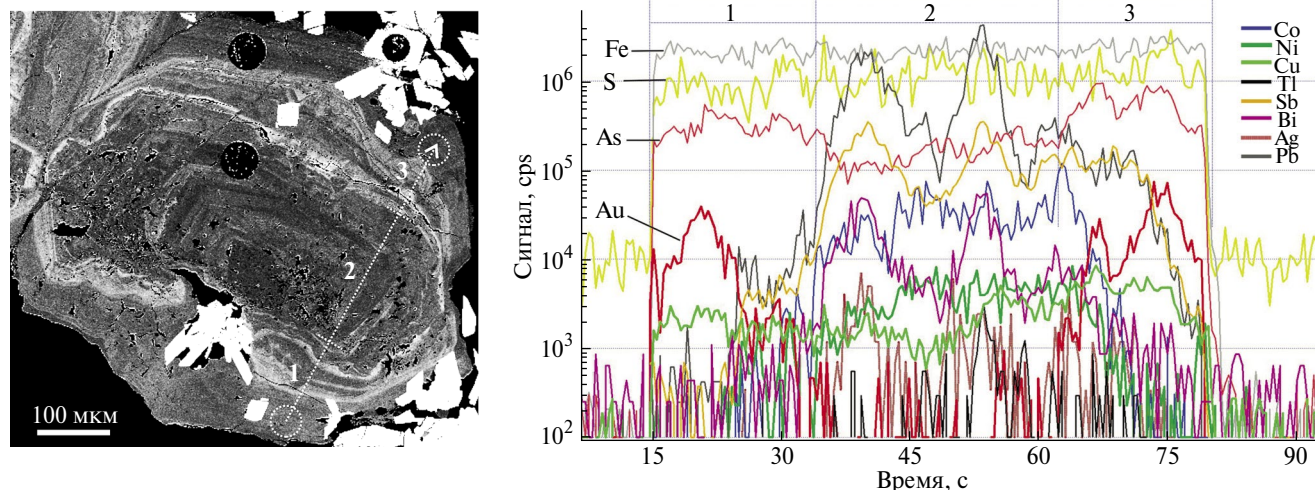
Фиг. 9. BSE-изображение метакристаллов пирита (темное) в сростании с арсенопиритом (светлое); пунктирными линиями разграничены зоны в пирите, обозначенные римскими цифрами (см. текст).

пористая зона, содержание мышьяка не превышает 0.5 мас. %; II — нарастающие на пористые зоны тонкие ореолы, мощностью 2–30 мкм, обогащенные As (до 5.3 мас. %); III — тонкозональная внешняя зона с кристаллографическими очертаниями и содержанием мышьяка до 1.8 мас. %; IV — внешняя пористая зона невыдержанной мощности (0–20 мкм), содержит менее 0.06 мас. % As. Из примесей в пирите (по данным РСМА) обнаружены: Cu до 0.11 мас. % — в единичных

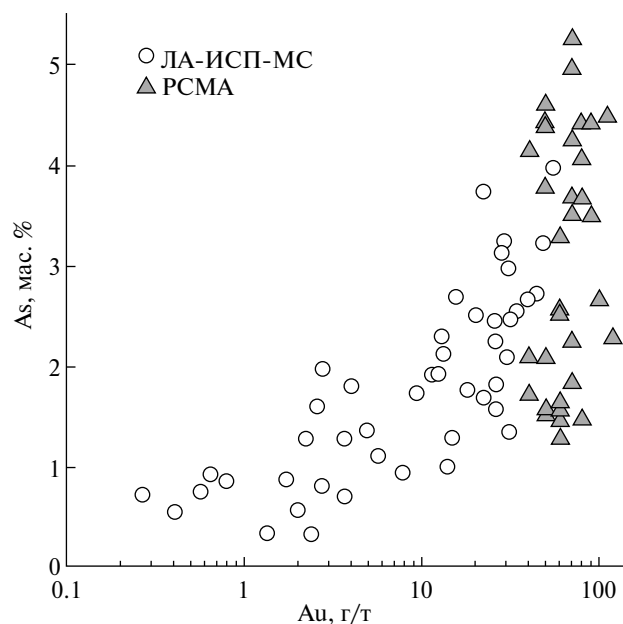
точках; Co до 0.08 мас. % — в 30% анализах; содержание золота превышает предел обнаружения (0.0045 мас. %) в половине аналитических точек и достигает 0.012 мас. %. На фиг. 10 показано изменение содержания золота по профилю электронного зондирования зерна пирита. Максимальные концентрации Au приурочены к светлым зонам с повышенным содержанием As. Однако значимой корреляционной зависимости As и Au по всей выборке не установлено.



Фиг. 10. (а) BSE-изображение метакристалла пирита (темное) в сростании с арсенопиритом (светлое); красной стрелкой обозначен профиль электронного зондирования с шагом 5 мкм, изображенный на рисунке (б); белые пунктирные стрелки — положение профилей лазерной абляции с интервалами (1–6), изображенными на рисунках (в) и (г).



Фиг. 11. Слева – BSE-изображение метакристалла пирита (темное) в сростании с арсенопиритом (светлое); белая пунктирная стрелка – положение профиля лазерной абляции с интервалами (1–3), изображенного справа.



Фиг. 12. Диаграмма содержаний Au (в г/т) и As (в мас. %) в пирите месторождения Майское, по данным PCMA и ЛА-ИСП-МС.

Методом ЛА-ИСП-МС выполнено 46 анализов пирита, диапазон концентраций и средние значения основных наиболее распространенных элементов-примесей (Co, Ni, Cu, Ag, Sb, Au, Tl, Pb, Bi) указаны в таблице 1. В 20–50% проб обнаружены следующие элементы (макс, в г/т): Zn (13); Se (15); Sn (4); W (23); Hg (6). В единичных пробах обнаружены Ga, Ge, In, Te в незначительных концентрациях. По результатам

ЛА-ИСП-МС в центральных, пористых частях пиритовых агрегатов установлены повышенные содержания (в г/т): Pb (17–716 при ср. геом. 117); Sb (45–320 при ср. геом. 121); Bi (0.4–18 при ср. геом. 3.2); Tl (до 0.8); Ag (0.4–6 при ср. геом. 2); Zn (до 13); частично – Co (10–83 при ср. геом. 30) и Ni (21–237 при ср. геом. 75); (фиг. 10, 11). Здесь же встречаются V, Zn, Ga, Ge, Te, W. Отмечено пониженное содержание As и Au (0.3–4 г/т) (фиг. 11). К краям зерен увеличивается концентрация Au, в среднем до 30 г/т. Содержание Co, Ni, Ag, Tl, Bi к краям снижается вплоть до предела обнаружения. До минимальных значений снижается содержание Pb (0.7 г/т) и Sb (1.13 г/т). Судя по высоким коэффициентам корреляции в группе Pb–Bi–Sb ($r = 0.9$), Ag–Bi и Ag–Pb ($r = 0.7$), при $n = 46$, можно предположить, что эти элементы входят в состав пирита в виде микровключений галенита или висмутовых и сурьмяных сульфосолей. Значимая корреляция отмечена для пар Co–Ni ($r = 0.7$) и Au–As ($r = 0.8$) (фиг. 12). Медь – единственный примесный микроэлемент, распределение которого в спектрах абляции пирита можно считать относительно равномерным.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Золотоносный арсенопирит вкрапленных руд Майского месторождения, как правило, имеет зональное строение с более сернистой (As/S = 0.7–0.8) центральной зоной-I и более мышьяковистой (As/S до 1.17) внешней зоной-II (фиг. 4). При этом его состав меняется

скачкообразно и наблюдается смена кристаллографической ориентировки роста кристаллов. Подобный сложный рисунок зональности описан для золотоносного арсенопирита на месторождении Виллеранджес (Benzazaoua et al., 2007). Однако здесь высоко-золотоносными являются более мышьяковистые внешние зоны. В арсенопирите Майского месторождения максимальные содержания золота (до 0.47 мас. %) сконцентрированы в тонких (5–10 мкм) более мышьяковистых участках в пределах центральной зоны-I (фиг. 6, 7). В более мышьяковистых внешних зонах концентрация золота на порядок ниже (фиг. 5, 6).

Для арсенопирита вкрапленных руд месторождения Майское установлена тенденция обратной корреляции Au–Fe и Au–Sb и прямой – Au–As.

Корреляционная связь золота с макрокомпонентами обсуждается как для природных, так и для синтетических кристаллов арсенопирита (Fleet and Mumin; 1997; Genkin et al., 1998; Cabri et al., 2000; Викентьев, 2015; Ковальчук и др. 2019). Так, прямая зависимость содержаний Au–As и обратная – Au–Fe в арсенопирите отмечена для ряда месторождений, например, Воронцовского, (Ковальчук и др., 2019; Vikentyev et al., 2019; Tyukova et al., 2022), Виллеранджес и Ле Шателе (Франция) (Marcoux et al., 1989; Cathelineau et al., 1989) и др. Об антагонистическом распределении сурьмы и золота в золотоносном арсенопирите указано для многих месторождений (Marcoux et al., 1989; Genkin et al., 1998; Генкин, 1998; Ashley et al., 2000; Li et al., 2019; Сидорова и др., 2022 и др.).

Пирит вкрапленных золото-сульфидных руд Майского месторождения также имеет зональное строение, в котором четко прослеживаются четыре зоны (фиг. 9, 10, 11): 1) центральная пористая, с пониженным содержанием мышьяка и золота и повышенным – Pb–Sb–Co–Ni–Bi–Tl–Ag; 2) тонкие, обогащенные мышьяком (до 5.3 мас. %) и золотом (до 0.012 мас. %) ореолы; 3) внешняя тонкозональная, обедненная другими элементами и содержащая мышьяк до 1.8 мас. % и золото до 30 г/т с понижением концентрации к краю зёрен до 6 г/т; 4) внешняя пористая зона, мощностью до 20 мкм, содержит менее 0.06 мас. % As.

Классический случай концентрирования “невидимого” золота в тонких мышьяковистых каймах в пирите известен также для месторождений карлинского типа. Здесь на ранний дорудный пирит нарастает обогащенный элементами-примесями, в том числе мышьяком и золотом,

рудный пирит (Palenik et al., 2004; Muntean et al., 2011; Large et al., 2009; Gopon et al., 2019; Large, Maslennikov, 2020; Liang et al., 2021). Золотоносный пирит Майского месторождения отличается от “карлинского” пирита тем, что внешние, обогащенные золотом и мышьяком зоны обеднены другими элементами.

Взаимоотношения сосуществующих золотоносных сульфидов на Майском и других месторождениях с “невидимым” золотом

Согласно экспериментальным данным (Кларк, 1966), парагенезис пирит-арсенопирит устойчив в интервале температур примерно 200–491°C. На примере ряда месторождений Северо-Востока России установлено, что ассоциации с арсенопиритом образуются не ниже 250 ± 50 °C (Тюкова, Ворошин, 2007). Опираясь на полученные нами данные, можно предположить, что зона-I в пирите сформировалась до поступления богатых As и Au растворов в рудообразующую систему, а тонкие зоны-II высокозолотоносного мышьяковистого пирита Майского месторождения росли в условиях быстрой кристаллизации при повышении температуры и увеличении концентрации As и Au. Арсенопирит начал кристаллизоваться в конце роста второй и далее формировался одновременно с третьей зонами пирита. Внешние пористые зоны-IV пирита значительно обеднены Au и As, и вероятно, образовалось при пострудных процессах.

При достижении определенной температуры начинает расти сернистый арсенопирит с наиболее высокими концентрациями золота, при этом содержание золота в зоне-III пирита падает. Как установлено для многих месторождений и подтверждено эмпирически (Mumin et al., 1994; Fleet and Mumin, 1997; Morey et al., 2008; Sung et al., 2009; Cook et al., 2013), при равновесной кристаллизации сосуществующих пирита и арсенопирита повышенные концентрации золота будут свойственны арсенопириту. Далее прослеживается резкая смена условий кристаллизации, о чем свидетельствуют размытые зоны роста в пирите (фиг. 9–11) и арсенопирите (фиг. 4г), а также смена состава и ориентировки роста в арсенопирите и трещины в центральных сернистых зонах (фиг. 7). Некоторое обогащение мышьяком внешних зон арсенопирита и, напротив, обеднение им внешних зон и частичное растворение пирита может быть обусловлено повышением щелочности растворов (Колонин и др., 1988).

Для месторождений Олимпиада и Кючус аналогичного золото-сульфидно-сурьмяного промышленного типа с “невидимым” золотом в сульфидах ранее были получены следующие данные по составу и распределению микроэлементов. По данным (Генкин и др., 1994; Genkin et al., 1998), в арсенопирите месторождения Олимпиада наиболее высокие содержания золота соответствуют участкам с обедненным As и Sb составом. Анализ методом мессбауэровской спектроскопии выявил как химически связанную, так и металлическую форму золота в арсенопирите. По последним данным (Sazonov et al., 2019; Сильянов, 2020; Сильянов и др., 2021), для арсенопирита месторождения Олимпиада установлена прямая корреляция между золотом и железом и обратная тенденция для Au–Sb и S/As–Sb. В пирите месторождения Олимпиада указаны низкие концентрации As и Au.

Для зонального арсенопирита и пирита месторождения Кючус установлено обогащение золотом и мышьяком краевых частей кристаллов обоих минералов, но при этом по всей выборке отсутствует значимая корреляция Au с другими элементами (Сидорова и др., 2022). Отмечено, что часть золота была сконцентрирована в сульфидах в процессе их роста, главным образом — в игольчатом арсенопирите. Другая часть золота вместе с группой элементов (As–Sb–Tl–Hg–Pb–Bi–Ag–Cu–Zn и др.) присутствует во фрагментах углеродисто-силикатной матрицы в ячеистых и ситовидных зонах пирита и арсенопирита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением современных прецизионных методов установлены закономерности поведения элементов-примесей и “невидимого” золота в золотоносных сульфидах вкрапленных руд месторождения Майское (Центральная Чукотка). На основании полученных данных установлена последовательность кристаллизации и взаимоотношения золотоносных сульфидов для основного и наиболее продуктивного золото-сульфидного этапа образования месторождения.

Арсенопирит вкрапленных руд имеет зональное строение с более сернистой центральной зоной и более мышьяковистой внешней, при этом максимальные содержания золота (до 0.47 мас. %) сконцентрированы в тонких (5–10 мкм) мышьяковистых участках в центральных, более сернистых, зонах кристаллов. Для арсенопирита установлена тенденция обратной корреляции Au–Fe и Au–Sb и прямой — Au–As.

Для пирита отмечается сложное зональное строение ксеноморфных агрегатов с центральными “реликтовыми” зонами (с повышенными содержаниями микроэлементов (Pb, Sb, Co, Ni, Bi, Tl, Ag, Zn и низкими содержаниями As и Au) и последующим нарастанием более мышьяковистого и золотоносного пирита (зоны-II, III). При этом для зоны-II характерно развитие тонких ореолов с максимальными концентрациями мышьяка (до 5.3 мас. %) и золота (до 0.012 мас. %). Поскольку более поздняя зона-III равновесна с золотоносным арсенопиритом, последний концентрирует основную часть Au, вследствие чего содержание золота в ней не превышает 30 г/т при равномерном распределении Au и As.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам и редакции журнала ГРМ за внимательные прочтение и замечания, которые помогли значительно улучшить статью.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке темы Госзадания ИГЕМ РАН (№ 124022400144-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев Б.С. Минералого-геохимические особенности и условия формирования редкометально-сурьмяного проявления. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Ленинград, 1984. 224 с.
- Артёмьев Д.С. Петрография и минералогия рудоносных гидротермально-метасоматических образований Майского золоторудного месторождения (Центральная Чукотка) // Региональная геология и металлогения. № 67. 2016. С. 118–123.
- Бортников Н.С., Брызгалов И.А., Кривицкая Н.Н., Прокофьев В.Ю., Викентьева О.В. Майское многоэтапное прожилково-вкрапленное золото-сульфидное месторождение (Чукотка, Россия): минералогия, флюидные включения, стабильные изотопы (О и S), история и условия образования // Геология руд. месторождений. 2004. Т. 46. № 6. С. 475–509.
- Викентьев И.В. Невидимое и микроскопическое золото в пирите: методы исследования и новые данные для колчеданных руд Урала // Геология руд. месторождений. 2015. Т. 57. № 4. С. 267–298.

- Волков А.В., Генкин А.Д., Гончаров В.И. О формах нахождения золота в рудах месторождений Наталкинское и Майское (Северо-Восток России) // Тихоокеанская геология. 2007. Т. 25. № 6. С. 18–29.
- Волков А.В., Гончаров В.И., Сидоров А.А. Месторождения золота и серебра Чукотки. М.: ИГЕМ РАН; Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2006. 221 с.
- Волков А.В., Сидоров А.А. Невидимое золото // Вестник РАН. 2017. Т. 87. № 1. С. 40–49.
- Гаврилов А.М., Новожилов Ю.И., Сидоров А.А. О принадлежности золото-мышьяково-сурьмяной минерализации к формации “вкрапленных сульфидных руд с тонкодисперсным золотом” // Тихоокеанская геология. 1986. № 3. С. 108–111.
- Гаврилов А.М., Плешаков А.П., Бернштейн П.С., Сандомирская С.М. Субмикроскопическое золото в сульфидах некоторых месторождений вкрапленных руд // Сов. геология. 1982. № 8. С. 81–86.
- Генкин А.Д., Лопатин В.А., Савельев Р.А., Сафонов Ю.Г., Сергеев Н.Б., Керзин А.Л., Цепин А.И., Амштутц Х., Афанасьева З.Б., Вагнер Ф., Иванова Г.Ф. Золотые руды месторождения Олимпиада (Енисейский край, Сибирь) // Геология руд. месторождений. 1994. Т. 36. № 2. С. 111–136.
- Генкин А.Д. Золотоносный арсенопирит из золоторудных месторождений: внутреннее строение зерен, состав, механизм роста и состояния золота // Геология руд. месторождений. 1998. Т. 40. № 6. С. 551–557.
- Григорьев С.А., Саморуков Н.М., Саморукова Л.Н., Томилов В.Л. Отчет о работе Тамнеквунской геологической партии масштаба 1 : 50000 за 1971–1972 гг. Певек. 1973. 779 с.
- Кларк Л. Фазовые отношения в системе Fe–As–S // Проблемы эндогенных месторождений. 1966. Вып. 3. С. 160–250.
- Ковалев К.Р., Кузьмина О.Н., Дьячков Б.А., Владимиров А.Г., Калинин Ю.А., Наумов Е.А., Кириллов М.В., Анникова И.Ю. Золото сульфидная вкрапленная минерализация месторождения Жайма (Восточный Казахстан) // Геология руд. месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 134–153.
- Ковальчук Е.В., Тагиров Б.Р., Викентьев И.В., Чареев Д.А., Тюкова Е.Э., Никольский М.С., Борисовский С.Е., Бортников Н.С. “Невидимое” золото в синтетических и природных кристаллах арсенопирита (Воронцовское месторождение, Северный Урал) // Геология руд. месторождений. 2019. Т. 461. № 5. С. 62–63.
- Колонин Г.Р., Пальянова Г.А., Широносова Г.П. Устойчивость и растворимость арсенопирита в гидротермальных растворах // Геохимия. 1988. № 6. С. 843–855.
- Новожилов Ю.И., Гаврилов А.М. Золото-сульфидные месторождения в терригенных углеродистых толщах. М.: ЦНИГРИ, 1999. 220 с.
- Новожилов Ю.И., Гаврилов А.М., Сидоров А.А. и др. Изучение структурных условий локализации и минералого-геохимических особенностей оруденения на Майском золоторудном месторождении. М.: ЦНИГРИ, 1983. 204 с.
- Новожилов Ю.И., Сидоров А.А., Гаврилов А.М., Волков А.В., Григорьев С.А., Процкий А.Г. Майское месторождение // Золоторудные месторождения СССР. Том IV. Геология золоторудных месторождений Востока СССР. М.: ЦНИГРИ, 1988. С. 167–188.
- Сидорова Н.В., Волков А.В., Ковальчук Е.В., Минервина Е.А., Левицкая Л.А. “Невидимое” золото и другие элементы-примеси в пирите и арсенопирите месторождения Кючус (республика Саха-Якутия) // Геология руд. месторождений. 2022. Т. 64. № 5. С. 451–461.
- Сильянов С.А. Геология и минералого-геохимические индикаторы генезиса золоторудного месторождения Олимпиада (Енисейский край). Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Красноярск, 2020. 185 с.
- Сильянов С.А., Сазонов А.М., Тишин П.А., Лобастов Б.М., Некрасова Н.А., Звягина Е.А., Рябуха М.А. Элементы-примеси в сульфидах и золоте месторождения Олимпиада (Енисейский край): источники вещества и параметры флюида // Геология и геофизика. 2021. № 3. С. 382–402.
- Толканов О.А. Неоднородность вещественного состава золото-сульфидных руд месторождения Майское, Северо-Восток России // Минералогия. 2019. Т. 5. № 2. С. 69–82.
- Тюкова Е.Э., Ворошин С.В. Состав и парагенезисы арсенопирита в месторождениях и вмещающих породах Верхне-Колымского региона (к интерпретации генезиса сульфидных ассоциаций). Магадан, СВКНИИ ДВО РАН. 2007. 107 с.
- Шило Н.А., Сахарова М.С., Кривицкая Н.Н., Ряховская С.К., Брызгалов И.А. Минералогические и генетические особенности золото-серебряного оруденения северо-западной части Тихоокеанского обрамления. М.: Наука, 1992. 256 с.
- Ashley P.M., Creagh C.J., Ryan C.G. Invisible gold in ore and mineral concentrates from the Hillgrove gold-antimony deposits, NSW, Australia // Miner. Deposita. 2000. V. 35. P. 285–301.
- Benzaazoua M., Marion P., Robaut F., Pinto A. Gold-bearing arsenopyrite and pyrite in refractory ores: analytical refinements and new understanding of gold mineralogy // Mineralogical Magazine. 2007. V. 71. P. 123–142.

- Cabri L. J., Newville M., Gordon R. A., Crozier E. D., Sutton S. R., McMahon G., Jiang D.-T.* Chemical speciation of gold in arsenopyrite // *Canad. Mineralogist*. 2000. V. 38. P. 1265–1281.
- Cook N. J., Ciobanu C. L., Meria D., Silcock D., Wade B.* Arsenopyrite-Pyrite Association in an Orogenic Gold Ore: Tracing Mineralization History from Textures and Trace Elements // *Econ. Geol.* 2013. V. 108. P. 1273–1283.
- Fleet M. E., Mumin A. H.* Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis // *Amer. Mineral.* 1997. V. 82. P. 182–193.
- Genkin A.D., Bortnikov N.S., Cabri L.J., Wagner F.E., Stanley C.J., Safonov Y.G., McMahon G., Friedl J., Kerzin A.L., Gamyagin G.N.* A Multidisciplinary Study of Invisible Gold in Arsenopyrite from Four Mesothermal Gold Deposits in Siberia, Russian Federation // *Econ. Geol.* 1998. V. 93. P. 463–487.
- Gopon P., Douglas J.O., Auger M.A., Hansen L., Wade J., Cline J.S., Robb L.J., Moody M.P.* A Nanoscale Investigation of Carlin-Type Gold Deposits: An Atom-Scale Elemental and Isotopic Perspective. *Econ. Geol.* 2019. V. 114. P. 1123–1133.
- Large R.R., Danyushevsky L., Hollit C., Maslennikov V., Meffre S., Gilbert S., Bull S., Scott R., Emsbo P., Thomas H., et al.* Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: Implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits // *Econ. Geol.* 2009. V. 104. P. 635–668.
- Large R.R., Maslennikov V.V.* Invisible gold paragenesis and geochemistry in pyrite from orogenic and sediment-hosted gold deposits // *Minerals*. 2020. V. 10. P. 1–21.
- Li W., Cook N.J., Xie G.Q., Mao J.W., Ciobanu C.L., Li J.W., Zhang Z. Y.* Textures and trace element signatures of pyrite and arsenopyrite from the Gutaishan Au–Sb deposit, South China // *Miner. Deposita*. 2019. V. 54. P. 591–610.
- Liang Q.L., Xie Z., Song X.Y., Wirth R., Xia Y., Cline J.* Evolution of invisible Au in arsenian pyrite in Carlin-type Au deposits // *Econ. Geol.* 2021. V. 116. № 2. P. 515–526.
- Marcoux É., Bonnemaison M., Braux C., Johan Z.* Distribution de Au, Sb, As et Fe dans l’arsénopyrite aurifère du Çhâtelet et de Villeranges (Greuse, Massif Central français) // *Comptes rendus de l’Académie des sciences*. 1989. 308. Série II. P. 293–300.
- Morey A.A., Tomkins A.G., Bierlein F.G., Weinberg R.F., Davidson G.J.* Bimodal distribution of gold in pyrite and arsenopyrite: examples from the Archean Boorara and Bardoc shear zones, Yilgarn craton, Western Australia // *Econ. Geol.* 2008. V. 103. P. 599–614.
- Mumin A. H., Fleet M. E., Chryssoulis S. L.* Gold mineralization in As-rich mesothermal gold ores of the Bogosu–Prestea mining district of the Ashanti Gold Belt, Ghana: remobilization of “invisible” gold // *Miner. Deposita*. 1994. V. 29. P. 445–460.
- Muntean J.L., Cline J.S., Simon A.C., Longo A.A.* Magmatic-hydrothermal origin of Nevada’s Carlin-type gold deposit // *Nature Geos.* 2011. № 4. P. 122–127.
- Palenik C.S., Utsunomiya S., Reich M., Kesler S.E., Wang L.M., Ewing R.C.* “Invisible” gold revealed: direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin type deposit // *Amer. Mineral.* 2004. V. 89. P. 1359–1366.
- Sazonov A.M., Silyanov S.A., Bayukov O.A., Knyazev Y.V., Zvyagina Y.A., Tishin P.A.* Composition and ligand microstructure of arsenopyrite from gold ore deposits of the Yenisei Ridge (Eastern Siberia, Russia) // *Minerals*. 2019. V. 9. P. 737.
- Sung Y.H., Brugger J., Ciobanu C.L., Pring A., Skinner W., Nugus M.* Invisible gold in arsenian pyrite and arsenopyrite from a multistage Archean gold deposit: Sunrise Dam, Eastern Goldfields Province, Western Australia // *Miner. Deposita*. 2009. V. 44. P. 765–791.
- Tyukova E.E., Vikentyev I.V., Kovalchuk E.V., Borisovsky S.E., Tagirov B.R.* Gold-bearing arsenian pyrite and arsenopyrite from Vorontsovka Carlinstyle gold deposit in the North Urals // *German International Journal of Modern Science*. 2022. № 25. P. 4–9.
- Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Vikent’eva O.V., Chugaev A.V., Dubinina E.O., Prokofiev V.Yu., Murzin V.V.* Vorontsovka Carlin-style gold deposit in the North Urals: mineralogy, fluid inclusion and isotope data for genetic model // *Chemical Geology*. 2019. V. 508. P. 144–166.

“INVISIBLE” GOLD AND OTHER IMPURITY ELEMENTS IN PYRITE AND ARSENOPYRITE FROM THE MAYSKOYE DEPOSIT (CHUKOTKA)

**N. V. Sidorova^{a, *}, A. V. Volkov^{a, **}, E. E. Tyukova^{a, b}, E. N. Kaigorodova^a, E. V. Koval'chuk^{a, c},
E. A. Minervina^a**

^a*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow*

^b*Scientific Geoinformation Center, Russian Academy of Sciences, Moscow*

^c*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow*

^{*}*E-mail: nsidorova989@mail.ru*

^{**}*E-mail: tma2105@mail.ru*

The gold-bearing sulphides (pyrite and arsenopyrite) from disseminated refractory ores of the Mayskoe gold deposit (Central Chukotka) were studied using modern precision methods (electron microprobe analysis and laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry). The distribution patterns of macro elements (As, Fe, S), as well as trace elements (Ni, Zn, Sb, Co, Cu, Ag), in pyrite and arsenopyrite, including the content of “invisible” Au and its correlation with other elements were studied. Based on received data, the sequence of crystallization and the relationships of gold-bearing sulphides at the main and most productive gold–sulphide stage of the deposit formation were established..

Keywords: Chukotka, Mayskoye deposit, pyrite, arsenopyrite, “invisible” gold, EMPA, LA-ICP-MS