

ЗОЛОТОНОСНОСТЬ АРСЕНОПИРИТА ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

К.Р. Ковалев, Ю.А. Калинин, Е.А. Наумов, М.К. Колесникова, В.Н. Королюк

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Контюга, 3, Россия*

На золото-сульфидных месторождениях Суздальское, Жерек и Большевик в Восточном Казахстане выделены ранняя продуктивная пирит-арсенопиритовая вкрапленная минерализация с невидимым золотом, контролируемая тектоническими зонами, и поздняя гнездово-прожилковая золото-полисульфидная минерализация со свободным золотом в зонах окварцованных пород. В них установлены две разновидности арсенопирита, различающиеся морфологией, химическим составом и золотоносностью, — игольчато-призматический и таблитчатый. Золото определялось по специально разработанной методике с пределом обнаружения 30 г/т. Игольчато-призматический арсенопирит является главным рудным минералом раннего продуктивного этапа минерализации и характеризуется высокой золотоносностью (1400—5360 г/т), нестехиометричным составом S/As = 1.2 и несколько обеднен железом. Отсутствие корреляции основных компонентов арсенопирита с золотом, крайне неравномерное распределение этого элемента в зернах игольчато-призматического арсенопирита и в пределах одного зерна указывают на вхождение невидимого золота в виде элементарных частиц, соосажающихся совместно с арсенопиритом. Таблитчатый арсенопирит масштабно представлен на Суздальском месторождении, где широко проявились процессы золото-полисульфидной минерализации и аргиллизации. Ему свойственны низкая золотоносность, повышенная концентрация сурьмы и стехиометричный состав. Видимое золото обычно накладывается на таблитчатый арсенопирит.

Изотопный состав серы игольчато-призматического арсенопирита и глобулярно-кристаллического пирита раннего этапа минерализации на месторождениях отвечает интервалу значений $\delta^{34}\text{S} = 0.0 \dots -3.3 \%$ и указывает на мантийный источник серы с частичным заимствованием коровой серы. Изотопный состав таблитчатого арсенопирита и других сульфидов второй продуктивной ассоциации характеризуется более легкой серой ($-7.7 \dots -10.2 \%$), что связано с процессами фракционирования серы в условиях повышенной фугитивности кислорода на позднем этапе рудоотложения. Наличие двух множеств морфологических разновидностей и составов арсенопирита на одном месторождении позволяет говорить о длительности процессов рудоотложения, совмещении разноэтапной минерализации и эволюции физико-химических параметров.

Золото-сульфидные месторождения, золотоносный арсенопирит, Восточный Казахстан.

GOLD-BEARING ARSENOPYRITE IN EASTERN KAZAKHSTAN GOLD-SULFIDE DEPOSITS

K.R. Kovalev, Yu.A. Kalinin, E.A. Naumov, M.K. Kolesnikova, and V.N. Korolyuk

We have revealed early productive disseminated pyrite-arsenopyrite mineralization with invisible gold in tectonic zones and late nest-veinlet gold-polysulfide mineralization with free gold in zones of silicified rocks at the Suzdal', Zherek, and Bol'shevik deposits in eastern Kazakhstan, localized within black shales. Two varieties of arsenopyrite differing in morphology, chemical composition, and gold contents have been established in them: acicular-prismatic and tabular. Gold was determined by a specially elaborated technique ensuring a detection limit of 30 ppm Au. Acicular-prismatic arsenopyrite is the main ore mineral of the early productive stage of mineralization; it has high gold contents (1400–5360 ppm) and a nonstoichiometric composition (S/As = 1.2) and is slightly depleted in Fe. The absence of correlation between the contents of the main arsenopyrite components and gold and the strongly uneven distribution of gold among the mineral grains and within a grain point to the presence of invisible gold as elemental particles deposited together with arsenopyrite. Tabular arsenopyrite is abundant at the Suzdal deposit, where gold-polysulfide mineralization and argillization are widespread. It has low gold and high antimony contents and a stoichiometric composition. Visible gold usually grows over tabular arsenopyrite.

The isotopic composition of sulfur of acicular-prismatic arsenopyrite and globular-crystalline pyrite formed at the early mineralization stage is characterized by $\delta^{34}\text{S} = 0.0 \dots -3.3\%$ and evidences a mantle source of sulfur with a partial borrowing of crustal sulfur. The tabular arsenopyrite and other sulfides of the second productive assemblage show a lighter isotopic composition of sulfur ($\delta^{34}\text{S} = -7.7 \dots -10.2\%$), which is due to sulfur fractionation under high oxygen fugacity at the late ore deposition stage. The coexistence of two sets of arsenopyrite of different morphologic varieties and compositions at the deposit point to a long ore deposition, the coexistence of mineralization formed at different stages, and the evolution of physicochemical parameters.

Gold-sulfide deposits, gold-bearing arsenopyrite, eastern Kazakhstan

ВВЕДЕНИЕ

Сульфиды многих золоторудных месторождений в минерализованных зонах с вкрапленным типом оруденения содержат так называемое невидимое золото, не выявляемое обычными оптическими методами. Основными золотосодержащими минералами на месторождениях Карлин-типа в джаспероидах являются высокомышьяковистый пирит и марказит [Wells, Mullens, 1973; Mao, 1991; Arehart et al., 1993; Fleet, Mumin, 1997; Palenik et al., 2004; Reich et al., 2005]. На золото-сульфидных месторождениях, локализованных в черносланцевых толщах, золото концентрируется преимущественно в арсенопирите [Старова, Бочаров, 1977; Генкин, 1998; Ashley et al., 2000; Генкин и др., 2002; Vos et al., 2005; Волков и др., 2006; Тюкова, Ворошин, 2007]. Изучению невидимого золота в Fe-сульфидах посвящено большое количество публикаций, что связано с необходимостью выявления форм его нахождения, установлению временных взаимоотношений золота и сульфидов, разработки методик определения и технологических схем извлечения золота из «упорных» руд. При этом многие вопросы остаются дискуссионными. Находится ли золото в сульфидах в структурно-связанной форме с образованием стабильных и метастабильных фаз или же в монокристаллическом состоянии в виде наночастиц или кластеров? Происходит совместная кристаллизация золота и сульфидов либо более позднее отложение золота на сульфидах в результате адсорбционных или электрохимических процессов?

В рудах изученных нами золоторудных месторождений Суздальское, Жерек и Большевик в Восточном Казахстане встречаются высоко- и слабозолотоносные арсенопириты, сформировавшиеся на разных этапах процессов рудоотложения. В статье рассматриваются две основные морфологические разновидности арсенопирита различного химического состава — игольчато-призматический высокосернистый нестехиометричный арсенопирит с невидимым золотом, образующийся синхронно на ранней продуктивной стадии рудоотложения, и поздний таблитчатый стехиометричный арсенопирит в ассоциации со свободным золотом.

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНАЯ ПОЗИЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Рассматриваемые месторождения располагаются в северо-западной части Западно-Калбинского золотоносного пояса в Восточном Казахстане (рис. 1). Они залегают в черносланцевых карбонатно-терригенных породах карбона и контролируются разломами северо-западного и субширотного направлений. Предлагаются различные геолого-генетические модели происхождения золоторудной минерализации: связь с орогенным гранитоидным магматизмом [Большой Алтай..., 2000; Борцов и др., 2005]; связь с процессами тектономагматической активизации [Малыгин и др., 1995; Нарсеев, 2002]; связь с метасо-

магматическими процессами в офиолитовых поясах с черносланцевыми толщами [Коробейников, Масленников, 1994]. Некоторые возрастные данные формирования золотого оруденения, полученные в последнее время для этих месторождений, приведены в работе Е.А. Наумова с соавторами [2009].

Месторождения Суздальское и Жерек находятся на крайнем северо-западе золотоносного пояса на площади Семипалатинского Прииртышья, в пределах которой известны Мукурская, Суздаль-Знаменская и Жананская рудоносные структуры, выделенные В. А. Нарсеевым [2002] в Суздаль-тренд как аналог Карлин-тренда в Неваде (рис. 2). Месторождение Большевик располагается в 160 км юго-восточнее, в пределах Бакырчикского рудного района (рис. 3).

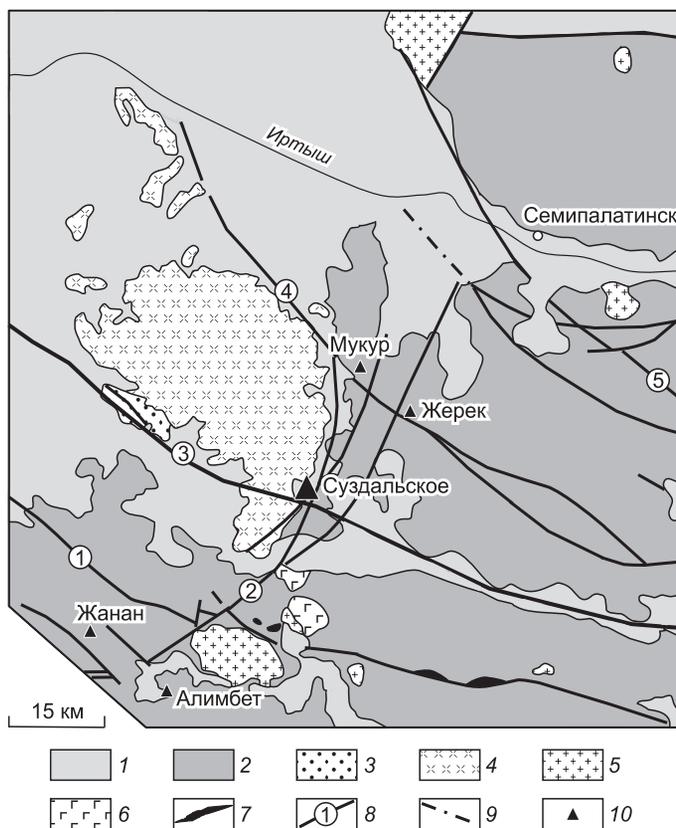
Геологическое строение Суздальского месторождения освещено в ряде работ [Бега-



Рис. 1. Расположение месторождений района Семипалатинского Прииртышья (1) и Бакырчикского рудного района (2) в Восточном Казахстане.

Рис. 2. Геолого-структурная схема Семипалатинского Прииртышья.

1 — Q-N отложения; 2 — углеродистые алевролиты и песчаники (C_{1-2}); 3 — известняки, кремнистые сланцы и туфы среднего девона (D_2); 4 — семейтауский вулканоплутонический комплекс; 5 — граниты; 6 — габбро-диориты; 7 — ультрабазиты; 8 — разломы: 1 — Байгузин-Булакский, 2 — Суздальский, 3 — Чарско-Горностаевский, 4 — Мукурский, 5 — Западно-Калбинский; 9 — разломы предполагаемые; 10 — золото-сульфидная минерализация.



ев, Степаненко, 1995; Нарсеев, 2002; Калинин и др., 2009; Kovalev et al., 2009]. Месторождение располагается в зоне сочленения Чарско-Горностаевского глубинного разлома северо-западного простирания и Суздальского разлома северо-восточного простирания. На северо-западе месторождение граничит с Семейтауской вулканоплутонической структурой, сформированной на этапе раннемезозойской внутриплитной тектономагматической активизации. В последнее время при проведении эксплуатационных работ на месторождении вскрыта рассекающая рудные тела дайка кварцевого порфира, интенсивно осветленная и содержащая ксенолиты руд и прожилково-вкрапленную золото-сульфидную минерализацию.

Линзовидные и субпластовые рудные тела Суздальского месторождения залегают в углеродистых терригенно-карбонатных толщах (C_{1-2}) и контролируются протяженной тектонической зоной северо-восточного простирания. Руды месторождения относятся к малосульфидному типу с содержанием сульфидов от 0.5 до 10—15%. Среднее содержание золота варьирует в пределах 6.4—16.2 г/т. На месторождении выделяются следующие типы минерализованных пород: реликтовая стратифицированная минерализация в терригенных породах (тип А); вкрапленная золотосодержащая пирит-арсенопиритовая минерализация в серицитизированных терригенных породах (тип Б, рис. 4, А—В); штокверковая и гнездовая золото-полисульфидная минерализация в окварцованных породах (тип В); прожилковая сурьмяная минерализация (тип Г); аргиллизированная дайка кварцевого порфира с вкрапленной сульфидной минерализацией (тип Д).

Месторождение Жерек располагается в южной части золотоносной Мукурской зоны разломов северо-западного простирания. Сведения о месторождении приведены в работах [Щерба и др., 1976; Нарсеев, 2002]. Оруденение локализовано в субогласной зоне рассланцеванных углеродистых терригенных пород нижнего карбона. Длина рудной зоны составляет 1.7 км и ширина — 100—300 м. Магматические породы представлены штокообразными телами плагιοгранит-порфиров с молибденовой минерализацией и поясом даек диабазовых порфиров и долеритов северо-западного простирания. Линзовидно-лентовидные рудные залежи падают на север под углами 15°—55°, пространственно ассоциируют с интрузивными телами плагιοгранит-порфиров и прослежены на глубину более 500 м. Оруденение представлено вкрапленным и тонкопрожилковым золотоносным пиритом и арсенопиритом в серицитизированных углеродистых терригенных породах, брекчированных и залеченных белым безрудным кварцем (см. рис. 4, Г). В зоне брекчирования висячем боку плагιοгранитов проявлены золотоносные березиты. Среднее содержание золота в рудах составляет 3.7 г/т.

Месторождение Большевик располагается в пологозалегающей субширотной Кызыловской зоне смятия с падением на север под углами 30°—45°, в пределах которой находится крупное месторождение Бакырчик. Зона, ограниченная на западе Западно-Калбинским и на востоке Северо-Восточным глубинными разломами, имеет протяженность 17 км, мощность от 10 до 250 м и прослежена на глубину 800—1000 м. Геологическое строение, золотоносность района и отдельных месторождений широко освещались в литературе [Гаврилов, 1971; Сорокин, 1971; Старова, Бочаров, 1977; Каймирасова, 1984; Рассохин, Степанов, 1984; Старова и др., 1984; Большой Алтай..., 2000; Нарсеев и др., 2001; Глоба, 2008; Дьячков и др., 2009]. Стратиграфический разрез рудного поля представлен углеродисто-терригенными породами

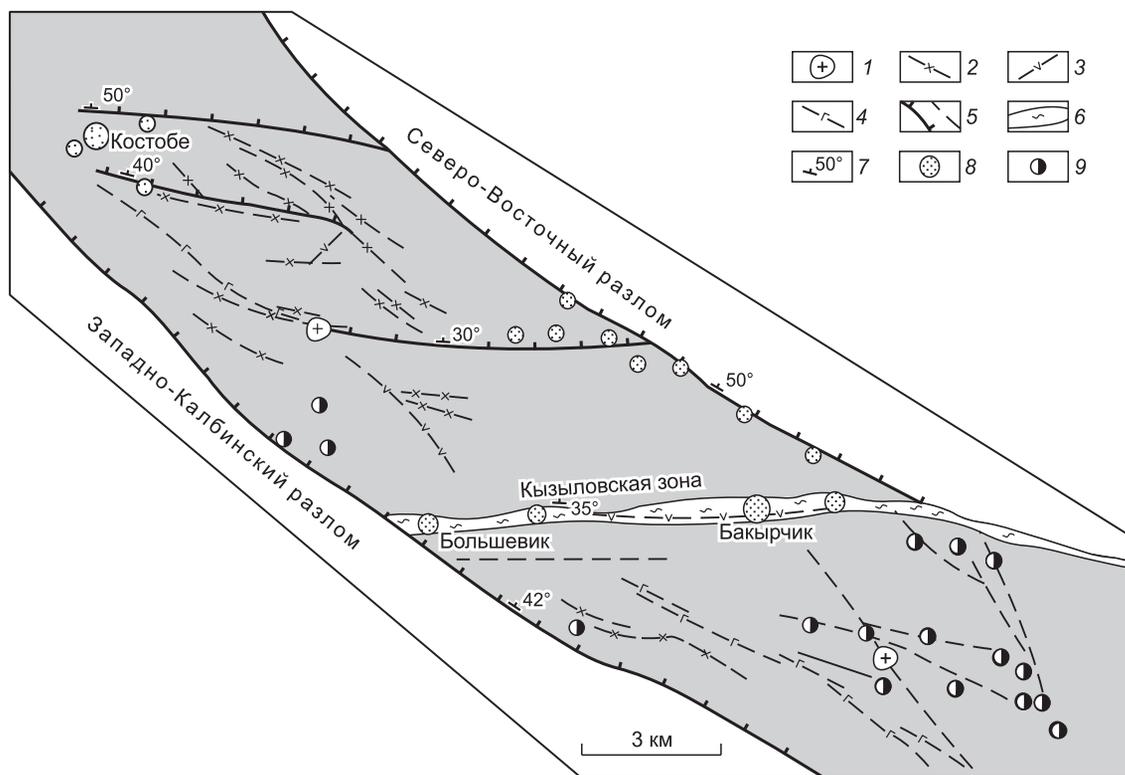


Рис. 3. Геолого-структурная схема Бакырчикского рудного района, по данным Г.П. Нахтигала [Большой Алтай..., 2000].

1 — плагиограниты; 2—4 — дайки: 2 — плагиогранит-порфиров, 3 — диорит-порфиров, 4 — диабазовых порфиров; 5 — разрывные нарушения; 6 — зона смятия; 7 — элементы залегания; 8 — золото-сульфидная, 9 — золото-кварцевая минерализация. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2.

нижнесреднекарбонového возраста. Из магматических образований в районе известны плагиограниты, гранодиориты и дайковый комплекс сульфидизированных, карбонатизированных, альбитизированных и березитизированных плагиогранит-порфиров, диоритовых и диабазовых порфиров. Руды месторождения Большевик залегают в сложнодислоцированных углеродистых алевропелитах, песчаниках, гравелитах и более грубообломочных породах турбидитового строения. Субсогласные пологозалегающие рудные тела имеют мощность 4—5 м, протягиваются в субширотном направлении на несколько сотен метров и прослежены по падению на 600 м. Руды со средним содержанием золота 5—7 г/т представлены вкрапленной сульфидной и кварцево-жильной минерализацией (см. рис. 4, E—3). Оруденение сопровождается окварцеванием, серицитизацией и карбонатизацией. Количество сульфидов в рудах составляет 2—13 %, достигая в отдельных участках 30—40 %. На месторождении выделяются вкрапленные, реликтивно-слоистые и массивные текстурные разновидности руд. Вкрапленные и брекчированные минерализованные породы с тонкодисперсным золотоносным пиритом и арсенопиритом представляют основной тип руд месторождения. Реликтивно-слоистые минерализованные породы характеризуются присутствием послойно-линзовидных выделений сингенетичного пирита и сидерита с наложенной послойной арсенопиритовой минерализацией. Массивные минерализованные породы сложены метасоматическими железо-магнезиальными карбонатами с гнездово-прожилковой кварц-полисульфидной минерализацией. Сульфиды в них представлены сфалеритом, халькопиритом, галенитом, Sb-As блеклыми рудами, Fe-Ni-Co-сульфоарсенидами, реже киноварью. С поздними процессами минерализации и метаморфизма на месторождении связано появление свободного тонкого золота.

ОПРОБОВАНИЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Образцы для исследований отбирались из карьеров и подземных горных выработок месторождений. В полированных штуфах изучались текстурные особенности различных типов минерализованных пород. Мономинеральные фракции арсенопирита отбирались под биноклем из протолок и сульфидных концентратов, полученных при растворении минерализованных пород в соляной и плавиковой

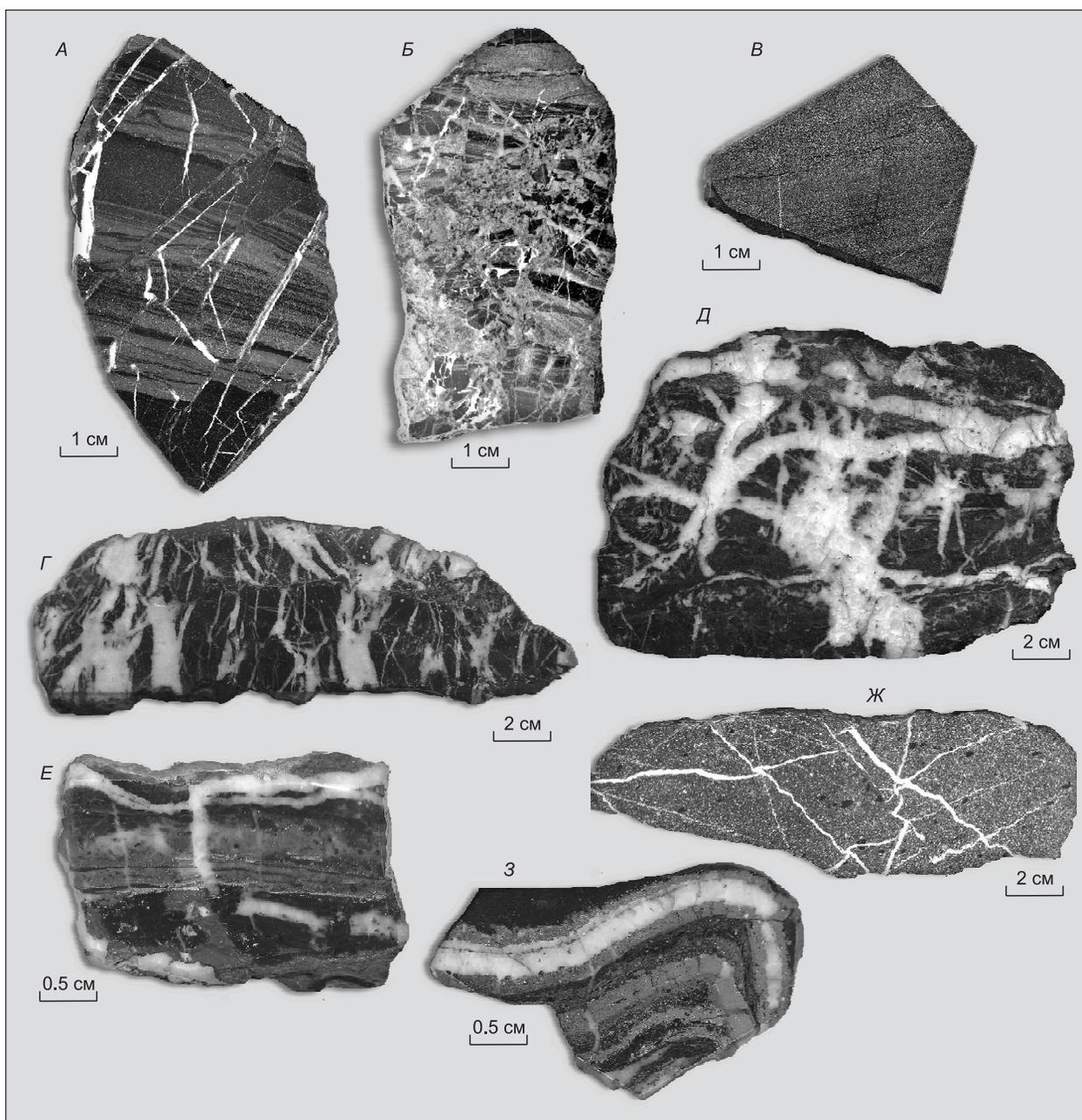


Рис. 4. Текстуры типов минерализованных пород раннего продуктивного этапа золото-сульфидных месторождений Восточного Казахстана.

Суздальское месторождение: *A* — кливажированная минерализованная углеродисто-терригенная порода флишеидного облика (обр. Su-23/1); *B* — брекчированная и прокварцованная минерализованная углеродистая порода флишеидного облика (Su-42); *V* — минерализованный слоистый песчаник (Su-24), содержание золота 32.2 г/т; месторождение Жерек: *Г* — брекчированный минерализованный углеродистый сланец, сцементированный безрудным кварцем (Je-32), содержание золота 7.3 г/т; месторождение Большевик: *Д* — брекчированный минерализованный углеродистый сланец (Б-8), содержание золота 28.0 г/т; *E* — то же, увеличенный фрагмент реликтово-слоистого строения; *Ж* — минерализованный песчаник (Б-5/1), содержание золота 10.0 г/т; *З* — сингенетичный пирит в углеродистом сланце с наложенной арсенопиритовой минерализацией стратиформного облика.

кислотах. Минеральный состав, структурные взаимоотношения, микрокристалломорфологические особенности арсенопиритов изучались под оптическим микроскопом в отраженном и проходящем свете. Пробы анализировались также на сканирующем электронном микроскопе LEO 01430VP, на электронно-зондовых микроанализаторах Camebax-Micro, JEOL JXA-8100 и атомно-абсорбционным методом. Для месторождений Суздальское, Жерек, Большевик были выполнены 636, 168, 188 химических анализов арсенопирита соответственно. Основная масса зерен арсенопирита изучалась в трех точках — по краям

и в центре; в сложных звездчатых агрегатах — по пять-шесть точек. В трех кристаллах золотоносных и слабозолотоносных арсенопиритов снимались профили с 10 и 30 точками анализа. Золото определяли по специально разработанной методике на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8100 при 20 кВ ускоряющего напряжения и токе зонда 200 нА с расширенным до 10—15 мкм диаметром пучка электронов. В качестве аналитической линии использована M_{α} , а не лучшая по отношению сигнал/фон L_{α} линия. Выбор обусловлен тем, что в спектре от кристалл-анализаторов LiF к коротковолновому крылу AuL_{α} излучения примыкает «отрицательная линия». Измерение фона в пределах спектральной «ямы» может привести к переопределению элемента до 700 г/т [Self et al., 1990], а взаимное наложение линий при недостаточном разрешении прибора, наоборот, ослабляет полезный сигнал. Поэтому при определении низких содержаний золота использованы L_{α} линии в качестве аналитической нецелесообразно. Излучение AuM_{α} регистрировали от кристалл-анализаторов PET одновременно на двух спектрометрах со счетчиками отпаянного типа с ксеноновым наполнением. Полоса пропускания импульсов на усилителе-дискриминаторе выбрана в пределах 0.7—3.2 В, что позволило избавиться от мешающего излучения FeK_{α} дублета в III порядке отражения, примыкающего со стороны меньших углов Брэгга к линии золота. Соответственно, фон регистрировался только с длинноволновой стороны на расстоянии 0.8 мм от пика линии. Образцом сравнения служил золото-серебряный сплав состава 75 % Au + 25 % Ag. Измерения на нем проводили при меньших токах зонда, обеспечивающих сопоставимые с образцами скорости набора импульсов. Время счета — по 200 с на линии и фоне. При таких условиях анализа предел обнаружения для одностороннего 2σ критерия с доверительной вероятностью 97.5 % составляет 30 г/т.

Пределы обнаружения других элементов в арсенопирите составляли (мас.%): Fe — 0.018, As — 0.06, S — 0.02, Sb — 0.04, Ni — 0.005, Co — 0.004, Zn — 0.043, Cu — 0.02, для Ag — 470 г/т.

ТИПОМОРФНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ЗОЛОТОНОСНОСТЬ АРСЕНОПИРИТА

Арсенопирит является главным минералом руд на рассматриваемых месторождениях. Он встречается в различных минеральных ассоциациях, характеризуется разнообразием морфологии, химического состава и широкими вариациями концентраций золота.

Морфология. В минерализованных породах выделяются две морфологические разновидности арсенопирита — ранний игольчато-призматический и поздний таблитчатый. Игольчато-призматический арсенопирит встречается во вкрапленных рудах ранней пирит-арсенопиритовой продуктивной ассоциации всех месторождений и представлен мелкими кристаллами размером от первых микрон до сотни микрон, образующими единичные или сгустковые вкрапления в серицитизированных углеродистых алевролитах и песчаниках. Иногда встречаются субсогласные со слоистым сингенетичным пиритом прослойки сплошного арсенопирита (см. рис. 4, 3). Характерны также звездчатые и друзовидные сростания игольчатых и призматических кристаллов (рис. 5). Центральная часть таких агрегатов обычно представлена глобулярным и тонкокристаллическим пиритом, обрастающим более крупнозернистым As-содержащим пиритом, на который нарастает игольчатый арсенопирит. В деформированных минерализованных углеро-

Таблица 1. Средний химический состав и золотоносность арсенопирита золото-сульфидных месторождений Восточного Казахстана

Месторождение	Морфология зерен арсенопирита	Fe	As	S	Fe	As	S	S/As	Au, г/т	Формула
		мас. %			ат. %					
Суздальское	Тонкоигольчатый (192/96)	34.67	42.90	22.19	32.94	30.34	36.71	1.21	580	$Fe_{0.897}As_{0.827}S$
	Таблитчатый из руд (202/68)	33.69	45.33	20.02	32.91	33.02	34.06	1.03	70	$Fe_{0.966}As_{0.969}S$
	Таблитчатый из дайки (202/42)	33.59	47.19	19.21	32.84	34.43	32.73	0.95	30	$Fe_{1.004}As_{1.005}S$
Жерек	Тонкопризматический (168/115)	34.31	43.45	22.15	32.59	30.73	36.68	1.19	210	$Fe_{0.889}As_{0.839}S$
Большевик	Тонкопризматический (122/86)	34.04	43.47	21.63	32.69	31.13	36.18	1.16	490	$Fe_{0.904}As_{0.860}S$
	Крупнопризматический (56/35)	34.02	43.36	21.94	32.51	30.96	36.52	1.18	120	$Fe_{0.890}As_{0.846}S$

Примечание. В скобках: первая цифра — общее количество анализов, вторая — количество анализов, в которых содержание золота превышает значение 30 г/т.

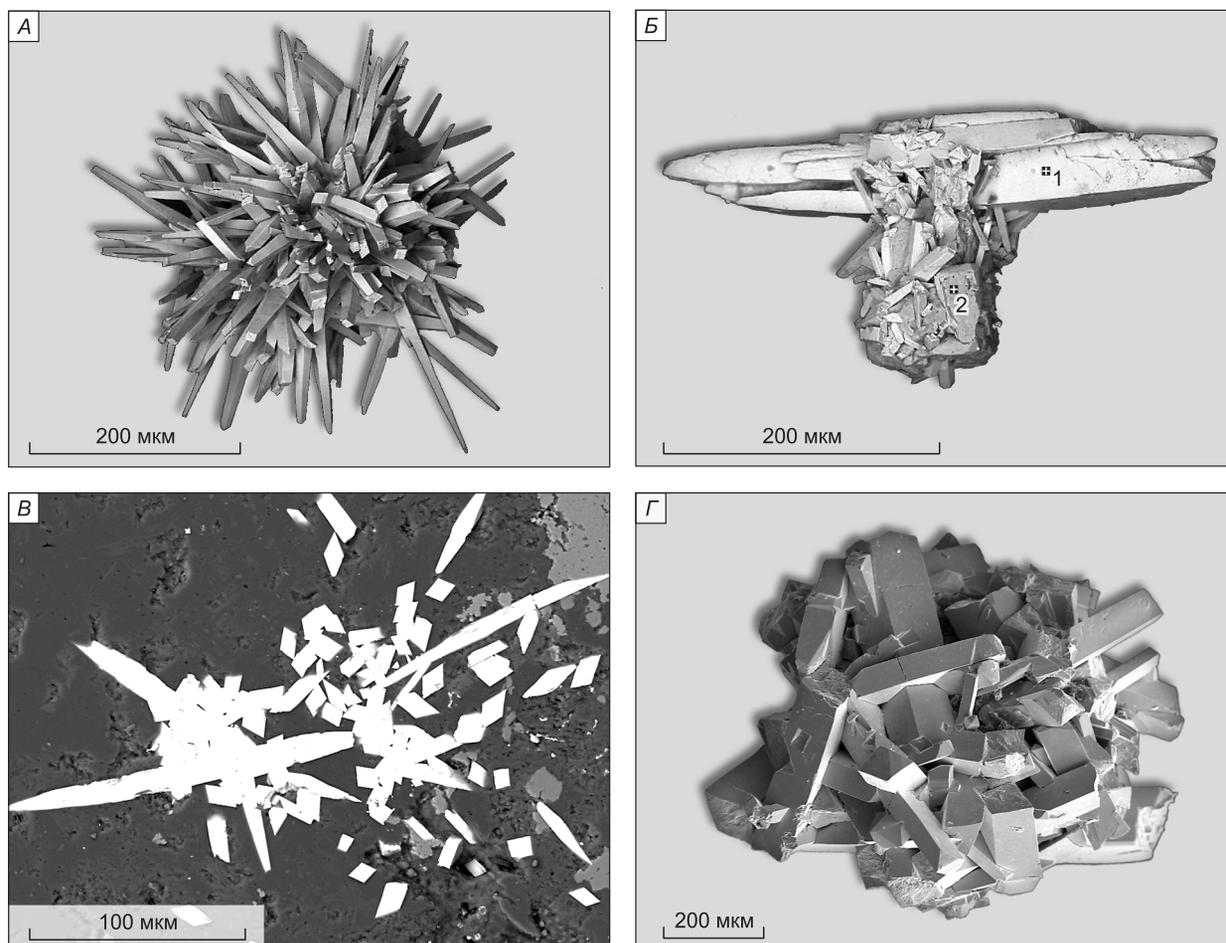


Рис. 5. Игольчато-призматический арсенопирит.

Суздальское месторождение: *А* — звездчатый агрегат игольчатого арсенопирита; *Б* — нарастание игольчатого и призматического арсенопирита (1) на глобулярно-кристаллический пирит (2); *В* — игольчатый и звездчатый арсенопирит, полированный шлиф; месторождение Большевик: *Г* — друзовидный агрегат призматического арсенопирита.

дистых сланцах кристаллы слабозолотоносного арсенопирита достигают размеров до нескольких сантиметров. Таблитчатый арсенопирит наиболее широко представлен на Суздальском месторождении в рудах поздней золото-полисульфидной ассоциации. Он отличается уплощенными изометричными кристаллами, часто ромбо-пирамидального облика или их друзовидными сростками, встречается в кварцеванных и минерализованных брекчированных породах метасоматического облика и в минерализованной дайке кварцевого порфира (рис. 6). Свойственны двойниковые сростания кристаллов. Под микроскопом зерна арсенопирита имеют удлиненные или изометричные псевдогексагональные формы. Они содержат включения рудных и нерудных минералов и имеют пойкилитовое строение. В них встречаются субмикроскопические вкрапления золота. Нередко золото нарастает на кристаллы таблитчатого арсенопирита. Характерна ассоциация таблитчатого арсенопирита с пиритом пентагон-додекаэдрического облика, также содержащего вкрапления видимого золота.

Химический состав и элементы-примеси. Средний химический состав игольчато-призматического и таблитчатого арсенопирита приведен в табл. 1. Соотношение серы и мышьяка в них показано на диаграммах (рис. 7). Игольчато-призматический арсенопирит ранней продуктивной ассоциации по химическому составу нестехиометричен и располагается в интервале значений серы 21—24 мас.%. Отношения S/As в них составляют 1.16—1.21. Таблитчатые арсенопириты группируются в интервале значений серы 18—21 мас.% и отвечают стехиометрическому составу при отношениях S/As = 1.03 и 0.95. Отмечается некоторое обеднение железом игольчато-призматического арсенопирита. Из проанализированных элементов-примесей (Sb, Ni, Co, Ag, Zn и Cu) наиболее высокие концентрации сурьмы (до 1.5 мас.%), никеля (до 0.5 мас.%) и кобальта (до 1.0 мас.%) встречены в таблитчатом арсенопирите. Содержания серебра в мономинеральных пробах арсенопирита обоих морфологических разновидностей не-

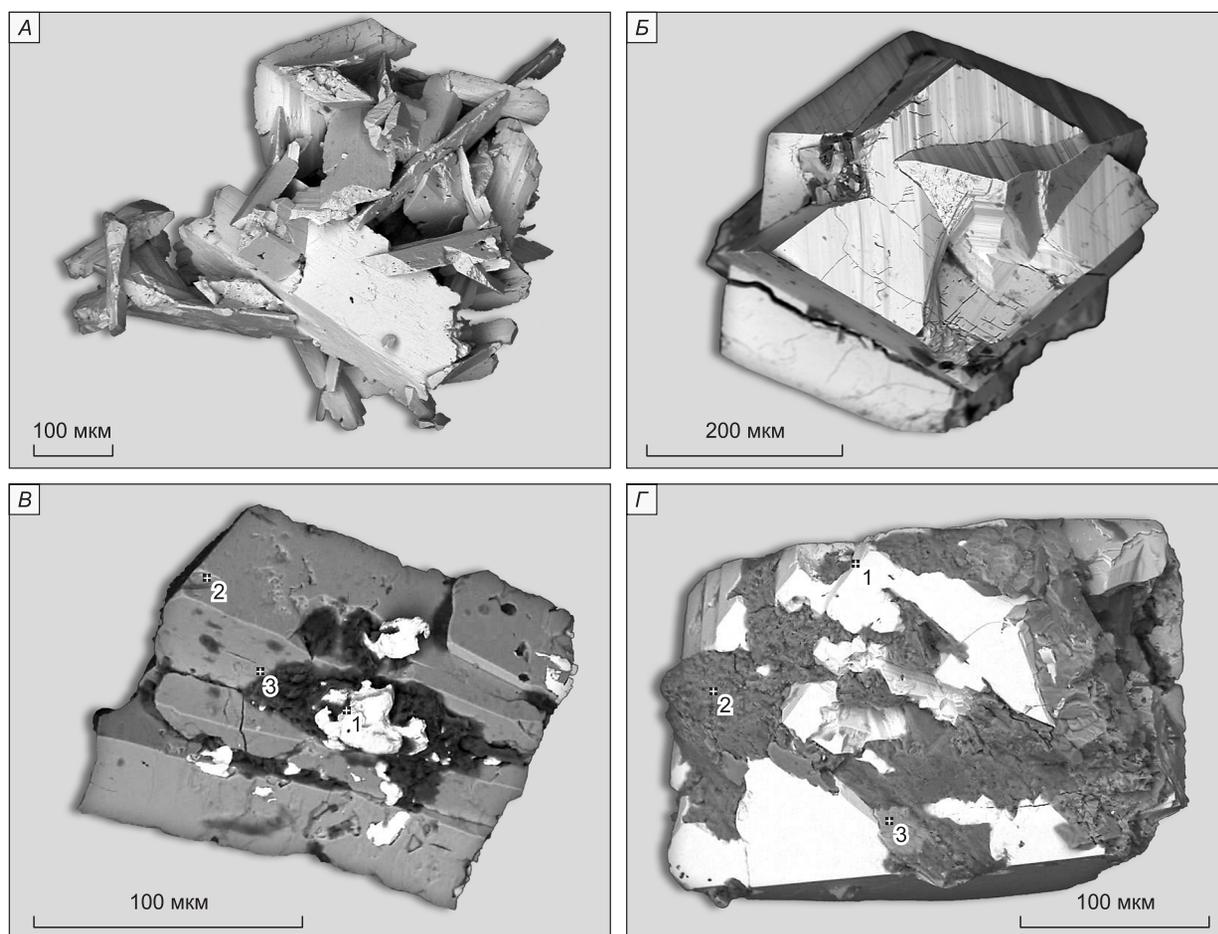


Рис. 6. Уплощенный таблитчатый арсенопирит, Суздальское месторождение.

А — друзовидный агрегат таблитчатого арсенопирита из минерализованной породы второго продуктивного этапа, *Б* — двойниковый сросток таблитчатого арсенопирита из минерализованной дайки кварцевого порфира, *В* — отложение золота (1) в каолинитовом агрегате (3) на таблитчатом кристалле арсенопирита (2) в минерализованной дайке кварцевого порфира, *Г* — катаклазированный кристалл таблитчатого арсенопирита (1) из минерализованной дайки кварцевого порфира, залеченный слюдино-хлоритовым агрегатом (2) с рутилом (3).

высоки, варьируют в пределах 0.92—9.1 г/т (табл. 2). Остальные элементы встречаются в незначительной части проб в концентрациях, близких к пределу обнаружения.

Золотоносность. Минерализованные углеродисто-терригенные породы с вкрапленным тонкодисперсным пиритом и игольчато-призматическим арсенопиритом содержат золото до десятков грамм на тонну и визуально практически не отличаются от неминерализованных осадочных пород (табл. 3). Степень золотоносности таких пород пропорциональна насыщенности тонкодисперсными сульфидами, преимущественно арсенопиритом. Содержание золота в мономинеральных пробах арсенопирита широко варьирует (см. табл. 2). Наиболее высокие содержания золота (207—850 г/т) встречаются в игольчатом и призматическом арсенопирите из руд ранней продуктивной минерализации всех месторождений. Таблитчатые арсенопириты содержат золото в интервале значений 2—88 г/т. По данным точечных электронно-зондовых микроанализов, золото в игольчатых агрегатах арсенопирита звездчатого строения распределяется крайне неравномерно (рис. 8). В призматических зернах встречаются различия как с высоким равномерным распределением золота, так и зерна с широкой дисперсией содержаний. Профиль точечного опробования по периферии и в центральной части призматического кристалла арсенопирита показан на рис. 9, *А*. Химический состав его достаточно однороден (табл. 4). Результаты точечного опробования таблитчатых кристаллов арсенопирита по профилям указывают на их низкую золотоносность (табл. 5, см. рис. 9, *Б, В*). Уровни золотоносности, выявляемые в единичных кристаллах, подтверждаются результатами анализов большого числа проб, выполненных для каждой из выделенных морфологических разновидностей. На диаграмме (рис. 10) показано соотношение концентраций золота и мышьяка в ар-

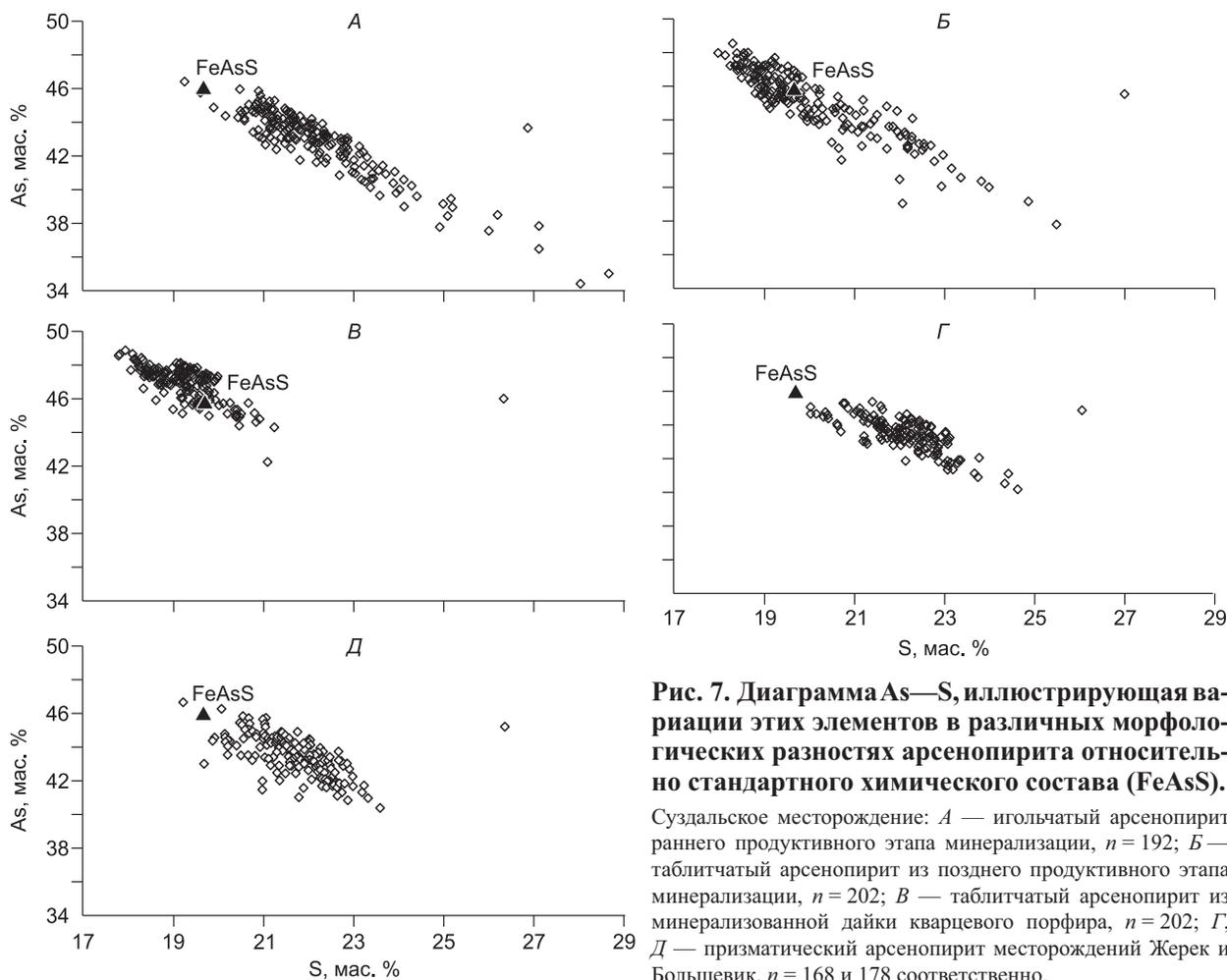


Рис. 7. Диаграмма As—S, иллюстрирующая вариации этих элементов в различных морфологических разностях арсенопирита относительно стандартного химического состава (FeAsS).

Суздальское месторождение: *A* — игольчатый арсенопирит раннего продуктивного этапа минерализации, $n = 192$; *B* — таблитчатый арсенопирит из позднего продуктивного этапа минерализации, $n = 202$; *B* — таблитчатый арсенопирит из минерализованной дайки кварцевого порфира, $n = 202$; *Г*, *Д* — призматический арсенопирит месторождений Жерек и Большевик, $n = 168$ и 178 соответственно.

сенопиритах рассматриваемых месторождений. Значительное число тонкоигольчатых арсенопиритов Суздальского месторождения содержат золото в интервале значений 500—4500 г/т. Высокие концентрации (до 1500—2500 г/т) обнаружены в большей части проанализированных призматических кристаллов арсенопирита из месторождений Жерек и Большевик. Перекристаллизованные крупнопризматические разности арсенопирита месторождения Большевик характеризуются низкими концентрациями золота. Обедненность золотом крупнокристаллического призматического арсенопирита была установлена на месторождении Жерек при проведении разведочно-эксплуатационных работ. Максимально высокое содержание золота, обнаруженное в таблитчатом арсенопирите, составляет 350 г/т. Значимой корреляции между содержаниями золота и мышьяка, а также между железом и серой в группах проанализированных золотоносных арсенопиритов не выявляется.

Изотопный состав серы определялся в арсенопирите, пирите и антимоните из разных минеральных ассоциаций месторождений (табл. 6). $\delta^{34}\text{S}$ большинства проанализированных проб сингенетического пирита и пирита из ранней продуктивной ассоциации отвечает интервалу 0.0...–3.3 ‰. Близкие значения

Таблица 2. Содержание золота и серебра в мономинеральных пробах игольчато-призматического и таблитчатого арсенопирита по данным атомно-абсорбционного анализа

Месторождение	№ образца	Морфология зерен арсенопирита	Au, г/т	Ag, г/т
Суздальское	Su-24	Тонкоигольчатый	830.0	4.0
	Su-27	»	297.0	3.4
	Su-63	»	288.0	3.2
	Sz-18	Таблитчатый	7.4	0.92
	Д-1	»	88.0	9.1
	Su-81	»	2.0	4.6
Жерек	Je-32	Призматический	207	1.1
Большевик	Б-8	»	850	2.4
	Б-5, Б-6	»	486	1.9

Примечание. Здесь и далее анализы выполнены в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), аналитики В.Г. Цимбалист и В.Н. Ильина.

Таблица 3.

**Содержание золота и серебра в углеродисто-терригенных породах
с тонкодисперсной пирит-арсенопиритовой минерализацией**

Месторождение	№ образца	Описание минерализованной породы	Au	Ag
			г/т	
Суздальское	Su-20x	Сульфидизированная углеродисто-терригенная порода фли-шоидного строения	3.43	0.47
	Su-21	»	3.6	0.4
	Su-21/x	»	1.71	0.25
	Su-23	»	31.0	0.32
	Su-23a	»	41.1	0.17
	Su-24	Сульфидизированный песчаник	32.2	0.14
	Su-25	»	8.1	0.22
	Su-27	»	10.6	0.09
	Su-29	»	26.9	0.26
	Su-30	Брекчированный сульфидизированный песчаник	8.1	0.77
	Su-40	»	13.0	0.33
	Su-63	Сульфидизированный углеродистый алевропелит	42.0	0.42
Жерек	Je-32	Брекчия углеродистого алевропелита с сульфидами	7.3	0.07
Большевик	Б-5(1)	Песчаник с вкрапленностью сульфидов	10.0	0.03
	Б-6	Сульфидизированный углеродистый алевропелит	24.0	1.0
	Б-8	Брекчия сульфидизированного углеродистого алевропелита	28.0	1.82

Примечание. Анализы выполнены атомно-абсорбционным методом, аналитики В.Г. Цимбалист и В.Н. Ильина.

Таблица 4.

**Химический состав призматического кристалла арсенопирита,
месторождение Большевик**

Точки анализа	S	As	Fe	Sb	Co	Ni	Au
	мас.%						г/т
1	20.57	45.01	33.87	Н.п.о.	0.006	0.004	1440
2	20.64	45.04	34.04	0.043	0.007	0.015	1340
3	20.77	44.2	34.39	0.042	0.006	0.012	1540
4	21.27	43.91	34.37	0.049	0.01	0.033	1710
5	20.79	44.83	34.28	Н.п.о.	0.012	0.008	1210
6	21.24	44.15	34.38	»	0.009	0.009	490
7	20.6	45.18	34.14	»	Н.п.о.	0.009	1040
8	21.31	44.19	34.36	»	»	Н.п.о.	880
9	20.95	44.87	34.36	»	»	»	1650
10	20.97	44.24	34.23	»	0.005	0.009	490
11	20.79	44.22	33.94	0.047	0.004	0.026	2040
12	21.37	43.54	33.79	0.04	0.007	0.016	860
13	21.04	44.78	34.22	Н.п.о.	0.005	Н.п.о.	810
14	21.53	44.27	34.43	0.04	0.004	0.002	1010
15	21.5	44.3	34.43	Н.п.о.	0.005	0.008	970
16	21.11	43.82	34.37	»	Н.п.о.	0.013	1060
17	21.46	44.2	34.38	»	0.008	0.067	1220
18	20.66	44.86	34	0.041	0.015	0.1	620
19	20.8	43.51	33.61	Н.п.о.	0.012	0.085	560
20	21.72	42.45	33.98	»	0.015	0.095	1140
21	21.32	44.26	33.99	»	0.008	0.006	1450
22	21.05	44.27	34.12	»	Н.п.о.	0.007	1570

Точки анализа	S	As	Fe	Sb	Co	Ni	Au
	мас.%						г/т
23	20.33	45.39	33.85	Н.п.о.	0.004	Н.п.о.	1150
24	20.69	45.02	33.71	0.04	0.006	»	1680
25	20.79	44.47	34.15	Н.п.о.	0.006	0.038	1320
26	21.06	44.47	34.2	0.042	Н.п.о.	0.032	1220
27	20.88	44.23	34.03	0.04	0.018	0.099	1500
28	21.13	44.3	34.07	Н.п.о.	0.01	0.083	1610
29	20.62	44.3	33.86	»	0.004	Н.п.о.	1750
30	20.3	44.65	33.67	»	Н.п.о.	»	1840
Среднее	20.97	44.36	34.11	0.014	0.006	0.026	1240

Примечание. Анализы выполнены на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8100, аналитик В.Н. Королук. Си ниже предела обнаружения (Н.п.о.).

Таблица 5. Химический состав зерен таблитчатого арсенопирита, Суздальское месторождение

Точки анализа	S	As	Fe	Sb	Cu	Co	Ni	Au
	мас.%							г/т
Таблитчатый арсенопирит из золото-полисульфидной минерализации								
1	19.24	47.85	32.99	0.49	Н.п.о.	0.067	Н.п.о.	Н.п.о.
2	19.4	47.68	33.23	0.28	»	0.017	»	60
3	18.54	46.13	33.21	0.24	»	0.008	»	Н.п.о.
4	19.17	47.49	33.15	0.36	»	0.011	»	»
5	18.95	47.43	32.8	0.78	»	0.03	»	»
6	18.59	47.74	32.6	0.59	»	0.029	0.007	»
7	18.86	47.14	32.83	0.43	»	0.043	Н.п.о.	70
8	18.94	47.18	32.92	0.69	»	0.053	0.01	Н.п.о.
9	18.64	47.48	32.59	0.70	»	0.037	0.009	»
10	18.39	46.78	33.28	0.35	»	0.036	0.01	90
11	18.34	47.36	33.49	0.25	»	0.042	0.014	Н.п.о.
12	19.01	47.11	32.66	0.41	»	0.111	0.005	»
Среднее	18.84	47.28	33.01	0.46	—	0.04	0.005	18
Таблитчатый арсенопирит из аргиллизированной дайки гранит-порфира								
1	19.18	47.61	33.73	0.134	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.
2	19.98	46.37	34.15	Н.п.о.	»	»	»	»
3	19.86	46.55	33.84	»	»	»	»	»
4	19.8	46.62	33.75	0.035	»	»	»	»
5	20.38	45.73	33.88	0.148	»	»	»	»
6	19.59	46.98	33.71	0.102	»	0.007	0.028	»
7	19.46	47.02	33.52	0.149	»	0.009	0.064	60
8	19.65	46.5	33.69	0.1	»	0.006	0.019	Н.п.о.
9	18.85	47.42	33.37	0.144	»	Н.п.о.	Н.п.о.	350
10	19.85	46.53	33.69	Н.п.о.	0.02	»	»	80
Среднее	19.66	46.733	33.733	0.078	0.002	0.002	0.01	49

Примечание. Анализы выполнены на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8100, аналитик В.Н. Королук.

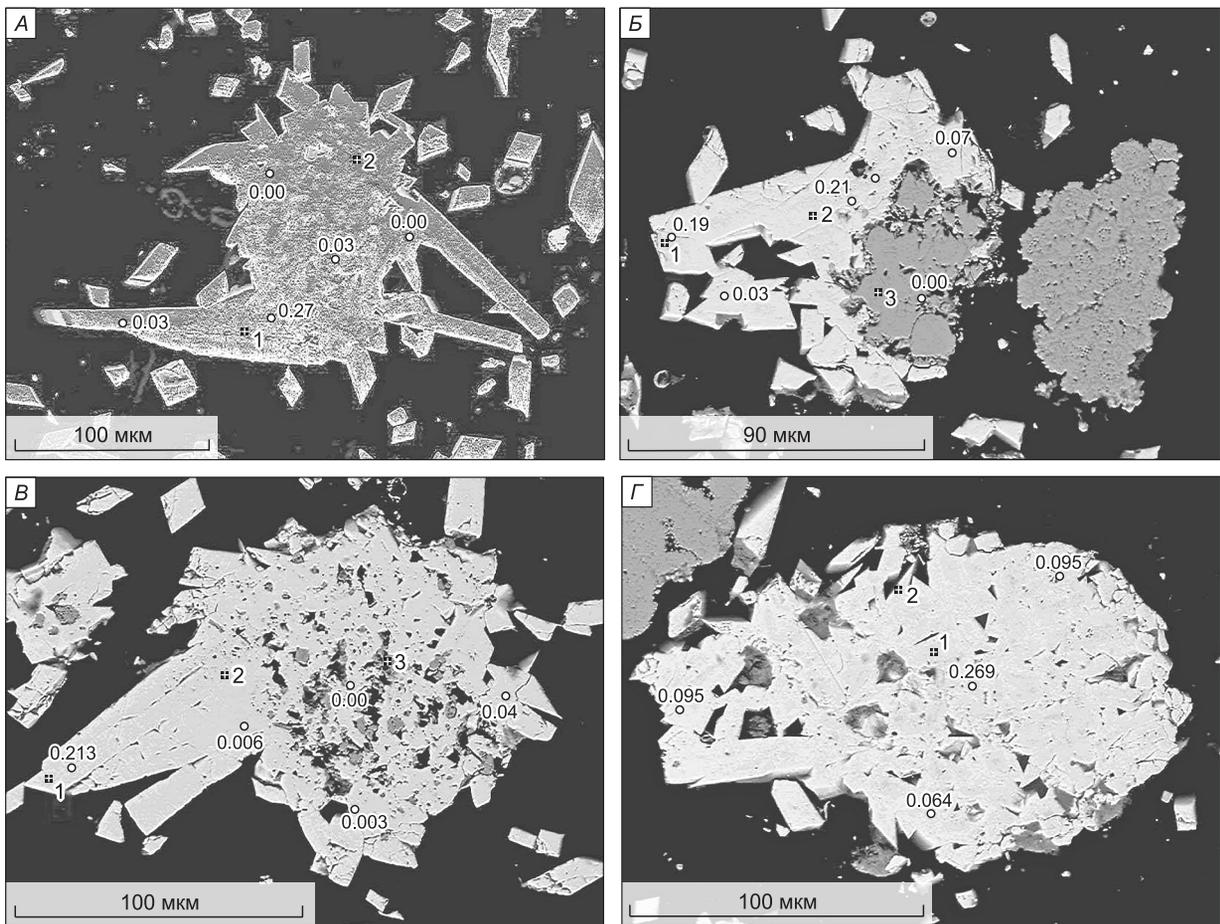


Рис. 8. Содержания золота (мас.%), по данным точечного электронно-зондового микроанализа в игольчато-звездчатых агрегатах арсенопирита Суздальского месторождения.

А — 1 — арсенопирит (As — 44.69 мас.%), 2 — арсенопирит (As — 43.85 мас.%); *Б* — 1 — арсенопирит (As — 43.97 мас.%), 2 — арсенопирит (As — 43.72 мас.%), 3 — глобулярный пирит; *В* — 1 — арсенопирит (As — 43.04 мас.%), 2 — арсенопирит (As — 43.46 мас.%), 3 — пирит; *Г* — 1 — арсенопирит (As — 44.64 мас.%), 2 — арсенопирит (As — 44.58 мас.%).

типичны для игольчатого и призматического арсенопирита (–1.2...3.2 ‰). Они могут указывать преимущественно на мантийный источник серы при частичном заимствовании более легкой коровой серы. Изотопный состав пирита из минерализованных пород второй продуктивной ассоциации на Суздальском месторождении характеризуется еще более легкой серой (–7.7 ‰). Близкие легкие значения серы устанавливаются также в пирите (–10.2 ‰) и таблитчатом арсенопирите (–7.6 ‰) из аргиллизированной дайки кварцевого-порфира этого месторождения. Облегченная сера свойственна антимониту завершающего этапа рудоотложения (–4.9 ‰). Значительное облегчение серы в сульфидах поздних процессов минерализации, сопровождаемых окварцеванием, карбонатизацией, аргиллизацией и наложением сурьмяной минерализации, вероятно всего, объяснимо фракционированием серы в условиях повышенной фугитивности кислорода.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Главным золотосодержащим минералом на рассмотренных месторождениях является арсенопирит. В минерализованных типах пород выделяются две основные морфологические разновидности арсенопирита — игольчато-призматический и таблитчатый. Они различаются химическим составом, элементами-примесями и степенью золотоносности. Тонкоигольчатый и тонкопризматический арсенопирит встречаются в минерализованных породах раннего продуктивного этапа рудообразования. Он образует как вкрапленную минерализацию, так и густо вкрапленные послойные скопления в толщах углеродистых алевролитов и песчаников. Иногда такая минерализация за счет избирательной приуроченности к

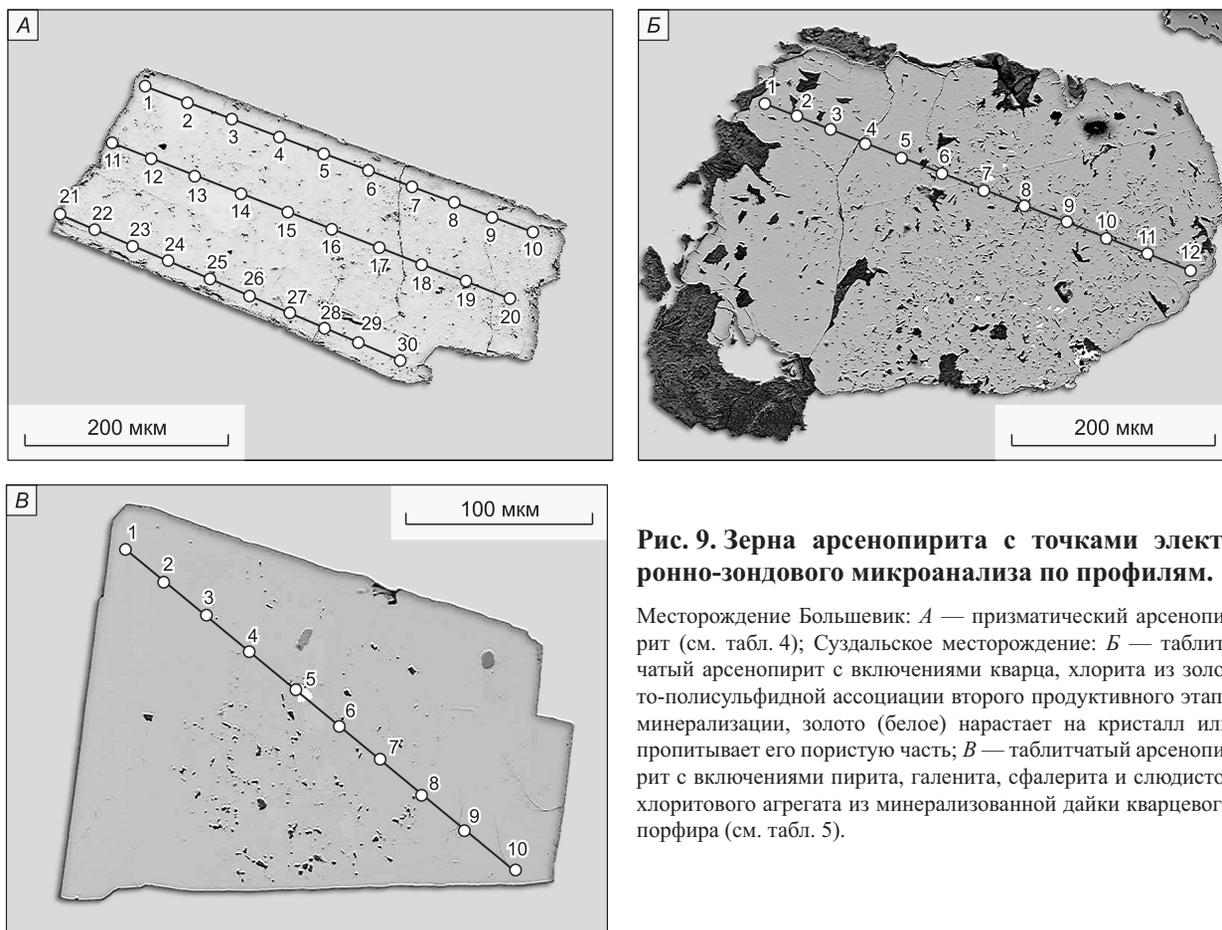


Рис. 9. Зерна арсенопирита с точками электроно-зондового микроанализа по профилям.

Месторождение Большевик: *A* — призматический арсенопирит (см. табл. 4); Суздальское месторождение: *B* — таблитчатый арсенопирит с включениями кварца, хлорита из золото-полисульфидной ассоциации второго продуктивного этапа минерализации, золото (белое) нарастает на кристалл или пропитывает его пористую часть; *B* — таблитчатый арсенопирит с включениями пирита, галенита, сфалерита и слюдисто-хлоритового агрегата из минерализованной дайки кварцевого порфира (см. табл. 5).

определенным прослоям приобретает стратиформный облик. Вкрапленная арсенопиритовая минерализация в углеродистых терригенных толщах описывалась на месторождениях Бақырчик [Гаврилов, 1971; Старова, Бочаров, 1977], Олимпиада, Нежданское, Майское, Наталкинское [Генкин, 1998; Генкин и др., 2002; Волков и др., 2006] и ряде месторождений мира [Cook, Chryssoulis, 1990]. Предполагается, что формирование мелких зерен арсенопирита, обогащенных золотом, происходит в условиях значительного пересыщения гидротермальных растворов серно-мышьяковыми комплексными соединениями золота, при распаде которых возникает одновременно большое число зародышевых кристаллов сульфидов с высокой скоростью кристаллизации [Гаврилов, 1971; Волков и др., 2006]. Частая ассоциация арсенопирита с пиритсодержащими осадочными породами, многочисленные примеры нарастания высозолотосодержащего арсенопирита на глобулярно-кристаллические агрегаты пирита указывают на важную роль сингенетического пирита при отложении золотосодержащего арсенопирита и было убедительно показано на примере многих золоторудных месторождений Верхнеколымского района [Тюкова, Ворошин, 2008].

Таблитчатые уплощенные кристаллы арсенопирита встречаются преимущественно на Суздальском месторождении, где широко проявлена вторая продуктивная золото-полисульфидная минерализация, сопровождаемая процессами окварцевания, карбонатизации и каолинизации. В рудах они образуют единичные порфировые вкрапления пойкилитового строения и содержат многочисленные включения рудных и нерудных минералов. Это указывает на то, что рост кристаллов происходил медленно в более низкотемпературных условиях из слабоконцентрированных растворов при повышенной фугитивности кислорода. Зависимость кристалломорфологических форм и химического состава арсенопирита от физико-химических условий рудоотложения была установлена при рассмотрении рудно-метасоматической зональности на ряде золоторудных месторождений Западно-Калбинского пояса [Старова, Бочаров, 1977; Старова и др., 1984; Пшеничкин, Ананьев, 2005; Борцов и др., 2005]. Вкрапленные пирит-арсенопиритовые руды с тонкопризматическим арсенопиритом представляют нижнюю часть такого ряда. В средней части колонны в штокверковых рудах отлагаются призматические или сдвойникованные кристаллы, а в жильном типе руд верхней части колонны — одиночные таблитчатые. Отмечено, что ранние высокотемпературные арсенопириты нестехиометричны и отражают восстановительные условия отложения, в то время как более низкотемпературные стехиометричные арсенопириты — более окислительные. Таким

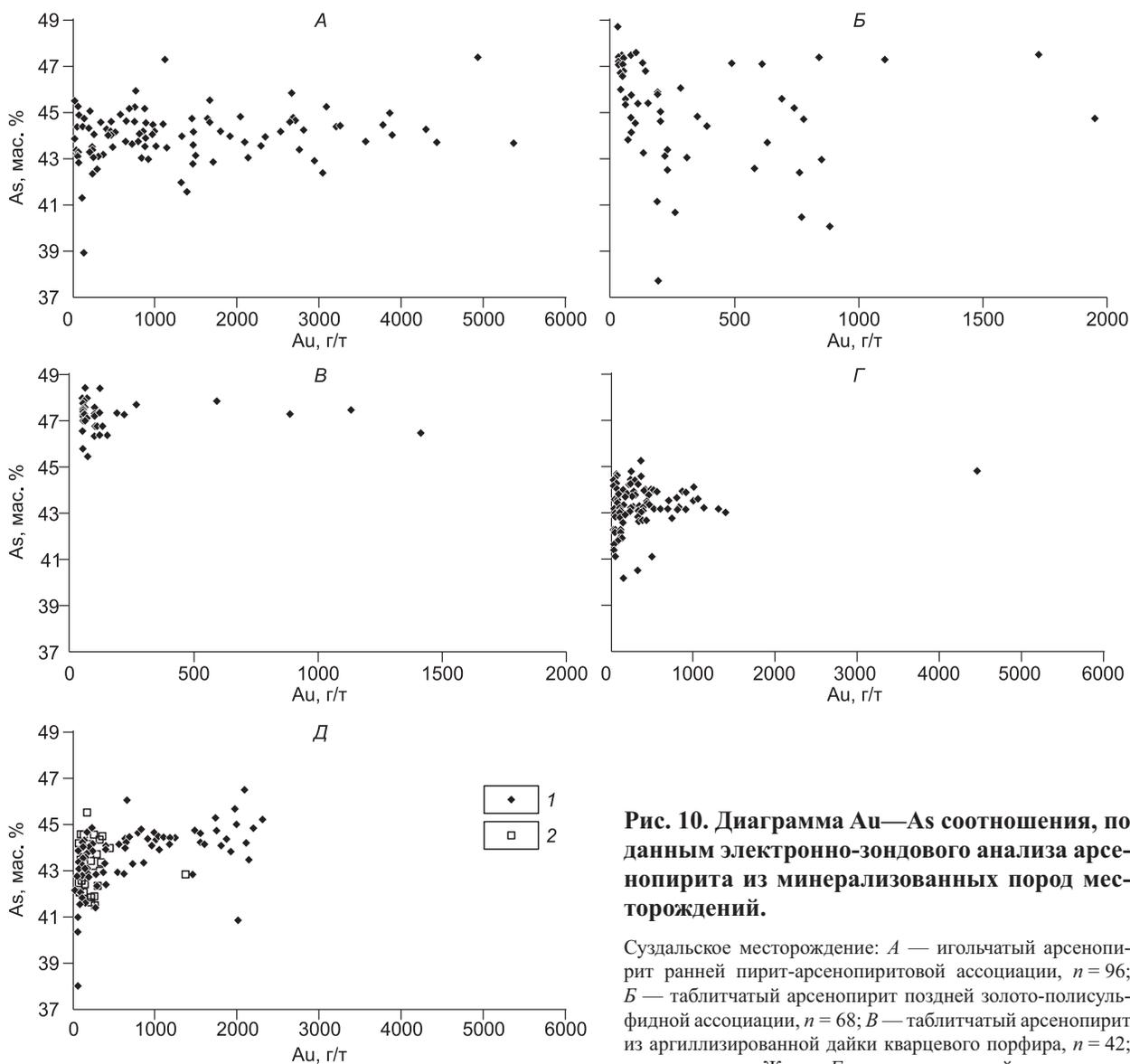


Рис. 10. Диаграмма Au—As соотношения, по данным электронно-зондового анализа арсенопирита из минерализованных пород месторождений.

Суздальское месторождение: *A* — игольчатый арсенопирит ранней пирит-арсенопиритовой ассоциации, $n = 96$; *B* — таблитчатый арсенопирит поздней золото-полисульфидной ассоциации, $n = 68$; *B* — таблитчатый арсенопирит из аргиллизированной дайки кварцевого порфира, $n = 42$; месторождение Жерек: *Г* — призматический арсенопирит

ранней пирит-арсенопиритовой ассоциации, $n = 115$; месторождение Большевик: *Д* — призматический арсенопирит ранней пирит-арсенопиритовой ассоциации: *1* — тонкопризматический, $n = 86$; *2* — крупнопризматический, $n = 35$.

образом, выявленные особенности морфологии и химического состава арсенопиритов из руд месторождений Суздальское, Жерек и Большевик отражают некоторую общую тенденцию зависимости типоморфных особенностей арсенопирита от конкретных физико-химических условий рудоотложения.

Игольчато-призматический арсенопирит является наиболее высокозолотоносным. Максимальные содержания золота в единичных кристаллах Суздальского месторождения достигают 5360 г/т, на месторождениях Большевик и Жерек — 2290 и 1400 г/т соответственно. Средние значения содержаний золота в игольчато-призматических арсенопиритах этих месторождений варьируют от 120 до 580 г/т. Большинство проанализированных игольчатых и призматических кристаллов характеризуются неравномерным распределением концентраций золота, что, скорее всего, указывает на случайное распределение элементарного золота в виде наночастиц. Это подтверждается отсутствием связи содержаний золота с вариациями химического состава арсенопирита, установленной при точечных анализах по профилям и по данным обработки анализов больших массивов золотоносных арсенопиритов. Призматические кристаллы арсенопирита из одной минеральной ассоциации с одинаковым химическим составом могут содержать золото как в очень высоких концентрациях, так и в значениях ниже пределов его обнаружения. Вместе с тем золотоносные игольчато-призматические арсенопириты в целом характеризуются более низкими содержаниями мышьяка (42,9—43,47 мас.%), высокими содержаниями серы (21,63—

Таблица 6. Изотопный состав серы сульфидов из минерализованных пород месторождений

Месторождение	№ образца	Минерализация и тип породы	Минерал	$\delta^{34}\text{S}$, ‰
Суздальское	Cз-2	Сингенетичная в углеродистых алевропелитах (тип А)	Пирит тонкозернистый глобулярный и кубический	-0.5
	Cз-4	»	»	0.0
	Su-33	»	»	-1.3
	Su-50	»	»	-3.3
	Su-21/х	»	»	-0.8
	Su-21, Su-24	Тонковкрапленная в серицитизированных углеродистых алевропесчаниках (тип Б)	Арсенопирит тонкоигольчатый	-1.2
	Su-4, Su-13	Гнездово-вкрапленная в кварцованных породах (тип В)	Пирит пентагон-додекаэдрический	-7.7
	Su-30	Гнездово-прожилковая (тип Г)	Антимонит	-4.9
	Д	Вкрапленная в дайке (тип Д)	Пирит среднезернистый	-10.2
Su-81/1	»	Арсенопирит таблитчатый	-7.6	
Жерек	Je-32	Вкрапленная в углеродистом сланце	Арсенопирит призматический	-3.2
Большевик	Б-8	Вкрапленная в углеродистом алевропелите	»	-2.4
	Б-8	»	Пирит среднезернистый	-0.7
	Б-6, Б-5	Вкрапленная в песчанике	Арсенопирит призматический	-1.3
	Б-6	»	Пирит среднезернистый	-0.3

Примечание. Анализы выполнены в Аналитическом центре ИГМ СО РАН, аналитик М.Н. Колбасова и в Аналитическом центре ДГИ ДВО РАН, аналитик А.В. Игнатъев.

22.19 мас.%) и железа (34.02—34.67 мас.%). В таблитчатых арсенопиритах интервалы этих элементов находятся в пределах (мас.%): As — 45.33—47.19, S — 19.21—20.02 и Fe — 33.59—33.69. Такое изменение химического состава в группах двух морфологических разновидностей арсенопирита, скорее всего, может указывать на различные физико-химические условия их отложения. Слабая золотоносность таблитчатых арсенопиритов (средние значения от 30 до 70 г/т) может быть объяснена более низкотемпературными условиями рудоотложения и более поздним отложением золота в ассоциации с карбонатами, серицитом и хлоритом. Об этом свидетельствуют включения, прожилки и нарастания золота на корродированные и катаклазированные кристаллы арсенопирита.

Тонкоигольчатые нестехиометричные высокозолотоносные арсенопириты описаны на ряде крупных золоторудных месторождениях, залегающих в дислоцированных черносланцевых толщах разного возраста [Генкин, 1998; Ashley et al., 2000; Волков и др., 2006]. На некоторых из них устанавливается структурно связанная форма золота в арсенопирите, на других месторождениях в арсенопирите выявлены и структурно связанная форма золота, и металлическое золото в виде наночастиц [Voiron et al., 1989; Cabri et al., 1989; Генкин, 1998; Maddox et al., 1998; Генкин и др., 2002; Мурзин и др., 2003; Волков и др., 2006]. В качестве одного из косвенных аргументов химически связанного золота рассматриваются его корреляционные связи с основными компонентами арсенопирита. На одних месторождениях устанавливаются корреляционные связи с мышьяком [Fleet et al., 1997; Cabri et al., 1989; Maddox et al., 1998], на других такой связи не выявляется [Ashley et al., 2000]. Отмечается обедненность железом золотоносных арсенопиритов [Fleet, Mumin, 1997] и вероятность замещения железа золотом [Мурзин и др., 2003]. Одной из причин обогащения золотом тонкоигольчатого арсенопирита рассматривается высокая дефектность его структуры, которая определяется соотношением Fe, As и S по сравнению с хорошо окристаллизованными формами арсенопирита [Жмодик, 2008]. Не исключено, что неравномерное распределение золота в арсенопиритах объясняется вариацией концентраций этого элемента в рудоносных растворах и условиями отложения сульфидов из растворов, как это отмечалось ранее [Гаврилов, 1971].

Арсенопириты разного строения и химического состава из ранних вкрапленных руд и поздних жильных образований описаны на Нежданинском и Наталкинском месторождениях [Волков и др., 2006]. Наличие двух множеств морфологических разновидностей и составов арсенопирита на одном месторождении позволяет говорить о длительности процессов рудоотложения, совмещении разноэтапной минерализации и эволюции физико-химических параметров. Многоэтапность рудоотложения на Суздальском месторождении подтверждается другими минералогическими наблюдениями и изотопно-геохронологическими данными [Kovalev et al., 2009].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На золото-сульфидных месторождениях Суздальское, Жерек и Большевик, залегающих в черносланцевых толщах Восточного Казахстана, выделены две морфологические разности арсенопирита, отвечающие двум продуктивным этапам рудоотложения. На раннем этапе формирования тонковкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации в серицитизированных углеродисто-терригенных породах, контролируемой тектоническими зонами, отлагался тонкозернистый игольчато-призматический арсенопирит с невидимым золотом. На втором продуктивном этапе формирования золото-полисульфидной минерализации, наиболее широко проявленном на Суздальском месторождении, отлагался таблитчатый арсенопирит в ассоциации со свободным видимым золотом.

2. Выделенные морфологические разности арсенопирита различаются химическим составом. Ранний золотоносный игольчато-призматический арсенопирит нестехиометричен по составу при отношении $S/As = 1.2$ и несколько обеднен железом. Поздний таблитчатый арсенопирит стехиометричен по составу, характеризуется повышенными концентрациями сурьмы и содержит минимальные концентрации невидимого золота.

3. Распределение золота в зернах арсенопирита крайне неравномерное и концентрация его не коррелируется с мышьяком. В одном и том же типе минерализованных пород зерна одной морфологической разности могут содержать высокие концентрации золота, при достаточно равномерном его распределении, и зерна с низкими содержаниями золота. Все это позволяет говорить о вхождении золота в арсенопирит на рассматриваемых месторождениях в виде примеси элементарного золота, соосаждающимся с арсенопиритом на раннем продуктивном этапе рудоотложения. На позднем продуктивном этапе золото накладывается на арсенопирит.

4. Причинами, обуславливающими морфологию и золотоносность арсенопирита, могут служить различные физико-химические условия рудоотложения на раннем и позднем этапах формирования оруденения, в частности, концентрация, окислительно-восстановительный потенциал и кислотность—щелочность растворов.

5. Изотопный состав серы сингенетичного пирита и игольчато-призматического арсенопирита раннего этапа минерализации на месторождениях отвечает узкому интервалу $0.0...-3.3$ ‰ и указывает на мантийный источник серы с частичным заимствованием коровой серы. Изотопный состав пирита и таблитчатого арсенопирита из минерализованных пород второй продуктивной ассоциации характеризуется более легкой серой ($-7.7...-10.2$ ‰), что связано с процессами фракционирования серы в условиях повышенной фугитивности кислорода на позднем этапе рудоотложения.

Авторы благодарны В.И. Польшину, И.Ф. Кудинову, М.И. Нетесову и А.Г. Клименко за возможность проведения работ на месторождениях, а также А.Т. Титову, Л.Н. Поспеловой и О.С. Хмельниковой за выполнение большого объема аналитической работы на сканирующем электронном микроскопе и электронно-зондовом микроанализаторе.

ЛИТЕРАТУРА

Бегаев И.В., Степаненко Н.И. Золотоносные коры выветривания Северного Казахстана и Семипалатинского Прииртышья // Геология и разведка недр Казахстана, 1995, № 5, с. 29—34.

Большой Алтай (геология и металлогения) / Ред. Г.Н. Щерба. Кн. 2. Металлогения. Алматы, РИО ВАК РК, 2000, 400 с.

Борцов В.Д., Рафаилович М.С., Услугин М.О., Мизерная М.А., Филатов А.С., Титов Д.В., Сухорукова Е.И. Некоторые особенности онтогении золотосульфидных месторождений Западной Калбы // Проблемы геологии и разведки месторождений полезных ископаемых. Томск, Изд-во ТПУ, 2005, с. 373—382.

Волков А.В., Генкин А.Д., Гончаров В.И. О формах нахождения золота в рудах месторождений Наталкинское и Майское (Северо-Восток России) // Тихоокеанская геология, 2006, т. 25, № 6, с. 18—29.

Гаврилов А.М. О сингенетичном с сульфидами характере тонкодисперсного золота на золоторудном месторождении Бакырчик (Восточный Казахстан) // Минеральный состав руд и изменения вмещающих пород в месторождениях золота, свинца и цинка. М., ЦНИГРИ, 1971, с. 159—166. (Тр. ЦНИГРИ, вып. 96, ч. 1).

Генкин А.Д. Золотоносный арсенопирит из золоторудных месторождений: внутреннее строение зерен, состав, механизм роста и состояние золота // Геология рудных месторождений, 1998, т. 40, № 6, с. 551—557.

Генкин А.Д., Вагнер Ф.Е., Крылова Т.Л., Цепин А.И. Золотоносный арсенопирит и условия его образования на золоторудных месторождениях Олимпиада и Ведуга (Енисейский край, Сибирь) // Геология рудных месторождений, 2002, т. 44, № 1, с. 59—76.

- Глоба В.А.** Особенности формирования и проблемы освоения суперкрупного месторождения Бакырчик // Геология Казахстана. Алматы, ИГН РК, 2008, с. 191—198.
- Дьячков Б.А., Титов Д.В., Сапаргалиев Е.М.** Рудные пояса Большого Алтая и оценка их перспектив // Геология рудных месторождений, 2009, т. 51, № 3, с. 222—238.
- Жмодик С.М.** Золотоцентрирующие системы офиолитовых поясов (на примере Саяно-Байкало-Муйского пояса). Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2008, 304 с.
- Каймирасова А.Г.** Особенности микроскопического и тонкодисперсного золота некоторых месторождений Казахстана // Условия образования рудных месторождений Казахстана. Алма-Ата, «Наука» Каз.ССР, 1984, с. 74—86.
- Калинин Ю.А., Ковалев К.Р., Наумов Е.А., Кириллов М.В.** Золото коры выветривания Суздальского месторождения (Казахстан) // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (3), с. 241—257.
- Коробейников А.Ф., Масленников В.В.** Закономерности формирования и размещения месторождений благородных металлов Северо-Восточного Казахстана. Томск, Изд-во Том. ун-та, 1994, 337 с.
- Малыгин А.А., Нахтигаль Г.П., Бегаев И.В.** Золотоносность Семейтауской вулканоплутонической структуры Семипалатинского Прииртышья // Геология и разведка недр Казахстана, 1995, № 2, с. 20—24.
- Мурзин В.В., Семенкин В.А., Суставов С.Г., Кринов Д.И., Пикулев А.И., Милдер О.Б.** Неэквивалентные позиции атомов железа в золотосодержащем арсенопирите по данным мессбауэровской спектроскопии // Геохимия, 2003, № 8, с. 893—901.
- Нарсеев В.А.** К дискуссии о генезисе руд карлинского типа. Суздаль-тренд, Юго-Западный Алтай // Руды и металлы, 2002, № 1, с. 67—70.
- Нарсеев В.А., Гостев Ю.В., Захаров А.В., Козлянинов Д.М., Матвиенко В.Н., Фаворов В.А., Франковская Н.М., Шиганов А.А.** Бакырчик (геология, геохимия, оруденение). М., ЦНИГРИ, 2001, 174 с.
- Наумов Е.А., Борисенко А.С., Ковалев К.Р., Федосеев Г.С., Травин А.В., Калинин Ю.А.** Возрастные рубежи формирования золотого оруденения Восточного Казахстана и Западной Сибири // Геология, минерагения и перспективы развития минерально-сырьевых ресурсов. Алматы, ИП Волкова, 2009, с. 224—228.
- Пшеничкин А.Я., Ананьев Ю.С.** Типоморфные особенности и поисковое значение пиритов и арсенопиритов золоторудных месторождений черносланцевых толщ // Проблемы геологии и разведки месторождений полезных ископаемых. Томск, Изд-во ТПУ, 2005, с. 129—136.
- Рассохин А.Г., Степанов С.А.** Структурно-морфологические особенности месторождения Большевик и условия формирования оруденения // Геология месторождений золота Казахстана. Алма-Ата, КазИМС, 1984, с. 85—92.
- Сорокин В.Н.** О хемогенной и гидротермальной золотоносности на месторождении Бакырчик (Восточный Казахстан) // Минеральный состав руд и изменения вмещающих пород в месторождениях золота, свинца и цинка. М., ЦНИГРИ, 1971, с. 148—158. (Тр. ЦНИГРИ, вып. 96, ч. 1).
- Старова М.М., Бочаров В.Е.** Роль типоморфных особенностей пиритов и арсенопиритов золоторудных месторождений в расшифровке генезиса руд // Геология, геохимия и минералогия золоторудных районов и месторождений Казахстана. Вып. 7. Алма-Ата, КазИМС, 1977, с. 97—100.
- Старова М.М., Баханова Е.В., Старова В.В.** Вопросы генезиса и природа минералого-геохимической зональности месторождений золота, связанных с породами углеродистой формации // Геология месторождений золота Казахстана. Алма-Ата, КазИМС, 1984, с. 47—57.
- Тюкова Е.Э., Ворошин С.В.** Состав и парагенезисы арсенопирита в месторождениях и вмещающих породах Верхнеколымского региона (к интерпретации генезиса сульфидных ассоциаций). Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 2007, 107 с.
- Щерба Г.Н., Дьячков Б.А., Нахтигаль Г.П.** Жарма-Саурский геотектоноген // Алма-Ата, «Наука» КазССР, 1976, 200 с.
- Arehart G.B., Chryssoulis S.L., Kesler S.E.** Gold and arsenic in iron sulfide from sediment-hosted disseminated gold deposits: implications for depositional processes // Econ. Geol., 1993, v. 88, p. 171—185.
- 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, № 4, p. 285—301.
- Boiron M.C., Cathelineau M., Trescases J.J.** Conditions of gold bearing arsenopyrite crystallization in Villeranges basin, Marche-Combrailles shear zone, France: a mineralogical and fluid inclusion study // Econ. Geol., 1989, v. 84, № 5, p. 1340—1362.
- Cabri L.J., Chryssoulis S.L., De Villiers J.P.R., LaFlamme J.H.G., Buseck P.R.** The nature of «invisible» gold in arsenopyrite // Canad. Miner., 1989, v. 27, № 3, p. 353—362.

Cook N.J., Chryssoulis S.L. Concentrations of «invisible gold» in the common sulfides // *Canad. Miner.*, 1990, v. 28, № 1, p. 1—16.

Fleet M.E., Mumin A.H. Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis // *Amer. Miner.*, 1997, v. 82, № 1—2, p. 182—193.

Kovalev K.R., Kalinin Y.A., Naumov E.A., Pirajno F., Borisenko A.S. A mineralogical study of the Suzdal sediment-hosted gold deposit, Eastern Kazakhstan: implication for ore genesis // *Ore Geol. Rev.*, 2009, v. 35, № 2, p. 185—205.

Maddox L.M., Bancroft G.M., Scaini M.J., Lorimer J.W. Invisible gold: comparison of Au deposition on pyrite and arsenopyrite // *Amer. Miner.*, 1998, v. 83, № 11—12, p. 1240—1245.

Mao S.H. Occurrence and distribution of invisible gold in a Carlin-type gold deposit in China // *Amer. Miner.*, 1991, v. 76, p. 1964—1972.

Palenik C.S., Utsunomiya S., Reich M., Kesler S.E., Wang L., Ewing R.C. «Invisible» gold reveals: direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin-type deposit // *Amer. Miner.*, 2004, v. 89, № 10, p. 1359—1366.

Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., Palenik C.S., Chryssoulis S.L., Ewing R.C. Solubility of gold in arsenian pyrite // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, v. 69, № 11, p. 2781—2796.

Self P.G., Norrish K., Milnes A.R., Graham J., Robinson B. Holes in the background in XRS // *X-Ray Spectrometry*, 1990, v. 19, p. 59.

Vos I.M.A., Bierlein F.P., Teale G.S. Genesis of orogenic-gold deposits in the Broken River Province, northeast Queensland // *Aust. J. Earth Sci.*, 2005, v. 52, p. 941—958.

Wells J.D., Mullens T.E. Gold-bearing arsenian pyrite determined by microprobe analysis, Cortez and Carlin gold mines, Nevada // *Econ. Geol.*, 1973, v. 68, p. 187—201.

*Рекомендована к печати 16 ноября 2009 г.
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию
28 мая 2009 г.*