

УДК 553.411.071

ЭВОЛЮЦИЯ СОСТАВА ПИРИТА НА ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КОПЫЛОВСКОЕ И КАВКАЗ В ЧЕРНОСЛАНЦЕВЫХ ТОЛЩАХ (БОДАЙБИНСКИЙ РАЙОН, РОССИЯ) ПО ДАННЫМ РСМА И ЛА-ИСП-МС¹

© 2015 г. Е. Е. Паленова*, Е. В. Белогуб*, О. Ю. Плотинская**, К. А. Новоселов*, В. В. Масленников*, В. А. Котляров*, И. А. Блинов*, А. А. Кузьменко***, И. Г. Грибоедова**

*Институт минералогии УрО РАН

456317, Челябинская обл., г. Миасс, Ильменский заповедник

**Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

119017, Москва, Старомонетный пер., 35

***ООО “Восточный базис”

620100, Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 12, стр. 1

Поступила в редакцию 23.06.2014 г.

Золоторудные месторождения Копыловское и Кавказ (Артемовский рудный узел, Бодайбинский район) залегают в терригенной углеродистой толще догалдынской свиты бодайбинской серии верхнего протерозоя и приурочены к ядерным частям антиклинальных структур высоких порядков. На них выделяются золото-сульфидный и золото-сульфидно-кварцевый типы руд. Среди рудных минералов преобладает пирит с подчиненным количеством сульфидов меди, свинца, цинка, никеля и кобальта. Самородное золото встречается как в свободных зернах, так и в виде включений и просечек в пирите. Выделяется несколько морфологических разновидностей пирита: 1) фрамбоидальный и тонкозернистый пирит, образовавшиеся при осадконакоплении и диагенезе; 2) мелкозернистый субгидральный до эвгидрального пирит, отвечающий процессам катагенеза, метаморфизма и динамометаморфизма; 3) крупнокристаллический эвгидральный незолотоносный пирит, развитый во вмещающих породах за пределами рудных тел и месторождений. Анализ состава пирита при помощи рентгеноспектрального микроанализа и ЛА-ИСП-МС показал, что от осадочно-диагенетического пирита к пириту метаморфогенному значительно уменьшается содержание примесей Au, Ag, Co, Pb, Sb, Bi, Ba, Mo и Ti и увеличивается – Ni, Cu, As, Se, в наибольшей степени – U. Предполагается, что золото первоначально было накоплено во время отложения вмещающих пород в формах, связанных с углеродистым веществом и сингенетичным пиритом, и переотложено в результате процессов катагенеза и метаморфизма в самородной форме, при этом кристаллизовались более поздние формы пирита и ассоциирующие с ними сульфиды цветных металлов.

DOI: 10.7868/S0016777015010025

ВВЕДЕНИЕ

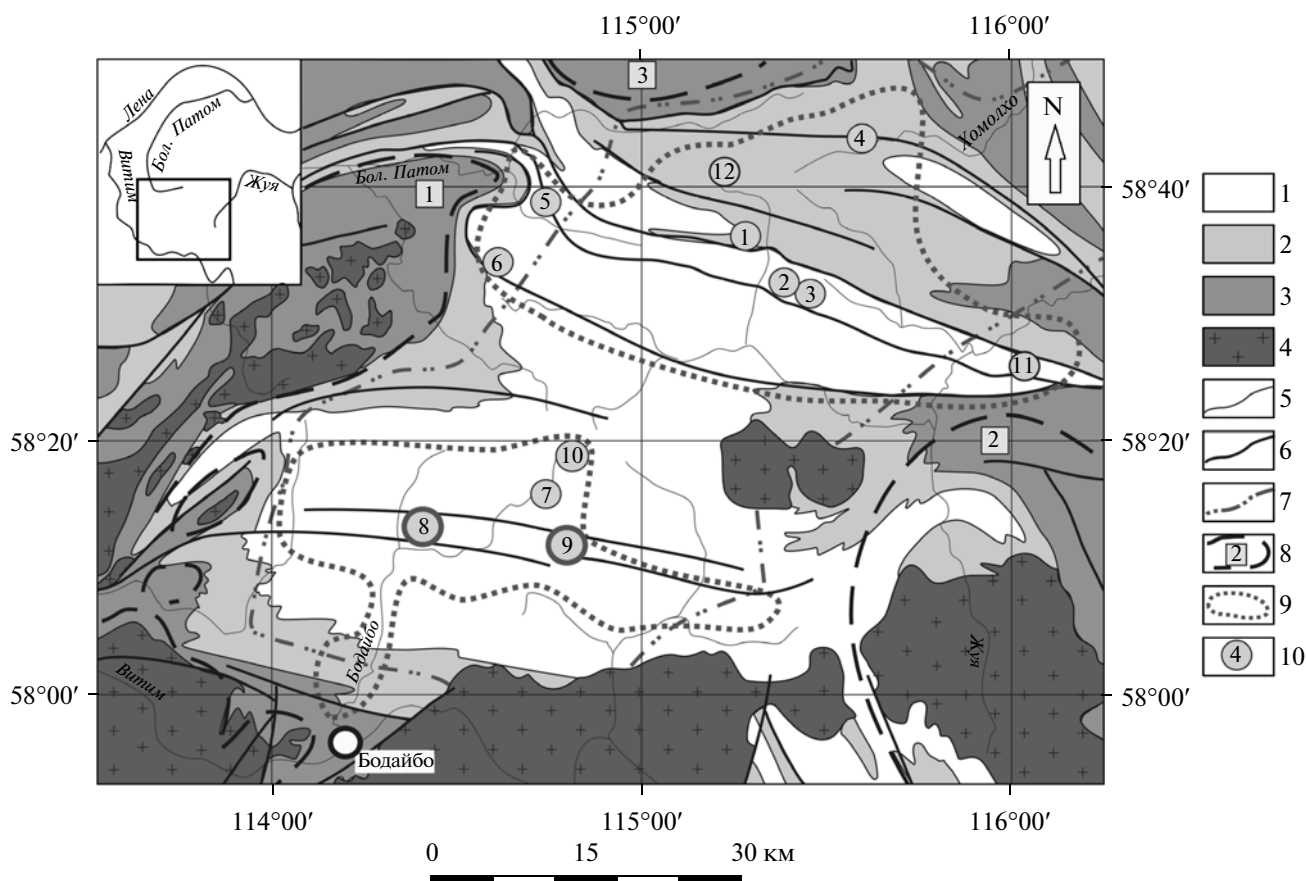
Бодайбинский рудный район принадлежит Ленской золотоносной провинции, на территории которой с 1846 г. из россыпей было добыто более 1500 тонн золота (Беневольский, 2002; Иванов, 2008). Здесь расположены крупнейшее в России коренное месторождение Сухой Лог и несколько крупных и средних – Высочайшее (Голец Высочайший), Вернинское, Невское (Иванов, 2008). Кроме того, известен ряд мелких объектов,

таких как рассматриваемые в статье месторождения Копыловское и Кавказ (фиг. 1).

Перечисленные выше месторождения одни исследователи относят к полигенному метаморфогенно-плутоногенному типу (Рундквист, 1997; Сафонов, 2006), а другие – к орогенному типу в черносланцевых толщах (Goldfarb *et al.*, 2001; и др.). Соответственно, существуют две основные гипотезы формирования месторождений Бодайбинского района: постмагматически-гидротермальная и метаморфогенно-гидротермальная. Согласно первой гипотезе, основной этап концентрации золота в рудах и привнос хотя бы части цветных и благородных металлов отвечает становлению постметаморфических интрузий, в качестве которых рассматриваются как гранитоиды, так и гипо-

Адрес для переписки: Е.Е. Паленова. E-mail: palenova@mineralogy.ru

¹ Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на Третьей молодёжной школе ИГЕМ РАН 02–06.12.2013.



Фиг. 1. Схематическая геологическая карта Бодайбинского рудного района (по Иванову, 2008).

1–3 – рифейско-вендские отложения: 1 – венд, бодайбинская серия (аунакитская, вачская, анангская, догалдынская, илигирская свиты), 2 – средний–верхний рифей, ныгринская серия (бужуихтинская, угаханская, хомолхинская, имняхская свиты), 3 – средний рифей, балаганахская серия (хорлухтахская, хайвергинская, бугорихтинская, бодайбокская свиты); 4 – верхнепалеозойские гранитоиды конклюдеро-мамаканского комплекса; 5 – геологические границы; 6 – разрывные нарушения; 7 – изограда биотита регионального метаморфизма; 8 – границы деформационных зон гранито-гнейсовых купольных структур (1 – Мамской группы, 2 – Верхне-Жуинской, 3 – Верхне-Хайвергинской); 9 – золотороссыпные районы; 10 – золоторудные месторождения (1 – Сухой Лог, 2 – Вернинское, 3 – Невское, 4 – Высочайшее, 5 – Ожерелье, 6 – Ыканское, 7 – Догалдынская жила, 8 – **Кавказ**, 9 – **Копыловское**, 10 – рудопроявление Красное, 11–12 – потенциальные золоторудные месторождения в 11 – Светловском, 12 – Верхне-Угаханском рудных полях).

тетические базитовые комплексы, залегающие на глубине. Она была впервые предложена А.К. Кондратенко (1977) и в разное время развивалась в работах: Русинов и др., 2005, 2008; Distler *et al.*, 2004; Лаверов и др., 2000, 2007; Юдовская и др., 2011 и др.

Согласно метаморфогенно-гидротермальной гипотезе, рудообразующие растворы генерировались при региональном метаморфизме исходно металлонесных углеродистых толщ (Буряк, 1982; Буряк, Бакулин, 1998 и цитируемая в них литература), а первичные концентрации золота накапливались в углеродистом веществе, осадочном и диagenетическом пирите. В работе (Large *et al.*, 2007) реалистичность этой модели была показана для месторождения Сухой Лог. Роль осадочных толщ как источника рудных компонентов подтверждается также данными изучения стабильных и радио-

генных изотопов (Кряжев и др., 2009; Иконникова и др., 2009; Дубинина и др., 2010; Чугаев и др., 2014) и теоретической возможностью связывания металлов при осадконакоплении путем адсорбции сингенетичными сульфидами и органическим веществом, а также в виде химических соединений с углеводородами (Юдович, Кетрис, 1994). Механизмы аккумуляции металлов в осадке при участии бентосных бактериальных сообществ детально рассмотрены в работе В.К. Немерова с соавторами (2010).

Следует отметить, что большинство цитируемых выше работ посвящено изучению месторождения Сухой Лог, которое в рассмотренных генетических моделях выступает в качестве опорного объекта. Другие же золоторудные объекты Бодайбинского района, за редким исключением, изуче-

ны мало или не изучены вообще. В то же время многие закономерности, которые помогли бы понять природу золотого оруденения, могут быть лучше выражены на мелкомасштабных объектах, а не на месторождениях-гигантах, для которых характерна полигенность и полихронность рудообразующих процессов (Рундквист, 1997). Поэтому в качестве объектов настоящего исследования были выбраны небольшие по запасам месторождения Копыловское и Кавказ.

В данной работе приведена характеристика рудной минерализации и типоморфных особенностей пирита этих месторождений. При помощи рентгеноспектрального микроанализа и ЛА-ИСП-МС изучен химический состав пирита и прослежено поведение основных рудообразующих элементов в процессе формирования месторождений. Полученные результаты сопоставлены с данными по месторождению Сухой Лог (Large *et al.*, 2007).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Бодайбинский район, представляющий собой часть Мамско-Бодайбинского мегасинклинория, сложен верхнепротерозойскими карбонатно-терригенными отложениями, смятыми в линейные складки и прорванными позднепалеозойскими гранитоидами (фиг. 1). В центральной части района развиты породы бодайбинской серии вендского возраста, к которой принадлежит и догалдынская свита (Vdg), вмещающая месторождения Копыловское и Кавказ. Периферия сложена породами средне-верхнерифейской ныгринской серии, которая включает хомолхинскую свиту ($R_{2-3}hm$), вмещающую руды месторождения Сухой Лог. Штоки и крупные батолиты гранитоидов конклюдеро-мамаканского комплекса среднепалеозойского возраста прорывают терригенные толщи в южной части района. Осадочные породы преобразованы в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма, уровень которого повышается от хлорит-мусковитовой субфации в центральной части района к биотитовой – в периферической (Иванов, 2008).

Месторождения рудного и россыпного золота в Бодайбинском районе объединяются в два крупных рудных узла: расположенный на севере Хомолхинский, к которому относятся наиболее известные объекты района (Сухой Лог, Вернинское), и Артемовский – на юге (Иванов, 2008). В локализации месторождений коренного золота не выявляется пространственная связь с гранитными массивами или степенью метаморфизма вмещающих пород (фиг. 1). Месторождения Копыловское и Кавказ расположены в Артемовском рудном узле и имеют сходное геологическое строение.

Месторождение Копыловское расположено в 45 км северо-восточнее г. Бодайбо и приурочено к

одноименной антиклинали субширотного простирания, представляющей собой сильно сжатую ассиметричную складку с пологим северным ($42^\circ-50^\circ$) и субвертикальным южным крылом. Шарнир складки изогнут и полого погружается в юго-западном и восточном направлениях (фиг. 2). На участке изгиба наблюдаются кварцевые жилы и штокверковые зоны, а также сдвиги-сбросы северо-восточного простирания. Копыловская антиклиналь осложнена складками более высокого порядка (Вамбольдт и др., 2011ф).

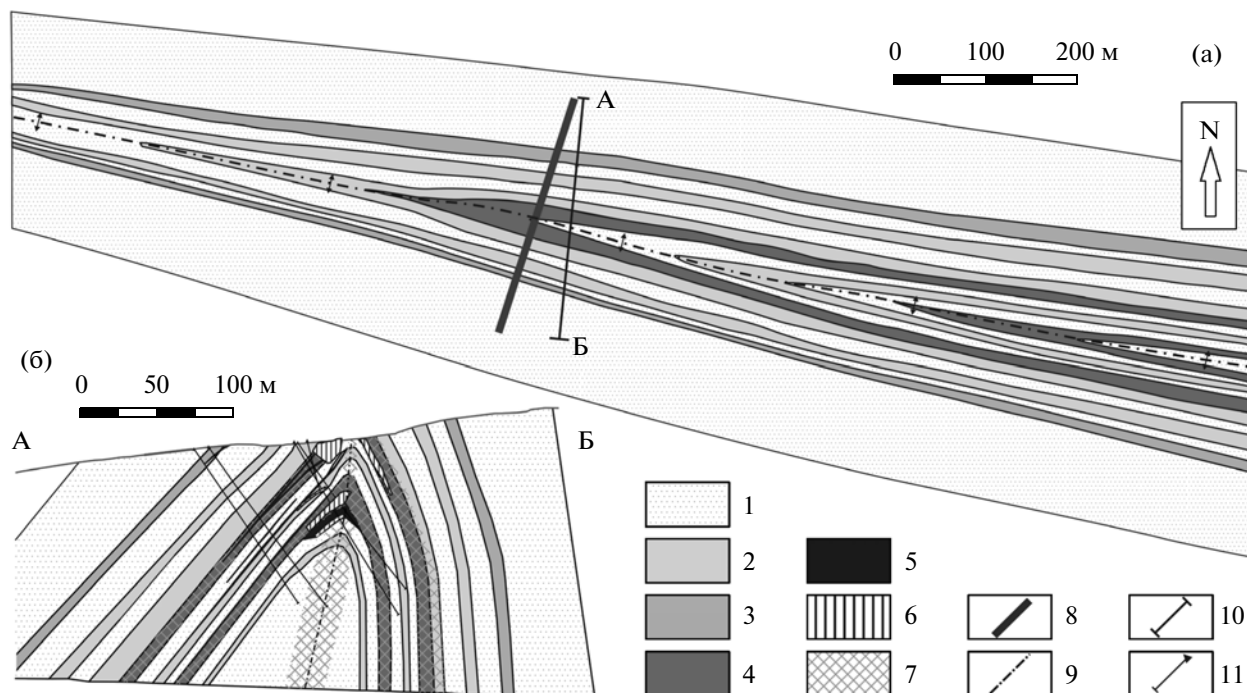
В геологическом строении месторождения участвуют отложения третьей (Vdg₃) и четвертой (Vdg₄) подсвит догалдынской свиты (Вамбольдт и др., 2011ф). Вмещающие породы представлены метапесчаниками, метаалевролитами, углеродисто-глинистыми и глинистыми сланцами, метаморфизованными в условиях серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации (Паленова и др., 2013). На месторождении известны редкие маломощные дайки лампрофиров. Ближайший гранитный массив расположен в 40 км к востоку (Аксенов, 2004ф).

Золотое оруденение приурочено к ядру и северному крылу Копыловской антиклинали и располагается преимущественно в пределах горизонтов углеродисто-глинистых сланцев с прослоями метапесчаников и метаалевролитов (Вамбольдт и др., 2011ф).

Месторождение Кавказ находится в 35 км к северу от г. Бодайбо в центральной части Васильевского рудного поля, в строении которого выделяется субширотная полоса кварцевых жил шириной 200–800 м. Полоса контролируется Миллионным и Корольковским взбросо-сдвигами, которые осложняют северное крыло Кайро-Ленинской антиклинали и сопряжены со складками более высоких порядков, к одной из которых, Васильевской антиклинали, и приурочено месторождение (фиг. 3).

В строении месторождения участвуют породы второй подсвиты догалдынской свиты (Vdg₂), на незначительной территории наблюдаются отложения третьей и четвертой подсвит (Vdg₃₋₄) (Вамбольдт и др., 2012ф). Вмещающие породы представлены метапесчаниками, метаалевролитами, углеродисто-глинистыми и глинистыми сланцами, по минералого-петрографическим и геохимическим характеристикам сходными с породами Копыловского месторождения (Паленова и др., 2013). Наблюдаются редкие дайки лампрофиров. Золотое оруденение расположено в зоне влияния Миллионного разлома и в ядре Васильевской антиклинали (Вамбольдт и др., 2012ф).

На обоих месторождениях выделяются золото-сульфидно-кварцевый (кварцевые жилы и штокверковые зоны в ядре антиклинальной складки) и золото-сульфидный (минерализованные зоны во



Фиг. 2. Геологический план месторождения Копыловское и разрез по линии А–Б (по Вамбольдту и др., 2011ф с упрощениями).

1 – песчаники; 2 – переслаивание сланцев и песчаников; 3 – глинистые сланцы; 4 – углеродисто-глинистые сланцы; 5 – кварцевые жилы; 6 – контуры рудных тел; 7 – зоны кварцевого прожилкования; 8 – дайка лампрофиров; 9 – ось складки; 10 – линия разреза; 11 – скважины.

вещающих породах) рудноформационные типы (Аксенов, 2004ф; Вамбольдт и др., 2012ф).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

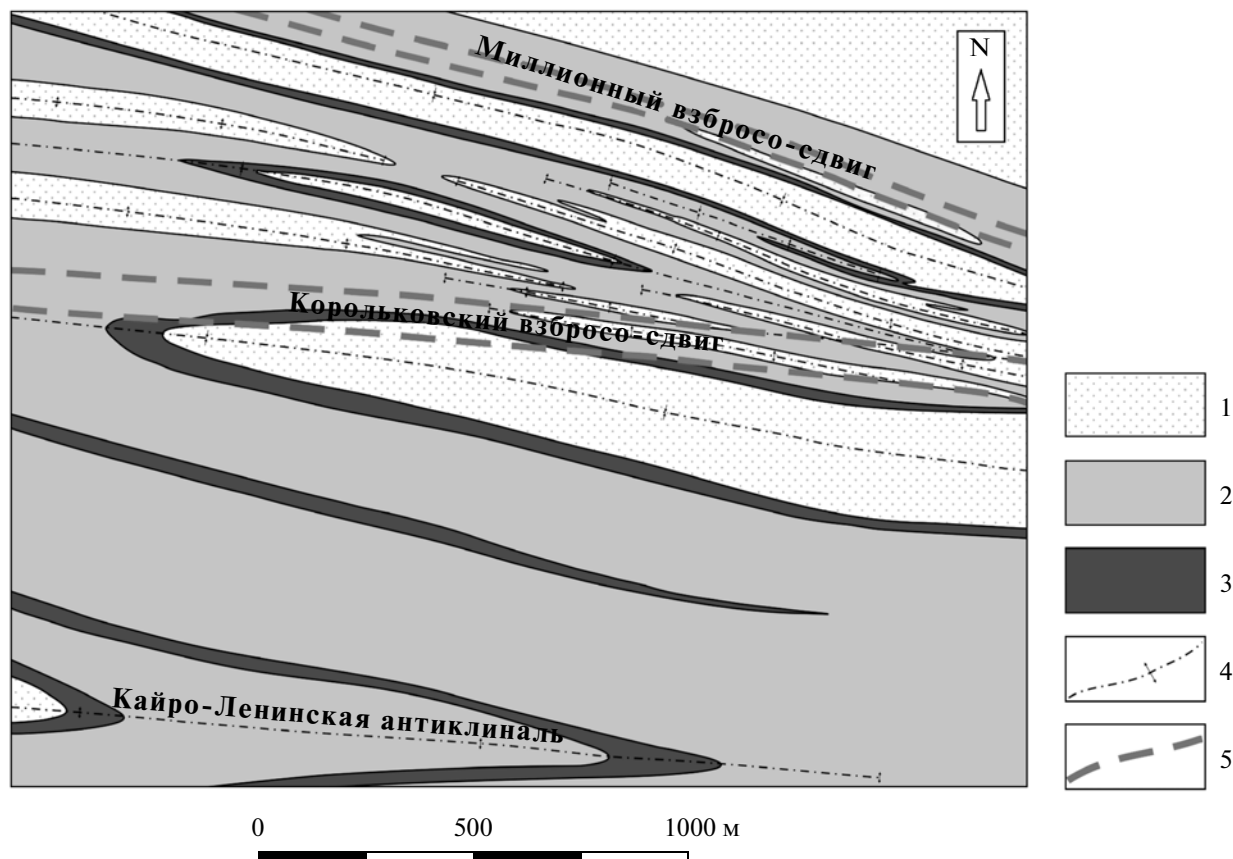
Для аналитических исследований использовались пробы, отобранные штучным и точечным способами из керна скважин, траншей и коренных выходов. Работа выполнена на материалах, предоставленных компаниями ООО “Кавказ”, ООО “Копыловский”, а также отобранных сотрудниками Института минералогии УрО РАН в ходе полевых работ в 2010–2012 гг.

Оптические исследования проводились с помощью поляризационных микроскопов (Axio-Scope A.1, Olympus BX51) с цифровыми приставками. Для выявления внутреннего строения зерен пирита применялось травление концентрированной HNO_3 и растворами КОН и KMnO_4 .

Для определения химического состава минералов использовались растровые электронные микроскопы РЭММА-202М, Vega 3 Tescan с ЭДА (Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс, аналитики В.А. Котляров, И.А. Блинов), а также рентгеновский микроанализатор JXA-8200, оборудованный пятью кристалл-дифракционными спектрометрами со сменными кристаллами-ана-

лизаторами и энергодисперсионным спектрометром фирмы JEOL (ИГЕМ РАН, аналитик И.Г. Грибоедова). Расчет поправок осуществлялся по методу ZAF-коррекции с использованием программы фирмы JEOL. Анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ, ток в образце – 20 нА, диаметр луча 1 мкм. Аналитические линии: $\text{K}\alpha$ для S, Fe, Zn, Ni, Co, Cu; $\text{L}\alpha$ для Sb, Se, Ag, As, Te, Tl; $\text{L}\beta$ для Cd; $\text{M}\alpha$ для Pb. Эталоны: Sb_2S_3 для Sb, CdSe для Se, ZnS для Zn, PbS для Pb, AgSbS_2 для Ag, FeS_2 для Fe и S, As_2S_3 для As, CuFeS_2 для Cu, CdS для Cd, TlInS_2 для Tl и химически чистые металлы – для Te, Ni и Co. Время экспозиции составляло для Tl 40 с, для остальных элементов – 10 с.

Содержания микроэлементов в пирите были получены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС) в Международном центре по изучению рудных месторождений (CODES, Университет Тасмании). Анализы выполнены с помощью твердотельного лазерного микрозонда New Wave UP213 и квадрупольного масс-спектрометра Agilent 4500. Диаметр лазерного пучка составлял 25–40 мкм, частота – 5 Гц, энергия на поверхности образца 4–5 Дж/см². Время экспозиции 100 с, из которых 30 с занимало измерение фона. Преобразование первичных данных проводилось по



Фиг. 3. Геологический план месторождения Кавказ (по Вамбольдту и др., 2012ф с упрощениями).

1 – песчаники; 2 – переслаивание сланцев и песчаников; 3 – углеродисто-глинистые сланцы; 4 – ось складки; 5 – границы разломов.

стандартной методике с использованием Fe в качестве внутреннего эталона. Съемка внешнего эталона (сплав бората лития с пиритом и/или сфалеритом) проводилась каждые полчаса работы прибора для расчета приборной погрешности, которая составляла менее 5% между каждым измерением внешнего эталона.

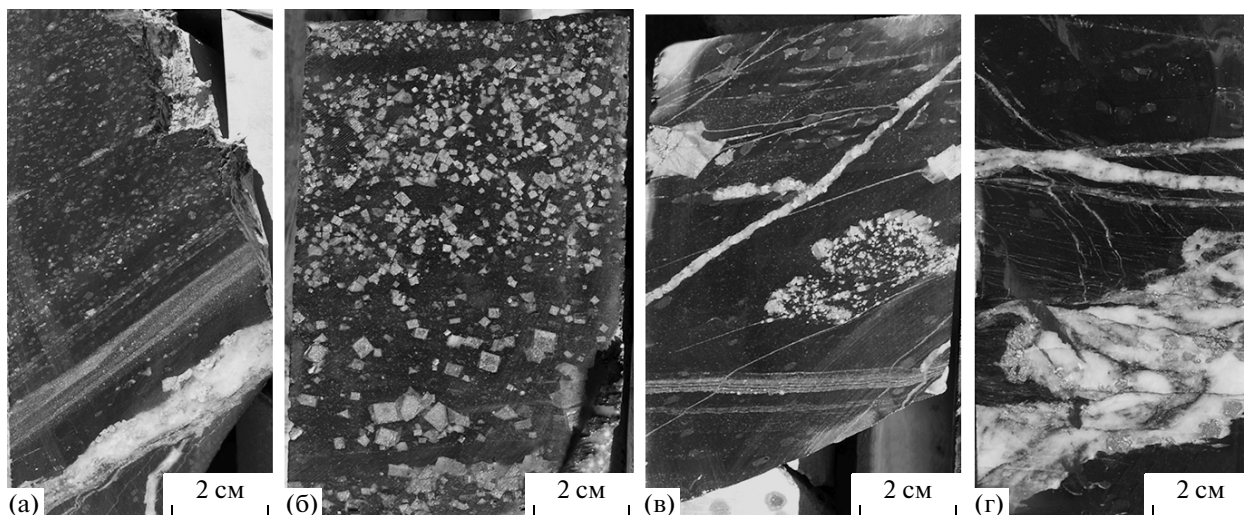
Химико-битуминологический анализ черных сланцев выполнялся во ВНИГРИ (г. Санкт-Петербург, аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.514899, аналитик А.И. Шапиро).

ВМЕЩАЮЩИЕ ПОРОДЫ

Вмещающие породы Копыловского месторождения представлены полевошпат-кварцевыми метапесчаниками и углеродисто-глинистыми сланцами с подчиненными прослоями метаалевролитов. На месторождении Кавказ преобладают кварц-полевошпатовые и полевошпат-кварцевые метапесчаники с прослоями углеродисто-глинистых сланцев и метаалевролитов. На обоих месторождениях породообразующими минералами являются кварц (часто регенерированный и пере-

кристаллизованный), альбит, ортоклаз, микроклин, структурно упорядоченные слюды (мусковит-2M₁, парагонит), иллит, хлорит. Карбонаты представлены конкрециями и метакристаллами брейнерита, доломита, сидерита, редко – тонкими просечками и скоплениями кальцита. Среди аксессуарных минералов широко распространены обломочные циркон, апатит, турмалин (часто окружен каймами регенерации), более редки обломочные сфен, ортит, гранат, обломочные и новообразованные рутил и эпидот. Типичным аксессуарным минералом пород догалдынской свиты является флоренсит, имеющий аутигенное происхождение (Palenova *et al.*, 2013), кроме того, встречаются ксенотим и монацит (Паленова и др., 2013).

Содержание органического вещества в породах Копыловского и Кавказа в среднем составляет около 2 об. %, колеблется в пределах 1–5 об. %. По данным термогравиметрического анализа, его выгоранию соответствует экзотермический эффект с максимумом 650°C и началом около 610–615°C, что соответствует зеленосланцевой фации метаморфизма (переход от мусковит-2M₁-хлори-



Фиг. 4. Типы рудной минерализации.

а – послойная тонкокристаллическая вкрапленность пирита и пирит-кварцевый прожилок; б – рассеянная вкрапленность мелко-среднезернистых кристаллов пирита; в – кварц-пиритовые прожилки и гнезда; г – пирит-кварцевый прожилок, смятый в складки наложенными процессами динамометаморфизма.

товой к мусковит-2M₁-биотитовой субфации) (Иванова и др., 1974).

По данным химико-битуминологического анализа, рассеянное органическое вещество в породах месторождений Копыловское и Кавказ характеризуется повышенным содержанием С_{орг} и низкой долей битумоида (ХБА), составляющей 0.17–0.39 мас. % от С_{орг} и около 0.005 мас. % от породы. В составе ХБА наблюдаются доля масел – 37–47 отн. %, спиртобензольных смол – 43–49 отн. % бензольных смол и асфальтенов суммарно – 9–14 отн. %. Среди масел преобладают насыщенные углеводороды (УВ), концентрация аренов мала – присутствуют только моноароматические структуры. В составе насыщенных УВ преобладают нормальные алканы с числом углеродных атомов до С₂₀. Пристан-фитановое отношение близко к единице, что подтверждает морское происхождение осадков. Исследование битумоидов показало, что рассеянное органическое вещество на обоих месторождениях прошло все стадии катагенетического преобразования. Несмотря на имеющиеся данные о присутствии металлоорганических соединений в породах зеленосланцевой фации метаморфизма (Углеродистое..., 2001), с учетом как содержания и состава углеводородов, так и средних содержаний цветных металлов в углеродистых отложениях изученных месторождений (г/т): Cu – 250, Zn – 107, Ni – 94, Pb – 22, основная часть цветных и благородных металлов в породах, по-видимому, химически не связана с углеродистым веществом (Эльштенбройх, 2011).

В целом, по данным минералого-петрографических исследований и анализа рассеянного углеродистого вещества, вмещающие породы месторождений Копыловское и Кавказ сходны. Распространение структурно упорядоченных глиноземистых слюд и железистых карбонатов в углеродистых отложениях носит региональный характер и не связано непосредственно с рудными зонами, что не позволяет рассматривать эти минералы в качестве признака околорудного метасоматоза, как это было предложено для месторождения Сухой Лог (Русинов и др., 2008).

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД

На обоих изученных месторождениях сульфидная минерализация образует послойную и рассеянную вкрапленность в углеродисто-глинистых сланцах, метапесчаниках и метаалевролитах, послойные кварц-пиритовые прожилки и просечки в штокверковых зонах, гнездовую и убогую рассеянную вкрапленность в кварцевых жилах (фиг. 4). Геохимическими работами на Копыловском месторождении была выявлена значимая положительная корреляция между содержаниями Au и As и слабая – между Au и Pb (Вамбольдт и др., 2011ф). На месторождении Кавказ значимых связей в паре Au–As не наблюдалось, что, возможно, связано с преобладанием золото-сульфидно-кварцевого типа оруденения (Вамбольдт и др., 2012ф).

Главным рудным минералом в рудах золото-сульфидного типа на обоих изученных месторождениях является пирит, в резко подчиненном ко-

Таблица 1. Минеральный состав руд месторождений Копыловское и Кавказ (по данным Романова, Эпова, 2003ф; Аксенова, 2004ф с дополнениями)

Типы руд	Минералы	Копыловское	Кавказ
	главные	пирит FeS ₂	пирит FeS ₂
Золото-сульфидный	Второстепенные и редкие	Пирротин Fe _{1-x} S, халькопирит CuFeS ₂ , галенит PbS, сфалерит ZnS, оксиды титана TiO ₂ , марказит FeS ₂ , <i>герсдорфит NiAsS</i> , <i>кобальтин CoAsS</i> , <i>миллерит NiS</i> , <i>пентландит (Fe,Ni)₉S₈</i> , <i>виоларит FeNi₂S₄</i> , <i>арсенопирит FeAsS</i> , <i>молибденит MoS₂</i> , <i>магнетит Fe₃O₄</i> , <i>ильменит FeTiO₃</i> , золото Au, электрум AuAg	Пирротин Fe _{1-x} S, халькопирит CuFeS ₂ , галенит PbS, сфалерит ZnS, оксиды титана TiO ₂ , марказит FeS ₂ , <i>герсдорфит NiAsS</i> , <i>кобальтин CoAsS</i> , <i>миллерит NiS</i> , <i>пентландит (Fe,Ni)₉S₈</i> , <i>ульманнит NiSbS</i> , арсенопирит FeAsS, молибденит MoS ₂ , <i>магнетит Fe₃O₄</i> , <i>ильменит FeTiO₃</i> , золото Au, электрум AuAg
	Главные	Пирит FeS ₂ , пирротин Fe _{1-x} S, халькопирит CuFeS ₂ , галенит PbS, сфалерит ZnS	Пирит FeS ₂ , пирротин Fe _{1-x} S, халькопирит CuFeS ₂ , галенит PbS, сфалерит ZnS
Золото-сульфидно-кварцевый	Второстепенные и редкие	Золото Au	Блеклые руды, тетрадимит Bi ₂ Te ₂ S, золото Au
	Гипергенные минералы	Гидроксиды железа и марганца	Гидроксиды железа и марганца, борнит Cu ₃ FeS ₄ , халькозин Cu ₂ S, ковеллин CuS, куприт Cu ₂ O

Примечание. Курсивом выделены минералы, впервые установленные авторами на месторождениях.

личестве встречаются пирротин, халькопирит, галенит, сфалерит. Помимо сульфидов распространен рутил. Среди редких установлены минералы никеля – миллерит, герсдорфит, пентландит, виоларит, ульманнит, а также кобальтин, марказит, арсенопирит, молибденит, магнетит, ильменит. Золото и электрум встречаются преимущественно в виде включений в пирите и в сростках с ним, реже образуют свободные зерна (табл. 1).

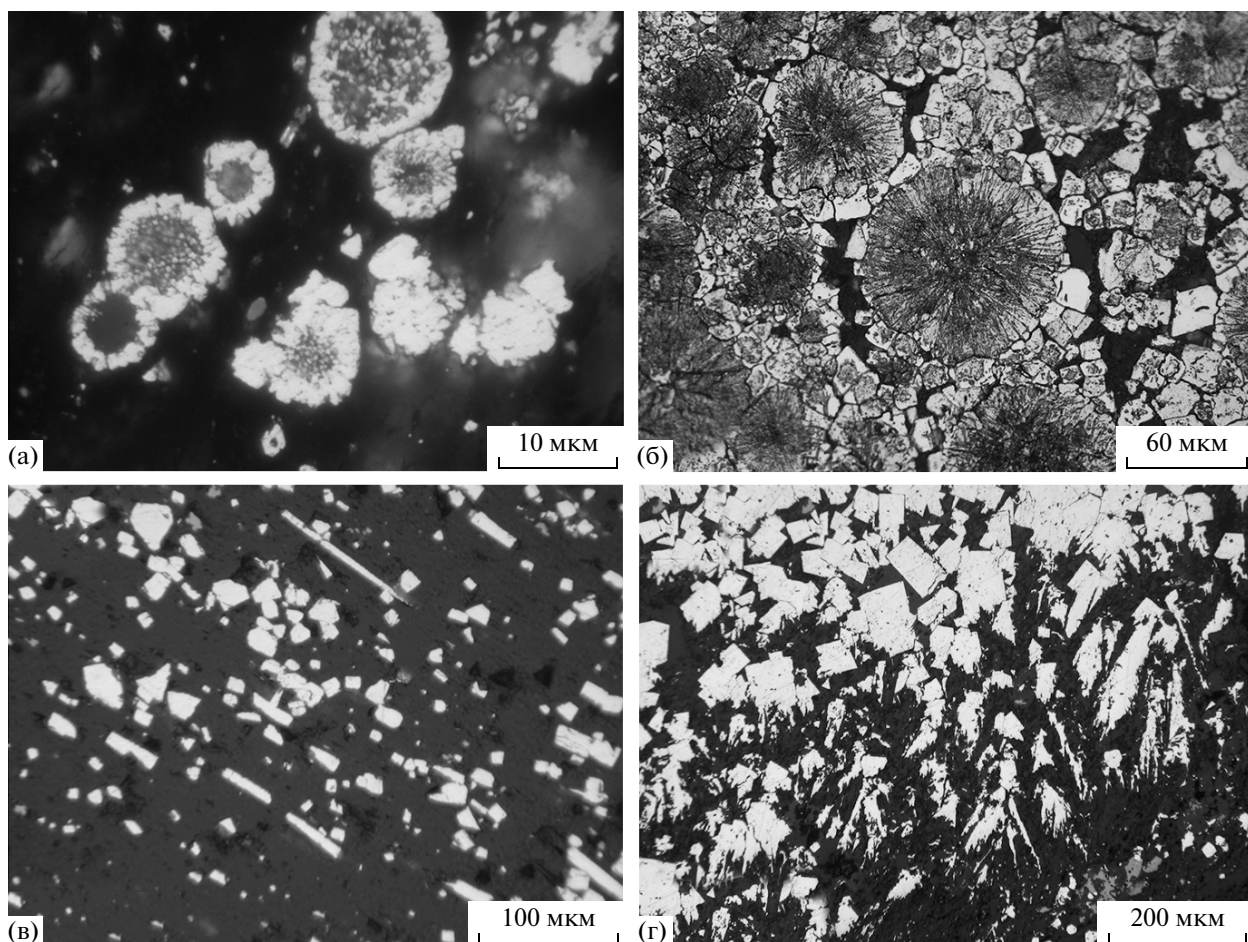
Рудная минерализация штокверковых зон сходна по составу с минерализацией во вмещающих породах. Кварцевые, реже карбонат-кварцевые жилы, приуроченные к ядерным частям антиклинальных структур, несут в основном убогую полиметаллическую минерализацию: пирит, пирротин, халькопирит, галенит, сфалерит (см. табл. 1). В составе кварцевых жил месторождения Кавказ также были установлены блеклые руды, тетрадимит и ряд вторичных минералов (Романов, Эпов, 2003ф). Золото в жилах преимущественно свободное.

ПИРИТ

Пирит представлен несколькими морфологическими разновидностями, объединенными в две генетические группы: осадочно-диагенетическую и метаморфогенную. Ранний осадочно-диагенетический пирит (ру-1) образует фрамбоиды и

тонкокристаллическую вкрапленность, поздний (ру-1а) – микроконкреции и “дендритовидные” формы (фиг. 5). Ко второй группе отнесены мелко-среднезернистый ангедральный до эвгедрального микропористый пирит с множеством включений нерудных минералов, сульфидов и самородного золота (ру-2), и субгедральный до эвгедрального пирит кварцевых линз и прожилков (ру-2а), образованные в процессе катагенеза, метаморфизма и динамометаморфизма (фиг. 6а–д). В составе золото-сульфидного типа руд наблюдается ру-1, ру-1а, ру-2. В золото-сульфидно-кварцевом – только ру-2а.

В отдельную группу выделен крупнокристаллический эвгедральный пирит размером до 2–5 см, часто с рубашками кварца (ру-3), распространенный во всех породах догалдынской свиты за пределами рудных тел и месторождений, который невозможно синхронизировать с осадочно-диагенетическим и метаморфогенным пиритом из-за отсутствия пересечений (фиг. 6е). Ру-3 не содержит включений сульфидов, в нем изредка наблюдаются включения лейкоксена и нерудных минералов; практически не содержит золота – на месторождении Копыловское в монофракции пирита >10 мм по данным спектрального анализа установлено всего 0.05–0.09 г/т Au (Бортникова, 2001ф). В данной работе эта генерация пирита не



Фиг. 5. Морфология пирита первой группы.

а – фрамбоиды ру-1 (отраженный свет, масляная иммерсия, Кавказ); б – микроконкреции ру-1а (отраженный свет, травление с концентрированной HNO_3 , Копыловское); в – тонкие кристаллы и “иголки” ру-1 (отраженный свет, Копыловское); г – “дендриты” ру-1а на вершинах тонкокристаллического ру-1 (отраженный свет, Кавказ).

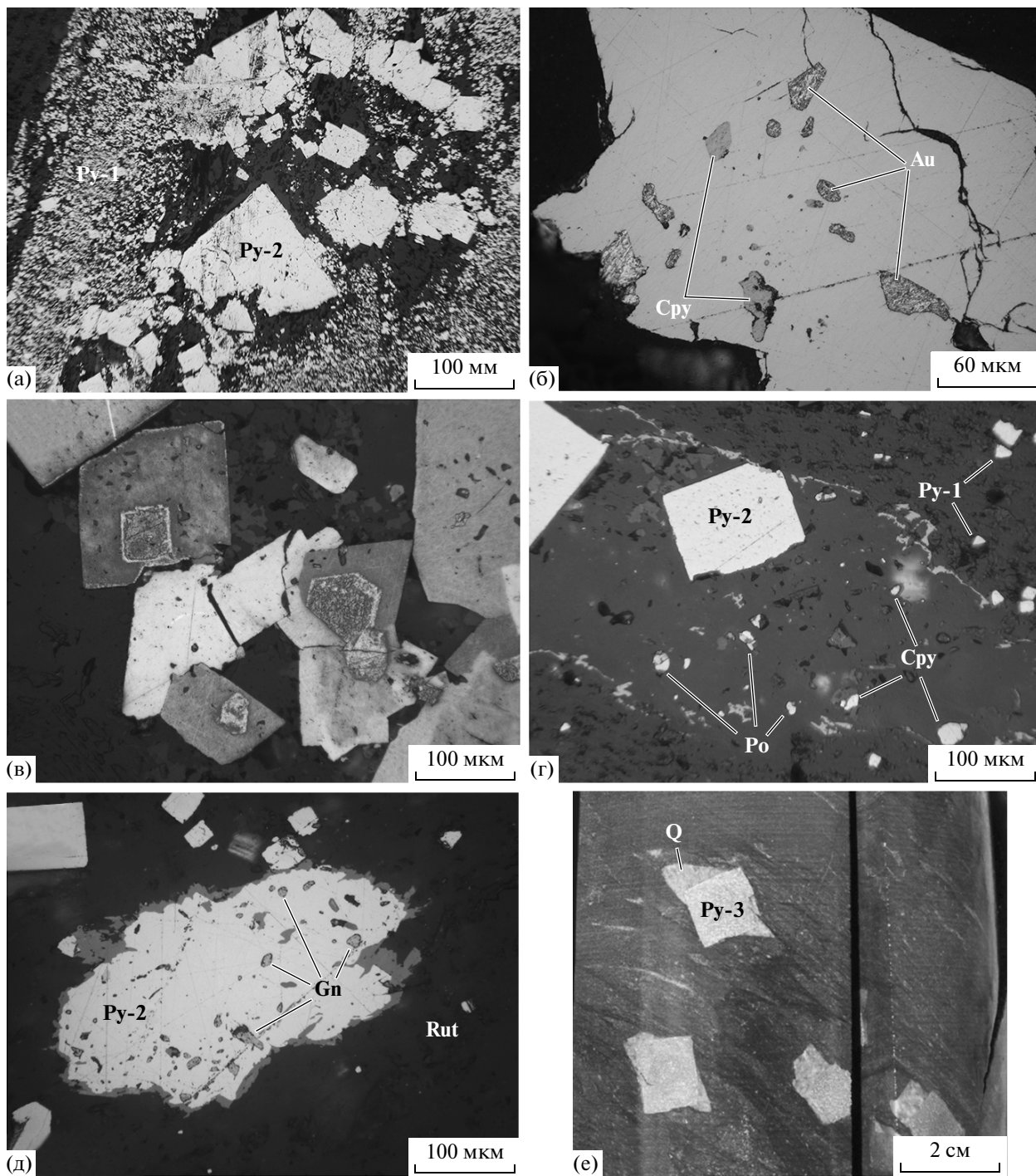
изучалась ввиду ее распространения вне рудных тел и отсутствия связи с другими формами пирита.

Морфологические особенности пирита

Ру-1 образует послойную или рассеянную вкрапленность во вмещающих породах. Мощность обогащенных пиритом слоев не превышает первых сантиметров. Фрамбоиды – наиболее ранняя сингенетическая форма, часто являются заправкой для образования тонкозернистого пирита (фиг. 7а, б) или микроконкреций пирита (ру-1а, см. фиг. 5б). Тонкозернистый пирит образует кубические или игольчатые кристаллы размером до 15 мкм (фиг. 5в). Иногда зонален, обрастает более поздними формами – ру-1а, ру-2, ру-2а (фиг. 7в, г). В прослоях тонкозернистого ру-1 могут присутствовать редкие ксеноморфные зерна халькопирита и галенита.

Ру-1а по отношению к ру-1 более поздний, представлен микроконкрециями размером до 40 мкм (фиг. 7д, е, 5б), заправкой для образования которых служил тонкозернистый пирит, обломки нерудных минералов, скопления рутила. По-видимому, часть таких агрегатов является результатом перекристаллизации микроконкреций марказита. “Дендритовидные” выделения отмечались только на месторождении Кавказ, они разрастаются от вершин кристаллов тонкозернистого пирита (см. фиг. 5г). Ру-1а обрастает, а иногда и замещается ру-2.

Ру-2 тяготеет к прослоям и рассеянным гнездовым выделениям пирита первой группы (см. фиг. 6а), содержит включения фрамбоидов, тонких кристаллов и микроконкреций более раннего пирита (см. фиг. 7). Для ру-2 характерно микропористое строение и включения силикатов, рутила, халькопирита, пирротина, галенита и золота (см. фиг. 6б, д). Иногда внешние каймы

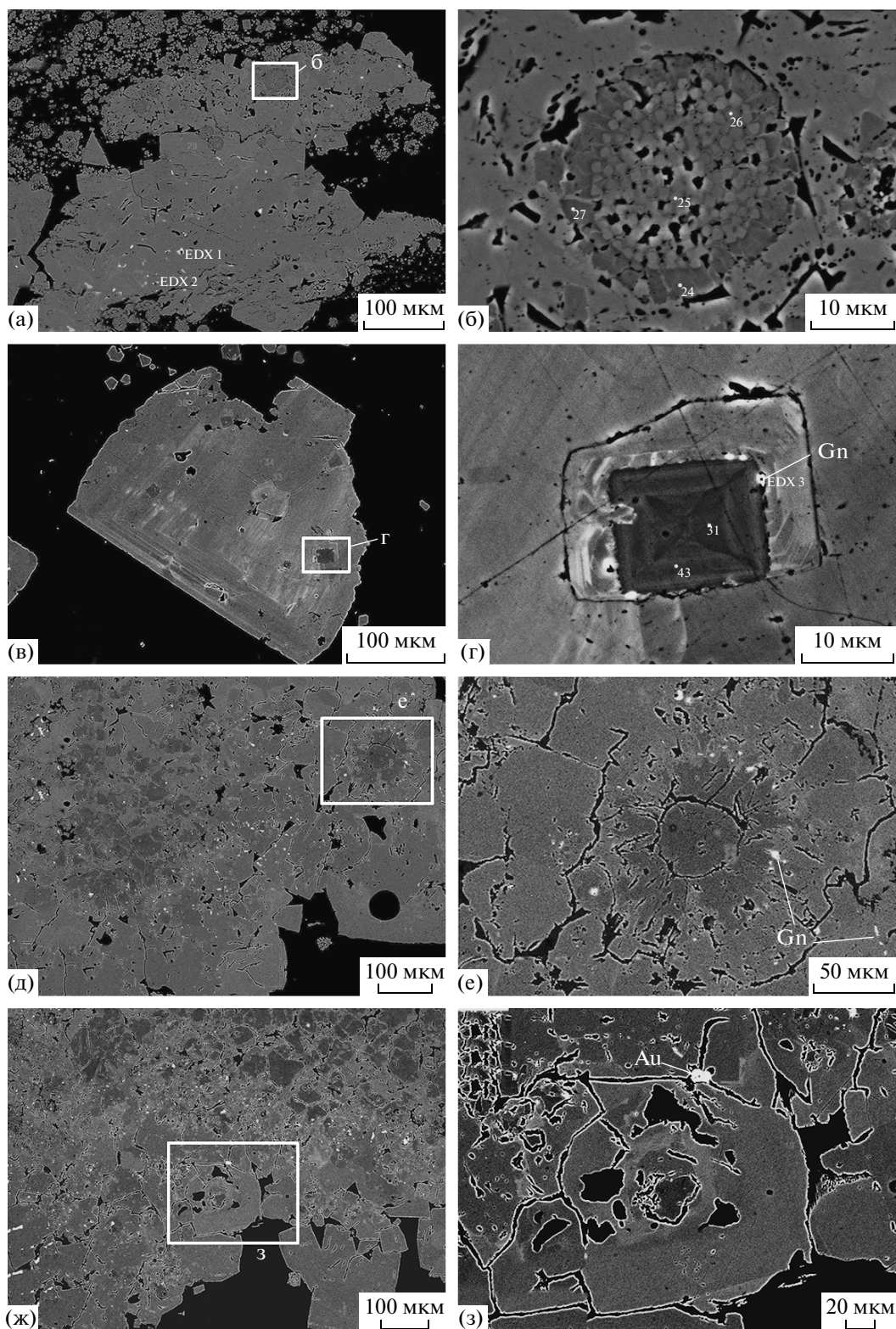


Фиг. 6. Морфология пирита второй и третьей групп.

а – ру-2 в прослое тонкозернистого ру-1 (отраженный свет, Копыловское); б – включения золота (Au) и халькопирита (Сру) в ру-2 (отраженный свет, Кавказ); в – зональное строение кристаллов ру-2а (отраженный свет, травление $KMnO_4 + KOH$, Кавказ); г – кристалл ру-2 и зерна второстепенных сульфидов в кварцевой “микролинзе” (отраженный свет, Копыловское); д – ру-2 с включениями галенита заместил кварцевую “микролинзу”, видна оторочка рутила (отраженный свет, Кавказ); е – кристаллы ру-3 с тенями давления в углеродисто-глинистом сланце (Копыловское).

кристаллические, не содержат тонких включений, но срastaются с крупными зернами второстепенных рудных минералов. Кристаллы ру-2 имеют зональное строение (см. фиг. 7в). Травле-

ние в концентрированной HNO_3 выявляет тени структуры породы в пористых участках. Ру-2 также образуется в кварцевых “микролинзах” с лейкоксеновой оторочкой, которые впоследствии



Фиг. 7. Взаимоотношение разных форм пирита, фото в отраженных электронах, точки соответствуют номерам анализов в табл. 2.

а – затравки фрамбOIDов ру-1 среди ру-2, Кавказ; б – фрамбOID ру-1 с каймой пористого ру-1а, Кавказ; в – реликтовое включение кристалла ру-1 в ру-2; г – включение галенита на контакте ру-1 и ру-2, увеличенный фрагмент (в), Кавказ; д – конкреция ру-1а с обрастаниями кристаллическим ру-2, Копыловское; е – увеличенный фрагмент (д); ж – нарастание ру-2 на ру-1а с включением самородного золота на контакте, Копыловское; з – увеличенный фрагмент (ж).

могут полностью замещаться пиритом (см. фиг. 6д). Совместно с ру-2 в таких агрегатах наблюдаются тонкие выделения пирротина, халькопирита, галенита и минералов никеля, по-видимому, образованные одновременно или почти одновременно с пиритом.

Ру-2а — субгедральный до эвгедрального пирит кварцевых линз и прожилков, имеет сходное с ру-2 строение и время образования. Цепочки зерен или кристаллов ру-2 в кварцевой рубашке часто, сливаясь, образуют послойные пирит-кварцевые линзы и прожилки (см. фиг. 4в, г).

Химический состав пирита

Состав пирита первой и второй групп, определенный на количественном уровне микронзондовым методом, приведен в табл. 2, вариации содержаний микропримесей (Au, Ag, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Tl, As, Sb, Bi, Se, Te, Cr, V, Mo, Sn, W, Ba, U), оцененные методом ЛА-ИСП-МС, — в табл. 3. Необходимо отметить, что размеры выделений фрамбоидального и тонкозернистого пирита (10–20 мкм) значительно меньше диаметра лазерного пучка (25–40 мкм), используемого при проведении ЛА-ИСП-МС, и часть элементов (например, Mn, V, Cr, W, Tl, U, Ba, Sn) может быть связана с захватом нерудной матрицы, в т.ч. с углеродистым веществом вмещающих пород.

Главные макропримеси — As, Ni, Co, в незначительных концентрациях присутствуют Cd и Tl, содержания Au, Ag, Zn, Pb, Cu, Sb, Te, Se обычно ниже предела обнаружения микронзондовым методом или близки к нему (табл. 2), но обнаруживаются более чувствительным методом ЛА-ИСП-МС (табл. 3).

Ру-1 и ру-1а обоих месторождений содержит небольшие количества As (до 0.26 мас. %), Co (от 0.07 до 0.23 мас. %). Однако суммарное содержание примесей в ру-1 и ру-1а незначительно и формулы пирита этой группы близки к стехиометрическим (см. табл. 2).

Ру-2, по сравнению с пиритами первой группы, обогащен Ni и As (по данным рентгеноспектрального микроанализа: Копыловское до 0.34 мас. % Ni и 1.40 мас. % As, Кавказ до 1.13 мас. % Ni и 2.65 мас. % As), а содержания Co в нем примерно такие же, как в пирите-1 (0.02–0.22 мас. %, Копыловское и 0.04–0.33 мас. %, Кавказ) (см. табл. 2). Примеси Ni и As распределены в ру-2 крайне неравномерно. Часто в обратно-рассеянных электронах в нем видна ростовая зональность, в которой зоны, обогащенные Ni и As, чередуются с зонами, свободными от макропримесей (фиг. 8а).

В ру-2, по данным микронзондового анализа, наблюдается более (Кавказ) или менее (Копыловское) отчетливая прямая зависимость между концентрациями Ni и As (фиг. 8б). Коэффициент

парной корреляции Ni–As (для данных СЭМ) составляет 0.81 при минимально значимом 0.47 (для $n = 18$). На месторождении Копыловское в ру-2 наблюдается прямая зависимость между содержаниями Co и Ni (фиг. 8б). Такая же закономерность намечается и для ру-2 месторождения Кавказ, но там имеются единичные анализы с высокими содержаниями Ni и As и низкими — Co.

Помимо заметных количеств As, Co, Ni (первые тысячи ppm), установленных микронзондовым анализом, методом ЛА-ИСП-МС в пирите обнаружены повышенные концентрации Pb, Cu, Sb (первые сотни ppm), Ag, Te, Bi, Mo, Se (первые десятки ppm). Содержания микропримесей значительно варьируют (см. табл. 3). При этом вариации в ру-2 на обоих месторождениях более значительны, чем в ру-1 (фиг. 9а, б, см. табл. 3), и достигают трех–пяти порядков, по сравнению с одним порядком, свойственным ру-1.

Средние содержания большинства изученных элементов в ру-2 по сравнению с ру-1 снижаются (Au, Ag, Co, Pb, Sb, Bi, Te и Ba примерно на один порядок, а Mo и Tl — на два порядка), а количества Ni, Cu, Zn, As и Se незначительно увеличиваются (фиг. 9в). Средние содержания Cd, Hg, Cr, V, Sn, W изменяются незначительно и на разных месторождениях — по-разному. Более детальное рассмотрение на примере четырех генераций пирита месторождения Кавказ показывает постепенное истощение пирита в отношении Au, Ag, Pb, Tl, Sb, Bi и Te и обогащение Ni, Cu, As, Se и U от ру-1 к ру-2а (фиг. 9г).

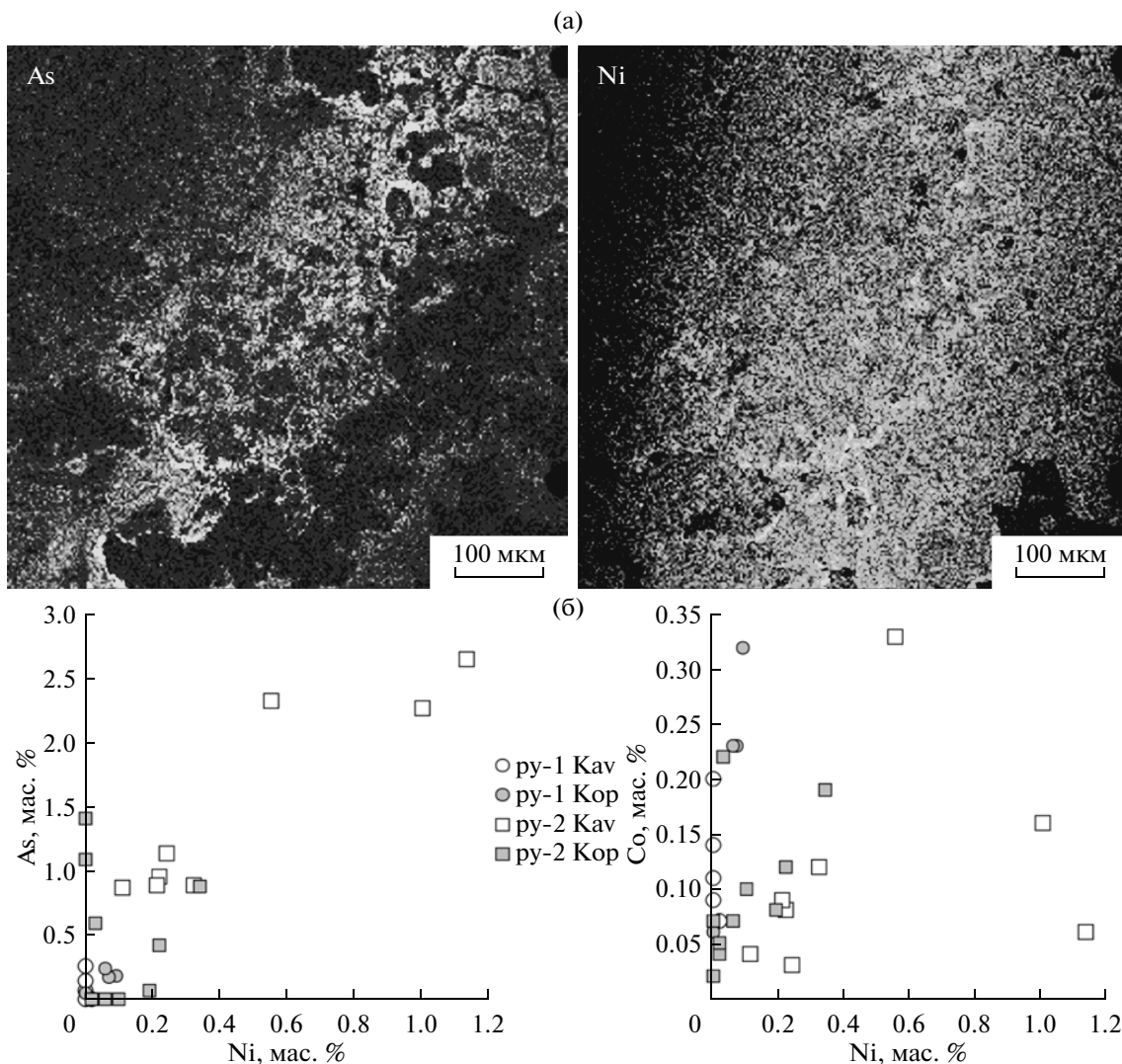
Следует отметить, что в отдельных анализах пирита второй группы фиксируются повышенные содержания Au (до 5.75 г/т), Ag (до 118 г/т), Cu (до 19468 г/т), Zn (до 3813 г/т), Pb (до 448 г/т) (см. табл. 3), что, вероятно, связано с захватом нановключений самородного золота, халькопирита, сфалерита, галенита и др. Если исключить анализы с ураганными содержаниями Au (>1 ppm), то его средняя концентрация в пиритах второй группы месторождений Кавказ и Копыловское составит 0.22 и 0.36 ppm соответственно, что значительно ниже средних содержаний в пирите первой группы, составляющих для Кавказа 0.97 ppm и для Копыловского 2.45 ppm. Наблюдается тенденция положительной связи содержаний Au в пирите всех генераций с Ag, Sb, As, Cu и Te и отсутствие связи Au–Se (фиг. 10).

В целом, на месторождении Кавказ эволюция микропримесей сходна с таковой на Копыловском. Ру-1 и ру-1а по набору и содержанию примесей близки к ру-1а месторождения Копыловское, хотя нужно отметить более широкий диапазон вариаций содержаний всех элементов в ру-1 Кавказа, по сравнению с Копыловским.

Таблица 2. Состав пирита месторождений Кавказ (1–5 и 10–17) и Копыловское (6–9 и 18–27) (мас. %) по данным микронзондового анализа

№ п/п	Тип пирита	No	Sb	Se	Zn	Pb	S	As	Cu	Fe	Cd	Ni	Co	Ti	Σ	Формула
1	py-1	25	—	—	—	0.08	52.85	0.07	—	46.58	0.05	—	0.14	—	99.77	Fe _{1,01} S _{2,00}
2	py-1	26	—	—	—	0.10	51.66	0.14	0.04	45.76	0.20	—	0.20	0.08	98.21	Fe _{1,02} S _{2,00}
3	py-1	27	—	—	—	0.07	52.07	0.26	—	45.53	0.05	—	0.11	—	98.09	Fe _{1,00} S _{2,00}
4	py-1	31	0.04	—	—	0.08	53.68	—	0.04	46.77	—	0.02	0.07	—	100.70	Fe _{1,00} S _{2,00}
5	py-1	41	—	0.05	—	—	52.39	—	—	45.64	0.34	—	0.09	—	98.54	Fe _{1,00} S _{2,00}
6	py-1	22	0.03	—	0.04	—	53.11	0.05	—	46.72	—	—	0.06	—	100.01	Fe _{1,01} S _{2,00}
7	py-1a	8	0.04	—	—	0.06	51.08	0.18	0.07	44.98	0.04	0.09	0.32	0.36	97.22	(Fe _{1,01} Co _{0,01}) _{1,02} S _{2,00}
8	py-1a	12	—	—	—	—	52.04	0.17	0.04	45.30	0.05	0.07	0.23	—	97.96	Fe _{1,00} S _{2,00}
9	py-1a	13	0.05	—	—	0.13	51.83	0.24	0.06	45.49	0.08	0.06	0.23	0.35	98.52	Fe _{1,01} S _{2,00}
10	py-2	28	—	—	—	0.03	51.53	0.89	—	45.55	1.12	0.32	0.12	—	99.56	(Fe _{1,01} Cd _{0,01} Ni _{0,01}) _{1,03} (S _{1,99} As _{0,01}) ₂
11	py-2	32	0.03	—	—	—	52.48	0.96	—	46.83	—	0.22	0.08	—	100.60	Fe _{1,02} (S _{1,98} As _{0,02}) ₂
12	py-2	33	0.04	0.07	—	0.08	52.56	0.87	—	47.24	—	0.11	0.04	—	101.01	Fe _{1,02} (S _{1,98} As _{0,02}) ₂
13	py-2	34	—	0.03	—	0.05	52.27	1.14	—	46.77	—	0.24	0.03	0.29	100.82	Fe _{1,02} (S _{1,98} As _{0,02}) ₂
14	py-2	35	—	—	0.05	—	51.48	2.65	—	44.73	0.11	1.13	0.06	—	100.21	(Fe _{0,98} Ni _{0,02}) _{1,00} (S _{1,96} As _{0,04}) ₂
15	py-2	37	—	—	—	—	51.94	2.26	—	45.81	0.09	1.00	0.16	—	101.26	(Fe _{0,99} Ni _{0,02}) _{1,01} (S _{1,96} As _{0,04}) ₂
16	py-2	40	—	—	0.04	—	52.69	0.89	—	47.07	0.09	0.21	0.09	0.18	101.26	Fe _{1,02} (S _{1,99} As _{0,01}) ₂
17	py-2	42	—	—	—	—	52.23	2.32	0.03	45.76	0.06	0.55	0.33	0.28	101.56	(Fe _{0,99} Co _{0,01} Ni _{0,01}) _{1,01} (S _{1,96} As _{0,04}) ₂
18	py-2	1	—	—	—	—	54.00	—	—	47.30	—	0.02	0.04	—	101.36	Fe _{1,01} S _{2,00}
19	py-2	3	—	—	0.04	0.05	54.08	—	—	46.90	0.13	0.02	0.05	0.09	101.36	Fe _{1,00} S _{2,00}
20	py-2	6	—	—	0.04	0.06	53.98	—	—	47.08	—	0.10	0.10	—	101.36	Fe _{1,00} S _{2,00}
21	py-2	7	—	—	0.03	0.07	52.86	0.88	—	46.26	0.05	0.34	0.19	0.18	100.86	(Fe _{1,00} Ni _{0,01}) _{1,01} (S _{1,99} As _{0,01}) ₂
22	py-2	11	0.08	—	—	0.07	53.60	0.59	0.04	46.38	—	0.03	0.22	—	101.01	Fe _{0,99} (S _{1,99} As _{0,01}) ₂
23	py-2	14	—	—	—	0.09	53.32	0.07	0.04	46.71	—	0.19	0.08	0.38	100.88	Fe _{1,01} S _{2,00}
24	py-2	15	—	0.03	—	0.05	52.59	1.40	—	46.35	—	—	0.02	0.34	100.78	Fe _{1,00} (S _{1,98} As _{0,02}) ₂
25	py-2	17	—	—	0.10	0.05	53.81	—	—	46.81	—	0.06	0.07	—	100.90	Fe _{1,00} S _{2,00}
26	py-2	19	0.08	—	—	0.04	53.62	0.42	0.03	46.35	—	0.22	0.12	0.15	101.03	Fe _{0,99} (S _{1,99} As _{0,01}) ₂
27	py-2	20	—	0.05	—	0.05	52.65	1.09	—	46.22	0.08	—	0.07	—	100.21	Fe _{1,00} (S _{1,98} As _{0,02}) ₂

Примечание. Py-1, py-1a, py-2 — тип пирита в соответствии с описанием в тексте; No — номера точек анализов, соответствуют фиг. 3. Формулы рассчитаны на 2 ат. в позиции аниона. “—” — содержание ниже предела обнаружения. Содержания Rb скорректированы на наложение фона. Ag, Te — ниже предела обнаружения.



Фиг. 8. Распределение основных макропримесей в пирите. а – карта распределения никеля и мышьяка в ру-2, обрастающем конкрецию ру-1а (см. фиг. 7д); б – соотношения никеля, мышьяка и кобальта в пирите разных генераций месторождений Кавказ (Kav) и Копыловское (Kop).

ЗОЛОТО

Золото в рудах золото-сульфидного типа на изученных месторождениях образует округлые включения в пирите второй группы, часто совместные с галенитом и халькопиритом, а также вытянутые зерна, пластинки, цепочки зерен, приуроченные к трещинам или межзерновым границам ру-2 (фиг. 11). Максимальный размер золотин в сечении составляет 0.1 мм. На месторождении Копыловское золото из изометричных включений содержит от 5 до 15 мас. % Ag и до 0.19 мас. % Cu, золото из трещин и межзерновых границ – от 12 до 30 мас. % Ag и до 0.15 мас. % Cu (фиг. 12, табл. 4). Золото Копыловского месторождения характеризуется более широкими вариациями состава за счет изменений содержаний Ag (от 5.67 до 30.81 мас.%),

чем золото месторождения Кавказ (от 16.43 до 19.05 мас.%). При этом в образцах Копыловского месторождения золото, выполняющее трещины, имеет более высокие содержания Ag, чем золото, образующее включения в пирите. Проведенная нами ранее оценка состава пирита с помощью СЭМ с ЭДА показала, что на Копыловском месторождении ру-2, содержащий изометричные включения золота, отличается от пирита, в котором золото находится в трещинах, повышенными содержаниями As: 0.36–0.71 мас. % по сравнению с 0.12 мас. %.

ПРОЧИЕ РУДНЫЕ МИНЕРАЛЫ

Пирротин, халькопирит, галенит и сфалерит распространены довольно широко. Они образуют

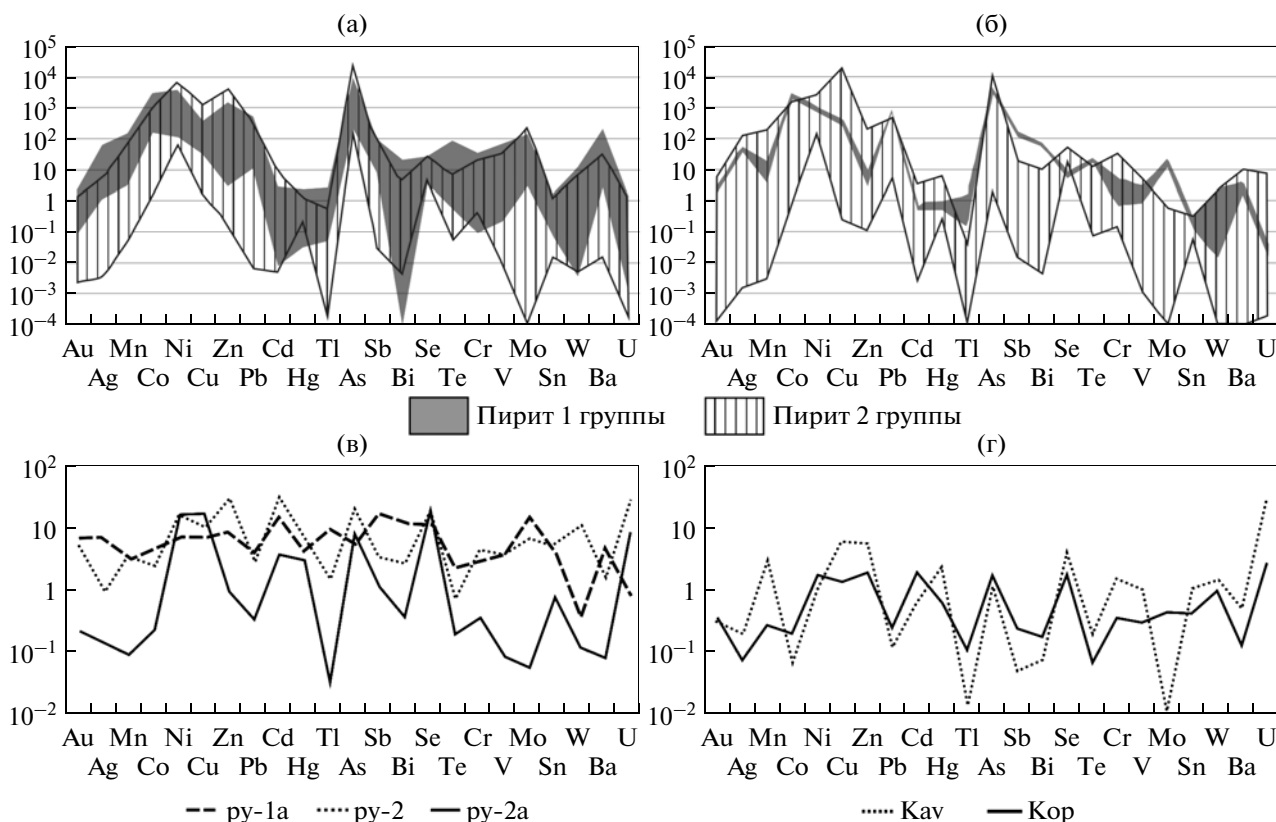
Таблица 3. Содержания важнейших микропримесей в пирите по данным ЛА-ИСП-МС (г/т)

Тип пирита	Py-1, Кавказ (n = 18)	Py-1a, Кавказ (n = 6)	Py-2, Кавказ (n = 10)	Py-2a, Кавказ (n = 5)	Py-1a, Копыловское (n = 11)	Py-2, Копыловское (n = 17)
Au	$\frac{0.09-2.14}{1.02 (0.78)}$	$\frac{0.20-1.13}{0.71 (0.38)}$	$\frac{0.05-1.33}{0.53 (0.45)}$	$\frac{\text{н.о.}-0.06}{0.02 (0.03)}$	$\frac{1.73-2.91}{2.45 (0.33)}$	$\frac{0.00-5.75}{0.79 (1.39)}$
Ag	$\frac{1.14-61.56}{24.62 (21.96)}$	$\frac{7.21-23.84}{17.28 (6.95)}$	$\frac{0.41-5.08}{2.39 (1.63)}$	$\frac{0.00-0.97}{0.34 (0.43)}$	$\frac{38.95-52.74}{45.54 (4.92)}$	$\frac{0.00-118}{8.76 (28.44)}$
Sb	$\frac{7.53-85.26}{39.48 (26.61)}$	$\frac{32.84-90.55}{68.29 (20.45)}$	$\frac{2.64-25.52}{14.23 (6.84)}$	$\frac{0.03-9.63}{4.28 (4.03)}$	$\frac{109-161}{136 (15.48)}$	$\frac{0.02-20.09}{6.89 (5.68)}$
Te	$\frac{0.57-86.18}{29.33 (31.68)}$	$\frac{1.01-11.92}{6.82 (4.52)}$	$\frac{0.13-6.58}{2.17 (2.06)}$	$\frac{0.05-1.14}{0.55 (0.45)}$	$\frac{16.40-22.86}{18.78 (2.18)}$	$\frac{0.08-12.02}{3.60 (4.66)}$
As	$\frac{226-9272}{3162 (2600)}$	$\frac{1045-2217}{1658 (400)}$	$\frac{155-22\ 924}{5904 (7191)}$	$\frac{201-5220}{2607 (2129)}$	$\frac{2886-4849}{3545 (640)}$	$\frac{2.10-10\ 569}{3837 (3950)}$
Se	$\frac{3.64-26.19}{9.79 (5.87)}$	$\frac{6.65-20.98}{11.31 (5.81)}$	$\frac{4.59-25.39}{16.76 (7.32)}$	$\frac{16.00-21.28}{17.42 (2.83)}$	$\frac{5.00-8.34}{6.92 (1.12)}$	$\frac{17.63-51.15}{26.29 (7.11)}$
Bi	$\frac{1.06-19.79}{9.37 (7.40)}$	$\frac{1.92-19.89}{11.79 (7.25)}$	$\frac{0.21-4.31}{2.49 (1.48)}$	$\frac{\text{н.о.}-0.03}{0.34 (0.42)}$	$\frac{52.57-70.48}{57.80 (5.64)}$	$\frac{0.00-10.40}{4.36 (3.40)}$
Cu	$\frac{32.68-382}{153 (104)}$	$\frac{56.47-145}{109 (36.20)}$	$\frac{6.25-818}{164 (250)}$	$\frac{1.54-1156}{262 (504)}$	$\frac{282-412}{354 (39.40)}$	$\frac{0.26-19\ 468}{2124 (5236)}$
Zn	$\frac{5.55-1561}{202 (384)}$	$\frac{2.97-763}{178 (297)}$	$\frac{1.33-3813}{558 (1239)}$	$\frac{0.17-94.15}{19.06 (41.98)}$	$\frac{2.57-9.44}{4.54 (2.44)}$	$\frac{0.11-195}{25.70 (58.45)}$
Pb	$\frac{23.30-570}{281 (197)}$	$\frac{17.20-194}{106 (71.94)}$	$\frac{8.19-341}{81.24 (98.30)}$	$\frac{0.01-22.10}{10.27 (8.98)}$	$\frac{671-884}{741 (67.47)}$	$\frac{0.03-448}{94.47 (129)}$
Cd	$\frac{0.01-2.55}{0.46 (0.63)}$	$\frac{\text{н.о.}-2.77}{0.65 (1.07)}$	$\frac{\text{н.о.}-8.01}{1.36 (2.76)}$	$\frac{0.02-0.73}{0.17 (0.31)}$	$\frac{0.47-0.80}{0.66 (0.11)}$	$\frac{\text{н.о.}-3.49}{0.42 (0.96)}$
Mo	$\frac{3.05-142}{49.86 (42.35)}$	$\frac{44.13-78.26}{65.89 (13.35)}$	$\frac{0.21-226}{33.26 (69.32)}$	$\frac{\text{н.о.}-1.04}{0.26 (0.45)}$	$\frac{14.10-21.51}{17.66 (3.08)}$	$\frac{\text{н.о.}-0.59}{0.18 (0.21)}$
Hg	$\frac{0.36-2.24}{0.96 (0.47)}$	$\frac{0.03-0.77}{0.40 (0.26)}$	$\frac{0.24-1.25}{0.64 (0.34)}$	$\frac{0.20-0.44}{0.29 (0.10)}$	$\frac{0.60-0.95}{0.71 (0.12)}$	$\frac{0.27-6.15}{1.56 (1.72)}$
Co	$\frac{156-2933}{1116 (755)}$	$\frac{194-818}{539 (273)}$	$\frac{41.81-915}{284 (257)}$	$\frac{1.33-61.75}{24.17 (26.05)}$	$\frac{1925-2925}{2378 (321)}$	$\frac{0.87-1414}{165 (347)}$
Ni	$\frac{111-3952}{960 (884)}$	$\frac{415-885}{669 (195)}$	$\frac{61.41-4346}{1527 (2231)}$	$\frac{468-2671}{1616 (804)}$	$\frac{621-987}{780 (119)}$	$\frac{132-2565}{781 (687)}$
V	$\frac{0.22-68.60}{19.04 (17.49)}$	$\frac{1.28-26.82}{7.28 (9.93)}$	$\frac{0.11-31.94}{7.27 (10.15)}$	$\frac{0.01-0.51}{0.16 (0.22)}$	$\frac{0.79-2.83}{1.29 (0.57)}$	$\frac{0.00-5.05}{1.33 (1.78)}$
Cr	$\frac{0.09-35.55}{14.41 (10.66)}$	$\frac{0.77-15.03}{4.14 (5.52)}$	$\frac{0.78-20.87}{6.26 (6.79)}$	$\frac{0.41-0.66}{0.51 (0.10)}$	$\frac{0.69-5.32}{2.49 (1.36)}$	$\frac{0.15-32.23}{3.82 (8.34)}$
Ti	$\frac{3.46-6699}{1011 (2083)}$	$\frac{28.49-87.18}{53.03 (23.06)}$	$\frac{31.58-14\ 504}{2835 (4767)}$	$\frac{0.40-145}{35.92 (62.47)}$	$\frac{8.94-612}{73.11 (176)}$	$\frac{0.51-2733}{462 (703)}$
Mn	$\frac{3.12-152}{49.91 (46.39)}$	$\frac{7.75-26.77}{15.62 (7.38)}$	$\frac{0.81-64.33}{17.13 (21.71)}$	$\frac{0.04-1.16}{0.44 (0.45)}$	$\frac{3.88-17.89}{7.31 (3.97)}$	$\frac{\text{н.о.}-188}{20.82 (46.51)}$

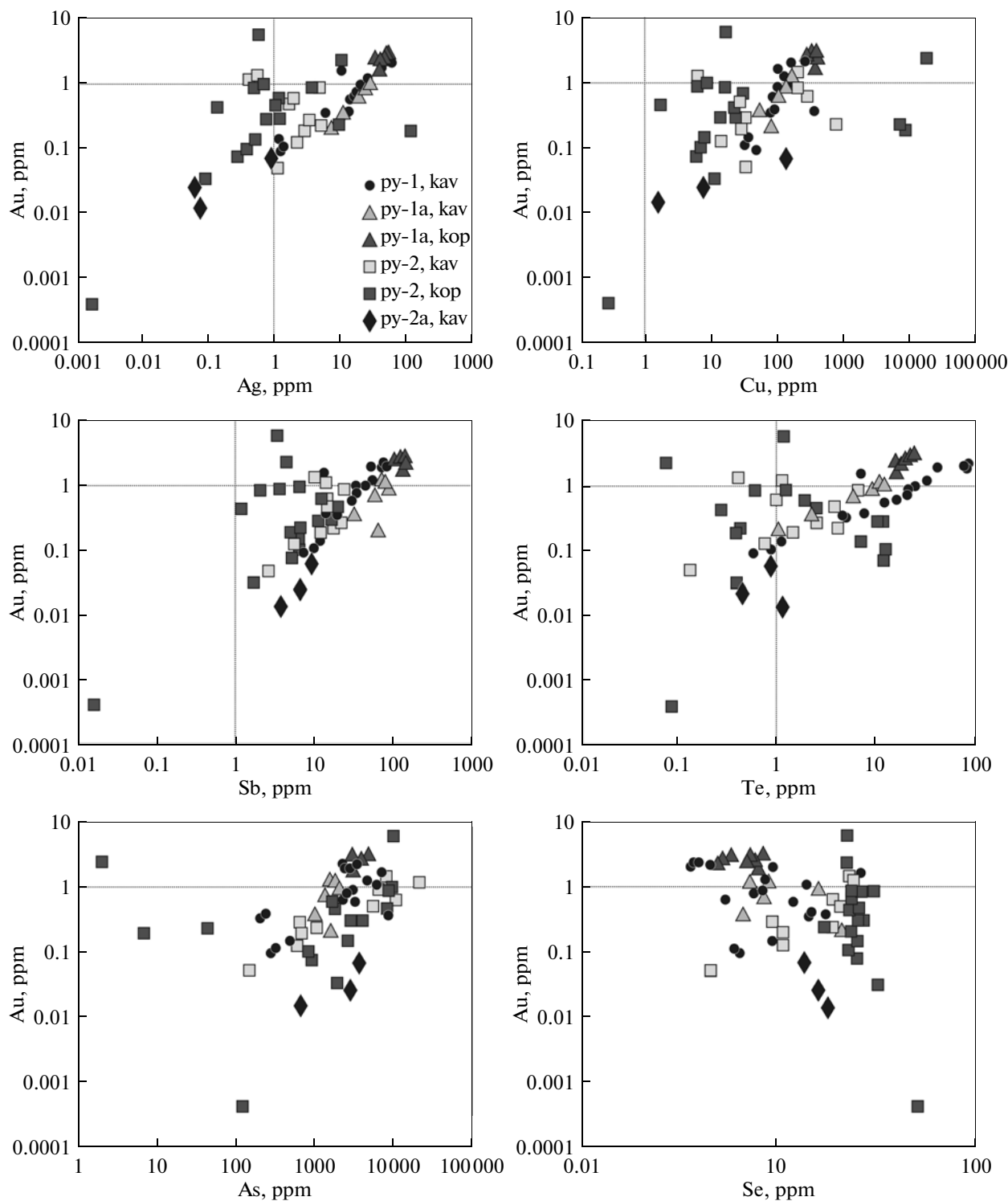
Таблица 3. Окончание

Тип пирита	Py-1, Кавказ (n = 18)	Py-1a, Кавказ (n = 6)	Py-2, Кавказ (n = 10)	Py-2a, Кавказ (n = 5)	Py-1a, Копыловское (n = 11)	Py-2, Копыловское (n = 17)
Sn	$\frac{0.10-1.62}{0.72 (0.38)}$	$\frac{0.08-0.88}{0.29 (0.30)}$	$\frac{0.06-1.15}{0.37 (0.35)}$	$\frac{0.02-0.11}{0.05 (0.04)}$	$\frac{0.12-0.30}{0.17 (0.05)}$	$\frac{0.06-0.32}{0.18 (0.09)}$
W	$\frac{0.00-11.71}{1.55 (3.39)}$	$\frac{0.01-0.10}{0.06 (0.03)}$	$\frac{0.01-6.55}{1.73 (2.31)}$	$\frac{\text{н.о.}-0.04}{0.01 (0.02)}$	$\frac{0.01-2.29}{0.24 (0.68)}$	$\frac{\text{н.о.}-2.22}{0.34 (0.57)}$
Tl	$\frac{0.05-2.59}{0.81 (0.75)}$	$\frac{0.57-0.98}{0.80 (0.16)}$	$\frac{0.01-0.53}{0.13 (0.17)}$	$\frac{0.001-0.01}{0.003 (0.002)}$	$\frac{0.14-1.48}{0.61 (0.44)}$	$\frac{0.00-0.04}{0.01 (0.01)}$
Ba	$\frac{2.96-213}{51.16 (53.73)}$	$\frac{3.12-88.56}{22.51 (33.30)}$	$\frac{0.23-31.20}{8.44 (9.16)}$	$\frac{0.01-1.45}{0.39 (0.60)}$	$\frac{1.43-4.12}{2.45 (0.81)}$	$\frac{0.00-9.89}{1.26 (3.12)}$
U	$\frac{\text{н.о.}-1.52}{0.20 (0.36)}$	$\frac{0.002-0.04}{0.02 (0.02)}$	$\frac{0.04-1.15}{0.57 (0.46)}$	$\frac{\text{н.о.}-0.58}{0.18 (0.26)}$	$\frac{0.02-0.04}{0.03 (0.01)}$	$\frac{\text{н.о.}-7.79}{0.81 (1.89)}$

Примечание. В таблице указан тип пирита в соответствии с описанием в тексте. В скобках указано количество анализов (n = 18). Содержания микропримесей приведены в следующем порядке: в числителе – диапазон (от...до) в знаменателе – среднее арифметическое, в скобках – стандартное отклонение. Н.о. – ниже предела обнаружения (различен для разных элементов).



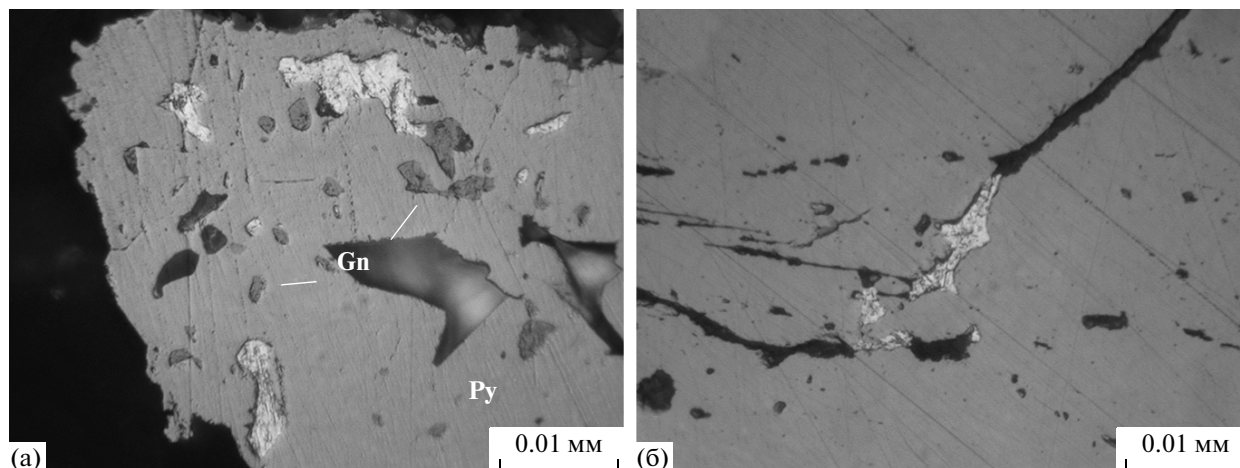
Фиг. 9. Распределение элементов-примесей в пирите разных генераций по данным ЛА-ИСП-МС. Вариации содержания в пиритах первой и второй групп на месторождениях Кавказ (а) и Копыловское (б), вертикальная ось – содержания в ppm; в – средние содержания в py-1a, py-2 и py-2a, нормированные на средние содержания в py-1, месторождения Кавказ; г – средние содержания в пиритах второй группы (py-2 + py-2a), нормированные на средние содержания в пирите первой группы (py-1 + py-1a) в месторождениях Кавказ (Kav) и Копыловское (Kop).



Фиг. 10. Бинарные диаграммы Au–Ag, Au–Cu, Au–Sb, Au–Te, Au–As, Au–Se (г/т). kop – Копыловское, kav – Кавказ. Тип пирита соответствует описанию в тексте. Данные ЛА-ИСП-МС.

включения и вроски в пирите второй группы, развиваются в интерстициях пирита, встречаются в виде свободных зерен в нерудных минералах, взаимных сростаний, в кварцевых “микролинзах”

и прожилках. Размер выделений составляет от нескольких микрон до 1 мм. В пирротине иногда наблюдаются пламенивидные выделения *пентландита*, по пирротину развивается *марказит*. В галените



Фиг. 11. Золото в пирите.

а – включения золота (светлое) и галенита (Gn); б – золото в трещине. Копыловское месторождение.

установлены примеси (мас. %): Se до 0.32, Fe до 0.54, Bi до 0.42, Ag до 0.08; в сфалерите (мас. %) – Fe до 1.33, Cd до 0.27 (данные микрозондового анализа).

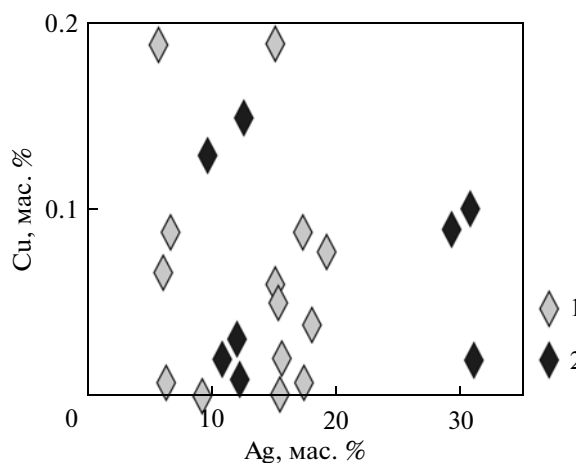
Минералы никеля и кобальта встречаются в виде включений в пирите, свободных зерен в нерудной матрице и различных сростков в пределах кварцевых “микролинз”. Наиболее распространен герсдорфит, менее – кобальтин, миллерит и пентландит, имеются единичные находки виоларита и ульманнита. На обоих месторождениях герсдорфит и кобальтин обогащены Fe: до 11 мас. % в герсдорфите и до 7 мас. % в кобальтине (табл. 5, фиг. 13).

Арсенопирит встречается в единичных случаях в виде включений размером около 5 мкм в ру-2. Молибденит образует редкие чешуйки размером до 100 мкм в углеродисто-глинистых сланцах. Магнетит и ильменит встречаются в составе кварцевых “микролинз” и прожилков в сростках с халькопиритом, пиритом второй группы, лейкоксеном, железистым карбонатом.

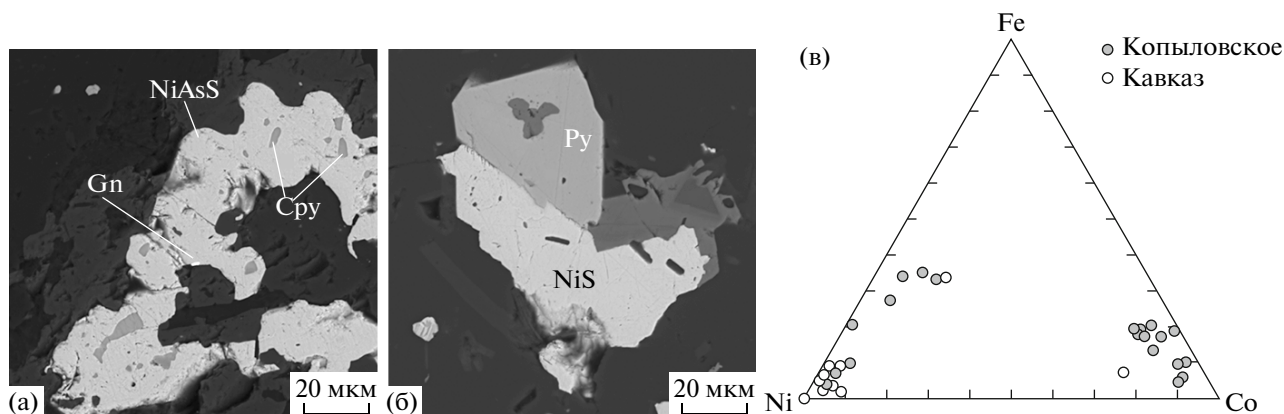
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что черносланцевые толщи, так же как и угли, характеризуются повышенными концентрациями многих цветных металлов, мышьяка, селена, а также урана (Юдович, Кетрис, 1994). Формам нахождения этих элементов в осадочных породах посвящена обширная и часто противоречивая литература. Наиболее детально рассмотрен вопрос о форме осаждения золота, которое в черных сланцах присутствует в трех формах: $Au_{орг}$, $Au_{сульф}$ (коллоидно-дисперсное Au^0 , сорбированное на поверхности пирита, реже арсенопирита) и Au^0 (самородное). Для неизменных черных сланцев характерны только две первые формы. В процессе их преобразования происходит переотложение пирита и преобразование органического

вещества, при этом высвобождается не только золото, но и другие металлы, которые затем могут многократно переотлагаться (Юдович, Кетрис, 1994). Выполненный нами химико-битуминологический анализ показал, что рассеянное в породах органическое вещество, представленное преимущественно $C_{орг}$ с незначительным содержанием углеводородов, прошло все стадии катагенетического преобразования. Следовательно, содержание металлов в форме металлоорганических и сорбированных коллоидно-дисперсных соединений должно составлять ничтожно малые величины по сравнению с минеральными формами. Однако непосредственно при накоплении углеродистых осадков Бодайбинского района органическое вещество могло являться важным концентратом цветных и благородных метал-



Фиг. 12. Содержание примесей в золоте по данным микрозондового анализа: 1 – включения золота в пирите; 2 – золото в трещинах в пирите.



Фиг. 13. Минералы никеля и кобальта. а – выделение герсдорфита (NiAsS) с включениями халькопирита (Cpy) и галенита (Gn); б – сросток пирита (Py) с миллеритом (NiS) и зональным железом-магнезиальным карбонатом; в – состав герсдорфита и кобальтина на треугольной диаграмме (ат. %), СЭМ с ЭДА, Vega 3 Tescan.

лов, а также урана. Важно также учесть, что осадконакопление в восстановительных условиях практически всегда сопровождается осаждением сингенетических сульфидов, которые также можно рассматривать в качестве концентратора цветных металлов и полуметаллов (мышьяка, сурьмы, висмута). С позиций термодинамики для большинства элементов-примесей неорганическая (в виде сульфидов) и сорбированная (на поверхности углеродистого вещества, сульфидов, глинистых минералов) формы предпочтительнее неустойчивых металлоорганических комплексов практически для всех элементов-примесей (Эльштейн, 2011), т.е. даже при наличии таких соединений в нелитифицированных осадках, в процессе диагенеза они быстро разрушаются с образованием неорганических минеральных форм.

Таким образом, поведение элементов-примесей в углеродистых осадках рассмотренных месторождений в наиболее общем виде может быть представлено следующей последовательностью. 1) Сингенетичное накопление в формах, связанных с органическим веществом и наиболее ранними сульфидами. 2) Высвобождение сорбированных металлов и серы из углеводородных соединений при начальном преобразовании органического вещества в процессе диагенеза, вхождение примесей в состав диагенетического пирита. 3) Высвобождение примесей при перекристаллизации сингенетического пирита и преобразовании глинистых минералов (особенно важно для урана), формирование поздних генераций кристаллического пирита в ассоциации с сульфидами и сульфосолями цветных металлов, самородного золота в виде микровключений в пирите и свободных зерен. Последующие процессы динамометаморфизма также могут приводить к локальному растворению рудных минералов, мобилизации и переотложению металлов в наиболее

благоприятных структурных позициях (замки складок, зоны влияния глубинных разломов).

Представленная модель хорошо согласуется с данными, полученными при исследовании состава пирита различных генераций. Согласно полученным нами данным анализа методом ЛА-ИСП-МС, в целом более поздние генерации пирита истощаются по отношению к большинству элементов-микропримесей. Содержание таких примесей, как Au, Ag, Co, Pb, Sb, Bi, Te, Ba, Mo и Tl, на обоих изученных месторождениях снижается от раннего осадочно-диагенетического пирита (py-1 и py-1a) к позднему, образованному в процессах катагенеза и метаморфизма (py-2 и py-2a). Содержания Ni, Cu, Zn, As и Se в более позднем пирите незначительно повышаются. Поведение Cd, Hg, Cr, V, Sn, W на разных месторождениях различается, но в целом содержания этих элементов варьируют незначительно. Обращает на себя внимание увеличение содержания U в пирите второй группы, особенно заметное на Копыловском месторождении. Кроме того, для пирита второй группы на обоих месторождениях наблюдаются гораздо более существенные вариации содержаний микропримесей, а также их ураганные значения.

По нашему мнению, поведение элементов-примесей в пирите изученных месторождений связано в наибольшей мере с их перераспределением при переотложении сульфидов. Морфология пирита первой группы (фрамбоиды, конкреции), с одной стороны, указывает на их быстрое осаждение из пересыщенных растворов (Farand, 1970; Краснова, Петров, 1995), способствующее захвату “условно” изоморфных примесей, а с другой – характеризуется значительной удельной поверхностью, способствующей сорбции растворенных металлов. Пирит второй группы образует более крупные зональные кристаллы и содержит как синхронные включения других сульфидов,

Таблица 4. Состав золота месторождений Копыловское (1–22) и Кавказ (23–26) (мас. %)

№ п/п	Cu	Ag	Au	Сумма	Формула	Тип золота
1	0.19	5.67	94.09	99.95	$Au_{0.89}Ag_{0.10}Cu_{0.01}$	Включение
2	0.01	6.47	93.54	100.02	$Au_{0.89}Ag_{0.11}$	Включение
3	0.07	6.21	93.73	100.01	$Au_{0.89}Ag_{0.11}$	Включение
4	0.09	6.84	92.92	99.85	$Au_{0.88}Ag_{0.12}$	Включение
5	0.06	15.13	84.88	100.07	$Au_{0.75}Ag_{0.25}$	Просечка
6	0.05	15.37	84.43	99.86	$Au_{0.75}Ag_{0.25}$	Просечка
7	0.02	15.67	84.32	100.01	$Au_{0.75}Ag_{0.25}$	Просечка
8	–	15.45	84.45	99.90	$Au_{0.75}Ag_{0.25}$	Просечка
9	0.19	15.06	84.75	100.00	$Au_{0.75}Ag_{0.24}Cu_{0.01}$	Просечка
10	0.01	12.28	87.60	99.90	$Au_{0.80}Ag_{0.20}$	Просечка
11	0.03	11.90	87.92	99.84	$Au_{0.80}Ag_{0.20}$	Просечка
12	0.15	12.49	87.26	99.90	$Au_{0.79}Ag_{0.21}$	Просечка
13	0.02	10.68	89.29	99.99	$Au_{0.82}Ag_{0.18}$	Просечка
14	0.13	9.56	90.18	99.87	$Au_{0.83}Ag_{0.17}$	Просечка
15	–	9.37	90.58	99.95	$Au_{0.84}Ag_{0.16}$	Просечка
16	0.09	17.29	82.53	99.91	$Au_{0.72}Ag_{0.28}$	Просечка
17	0.04	17.88	82.02	99.94	$Au_{0.71}Ag_{0.29}$	Просечка
18	0.01	17.25	82.62	99.88	$Au_{0.72}Ag_{0.28}$	Просечка
19	0.08	19.25	80.68	100.01	$Au_{0.70}Ag_{0.30}$	Просечка
20	0.10	30.50	69.28	99.88	$Au_{0.55}Ag_{0.45}$	Просечка
21	0.09	29.63	70.25	99.97	$Au_{0.56}Ag_{0.44}$	Просечка
22	0.02	30.81	69.10	99.93	$Au_{0.55}Ag_{0.45}$	Просечка
23	–	16.43	83.61	100.04	$Au_{0.74}Ag_{0.26}$	Просечка
24	–	18.13	81.89	100.02	$Au_{0.71}Ag_{0.29}$	Просечка
25	–	19.05	80.93	99.98	$Au_{0.70}Ag_{0.30}$	Просечка
26	–	15.96	83.99	99.95	$Au_{0.74}Ag_{0.26}$	Просечка

Примечание. Формулы рассчитаны на сумму катионов. “–” содержания ниже предела обнаружения.

так и пойкилитовые вроски силикатных минералов и рутила, наследующие структуру исходного осадка, что свидетельствует об их метасоматическом и более медленном, чем у седиментогенного пирита, росте. При этом возможности изоморфного вхождения примесей в пирит снижаются, но увеличивается вероятность захвата нановключений собственных минеральных фаз, с чем и связаны ураганные содержания некоторых элементов в позднем пирите.

Несколько отличается поведение Ni, Cu, Zn, As, Se и U, которые накапливаются в более поздних генерациях пирита. Источником этих элементов, помимо сингенетических сульфидов, также может являться углеродистое вещество.

Вариации химического состава пирита из других месторождений черносланцевых толщ Бодайбинского района изучены мало. Детально и на современном уровне эволюция состава разных генераций пирита рассмотрена только для

месторождения Сухой Лог в работе (Large *et al.*, 2007). Авторами установлены заметные содержания золота в раннем фрамбоидальном и тонкозернистом пирите (0.4–12.1 ppm) и показано, что от ранних генераций пирита к поздним снижались содержания Au, Ag, Te, Sb, Pb, Cu, Zn, Mo, а концентрации Ni, Co, As и Se либо не изменялись, либо увеличивались. То есть в целом направление эволюции химического состава пирита месторождения Сухой Лог сходно, но не аналогично установленному нами для месторождений Копыловское и Кавказ. Первичное обогащение осадочного пирита Au, Ag, Te, Pb, Sb, Bi, Mo имело место и в хомолхинской свите среднего–верхнего рифея R₂₋₃hm (Сухой Лог), и в догалдынской свите вендского возраста Vdg (Копыловское и Кавказ), в то время как поведение таких металлов, как Cu, Zn, Co, Ni, As и Se, не столь однозначно. Наиболее вероятной причиной различия в поведении этих элементов на мелких месторож-

Таблица 5. Состав герсдорфита и кобальтина месторождений Копыловское (1–22) и Кавказ (23–33) (мас. %)

№ п/п	№ лаб.	S	Fe	Co	Ni	As	Sb	Сумма	Формула
1	13461a	18.65	3.26	2.20	29.39	45.87	—	99.38	(Ni _{0.84} Fe _{0.10} Co _{0.06}) _{1.00} As _{1.03} S _{0.97}
2	13461e	18.94	9.42	2.57	23.51	45.47	—	99.91	(Ni _{0.67} Fe _{0.28} Co _{0.07}) _{1.02} As _{1.01} S _{0.99}
3	13461g	18.63	11.75	3.95	18.92	45.89	—	99.15	(Ni _{0.54} Fe _{0.35} Co _{0.11}) _{1.00} As _{1.03} S _{0.97}
4	13461h	18.68	11.40	5.55	18.40	45.15	—	99.17	(Ni _{0.53} Fe _{0.34} Co _{0.16}) _{1.03} As _{1.02} S _{0.98}
5	13466a	18.67	1.44	—	34.66	44.62	—	99.39	(Ni _{1.00} Fe _{0.04}) _{1.05} As _{1.01} S _{0.99}
6	13464a	18.55	1.43	1.34	33.13	44.27	0.37	99.10	(Ni _{0.96} Fe _{0.04} Co _{0.04}) _{1.05} As _{1.01} S _{0.98} Sb _{0.01}
7	13464g	18.50	2.18	0.47	32.58	46.62	0.43	100.77	(Ni _{0.92} Fe _{0.06} Co _{0.01}) _{0.99} As _{1.03} S _{0.96} Sb _{0.01}
8	13464i	18.66	2.48	1.52	31.78	45.55	0.49	100.48	(Ni _{0.91} Fe _{0.07} Co _{0.04}) _{1.02} As _{1.02} S _{0.97} Sb _{0.01}
9	13464k	18.77	7.08	0.53	28.16	44.68	—	99.22	(Ni _{0.81} Fe _{0.21} Co _{0.02}) _{1.04} As _{1.01} S _{0.99}
10	13524a	19.62	11.21	2.34	20.33	45.63	—	99.13	(Ni _{0.57} Fe _{0.33} Co _{0.07}) _{0.96} As _{1.00} S _{1.00}
11	13461f	20.00	6.59	25.82	3.29	43.92	—	99.62	(Co _{0.72} Fe _{0.20} Ni _{0.09}) _{1.01} As _{0.97} S _{1.03}
12	13461i	20.10	6.32	25.81	3.51	43.68	—	99.42	(Co _{0.72} Fe _{0.19} Ni _{0.10}) _{1.01} As _{0.96} S _{1.04}
13	13461j	19.70	5.91	25.95	3.22	45.12	—	99.90	(Co _{0.72} Fe _{0.17} Ni _{0.09}) _{0.99} As _{0.99} S _{1.01}
14	13461k	19.52	6.34	24.74	3.63	45.25	—	99.48	(Co _{0.69} Fe _{0.19} Ni _{0.10}) _{0.98} As _{1.00} S _{1.00}
15	13464b	20.68	3.39	31.75	1.80	43.14	—	100.77	(Co _{0.88} Fe _{0.10} Ni _{0.05}) _{1.03} As _{0.94} S _{1.06}
16	13464c	23.56	6.66	29.81	0.41	39.48	—	99.91	(Co _{0.80} Fe _{0.19} Ni _{0.01}) _{1.00} As _{0.84} S _{1.16}
17	13464d	19.46	1.58	30.50	2.47	45.22	—	99.23	(Co _{0.86} Ni _{0.07} Fe _{0.05}) _{0.97} As _{1.00} S _{1.00}
18	13464e	20.15	2.00	31.92	2.05	43.64	—	99.77	(Co _{0.89} Fe _{0.06} Ni _{0.06}) _{1.01} As _{0.96} S _{1.04}
19	13464f	21.41	3.47	31.53	1.05	41.86	—	99.32	(Co _{0.87} Fe _{0.10} Ni _{0.03}) _{1.00} As _{0.91} S _{1.09}
20	13464j	21.28	6.07	28.90	1.92	41.12	—	99.29	(Co _{0.81} Fe _{0.18} Ni _{0.05}) _{1.04} As _{0.91} S _{1.09}
21	13464k'	22.36	6.92	26.51	2.11	41.35	—	99.25	(Co _{0.72} Fe _{0.20} Ni _{0.06}) _{0.98} As _{0.88} S _{1.12}
22	13464l'	20.15	4.49	27.49	3.19	43.78	—	99.10	(Co _{0.77} Fe _{0.13} Ni _{0.09}) _{0.99} As _{0.96} S _{1.04}
23	14037a	18.35	2.07	—	33.54	45.17	—	99.12	(Ni _{0.97} Fe _{0.06}) _{1.03} As _{1.03} S _{0.97}
24	14037b	18.73	11.62	6.39	17.55	44.94	—	99.23	(Ni _{0.51} Fe _{0.35} Co _{0.18}) _{1.04} As _{1.01} S _{0.99}
25	14037d	18.26	2.01	0.61	31.80	46.76	—	99.44	(Ni _{0.91} Fe _{0.06} Co _{0.02}) _{0.99} As _{1.05} S _{0.95}
26	14037e	18.60	2.94	0.66	30.78	46.08	—	99.06	(Ni _{0.88} Fe _{0.09} Co _{0.02}) _{0.99} As _{1.03} S _{0.97}
27	14068b	18.38	2.93	1.50	29.37	46.70	0.27	99.15	(Ni _{0.83} Fe _{0.09} Co _{0.04}) _{0.96} As _{1.04} S _{0.96}
28	14068e	18.42	1.07	—	33.58	46.55	0.13	99.75	(Ni _{0.96} Fe _{0.03}) _{0.99} As _{1.04} S _{0.96}
29	14069a	18.20	0.53	2.96	31.62	47.15	—	100.46	(Ni _{0.90} Co _{0.08} Fe _{0.02}) _{1.00} As _{1.05} S _{0.95}
30	14069b	18.35	1.18	1.84	31.99	46.14	—	99.50	(Ni _{0.92} Co _{0.05} Fe _{0.04}) _{1.01} As _{1.04} S _{0.96}
31	14069f	18.34	0.83	1.15	32.24	46.73	—	99.28	(Ni _{0.92} Co _{0.03} Fe _{0.02}) _{0.97} As _{1.04} S _{0.96}
32	14069j	18.07	1.60	0.57	33.10	45.69	—	99.04	(Ni _{0.96} Fe _{0.05} Co _{0.02}) _{1.03} As _{1.04} S _{0.96}
33	14068c	19.30	2.39	25.57	6.71	44.89	0.43	99.30	(Co _{0.72} Ni _{0.19} Fe _{0.07}) _{1.02} As _{0.99} S _{1.00} Sb _{0.01}

Примечание. Формулы рассчитаны на 2 атома в позиции аниона. Герсдорфит — № п/п 1–10 и 23–32, кобальтин — 11–22, 33. “—” содержания ниже предела обнаружения.

дениях Кавказ и Копыловское и месторождения-гиганте Сухой Лог является полигенность последнего, его более длительная и сложная история.

Повышенные содержания золота (до нескольких ppm) в сингенетичном фрамбоидальном пирите из осадков, вмещающих орогенные золоторудные месторождения, — довольно распространенное явление (Large *et al.*, 2011; Sack *et al.*, 2014). В частности, в работе (Large *et al.*, 2011) предложено считать содержания золота в осадочном и

диагенетическом пирите выше 250 ppb благоприятным поисковым признаком для орогенных месторождений и месторождений типа Карлин. Помимо золота, осадочный пирит также концентрировал ряд цветных металлов.

Более того, предположения о первично осадочном источнике золота для формирования мезотермальных месторождений золота в зеленокаменных поясах высказывались Р. Гольдфарбом с соавторами (Goldfarb *et al.*, 2005).

Сказанное выше позволяет предполагать, что значительная часть цветных и благородных металлов месторождений Копыловское и Кавказ была заимствована из осадочного пирита и углеродистого вещества вмещающих толщ в процессах диагенеза, катагенеза и низкоградного метаморфизма и перекристаллизации пирита.

ВЫВОДЫ

В составе золото-сульфидного типа руд на месторождениях Копыловское и Кавказ преобладает пирит с подчиненным количеством сульфидов меди, свинца, цинка, никеля и кобальта. Золото образует включения и развивается в трещинах кристаллов пирита.

Морфологические разновидности пирита из минерализации золото-сульфидного типа объединяются в две генетические группы. Образование фрамбоидального и тонкокристаллического пирита первой группы связано с сингенетическими и диагенетическими процессами преобразования пелитовых пород, обогащенных органическим углеродом. Субгедральный до эвгедрального тонкозернистый пирит второй группы формировался при катагенезе, метаморфизме и динамометаморфизме. От пирита первой группы к пириту второй наблюдается уменьшение содержания Au, Ag, Co, Pb, Sb, Bi, Te, Ba, Mo и Tl и увеличение — Ni, Cu, As, Se, наиболее значительно — U. Пирит второй группы характеризуется явно выраженной ростовой химической зональностью и микровключениями золота и собственных минералов цветных металлов.

В процессе метаморфизма на месторождениях Копыловское и Кавказ происходило преобразование и очищение сингенетических форм пирита, а также органического вещества, ремобилизация металлов и их перетолжение в сульфидной (цветные металлы) и самородной (золото, часть серебра) формах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллектив ООО “Копыловский” за помощь во время полевых работ, Л. Данюшевского (CODES) за содействие проведению ЛА-ИСП-МС анализов, В.А. Коваленкера и М.А. Юдовскую (ИГЕМ РАН) за критические замечания, значительно улучшившие статью. Работы проводились в рамках бюджетной темы лаборатории минералогии рудогенеза ИМин УРО РАН и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13–05–00144а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аксенов И.М.* Отчет о результатах геологоразведочных работ 2000–2004 г. с подсчетом запасов в пределах золоторудного месторождения “Копыловское” по состоянию на 01.09.2004. ООО “Угрюм-река”, Бодайбо–Иркутск, 2004ф.
- Беневольский Б.И.* Золото России. М.: ООО “Геоинформмарк”, 2002.
- Бортникова С.Б.* Информационная записка по теме: Изучение вещественного состава руды ООО “Угрюм-река” месторождения “Копыловское”. Новосибирск, 2001ф.
- Буряк В.А.* Метаморфизм и рудообразование. М.: Недра, 1982.
- Буряк В.А., Бакулин Ю.И.* Металлогения золота. Владивосток: Дальнаука, 1998.
- Вамбольдт А.Я., Краснощеков А.Н., Власова Н.А.* Отчет по результатам геологоразведочных работ, выполненных в 2010 году. Бодайбо, 2011ф.
- Вамбольдт А.Я., Божко Е.Н., Синюков Ю.Д.* Отчет о результатах геологоразведочных работ на лицензионной площади “Кавказ”, выполненных в 2011 году (О-50-ХIII, Бодайбинский район). Бодайбо, 2012ф.
- Дубинина Е.О., Иконникова Т.А., Чугаев А.В.* Неоднородность изотопного состава серы пирита на месторождении Сухой Лог и определяющие ее факторы // Докл. РАН. 2010. Т. 435. № 6. С. 786–790.
- Иванов А.И.* Месторождение “Ожерелье” – новый тип коренных месторождений в Бодайбинском рудном районе // Известия СО РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2008. Т. 32. № 6. С. 14–26.
- Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н., Розинова Е.Л.* Термический анализ минералов и горных пород. Л.: Недра, 1974.
- Иконникова Т.А., Дубинина Е.О., Сароян М.Р., Чугаев А.В.* Изотопный состав кислорода жильного кварца и вмещающих пород на месторождении Сухой Лог (Россия) // Геология руд. месторождений. 2009. Т. 51. № 6. С. 560–567.
- Кондратенко А.К.* Магматические комплексы центральной части Ленской провинции и их металлогеническая специализация. М.: Недра, 1977.
- Краснова Н.И., Петров Т.Г.* Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб.: Невский курьер, 1995.
- Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А.* Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным // Геохимия. 2009. № 10. С. 1108–1118.
- Лаверов Н.П., Лишневецкий Э.Н., Дистлер В.В., Чернов А.А.* Модель рудно-магматической системы золото-платинового месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия) // Докл. АН. 2000. Т. 375. № 5. С. 652–656.
- Лаверов Н.П., Чернышев И.В., Чугаев А.В. и др.* Этапы формирования крупномасштабной благороднометальной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия): результаты изотопно-геохронологического изучения // Докл. РАН. 2007. Т. 415. № 2. С. 236–241.
- Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А.* Биогенно-седиментацион-

- ные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 729–747.
- Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Заботина М.В. Минералого-геохимическая характеристика углеродистых толщ золоторудных объектов Артемовского узла (Бодайбинский район) // Известия СО РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2013. Т. 43. № 2. С. 29–36.
- Романов Г.В., Эпов Е.А. Отчет о результатах геологоразведочных работ в пределах месторождения Кавказ с подсчетом запасов рудного золота по состоянию на 01.01.2003. Иркутск, 2003ф.
- Рундквист Д.В. Фактор времени в образовании гидротермальных месторождений: периоды, эпохи, мегаэтапы и стадии рудообразования // Геология руд. месторождений. 1997. Т. 39. № 1. С. 11–24.
- Русинов В.Л., Русинова О.В., Борисовский С.Е., Алышева Э.И. Состав метасоматических минералов золоторудного месторождения Сухой Лог как критерий его генетической связи с базит-гипербазитовым магматизмом // Докл. РАН. 2005. Т. 405. № 5. С. 661–665.
- Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г. и др. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // Геология руд. месторождений. 2008. Т. 50. № 1. С. 3–46.
- Сафонов Ю.Г. Геолого-генетические типы золоторудных и золотосодержащих месторождений // Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. М.: ИГЕМ РАН, 2006. Т. 2. С. 17–96.
- Углеродистое вещество в метаморфических и гидротермальных породах / Д.Х. Мартихаева, В.А. Макрыгина, А.Е. Воронцова, Э.А. Развозжаева. Новосибирск: СО РАН, филиал "Гео", 2001.
- Чугаев А.В., Плотинская О.Ю., Чернышев И.В., Котов А.А. Неоднородность изотопного состава Pb в сульфидах различных парагенетических ассоциаций на золоторудном месторождении Вернинское (Байкало-Патомское нагорье, Россия) // Докл. РАН. 2014. Т. 457. № 3. С. 1–6.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: УИФ Наука, 1994.
- Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В. и др. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов // Геология руд. месторождений. 2011. Т. 53. № 1. С. 32–64.
- Эльшенбройх К. Металлоорганическая химия. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2011.
- Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L. et al. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia // Ore Geol. Rev. V. 24. 2004. P. 7–44.
- Farrand M. Framboidal sulphides precipitated syntetically // Min. Dep. 1970. V. 5. P. 237–247.
- Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis // Ore Geol. Rev. 2001. V. 18. P. 1–75.
- Goldfarb R.J., Baker T., Dube B. et al. Distribution, character and genesis of gold deposits in metamorphic terranes // Econ. Geol. 2005. V. 100. P. 407–450.
- Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A Carbonaceous Sedimentary Source-Rock Model for Carlin-Type and Orogenic Gold Deposits // Econ. Geol. 2011. V. 106. P. 331–358.
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F. et al. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log Deposit, Lena gold province, Russia // Econ. Geol. 2007. V. 102. P. 1233–1267.
- Palenova E.E., Belogub E.V., Kotlyarov V.A., Blinov I.A. Florencite from Kopylovskoye and Caucasus gold deposits (Bodaybo ore region, Russia) // Ore genesis. Proceeding papers of the international conference. Miass: IMin UB RAS, 2013. С. 58–61.
- Sack P.J., Danyushevsky L.V., Large R.R. et al. Sedimentary pyrite as a gold-source in sediment-hosted gold occurrences in the Selwyn basin area, eastern Yukon // In: Yukon Exploration and Geology 2013, MacFarlane K.E., Nordling M.G., and Sack P.J. (eds.). Yukon Geological Survey, 2014. P. 195–220.