

Минералого-геохимические особенности и золотоносность пирита и арсенопирита золоторудного месторождения Южные Ашалы (Восточный Казахстан)

Греку Е. Д.¹, Калинин Ю. А.¹, Сердюков А. Н.², Наумов Е. А.³, Боровиков А. А.¹, Рагозин А. Л.¹, Гладков А. С.⁴

¹ Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия;

² ТОО «К-ПЛЕЙСЕР», г. Семей, Республика Казахстан; ³ Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, г. Москва, Россия;

⁴ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. В работе приводится краткая геологическая характеристика месторождения Южные Ашалы (Восточный Казахстан), в котором зафиксированы золото-сульфидный и золото-малосульфидно-кварцевый типы руд. Установлены два рудных этапа, которые включают в себя четыре стадии: пиритовую, пирит-арсенопиритовую, сульфидную и полиметаллическую. Охарактеризованы морфологические и минералого-геохимические особенности рудных минералов. Выделены последовательные генерации пирита: диагенетический, метаморфический и гидротермальный, включающие в себя шесть морфологических разновидностей, каждой из которых присущи свои геохимические особенности. Зафиксированы и визуально подтверждены повышенные концентрации золота в диагенетическом пирите. Изучено самородное золото двух генераций, характеризующихся средней пробностью 884 ‰ (ранняя) и 998 ‰ (поздняя). Температура преобразования углистого вещества пород буконовской свиты и образования золото-сульфидного типа руд варьирует от 384 до 241 °С, что соответствует зеленосланцевой–цеолитовой фации метаморфизма.

Ключевые слова: Восточный Казахстан; Западно-Калбинский золотоносный пояс; минералогия руд; микроэлементный состав пирита и арсенопирита; LA-ИСП-МС метод анализа.

Для цитирования: Греку Е. Д., Калинин Ю. А., Сердюков А. Н., Наумов Е. А., Боровиков А. А., Рагозин А. Л., Гладков А. С. Минералого-геохимические особенности и золотоносность пирита и арсенопирита золоторудного месторождения Южные Ашалы (Восточный Казахстан). Руды и металлы. 2024. № 4. С. 5–36. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10016.

Mineralogical and geochemical peculiarities and gold content of pyrite and arsenopyrite of the Southern Ashaly gold deposit (East Kazakhstan)

Greku E. D.¹, Kalinin Yu. A.¹, Serdyukov A. N.², Naumov E. A.³, Borovikov A. A.¹, Ragozin A. L.¹, Gladkov A. S.⁴

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia; ² K-PLACER LLP, Semey, Republic of Kazakhstan; ³ Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia; ⁴ Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

Annotation. The article provides a brief geological description of the Southern Ashaly mineral deposit within which ores of the gold-sulfide and gold-low-sulfide-quartz types were recognized. Two ore mineralization phases were established, that incorporate four stages, the pyrite, pyrite-arsenopyrite, sulfide, and polymetallic ones. The morphological and mineralogical-geochemical features of the major, minor, and rare ore minerals were studied in detail. The following successive generations of pyrite were established at the deposit: diagenetic, metamorphic, and hydrothermal, that embrace six varieties with its own geochemical features. Elevated concentrations of gold in diagenetic pyrite have been recorded and visually confirmed. Native gold of two generations is formed at the pyrite, pyrite-arsenopyrite (early), and sulfide (late) stages and have an average gold fineness of 884 and 998 ‰, respectively. The temperature of transformation of the carbonaceous matter of rocks of the Bukon Formation and of generation of the ores of the gold-sulfide type varies from 384 to 241 °C, which corresponds to the greenschist-zeolite facies of metamorphism.

Keywords: East Kazakhstan; West Kalba gold-bearing belt; ore mineralogy; microelement composition of pyrite and arsenopyrite; LA-ICP-MS analytical technique.

For citation: Greku E. D., Kalinin Yu. A., Serdyukov A. N., Naumov E. A., Borovikov A. A., Ragozin A. L., Gladkov A. S. Mineralogical and geochemical peculiarities and gold content of pyrite and arsenopyrite of the Southern Ashaly gold deposit (East Kazakhstan). Ores and metals. 2024. No. 4. pp. 5–36. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10016.



Светлой памяти Константина Романовича Ковалёва, выдающегося геолога и исследователя, посвятившего многие годы изучению рудных месторождений.

Введение. На территории Западно-Калбинского золотоносного пояса (ЗКЗП) Восточного Казахстана наиболее распространены золоторудные месторождения «орогенного» типа, локализованные преимущественно в углеродисто-терригенных толщах карбона (Бакырчик, Большевик, Суздаль, Жанан и др.). Оруденение таких «орогенных» золоторудных месторождений представлено значительными по запасам упорными арсенопирит-пиритовыми вкрапленными рудами с трудно извлекаемым золотом [1, 11]. Образование руд в сланцевых поясах связывается с предварительным накоплением золота в аутигенных сульфидах в ходе седиментации и диагенеза. Собственно золотое оруденение формируется при региональном метаморфизме в результате циркуляции метаморфогенных флюидов сквозь специализированные на золото породы. В это время продолжается концентрирование золота в новообразованных сульфидах, причём тонкий игольчатый арсенопирит является основным его концентратом, что обуславливает тесную корреляцию Au и As в рудах типовых орогенных месторождений. Содержание Au в пирите, как правило, на порядок ниже (месторождения Наталкинское, Сухой Лог, Нежданинское, Удерей).

Другим важным типом золотого оруденения ЗКЗП являются месторождения типа IRGD (Intrusion-related gold deposits), которые представлены жильными и штокверковыми минерализованными зонами в приконтактных частях гранитоидных интрузивов. Золоторудные месторождения ЗКЗП традиционно связывали со становлением плагиогранит-гранодиоритовых массивов кунушского комплекса (C_3-P_1) [6, 12]. Главным поисковым признаком служили приконтактные зоны массивов и локализованные в них богатые кварцевые жилы [5, 12], являвшиеся долгие десятилетия основным объектом золотодобычи (например, месторождение Акжал). Выявление в тех же рудных полях ЗКЗП мас-

штабных прожилково-вкрапленных зон золоторудной минерализации вне видимой связи с кислым магматизмом породило всплеск интереса к этому типу [15, 16, 30]. Поэтому представляются важными детальными минералогические, изотопно-геохимические, структурные, термобарогеохимические, геохронологические исследования орогенного месторождения Южные Ашалы. Его промышленные запасы и ресурсы составляют 13,5 (C_2) и 36,7 (P_1+P_2) тонн соответственно [3, 17], но в опубликованной литературе данные о геологическом строении и минералогии этого месторождения практически отсутствуют.

Цель данной статьи – выявить ключевые минералого-геохимические особенности «эталонного» для региона золоторудного месторождения Южные Ашалы, а в дальнейшем на основе полученных данных, с привлечением результатов изотопно-геохронологических, термобарогеохимических и структурных исследований создать непротиворечивую геолого-генетическую модель рудоформирующей системы, приведшей к образованию объектов подобного типа в Восточном Казахстане.

Геологическое строение. Месторождение Южные Ашалы расположено в юго-восточной части Акжал-Боко-Ашалинского золоторудного района (АБАЗР), приуроченного к юго-западной части Западно-Калбинского золотоносного пояса (рис. 1). Границы золоторудного района проходят по глубинным разломам северо-западного простирания: Горностаевско-Аркалыкско-Боконскому на юго-западе и Чарскому на северо-востоке (рис. 2) [2, 16, 29]. В состав района входит пять золоторудных полей: Акжалское, Боко-Васильевское, Тандинское, Вера-Чарское и Даубай-Ашалинское [14], а также около 70 месторождений и рудопроявлений. Район является промышленно активным, в его пределах осуществляются поисково-разведочные и добычные работы, на сегодняшний день ведётся разработка коренного золота открытым способом на месторождениях Акжал, Васильевское, Южные Ашалы и других.

Геологическое строение месторождения Южные Ашалы кратко охарактеризовано в

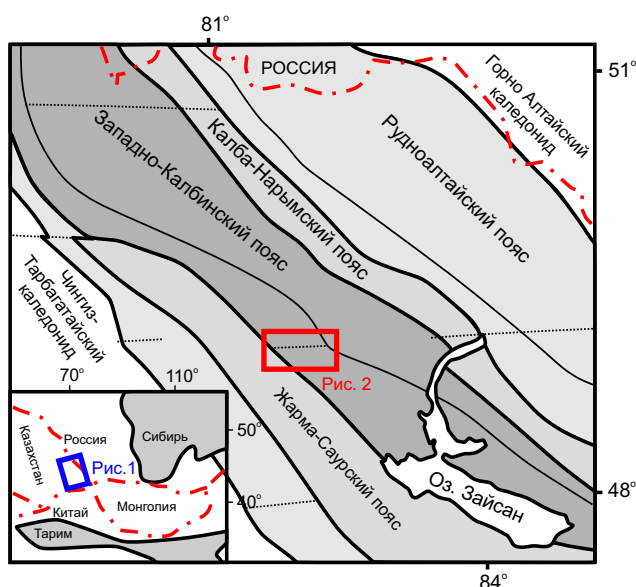


Рис. 1. Упрощённая металлогеническая схема Восточного Казахстана (по [20])

Fig. 1. Simplified metallogenic scheme of the Eastern Kazakhstan (after [20])

ряде публикаций [9, 15, 16, 21]. В данной работе обобщается геологическая информация, накопленная в ходе разведки и отработки месторождения, а также при тематических договорных работах.

Рудовмещающими являются углеродсодержащие терригенно-осадочные породы буконьской (C_2bk) и вулканогенно-осадочные породы даубайской (C_2db) свит (рис. 3). Породы буконьской свиты (мощностью до 200–300 м) лежат в основании разреза и смяты в узкие линейные складки субширотного простирания. По вещественному составу это алевролиты, песчаники, сланцы, которые образуются в условиях мелководного бассейна. Породы буконьской свиты перекрываются вулканитами даубайской свиты, представленными преимущественно базальтами, андезибазальтами и андезитовыми порфиритами, мощность покрова иногда более 300 метров. Порфириты на северо-восточном фланге месторождения перекрываются туфами и туфобрекчиями майтубинской свиты (C_2mt), мощность которых от десятков до сотен метров. Все породы претерпели региональный метаморфизм зелено-

сланцевой фации. Рассчитанная нами температура преобразования углистого вещества в углеродсодержащих терригенных породах буконьской свиты находится в интервале от 385 до 214 °C при среднем значении около 300 °C; расчёты проводились по специальной методике [31].

Магматизм в пределах АБАЗР представлен разнообразно, в широком возрастном диапазоне (см. рис. 2). Наиболее древними, доорогенными, считаются породы Чарского офиолитового пояса: серпентинизированные ультраосновные и основные породы, листвениты (C_1), габброиды (D_3-C_1) и вулканогенные образования – базальты, андезиты, дациты (D_3-C_1) и базальты, андезибазальты (D_3) [7, 38]. В позднеорогенную стадию сформировались вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы даубайской базальт-андезитовой ассоциации: нижняя толща – андезибазальты и андезиты (C_2db_1 – 311±2 млн лет); верхняя толща – преимущественно андезиты (C_2db_2 – 297±1 млн лет) [18]. В посторогенную стадию формировались породы: кунушского комплекса (C_3-P_1 – 307–300 млн лет) – плагиограниты, гранодиориты, гранит-порфиры и гранодиорит-порфиры [2, 5]; аргимбайского комплекса (P_1 – 293±2 млн лет) – габброиды; максутского комплекса (P_1 – 280±3 млн лет) – пикритоиды; тастауского массива (P_1 – 280±1 млн лет) – многофазные габбро-гранитные интрузии [18]. Также в посторогенную стадию в районе Тюрешокинской мульды отмечается вулканогенный аналог аргимбайского комплекса – субвулканические риолит-порфиры [18].

В пределах Ашалинского рудного поля выявлены дайки и малые тела основного и кислого состава, контролируемые главным образом зонами Южного, Поперечного и Долинного разломов (см. рис. 3). Дайки и малые интрузии, представленные альбитофирами, диоритовыми порфиритами, сиенит-порфирами, гранодиорит-порфирами и гранит-порфирами (C_3-P_1 – 309,1–298,7 млн лет) [9, 29], прорывают вмещающие породы буконьской и даубайской свит.

Золоторудная минерализация на месторождении представлена первичными рудами

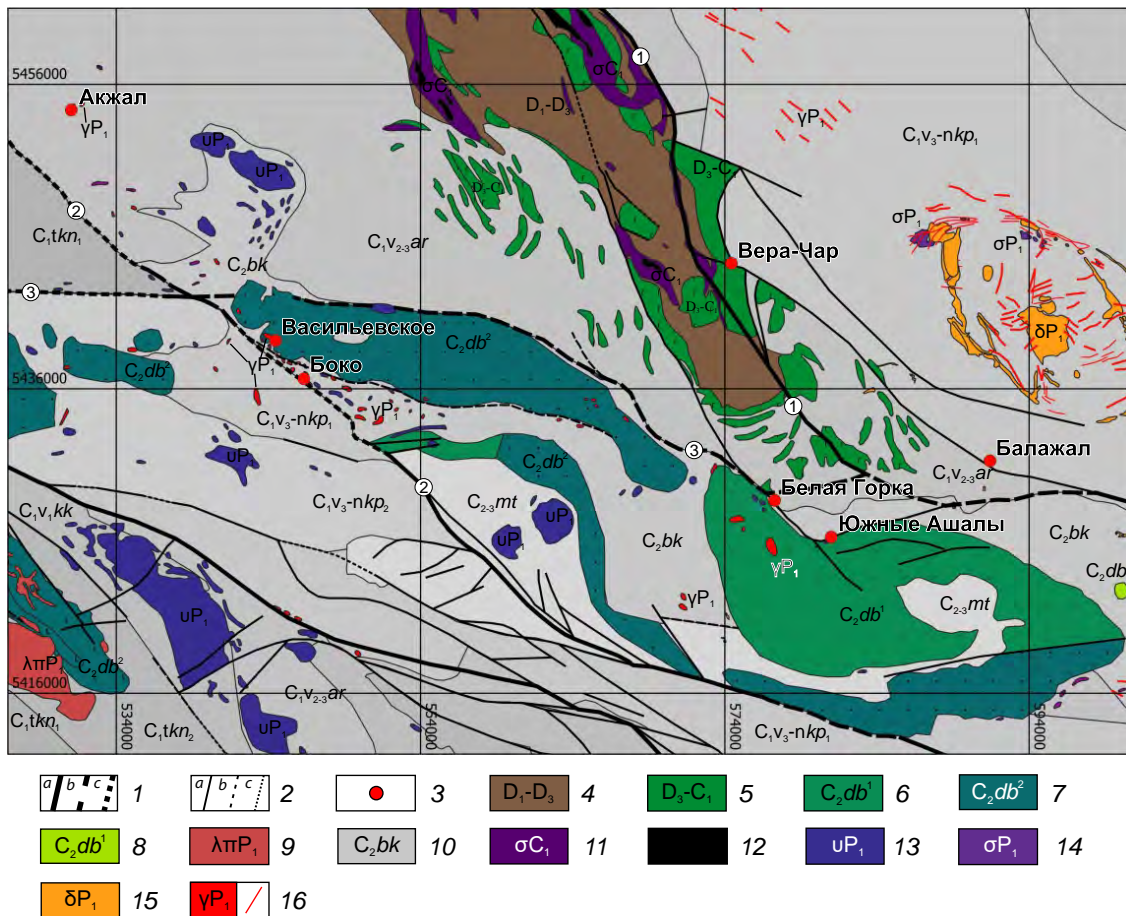


Рис. 2. Геологическая карта Акжал-Бок-Ашалинского золоторудного района (по данным [2, 4, 7, 18, 38], с дополнениями авторов):

разломы: 1 – главные (*a* – установленные, *b* – предполагаемые, *c* – перекрытые), 2 – второстепенные (*a* – установленные, *b* – предполагаемые, *c* – перекрытые). Основные разломы (цифры в кружках): 1 – Чарский, 2 – Горностаевско-Аркалыкско-Боконский, 3 – Южно-Акжалский (Сарыжалский); 3 – крупные месторождения; 4 – осадочные и вулканогенно-осадочные отложения (D_1 – D_3); 5 – базальты, андезитобазальты, кремнистые сланцы, дациты; даубайская свита верхнего карбона: 6 – нижняя вулканогенная толща, преимущественно андезитобазальты и андезиты, 7 – верхняя вулканогенная толща, преимущественно андезиты, 8 – экструзивные андезиты Тологайского купола; 9 – субвулканические риолит-порфиры; 10 – терригенные и осадочно-вулканогенные отложения (C_1 – $C_{2-3}mt$); 11 – серпентинизированные ультраосновные и основные породы, листвениты (верхневизейский комплекс); 12 – габброиды (D_3 – C_1); 13 – габброиды аргимбайского комплекса; 14 – пикритоиды максутского комплекса; 15 – породы гибридного состава тастауского комплекса; 16 – гранитоиды кунушского комплекса

Fig. 2. Geological map of the Akzhal-Boko-Ashaly gold ore region (modified after [2, 4, 7, 18, 38]):

1, 2 – Faults: 1 – main (*a* – determined, *b* – assumed, *c* – overlapped), 2 – auxiliary (*a* – determined, *b* – assumed, *c* – overlapped). Main faults (numbers in circles): 1 – Charsky, 2 – Gornostaevsk-Arkalyk-Bokon, and 3 – Southern-Akzhal (Saryzhal); 3 – large ore deposits; 4 – sedimentary and volcanosedimentary rock sequences (D_1 – D_3); 5 – basalts, basaltic andesites, cherty shales, and dacites; Daubai Formation of the Upper Carboniferous: 6 – lower volcanogenic sequence (mainly basaltic andesites and andesites), 7 – upper volcanogenic sequence (mainly andesites), 8 – extrusive andesites of the Tologai dome, 9 – subvolcanic rhyolite porphyries; 10 – terrigenous and sedimentary volcanogenic deposits (C_1 – $C_{2-3}mt$); 11 – serpentinized ultramafic and mafic rocks, listvenites (Late Visean Complex); 12 – gabbroids (D_3 – C_1); 13 – gabbroids of the Argimbai Suite; 14 – picritoids of the Maksut Suite; 15 – hybrid rocks of the Tastau Complex; 16 – granitoids of the Kunush Suite

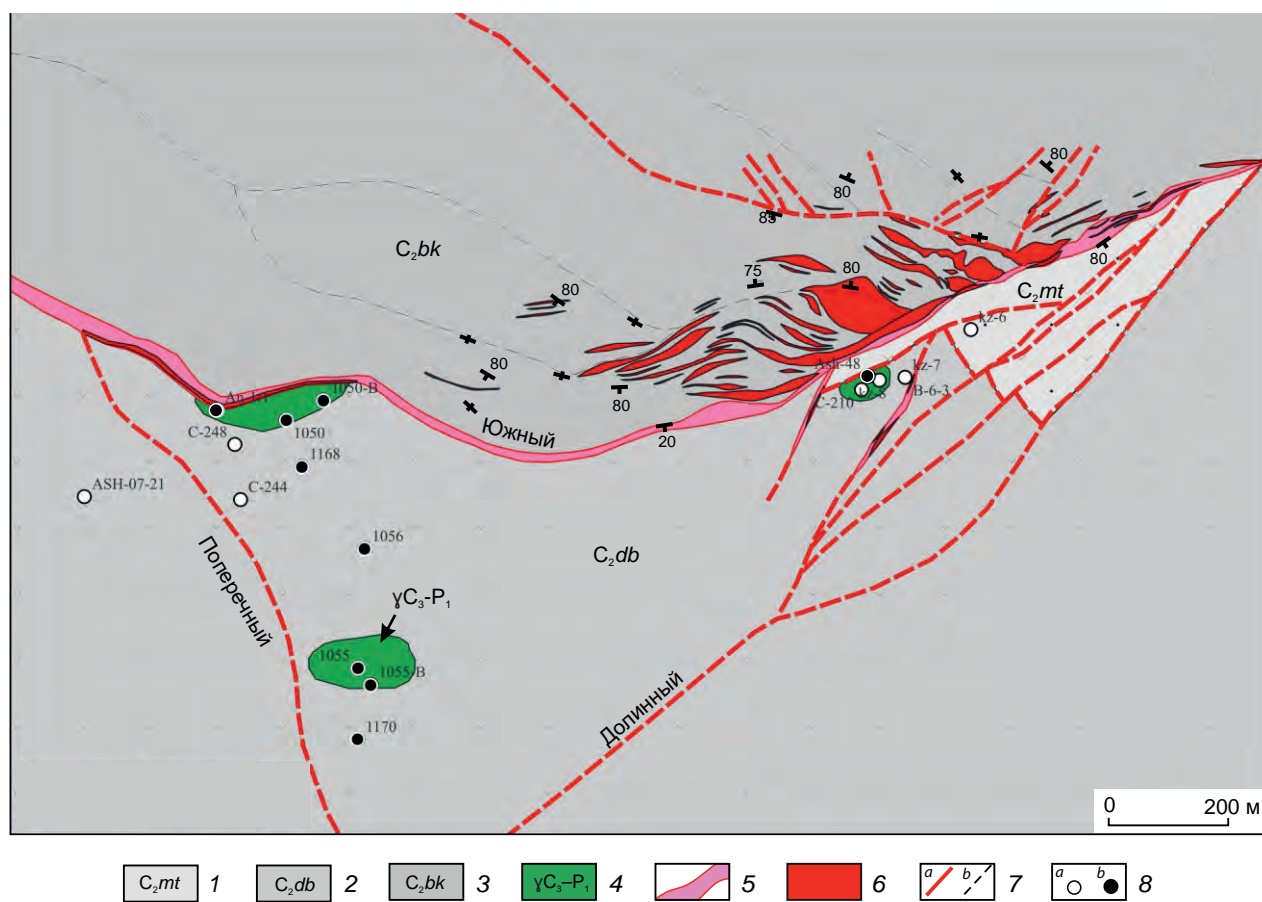


Рис. 3. Геологическая схема месторождения Южные Ашалы (по данным [8, 9, 16, 17], с дополнениями авторов): 1 – туфобрекчии (C_2mt); 2 – андезибазальты, андезиты, базальты (C_2db); 3 – терригенно-осадочные породы (C_2bk); 4 – сиенит-порфиры, диориты, гранодиориты (γC_3-P_1); 5 – углеродистые тектониты/милониты/катаклазиты (сдвиговые зоны); 6 – рудные тела; 7 – разломы (а), оси антиклинальных складок и элементы залегания (b); 8 – точки наблюдения: а – поверхность, b – скважина

Fig. 3. Schematic geological map of the Southern Ashaly deposit (modified after [8, 9, 16, 17]):

1 – tuffobrecchias (C_2mt); 2 – andesibasalts, andesites, basalts (C_2db); 3 – terrigenous sedimentary rocks (C_2bk); 4 – syenite–porphyries, diorites, granodiorites; 5 – carbonaceous tectonites/mylonites/cataclasites (shear zones); 6 – ore bodies; 7a – faults, 7b – axes of anticlinal folds and elements of occurrence; 8 – observation points: 8a – surface, 8b – well

двух типов: золото-сульфидного и золото-малосульфидно-кварцевого. В рудах первого типа установлена тонковкрапленная, гнездово-прожилковая и стратиформная золотосодержащая сульфидная минерализация, реже тонковкрапленное самородное золото в углеродистых алевролитах, песчаниках и кремнистых сланцах. Содержание сульфидов в руде достигает 15 %, в них локализуется «неви-

димое» и мелкокрапленное золото, размер его выделений менее 15 мкм. Содержание Au в рудах первого типа варьирует от 0,34 до 13,2 г/т. В рудах второго типа установлена золото-сульфидная минерализация в кварцевых, карбонат-кварцевых жилах и окварцованных брекчиях различных типов пород, с содержанием сульфидов не более 1–3 %. Золото самородное, размером до 0,3 мм в диа-

метре, с редкими включениями жильных минералов. Содержание Au в рудах варьирует от 1,5 до 28,1 г/т (среднее – 4,4–8,7 г/т). Рудные тела контролируются тектоническими зонами, в которых интенсивно проявлены гидротермально-метасоматические и динамометаморфические преобразования. Преобладают зоны брекчирования и прокварцевания, а также серицитизация, хлоритизация, карбонатизация, альбитизация и сульфидизация.

В пределах месторождения установлено два морфологических типа руд. Первый (золото-сульфидный) тип в виде минерализованных зон приурочен к углеродсодержащим терригенным породам буконьской свиты, смятым в узкие линейные складки субширотного простирания. Зоны простираются в западном, северо-западном направлениях (от 10 до 600 м) и приурочены к областям смятия вдоль Южного разлома. Рудные зоны кулисообразного залегания линзообразной формы, мощностью от 5 до 15 м оконтуриваются по данным опробования и прослеживаются на глубину более 300 м. Второй (золото-малосульфидно-кварцевый) тип представляет собой жилы, которые прорывают вмещающие породы. Они, как правило, простираются в западном, запад-северо-западном направлениях и приурочены к сложным узлам пересечения разноориентированных разломных структур. Жилы прослеживаются до 300 м на глубину, их мощность не постоянна и варьирует от 0,3 до 1,5–2 м. Нередко отмечается пространственное совмещение двух морфологических типов руд, где жилы прорывают зоны минерализации.

Материалы и методы исследования. В основу работы положен фактический материал, полученный и обобщённый авторами в ходе полевых исследований в период с 2016 по 2022 гг. Образцы отобраны из керна скважин, штупов карьера, геологических обнажений и канав месторождения Южные Ашалы. Для минералого-геохимического исследования руд применялись различные методы. Оптические исследования и фотодокументация аншлифов и пластинок выполнены на микроскопе «Olympus BX53 P» с цифровой камерой DP72. Составы, зональность и взаимоотношение раз-

личных минеральных фаз определялись с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «MIRA 3LMU» (Tescan, Чехия; аналитики Н. С. Карманов, М. В. Хлестов) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 XMax 80 (Oxford Instruments, Великобритания) в режимах вторичных (SE) и обратно-рассеянных электронов (BSE) при различных увеличениях (ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка 1 нА и время накопления сигнала 20 с). Картирование пирита и арсенопирита проведено в характеристическом излучении NiKa, AsLa, AuLa, AgLa, CoKa, FeKa, SKa, SbLa на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8230 (Jeol Ltd) (аналитик В. А. Даниловская). Содержания Au и Ag в породах и мономинеральных фракциях определены атомно-абсорбционным методом (аналитик В. Н. Ильина). Определение содержаний микроэлементов в пирите и арсенопирите проводилось методом масс-спектрометрии с лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС) с использованием квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой iCAP Qc (Thermo Scientific), объединённого с устройством лазерного пробоотбора NewWave Research 213 (Elemental Scientific; лазер Nd:YAG; длина волны 213 нм; аналитик А. Л. Рагозин). В качестве внешнего стандарта использовался многоэлементный сертифицированный стандартный образец стекла NIST 612, в качестве внутреннего стандарта – определённые с помощью ЭДС (SEM «MIRA 3LMU») концентрации Fe. Дрейф чувствительности прибора контролировался съёмкой NIST 610 в качестве неизвестного образца. Диаметр пятна абляции – 50 мкм, частота повторения импульсов – 10 Гц, плотность энергии ~ 3,5 Дж/см². Пробоподающий газ – гелий (0,5 л/мин) и дополнительный поток аргона (0,8 л/мин). Времена задержки (т. е. время измерения каждого изотопа за одну развёртку квадруполья) устанавливались в 10 мс на каждую массу, один проход по всем массам за развёртку. Время анализа составляло 85 с на точку, включая 30 с для определения фоновых значений. Данные накапливались в режиме временного разрешения в виде «временных срезов» в целях



определения изменения концентрации элемента во времени. Анализируемые изотопы определялись одновременно по массе и по времени достижения максимума во «временном срезе». Через каждые 10 образцов проводилось измерение стандартов NIST 612.

Углеродистое вещество изучалось в полированных пластинках толщиной 0,2 мм методом рамановской спектроскопии. Измерения проводились на рамановском спектрометре Horiba Labram HR800. Возбуждение в образце осуществлялось лазером с длиной волны 532 нм и мощностью на выходе 50 мВт. Регистрация спектра производилась полупроводниковым детектором (CCD-матрицей), охлаждаемым по методу Пельтье. Набор спектра углеродистого вещества осуществлялся в диапазоне 1100–1800 см⁻¹. Время накопления одного спектра составляло 10 с, один анализ включал 5 накоплений. В каждом образце анализировалось не менее 30 чешуй углеродистого вещества. Полученные спектры обрабатывались в компьютерной программе Fityk (версия 1.3.1). В качестве базовой линии принималась кривая полиномиальной функции 3-го порядка, проходящая по средним значениям фонового шума. После вычитания базовой линии проводилась аппроксимация пиков (D1, G, D2) с использованием функции Войта (Voigt) (Fityk manual, 2018). Площадь (интегральная интенсивность), интенсивность (высота), положение центра пиков и полная ширина в половине максимума (FWHM) были определены для всех пиков (т. е. для D1, G и D2). Оценка температур осуществлялась с использованием геотермометров Бейссак и др. (2002) и Кукецу и др. (2014).

Все аналитические исследования проводились в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» СО РАН (г. Новосибирск).

Текстуры руд месторождения Южные Ашаны разнообразны: наибольшее распространение имеют вкрапленные, прожилково-вкрапленные, часты полосчатые, брекчиевые, гнездовые и прожилковые.

Брекчиевые и гнездовые текстуры встречаются главным образом в осевой части Южного разлома и приурочены к рудам золото-

малосульфидно-кварцевого типа (рис. 4, *c, e, g*). Прожилковые текстуры широко распространены в пределах всего месторождения, вне зависимости от типа руд (см. рис. 4, *f, h*). Полосчатые текстуры встречаются на месторождении в участках развития углеродсодержащих алевролитов и песчаников (см. рис. 4, *a, b, d*). Они представлены чередованием кварцевых и пирит-алевролитовых полос шириной до 0,5 см. Вкрапленные и прожилково-вкрапленные текстуры выявляются в пределах месторождения повсеместно и развиваются как по вмещающим (вулканическим и осадочным) породам, так и по жилам (карбонат-кварцевого, кварцевого состава), вне зависимости от типа руд (см. рис. 4, *a–c, g, i*).

Рудная минерализация

Сульфиды и сульфосоли. Пирит является самым распространённым сульфидным минералом. На месторождении Южные Ашаны установлены четыре генерации пирита, отличающиеся по морфологии, структурно-текстурным особенностям, геохимии и минеральным ассоциациям. На основании вышеописанных признаков выделено семь разновидностей пирита (рис. 5): фрамбоидальный (Py-Ia); сферический (Py-Iб); сферически-прожилковый (Py-Iв); эвгедральный с микровключениями (Py-IIa), эвгедральный мышьяковистый (Py-IIб); эвгедральный никелевый (Py-III); изометрический, в результате замещения (Py-IV).

Py-I (Fe_{1,01}S₂) в виде вкрапленности фрамбоидальных и сферических зёрен, а также цепочечных (прожилковых) агрегатов, приуроченных к углеродсодержащим осадочным породам буконьской свиты, обычно расположен параллельно слою. В пределах месторождения встречается достаточно редко. Фрамбоиды в виде шариков размером до 30–50 мкм в диаметре (Py-Ia) состоят из кристаллов кубического и октаэдрического габитусов размером не более 5–7 мкм (см. рис. 5, *a, b*). Сферический пирит (Py-Iб) распространён менее, чем фрамбоидальный, и рассматривается нами как морфологическая разновидность последнего, размер зёрен не более 70 мкм в диаметре (см. рис. 5, *c*). Сферические выделения округлой формы нередко образуют прожил-

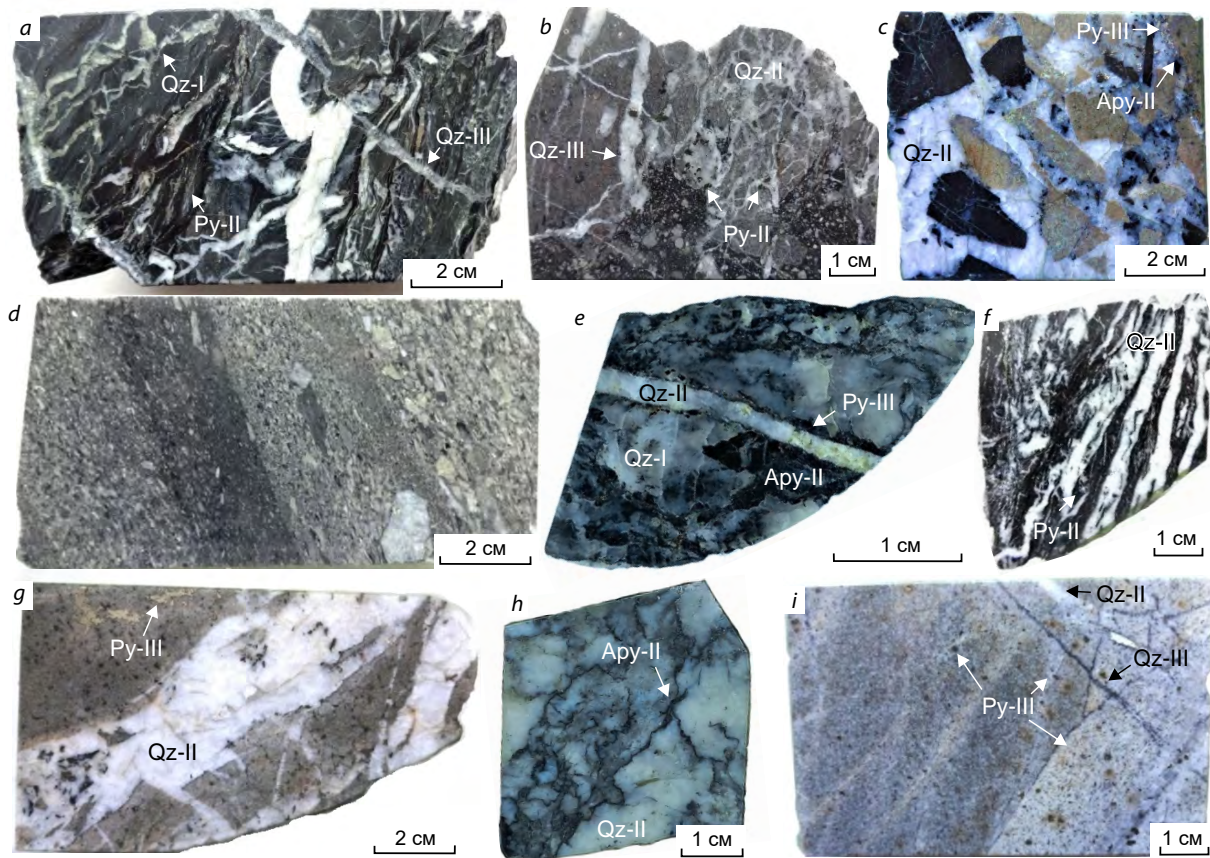


Рис. 4. Текстуры руд месторождения Южные Ашалы:

a – деформированный и брекчированный углеродисто-пелитовый сланец с несколькими генерациями серого и белого жильного кварца и послойно-просечковой сульфидной минерализацией; *b* – прокварцованная брекчия, состоящая из обломков андезибазальтового порфирита и углеродисто-кремнистого сланца с сульфидной и кварцево-жильной минерализацией нескольких генераций; *c* – брекчия из сульфидизированных обломков базальта и углеродистого сланца, сцементированных кварцем; *d* – градационно-слоистая обломочная порода; *e* – брекчированный углеродисто-кремнистый сланец с вкрапленной и прожилковой кварц-сульфидной минерализацией; *f* – углеродисто-пелитовый сланец с послойной сульфидной минерализацией и кварцевым прожилкованием; *g* – брекчия из обломков базальта, сцементированных кварцем с вкрапленно-гнездовой сульфидной минерализацией; *h* – кварцевая жила с кварц-сульфидными прожилками; *i* – андезит с кварцевыми прожилками и обильной вкрапленностью пирита; здесь и далее Ab – альбит, Apy – арсенопирит, Au – золото, Bnn – бурнонит, Ccp – халькопирит, Cs – халькозин, Cv – ковеллин, Dol – доломит, Fhl – блёклая руда, Gdf – герсдорфит, Gl – глаукоdot, Gn – галенит, Mrc – марказит, Py – пирит, Pyh – пирротин, Qz – кварц, Sd – сидерит, Sph – сфалерит, Ttd – тетраэдрит

Fig. 4. Ore textures of the Southern Ashaly deposit:

a – deformed and brecciated carbonaceous-pelitic shale with several generations of gray and white vein quartz and bedded stringer sulfide mineralization; *b* – silicified breccia consisting of fragments of andesibasalt porphyrite and carbonaceous-cherty shale with sulfide and quartz-vein mineralization of several generations; *c* – breccia of sulfidized fragments of basalt and carbonaceous shale, cemented with quartz; *d* – gradation-layered detrital rock; *e* – brecciated carbonaceous-cherty shale with disseminated and veinlet quartz-sulfide mineralization; *f* – carbonaceous-pelitic shale with bedded sulfide mineralization and quartz veining; *g* – breccia of basalt fragments cemented with quartz with disseminated-nested sulfide mineralization; *h* – quartz vein with quartz-sulfide veinlets; *i* – andesite with quartz veinlets and abundant pyrite dissemination; here and after: Ab – albite, Apy – arsenopyrite, Au – gold, Bnn – bournonite, Ccp – chalcopyrite, Cs – chalcocite, Cv – covellite, Dol – dolomite, Fhl – fahlore, Gdf – gersdorffite, Gl – glaucodot, Gn – galena, Mrc – marcasite, Py – pyrite, Pyh – pyrrhotite, Qz – quartz, Sd – siderite, Sph – sphalerite, Ttd – tetrahedrite

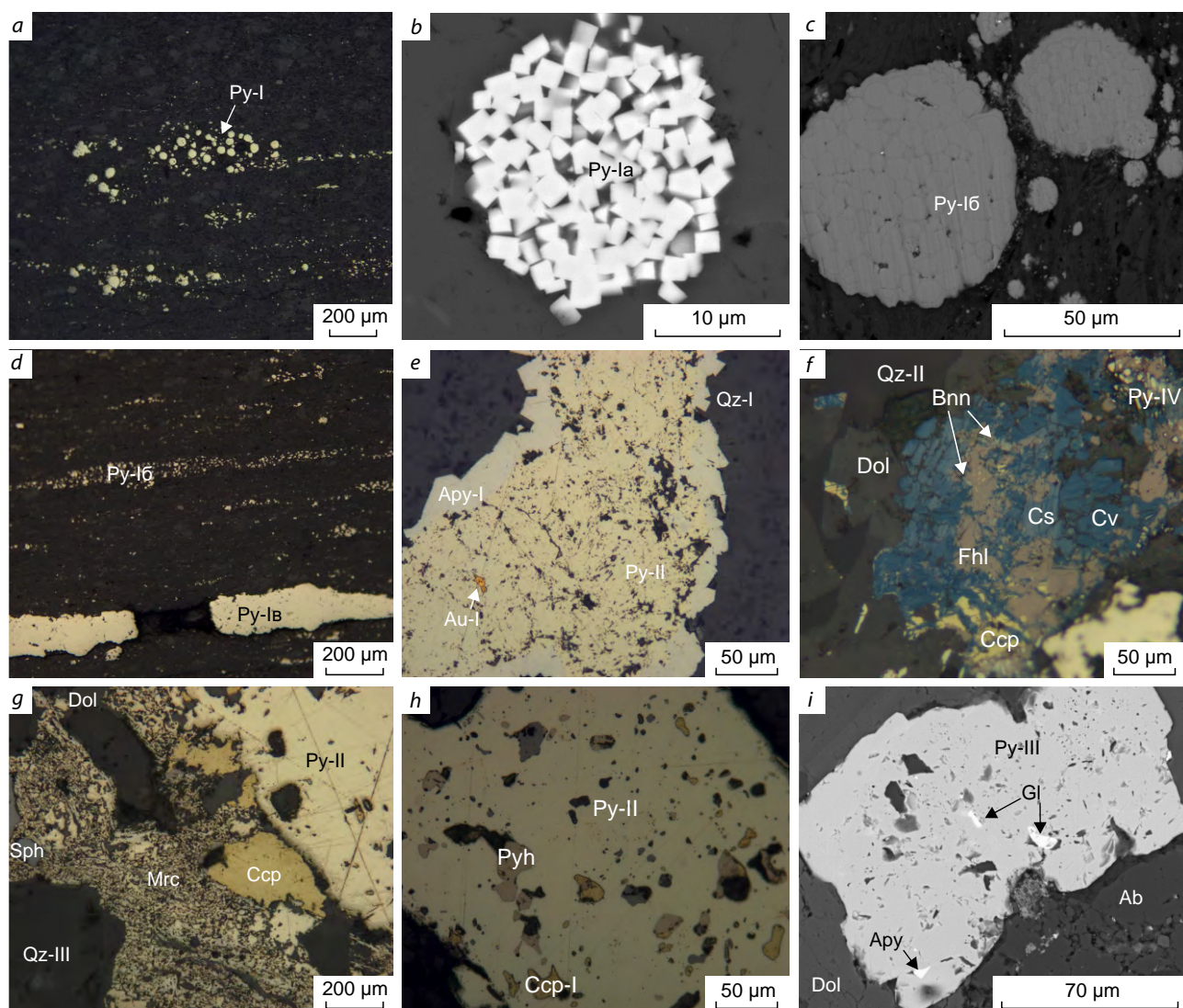


Рис. 5. Формы выделения пирита в рудах месторождения Южные Ашалы:

a – вкрапленность фрамбOIDов и сферических агрегатов Py-I в углеродистых сланцах; *b* – фрамбOID пирита; *c* – сферический сросток микрокристаллов Py-I; *d* – вкрапленность и прожилки Py-I в углеродсодержащем сланце; *e* – кавернозный Py-II с включением золота обрастает арсенопиритом-I; *f* – прожилок доломит-халькопирит-пирит-сульфосолевого состава с плёнками ковеллина и халькозина; *g* – халькопирит, сфалерит и Py-II обрастают марказитом; *h* – Py-II с включением халькопирита-I, пирротина и нерудных минералов; *i* – кавернозный Py-III с включением глаукодота и арсенопирита. *a, d–h* – оптический микроскоп, PPL; *b, c, i* – сканирующий электронный микроскоп (СЭМ), режим BSE

Fig. 5. Forms of pyrite segregations in ores of the Southern Ashaly deposit:

a – dissemination of framboids and spherical aggregates of Py-I in carbonaceous shales; *b* – pyrite framboid; *c* – spherical intergrowth of Py-I microcrystals; *d* – dissemination and veinlets of Py-I in carbon-bearing shale; *e* – cavernous Py-II with the inclusion of gold is overgrown with arsenopyrite-I; *f* – veinlet of dolomite-chalcopyrite-pyrite-sulfosalt composition with covellite and chalcocite films; *g* – chalcopyrite, sphalerite, and Py-II are overgrown with marcasite; *h* – Py-II with inclusion of chalcopyrite-I, pyrrhotite, and non-metallic minerals; *i* – cavernous Py-III with inclusion of glaucodote and arsenopyrite. Notes: *a, d–h* – optical microscope, PPL; *b–c, i* – scanning electron microscope (SEM), BSE mode

ковидные скопления вдоль слоистости породы, редко встречаются массивные прожилки (Ру-IV, см. рис. 5, d). Ру-IV и Ру-IV образуются в результате диагенетического преобразования Ру-IVa. В межзерновом пространстве сферической и сферически-прожилковой разновидности Ру-IV отмечаются минеральные включения золота-I, халькопирита-I и блёклой руды (тетраэдрита-I), размер включений менее 5–7 мкм. Проведённое картирование (микроанализатор JXA-8230) и исследование состава (SEM/EDX, ЛА-ИСП-МС) пирита позволило установить, что Ру-IV обогащён V, Ni, Co, Cu, Ti, Ag, W, Pt, Au, Hg, Pb, Zn и Bi относительно Ру-II и III (рис. 6; табл. 1). Также установлены геохимические различия внутри генерации: Ру-IV обогащён (г/т) Au (до 484), Ni (до 1966), Cu (до 1973), As (до 8902), Se (до 110), Ag (до 38), Sn (до 7,86) и обеднён Al, Ti, V, Mn, Zr, Mo, Ba, La, W, Pt, Tl, Bi относительно Ру-IVb. При этом, по данным ЛА-ИСП-МС, в Ру-IVb среднее содержание Au и Ag составляет 4,14 и 10,4 г/т, а в Ру-IV – 236,6 и 26,4 г/т соответственно (см. табл. 1). По результатам SEM/EDX, содержания Ni и Co в Ру-IV ниже предела обнаружения (0,15 %) (табл. 2). Зачастую отмечается, что Ру-IV слагает ядерные части вкрапленных зёрен, а Ру-II обрастает его (см. рис. 6).

Ру-II ($\text{FeAs}_{0,05}\text{S}_{1,95}$), распространённый в виде вкрапленности в осадочных породах бунконской свиты, встречается чаще, чем фрамбоидальный Ру-IV и эвгедральный Ру-III, IV. Центральная часть минерала кавернозного строения (Ру-IIa) со значительным количеством микровключений обрастает эвгедральным (кристаллическим) пиритом (Ру-IIб) с меньшим количеством включений. Эвгедральный пирит в сростании с игольчатым, дипирамидальным арсенопиритом-I образует кристаллы октаэдрического и кубического габитусов, размер которых варьирует от 50 до 500 мкм в поперечнике. В Ру-II отмечаются включения углеродистого вещества (графита?), пирротина, халькопирита-I, тетраэдрита-I и золота-I, размер которых редко превышает 20 мкм в диаметре (см. рис. 5, e, h и табл. 2). Ру-II зонального строения: централь-

ная часть зерна (Ру-IIa) обогащена Cu, Zn, Se, Mo, Ag, Sb, Pt, Pb и S (см. табл. 1 и рис. 6), тогда как на периферии (Ру-IIб) установлена осцилляторная зональность As и Ni (см. рис. 6, b, c). Содержания Au и Ag, по данным атомно-абсорбционного анализа, в мономинеральной фракции Ру-II составляют 92 и 4 г/т соответственно, а среднее их содержание, по данным ЛА-ИСП-МС, 85 и 14,5 г/т – для Ру-IIa, 34 и 1 г/т – для Ру-IIб соответственно (см. табл. 1).

Ру-III ($(\text{Fe}_{0,99}\text{Ni}_{0,02})_{1,01}\text{As}_{0,03}\text{S}_{1,97}$) менее распространён, нежели первые две генерации, он отмечается в виде вкрапленности, прожилок и гнёзд как в кварцевых жилах, так и во вмещающих породах. Кристаллизуется в виде кавернозных зёрен кубического, октаэдрического, редко пентагон-додекаэдрического габитусов, размером от 15 до 350 мкм в поперечнике. Ру-III отмечается в сростании с арсенопиритом-II; в минерале установлены включения анатаза, глаукодота ($(\text{Ni}_{0,08}\text{Fe}_{0,32}\text{Co}_{0,55})_{0,95}\text{As}_{0,71}\text{S}_{1,29}$), герсдорфита ($(\text{Co}_{0,1}\text{Fe}_{0,42}\text{Ni}_{0,49})_{1,01}\text{As}_{0,87}\text{S}_{1,13}$) и пирротина (см. рис. 5, i); его поры и трещины заполняются галенитом, халькопиритом-II, сфалеритом и блёклыми рудами-II. По данным SEM/EDX, Ру-III относительно ранних его генераций обогащён примесями As (до 1,8 мас. %), также установлены примеси Ni (до 1,2 мас. %), повышенные содержания этих элементов сопровождаются зональностью (см. табл. 2). По геохимическим данным, ЛА-ИСП-МС установлены неоднородности в составе Ру-III, которые, скорее всего, связаны с микровключениями анатаза – Ti, V, W и арсенопирита. При этом максимальные содержания Au и Ag составляют 35 и 2,5 г/т соответственно.

Ру-IV образуется в результате замещения халькопирита блёклой рудой, из-за избыточного количества железа. Зёрна изометрического облика размером не более 20 мкм в диаметре (см. рис. 5, f). Плохо изучен из-за слабой распространённости.

Марказит в пределах месторождения имеет слабое распространение и отмечается на поздних стадиях рудообразования. Наблюдаются агрегаты пластинчатой, чешуйчатой и неправильной форм выделения, размер кото-

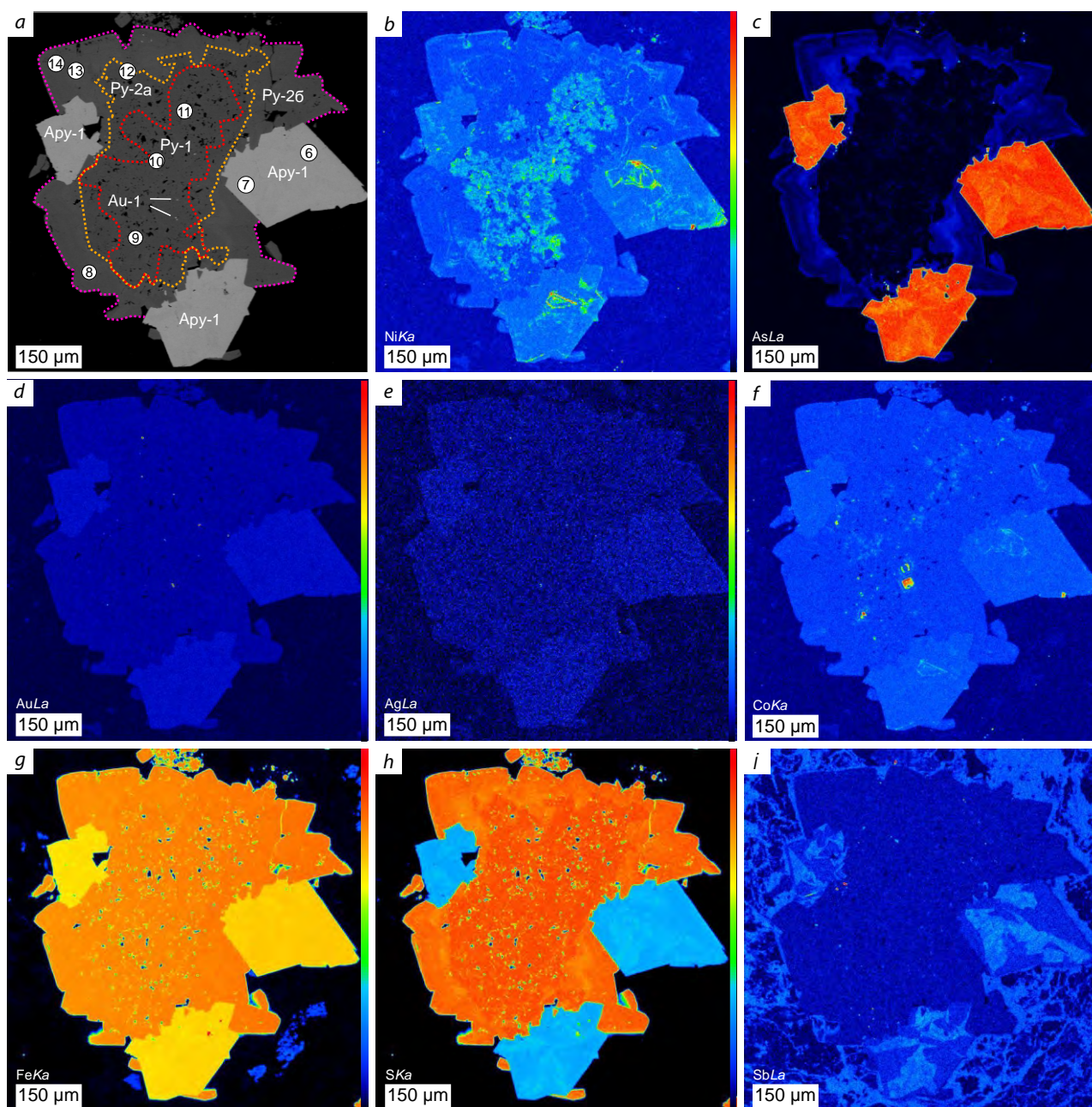


Рис. 6. Картирование пирита и арсенопирита на микроанализаторе JXA-8230 (обр. kz-08-2):

a – изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE), СЭМ; кругами обозначены анализы ЛА-ИСП-МС и их номера (см. табл. 1); *b–i* – распределение главных элементов и элементов-примесей в пирите и арсенопирите в характеристическом излучении NiKa, AsLa, AuLa, AgLa, CoKa, FeKa, SKa, SbLa; шкала расположена справа от карт: красный цвет – наибольшая интенсивность

Fig. 6. Mapping of pyrite and arsenopyrite on the JXA-8230 microanalyzer (Sample kz-08-2):

a – backscattered electrons image (BSE), SEM; circles indicate the analyses of LA-ICP-MS and their numbers (see table 1); *b–i* – distribution of the major elements and trace elements in pyrite and arsenopyrite in the characteristic radiation of NiKa, AsLa, AuLa, AgLa, CoKa, FeKa, SKa, SbLa; the scales are on the right of the maps: red color for the maximum intensity



Табл. 2. Химический состав пирита, SEM/EDX, мас. %

Table 2. Chemical composition of pyrite, SEM/EDX, wt. %

Генерация	№ образца	Fe	Ni	As	S	Сумма	Формула
Py-I	210/12	47,02	–	–	53,35	100,37	$Fe_{1,01}S_2$
Py-I	210/13	46,5	–	–	52,61	99,11	$Fe_{1,01}S_2$
Py-I	kz-8-2	46,96	–	–	53,39	100,35	$Fe_{1,01}S_2$
Py-I	kz-8-2	47,12	–	–	53,53	100,65	$Fe_{1,01}S_2$
Py-I	210/11	46,58	–	–	52,54	99,12	$Fe_{1,01}S_2$
Py-II	248/3	45,05	–	5,42	49,56	100,6	$FeAs_{0,09}S_{1,91}$
Py-II	248/3	45,61	–	4,27	50,75	99,4	$FeAs_{0,07}S_{1,93}$
Py-II	210/15	45,96	–	2,46	51,02	100,3	$Fe_{1,01}As_{0,04}S_{1,96}$
Py-II	Sh-4	46,03	–	2,66	51,29	100	$Fe_{1,01}As_{0,04}S_{1,96}$
Py-II	Sh-9	45,45	–	1,8	51,21	98,5	$FeAs_{0,03}S_{1,97}$
Py-III	244/6	45,89	1,17	–	53,23	100,3	$(Fe_{0,99}Ni_{0,02})_{1,01}S_2$
Py-III	244/6	45,74	0,82	–	52,44	99	$(FeNi_{0,02})_{1,02}S_2$
Py-III	Sh-4	45,11	0,74	1,78	51,45	99	$(Fe_{0,99}Ni_{0,02})_{1,01}As_{0,03}S_{1,97}$
Py-III	Sh-5	45,03	0,6	1,74	51,35	98,7	$(Fe_{0,99}Ni_{0,01})_{1,0}As_{0,03}S_{1,97}$
Py-III	244/6	45,89	1,17	–	53,23	100,29	$Fe_{1,01}S_2$

рых иногда достигает 0,5 мм в диаметре. В наблюдаемых образцах этим минералом обрастают халькопирит-II, сфалерит, Py-II и тетраэдрит (см. рис. 5, g).

Арсенопирит является вторым по распространённости рудным минералом на месторождении. Арсенопирит-I ($Fe_{1,01}As_{0,92}S_{1,08}$) поздней стадии золото-сульфидного этапа сформировался в результате гидротермально-метасоматического преобразования углеродсодержащих терригенных пород буконьской свиты, в которых он и локализуется. Чаще всего образует рассеянную вкрапленность игольчатых, длиннопризматических и дипирамидальных кристаллов размером от 20 до 500 мкм вдоль удлинения. Реже арсенопирит-I отмечается в виде реликтов и обломков кристаллов в более поздних кварц-сульфидных жилах. Количество минерала в породе обычно не превышает 1–3 %, в наиболее богатых рудных телах достигает 7 %. Арсенопирит-I наблюдается в сростании с кавернозным Py-II и пластинчатым пирротинном, редко в нём отмечаются включения фрамбоидального Py-I (рис. 7, a–d). Средний химический

состав минерала: Fe – 34,58, As – 41,61, S – 21,45 мас. %, при этом отношение As/S – 0,7. Арсенопирит-I попадает в область высокозолотоносного арсенопирита, характерного для месторождений Большевик, Суздаль и Жерек [10]. Относительно стандартного химического состава минерала обогащён серой и обеднён мышьяком (рис. 8; табл. 3), тогда как содержание железа соответствует стандарту. Содержание золота, определённое атомно-абсорбционным методом в мономинеральных фракциях, достигает 500 г/т, редко отмечаются прожилки и вкрапленность золота-I (см. ниже). Картирование арсенопирита-I показало зональное распределение As, Sb и S, при этом пониженные концентрации As и S (см. рис. 6, c, h) компенсируются повышенными содержаниями Sb (см. рис. 6, i). Также отмечаются осцилляторная зональность по Ni, Co (см. рис. 6, b, f) и равномерное распределение Au и Ag (см. рис. 6, d, e). Максимальные содержания Au и Ag, по данным ЛА-ИСП-МС, составляют 230 и 20 г/т соответственно.

Арсенопирит-II ($Fe_{0,99}Ni_{0,03}As_{0,9}S_{1,1}$) сульфидной стадии золото-малосульфидно-кварцево-

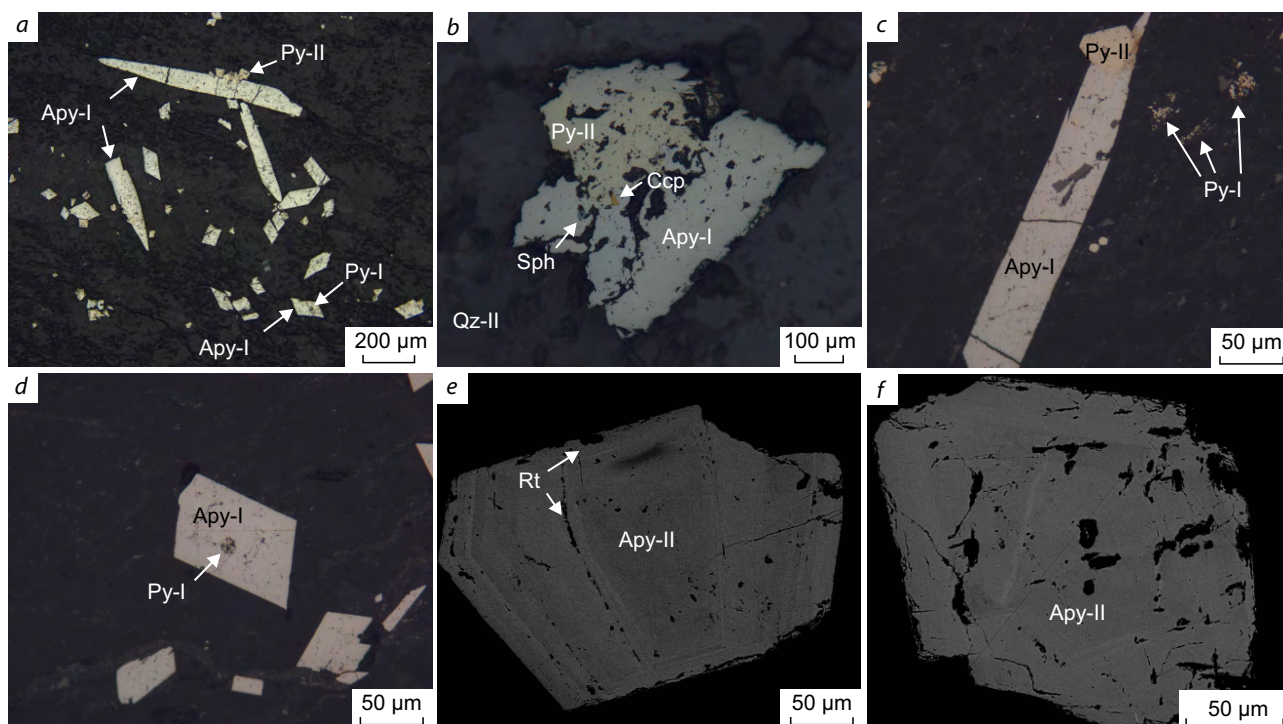


Рис. 7. Арсенопирит месторождения Южные Ашалы:

a – включения Py-I в арсенопирите-I и сростание последнего с Py-II в углеродистом сланце; *b* – сростание арсенопирита-I и Py-II с включением сфалерита и халькопирита в кварцевом матрице; *c* – игольчатый кристалл арсенопирита-I в сростании с Py-II и фрамбоиды Py-I в виде вкрапленности в углеродистом сланце; *d* – включение Py-I в арсенопирите-I; *e* – зональный кристалл арсенопирита-II с включениями анатаза (рутила?); *f* – сростки зональных кристаллов арсенопирита-II; *a-d* – оптический микроскоп, PPL; *e, f* – СЭМ, BSE

Fig. 7. Arsenopyrite of the Southern Ashaly deposit:

a – inclusions of Py-I in arsenopyrite-I and intergrowth of the latter with Py-II in carbonaceous shale; *b* – intergrowth of arsenopyrite-I and Py-II with the an inclusion of sphalerite and chalcopyrite in the quartz matrix; *c* – needle crystal of arsenopyrite-I in intergrowth with Py-II and Py-I framboids in the form of inclusions in carbonaceous shale; *d* – inclusion of Py-I in arsenopyrite-I; *e* – zonal crystal of arsenopyrite-II with inclusions of anatase (rutile?); *f* – intergrowths of zonal crystals of arsenopyrite-II. Notes: *a-d* – optical microscope, PPL; *e-f* – SEM, BSE

го этапа наблюдается в виде короткопризматических, таблитчатых кристаллов размером от 5 до 200 мкм в диаметре (см. рис. 7, *e, f*). Содержание минерала в породе менее 1 %. Установлены включения анатаза (рутила?) и пирротина, сростания с кавернозным Py-III, а также заполнение пор и трещин золотом, галенитом, сфалеритом, халькопиритом и блёклыми рудами. Выявлена чёткая зональность арсенопирита-II, она связана с примесями Co (< 0,7 мас. %) и Ni (< 3,1 мас. %) в периферийной части минерала (см. рис. 7, *e*). Средний

химический состав арсенопирита-II идентичен химическому составу арсенопирита-I (см. табл. 3). Можно предположить, что арсенопирит-II образовался в результате рекристаллизации золотоносного игольчатого арсенопирита-I раннего этапа. В пределах месторождения минерал слабо распространён, отчего и изучен плохо.

Минералы Ni и Co относятся к редким минералам и встречаются в виде мелких включений в пирите, сростков с арсенопиритом и свободных зёрен в карбонате, размер зёрен не

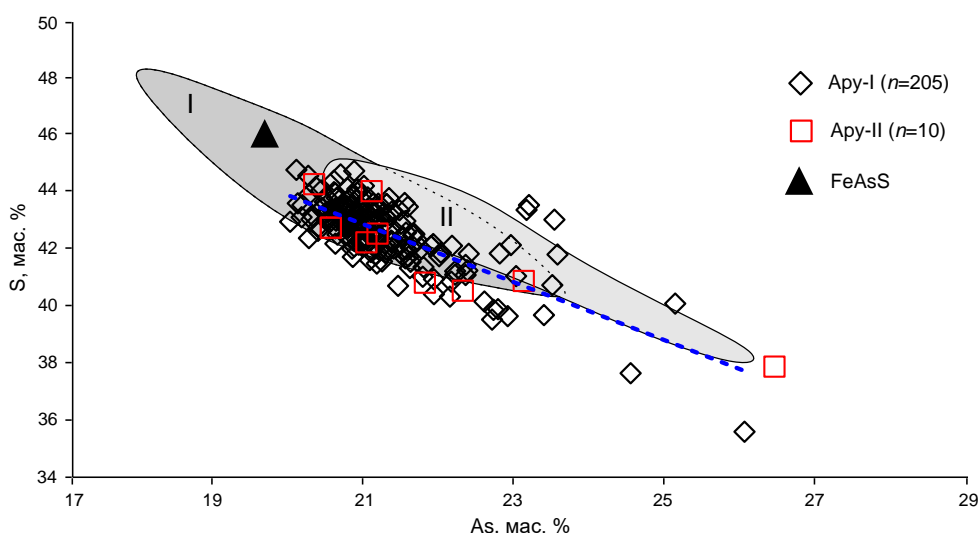


Рис. 8. Диаграмма As–S, иллюстрирующая составы арсенопирита месторождения Южные Ашалы относительно стандартного химического состава (FeAsS) и областей составов игольчатого (I) и таблитчатого (II) арсенопирита месторождений Большевик, Суздаль и Жерек [10]:

треугольник – стандартный химический состав арсенопирита; анализ произведён на SEM/EDX, n – число анализов

Fig. 8. The As–S diagram illustrating the compositions of arsenopyrites from the Southern Ashaly deposit relative to the standard chemical composition (FeAsS) and the fields of needle-shaped (I) and tabular (II) arsenopyrites from the Bolshevik, Suzdal, and Zherek deposits [10]:

the triangle shows the standard chemical composition of arsenopyrite; the analysis was performed on the Tescan Mira SEM/EDX, n is the number of analyses

более 20 мкм в диаметре (см. рис. 5, *i*). Герсдорфит наиболее распространён и обогащён Fe (до 14,32 мас. %), реже Co (до 12,75 мас. %). Меньшее распространение имеет глаукоdot с содержанием Ni (до 3,38 мас. %) (см. табл. 3).

Халькопирит ($\text{Cu}_{1,04}\text{Fe}_{0,72}\text{S}_2$) – двух генераций. Ранняя генерация отмечается в виде включений в Ру-II. Наблюдается в виде зёрен неправильной формы в сростании с пирротинном, блёклой рудой-I и золотом-I, размер частиц не более 20 мкм в диаметре (рис. 10, *e–h*). Халькопирит поздней генерации – в виде вкрапленности (до 250 мкм), включений (до 250 мкм) и тонких прожилок (до 10 мкм) в пирите, арсенопирите, кварце, сидерите и доломите-II (рис. 9, *a, d, f*; табл. 4). Зёрна неправильной формы изометрического облика наблюдаются в сростании с тетраэдритом, бурнонитом, сфалеритом, пиритом, золотом и галенитом. Нередко минерал замещается тетраэдритом

с образованием пирита, а также гипергенными борнитом, халькозином и ковеллином.

Галенит ($\text{Pb}_{1,04}\text{S}$) встречается в рудах золото-малосульфидно-кварцевого типа, на поздних стадиях. Отмечается в виде тонких прожилок и мелких включений (до 20 мкм) в пирите, арсенопирите, зачастую заполняет пустоты и трещины сульфидов. Минерал приурочен к прожилкам кварц-карбонатного состава. Наблюдается в сростании с самородным золотом, халькопиритом, тетраэдритом и минералами бурнонит-зелигманитового ряда (см. рис. 9, *e, h, i*). Установлены примеси Cu (до 1,3 мас. %), Sb (до 1,5 мас. %), Fe (до 6,8 мас. %) и Se (до 1 мас. %) (см. табл. 4).

Клейофан ($\text{Zn}_{0,51}\text{S}_{0,48}$) встречается крайне редко в виде ксеноморфных зёрен изометрического облика, размер до 30 мкм (см. рис. 5, *g*). Минерал с редкими незначительными примесями сурьмы (до 0,2 мас. %) (см. табл. 4).

Табл. 3. Химический состав сульфосаренидов, SEM/EDX, мас. %

Table 3. Chemical composition of sulfoarsenides, SEM/EDX, wt. %

Генерация	№ образца	Fe	Co	Ni	As	S	Сумма	Формула
Ару-I	Ash-07-21	35,98	–	–	41,81	22,82	100,61	$Fe_{1,01}As_{0,88}S_{1,12}$
Ару-I	Sh-1	35,94	–	–	40,7	23,52	100,15	$Fe_{1,01}As_{0,85}S_{1,15}$
Ару-I	Sh-10	34,73	–	–	43,23	20,51	98,48	$Fe_{1,02}As_{0,95}S_{1,05}$
Ару-I	Sh-11	35,17	–	–	42,87	20,73	98,77	$Fe_{1,02}As_{0,94}S_{1,06}$
Ару-I	Sh-12	34,41	–	–	41,92	21,55	97,47	$FeAs_{0,91}S_{1,09}$
Ару-I	Sh-13	35,15	–	–	42,84	21,51	99,5	$Fe_{1,01}As_{0,92}S_{1,08}$
Ару-I	Sh-14	34,76	–	–	42,79	20,81	100,31	$Fe_{1,02}As_{0,94}S_{1,06}$
Ару-I	Sh-2	35,66	–	–	41,45	21,19	101,74	$Fe_{1,05}As_{0,91}S_{1,09}$
Ару-I	Sh-3	34,87	–	–	43,11	21,11	99,08	$Fe_{1,01}As_{0,93}S_{1,07}$
Ару-I	Sh-4	35,4	–	–	42,93	21,57	99,89	$Fe_{1,02}As_{0,92}S_{1,08}$
Ару-I	Sh-5	35,07	–	–	43,08	21,23	99,38	$Fe_{1,02}As_{0,93}S_{1,07}$
Ару-II	Sh-12	34,08	–	0,42	42,7	20,58	95,8	$(Fe_{1,01}Ni_{0,01})_{1,02}As_{0,94}S_{1,06}$
Ару-II	Sh-12	34,7	–	0,42	42,7	20,58	97,93	$(Fe_{1,03}Ni_{0,01})_{1,04}As_{0,94}S_{1,06}$
Ару-II	Sh-14	35,23	–	0,44	43,98	21,12	100,51	$(Fe_{1,01}Ni_{0,01})_{1,02}As_{0,94}S_{1,06}$
Ару-II	Sh-3	34,93	–	0,98	37,85	26,47	100,45	$(Fe_{0,94}Ni_{0,03})_{0,97}As_{0,76}S_{1,24}$
Ару-II	Sh-3	32,72	0,72	1,73	42,19	21,05	98,41	$(Fe_{0,96}Ni_{0,03})_{0,99}As_{0,92}S_{1,08}$
Ару-II	Sh-4	34,31	–	0,91	42,5	21,2	98,92	$(FeNi_{0,03})_{1,03}As_{0,92}S_{1,08}$
Ару-II	Sh-4	32	–	3,14	44,23	20,36	99,73	$(Fe_{0,94}Ni_{0,09})_{1,03}As_{0,96}S_{1,04}$
Ару-II	Sh-4	34,62	–	0,29	40,79	21,83	97,53	$(Fe_{1,01}Ni_{0,01})_{1,02}As_{0,89}S_{1,11}$
Ару-II	Sh-4	35,43	–	0,35	40,84	23,14	99,75	$(FeNi_{0,01})_{1,01}As_{0,86}S_{1,14}$
Ару-II	Sh-4	33,93	–	1,64	40,51	22,33	98,42	$(Fe_{0,98}Ni_{0,05})_{1,03}As_{0,87}S_{1,13}$
Gdf	244/6	9,08		27,41	46,48	18,87	101,84	$(Ni_{0,77}Fe_{0,27})_{1,04}As_{1,03}S_{0,97}$
Gdf	244/6	11,73	1,2	23,17	46,35	19,22	101,67	$(Ni_{0,65}Fe_{0,35}Co_{0,03})_{1,03}As_{1,02}S_{0,98}$
Gdf	Sh-6	14,32	3,71	17,63	39,69	22,05	97,4	$(Ni_{0,49}Fe_{0,42}Co_{0,1})_{1,01}As_{0,87}S_{1,13}$
Gdf	Sh-4	12,74	11,12	12,16	39,81	22,37	98,2	$(Fe_{0,37}Ni_{0,34}Co_{0,31})_{1,02}As_{0,86}S_{1,14}$
Gl	Sh 4	12,5	21,08	2,94	35,79	27,84	100,15	$(Co_{0,53}Fe_{0,33}Ni_{0,07})_{0,93}As_{0,71}S_{1,29}$
Gl	Sh-4	12,24	21,96	3,38	36,02	28,23	101,83	$(Co_{0,55}Fe_{0,32}Ni_{0,08})_{0,95}As_{0,71}S_{1,29}$

Примечание: Ару-I, Ару-II, Gdf, Gl – в соответствии с описанием в тексте. Формулы рассчитаны на 2 ат. в позиции аниона. «–» – содержание ниже предела обнаружения.

Сфалерит отмечается в интерстициях кварца, лимонитовых прожилках и пирите в виде зёрен неправильной формы. В кавернозном пирите заполняет пустоты и трещины в сростании с карбонатом. Пространственно приурочен к рудам второго типа, образуется в полиметаллическую стадию позднего этапа.

Пирротин ($Fe_{1-x}S_2$) является редким минералом на месторождении. Отмечается на глу-

бинах более 150 м (в керне скважин Ash-07-21, 244 и 263) в виде вкрапленных зёрен каплевидной и неправильной форм в сульфидах (арсенопирите и пирите), размер зёрен не превышает 20 мкм в диаметре (см. рис. 5, h). Установлены изоморфные примеси Ni (до 0,6 мас. %) и Cu (до 6,5 мас. %) (см. табл. 4). Минерал образуется на раннем золото-сульфидном этапе пирит-арсенопиритовой стадии.

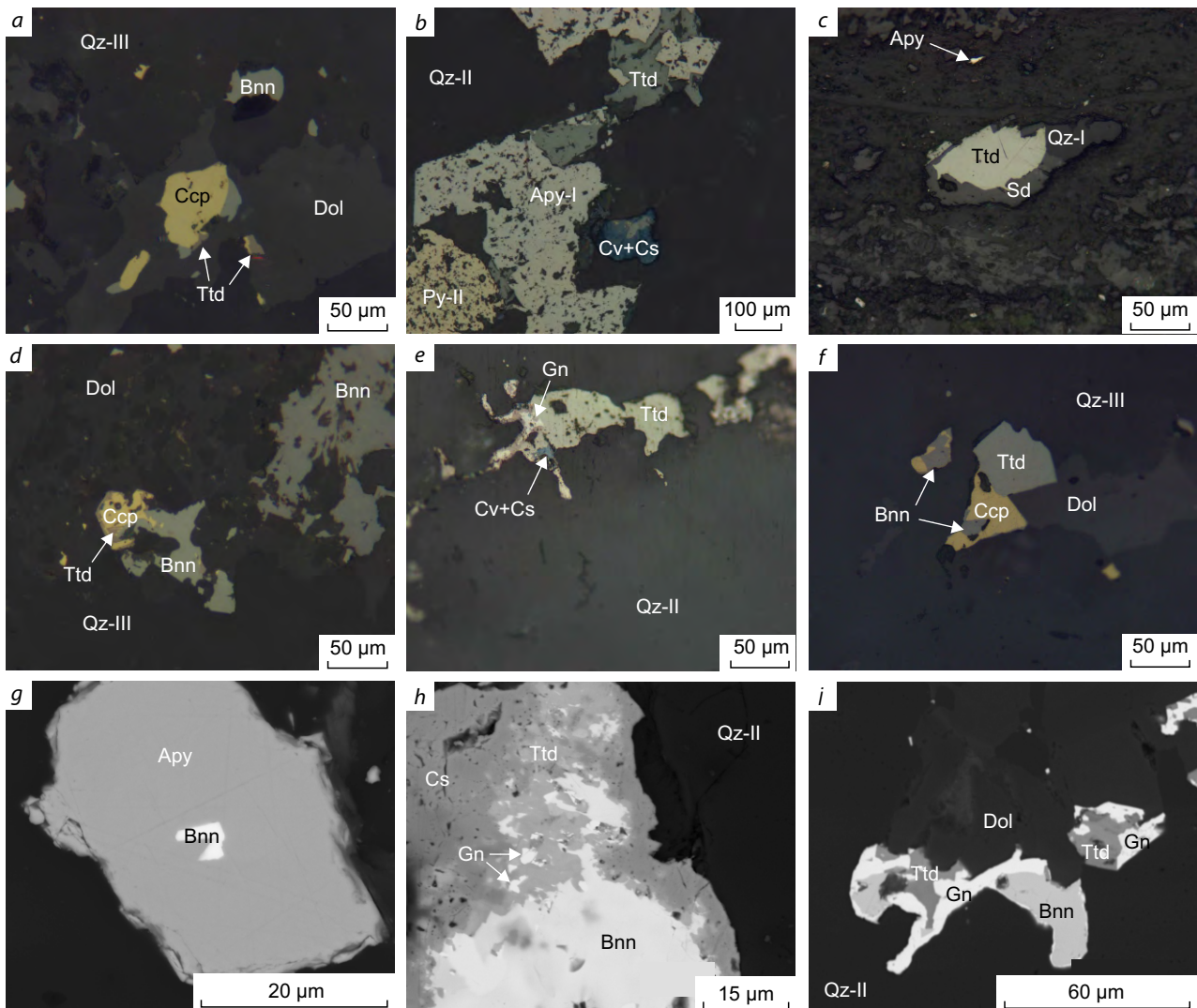


Рис. 9. Сульфосоли месторождения Южные Ашалы:

a – сростание халькопирита, тетраэдрита и бурнонита в карбонатном прожилке; *b* – заполнение пор и трещин кавернозных сульфидов тетраэдритом и халькопиритом и замещение последних халькозином; *c* – углеродистый алевролит с кварц-сидерит-тетраэдритовой линзой; *d* – карбонат-полисульфидный прожилок с тетраэдритом, халькопиритом и бурнонитом; *e* – сростание тетраэдрита и галенита с плёнками ковеллина и халькозина; *f* – сростание халькопирита, тетраэдрита и бурнонита; *g* – включение бурнонита в арсенопирите; *h* – тетраэдрит-галенит-бурнонитовый агрегат с плёнками халькозина в кварцевом матриксе; *i* – тетраэдрит, галенит и бурнонит на контакте доломита и кварца; *a–f* – оптический микроскоп, PPL; *g–i* – СЭМ, BSE

Fig. 9. Sulphosalts of the Southern Ashaly deposit:

a – intergrowth of chalcopyrite, tetrahedrite, and burnonite in a carbonate veinlet; *b* – filling of pores and cracks in cavernous sulfides with tetrahedrite and chalcopyrite and replacement of the latter with chalcocite; *c* – carbonaceous siltstone with quartz-siderite-tetrahedrite lens; *d* – carbonate-polysulfide veinlet with tetrahedrite, chalcopyrite, and burnonite; *e* – intergrowth of tetrahedrite and galena with covellite and chalcocite films; *f* – intergrowth of chalcopyrite, tetrahedrite, and burnonite; *g* – inclusion of burnonite in arsenopyrite; *h* – tetrahedrite-galena-burnonite aggregate with chalcocite films in a quartz matrix; *i* – tetrahedrite, galena, and burnonite at the contact of dolomite and quartz. Note: *a–f* – optical microscope, PPL; *g–i* – SEM, BSE

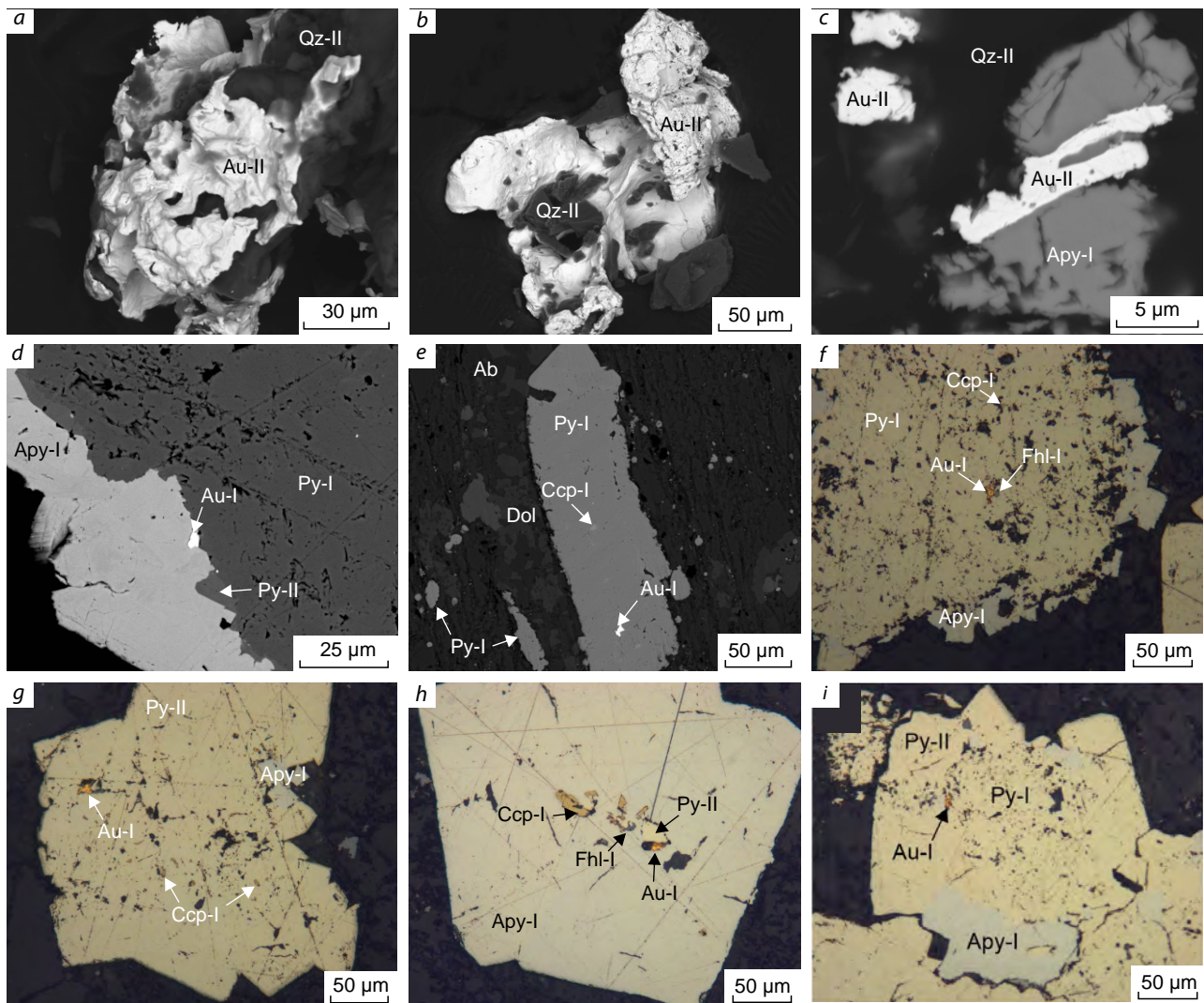


Рис. 10. Золото месторождения Южные Ашалы:

a – золото-II с кварцем, зерно неправильной, прожилковой формы, уплощённого облика; *b* – золото-II в сростании с кварцем, изометрического облика, неправильной формы, вид частицы прожилковый; *c* – прожилок золота-II в арсенопирите-I; *d* – золото-I на контакте Py-I и арсенопирита-I; *e* – Py-I с включением золота-I и халькопирита-I в углеродистом сланце; *f, g* – кавернозный Py-II с включением золота-I, блёклой руды-I и халькопирита-I обрастает арсенопиритом-I; *h* – Py-II с включением золота-I и блёклой руды-I обрастает арсенопиритом-I; *i* – золото-I на контакте Py-I с Py-II и арсенопиритом-I; *f-i* – оптический микроскоп, PPL; *a-e* – СЭМ, режим BSE

Fig. 10. Gold of the Southern Ashaly ore deposit:

a – gold-II with quartz: grain of irregular, veiny shape, flattened habit; *b* – gold-II in intergrowth with quartz, isometric habit, irregular shape; the particle is veiny in appearance; *c* – veinlet of gold-II in arsenopyrite-I; *d* – gold-I on the contact of pyrite-I and arsenopyrite-I; *e* – pyrite-I with an inclusion of gold-I and chalcopyrite-I in carbonaceous shale; *f, g* – cavernous Py-II with an inclusion of gold-I, fahlore-I, and chalcopyrite-I overgrown with arsenopyrite-I; *h* – pyrite-II with an inclusion of gold-I and fahlore-I overgrown with arsenopyrite-I; *i* – gold-I on the contact of pyrite-I, pyrite-II, and arsenopyrite-I. Notes: *f-i* – optical microscope, PPL; *a-e* – SEM, BSE mode



Табл. 4. Химический состав галенита, сфалерита, халькопирита и пирротина, SEM/EDX, мас. %

Table 4. Chemical composition of galena, sphalerite, chalcopyrite, and pyrrhotite, SEM/EDX, wt. %

Минерал	№ образца	Pb	Zn	Sb	Cu	Fe	S	Se	Сумма
Галенит	Sh-7	84,47	–	–	–	0,3	11,95	1,03	97,75
Галенит	Sh-14	82,92	–	1,56	1,29	–	12,60	–	98,37
Галенит	Sh-14	86,31	–	–	0,53	–	12,92	–	99,76
Галенит	Kz-8-2	–	–	–	–	–	–	–	–
Клейофан	Sh-1	–	50,57	0,20	–	–	47,56	–	98,34
Клейофан	Sh-2	–	53,96	–	–	–	46,40	–	100
Халькопирит-II	Sh-5	–	–	–	27,68	33,96	37,92	–	99,56
Халькопирит-II	Sh-4	–	–	–	25,48	37,33	38,91	–	101,72
Халькопирит-II	Sh-6	–	–	–	28,33	33,03	38,07	–	99,43
Халькопирит-I	210-11	–	–	–	27,73	33,49	37,69	–	98,91
Халькопирит-I	263-97	–	–	–	32,64	30,66	34,13	–	97,43
Халькопирит-I	263-97	–	–	–	32,43	30,76	34,60	–	97,79
Халькопирит-I	263-97	–	–	–	33,35	29,71	34,51	–	97,56
Халькопирит-I	263-97	–	–	–	34,33	30,98	34,91	–	100,22
Халькопирит-I	263-97	–	–	–	33,52	30,90	35	–	99,43
Халькопирит-I	263-97	–	–	–	33,75	30,83	35	–	99,59
Пирротин	263-97	–	–	–	–	60,36	38,05	–	98,41
Пирротин	263-97	–	–	–	–	60,71	38,76	–	99,47
Пирротин	263-97	–	–	–	–	59,66	38,06	–	97,72
Пирротин	263-97	–	–	–	–	60,39	37,84	–	98,23
Пирротин	263-97	–	–	–	–	60	38,11	–	98,10

Сульфосоли встречаются редко и представлены блёклыми рудами (Cu-, Zn-Fe- и Fe-Zn-тетраэдрит, табл. 5) и минералами бурнонит-зелигманитового ряда. Они отмечаются в виде включений, зёрен неправильной формы (до 15 мкм в диаметре) и прожилок (мощностью до 100 мкм) в сростании с халькопиритом, галенитом, минералами бурнонит-зелигманитового ряда и золотом. Ранняя генерация в ассоциации с золотом-I и халькопиритом-I образуется в пиритовую и пирит-арсенопиритовую стадии (см. рис. 10, *f, h*); поздняя генерация в ассоциации с бурнонит-зелигманитом, галенитом, халькопиритом-II образуется в полиметаллическую стадию (см. рис. 9, *a-c, e, f, h, i*). Блёклая руда-II приурочена к кварц-сидеритовым линзам в углеродистых сланцах и кварц-доломитовым прожилкам в

кварц-сульфидных жилах (молочно-белого цвета). Зачастую блёклая руда-II покрывается корками вторичных минералов меди – ковеллином и халькозином (см. рис. 9, *b, e*). Минералы бурнонит-зелигманитового ряда представлены бурнонитом, реже переходной разновидностью. Они отмечаются в виде мелких включений (до 10 мкм в диаметре) и тонких прожилок (мощностью до 100 мкм) в сростании с блёклой рудой-II, галенитом и халькопиритом-II (см. рис. 9, *a, d, f-i*). Установлены примеси Fe до 6,5 мас. % и As до 8,5 мас. % (табл. 6). В некоторых случаях бурнонит обростает блёклой рудой-II, галенитом и халькозином (см. рис. 9, *h*).

Самородное золото двух генераций локализуется как в кварцевых жилах, так и в минерализованных зонах. Промышленные запасы

Табл. 5. Химический состав блёклой руды, SEM/EDX, мас. %

Table 5. Chemical composition of fahlore, SEM/EDX, wt. %

Минерал	№ образца	Fe	Cu	Zn	Sb	As	S	Сумма	Формула	Sb/(Sb+As)
Су-тетраэдрит	Sh-14	–	42,49	–	23,19	3,93	28,94	98,55	$Cu_{10,7}(Sb_{3,04}As_{0,84})_{3,88}S_{14,4}$	0,78
Fe-Zn-тетраэдрит	Sh-7	2,23	38,23	5,92	27,18	1,82	25,20	100,58	$Cu_{9,9}(Fe_{0,66}Zn_{1,48})_{2,14}(Sb_{3,67}As_{0,4})_{4,07}S_{12,9}$	0,90
Fe-Zn-тетраэдрит	Sh-14	1,51	38,04	6,20	27,33	2,22	25,57	100,87	$Cu_{9,8}(Fe_{0,44}Zn_{1,55})_{1,99}(Sb_{3,67}As_{0,48})_{4,05}S_{13,05}$	0,88
Fe-Zn-тетраэдрит	Sh-1	1,42	37,53	5,79	27,68	1,93	24,99	99,34	$Cu_{9,86}(Fe_{0,42}Zn_{1,48})_{1,9}(Sb_{3,8}As_{0,43})_{4,23}S_{13,01}$	0,90
Fe-Zn-тетраэдрит	Sh-7	1,17	37,50	6,61	27,46	2,29	25,76	100,79	$Cu_{9,66}(Fe_{0,34}Zn_{1,65})_{1,99}(Sb_{3,69}As_{0,5})_{4,19}S_{13,15}$	0,88
Fe-Zn-тетраэдрит	Sh-7	3,87	37,30	5,49	27,37	2,19	25,16	101,38	$Cu_{9,57}(Fe_{1,13}Zn_{1,36})_{2,49}(Sb_{3,66}As_{0,48})_{4,12}S_{12,79}$	0,89
Fe-Zn-тетраэдрит	Sh-7	1,78	37,08	5,90	27,26	1,29	24,53	97,84	$Cu_{9,89}(Fe_{0,54}Zn_{1,53})_{2,07}(Sb_{3,79}As_{0,29})_{4,08}S_{12,96}$	0,93
Fe-Zn-тетраэдрит	Sh-7	2,77	36,52	4,56	29,89	–	25,14	98,88	$Cu_{9,67}(Fe_{0,83}Zn_{1,17})_2Sb_{4,13}S_{13,19}$	1,00
Fe-Zn-тетраэдрит	Sh-7	1,72	36,31	5,68	27,30	1,86	24,68	97,55	$Cu_{9,7}(Fe_{0,52}Zn_{1,48})_2(Sb_{3,8}As_{0,42})_{4,22}S_{13,07}$	0,90
Zn-Fe-тетраэдрит	Sh-14	5,29	36,27	4,91	23,01	7,71	25,34	102,53	$Cu_{9,1}(Fe_{1,5}Zn_{1,19})_{2,69}(Sb_3As_{1,63})_{4,63}S_{12,57}$	0,65
Fe-Zn-тетраэдрит	Sh-7	2,36	36,26	6,69	24,99	2,29	24,84	97,43	$Cu_{9,59}(Fe_{0,71}Zn_{1,72})_{2,43}(Sb_{3,45}As_{0,51})_{3,96}S_{13,02}$	0,87
Fe-Zn-тетраэдрит	Sh-14	2,62	36,03	6,63	27,48	4,06	24,16	100,98	$Cu_{9,4}(Fe_{0,78}Zn_{1,68})_{2,44}(Sb_{3,74}As_{0,9})_{4,64}S_{12,49}$	0,81
Fe-Zn-тетраэдрит	Sh-7	3,17	35,90	6,11	28,28	–	24,38	97,84	$Cu_{9,6}(Fe_{0,96}Zn_{1,59})_{2,55}Sb_{3,94}S_{12,91}$	1,00
Zn-Fe-тетраэдрит	Sh-14	5,58	35,67	4,76	24,48	6,56	25,10	102,15	$Cu_{9,01}(Zn_{1,17}Fe_{1,6})_{2,77}(Sb_{3,23}As_{1,4})_{4,63}S_{12,57}$	0,70
Zn-Fe-тетраэдрит	Sh-9	5,77	34,80	4,64	21,61	7,43	24,06	98,31	$Cu_{9,08}(Zn_{1,18}Fe_{1,7})_{2,89}(Sb_{2,94}As_{1,64})_{4,58}S_{12,44}$	0,64
Zn-Fe-тетраэдрит	Sh-9	5,54	34,10	4,82	24,53	6,02	24,50	99,51	$Cu_{8,87}(Zn_{1,22}Fe_{1,64})_{2,86}(Sb_{3,33}As_{1,33})_{4,66}S_{12,62}$	0,72
Fe-Zn-тетраэдрит	244/6	3,67	38,99	3,85	22,20	5,38	25,29	99,38	$Cu_{9,99}(Zn_{0,96}Fe_{1,07})_{2,03}(Sb_{2,97}As_{1,17})_{4,14}S_{12,84}$	0,72
Fe-Zn-тетраэдрит	244/6	3,06	37,87	4,59	23,57	3,94	25,08	98,11	$Cu_{9,88}(Fe_{0,91}Zn_{1,16})_{2,07}(Sb_{3,21}As_{0,87})_{4,08}S_{12,97}$	0,79

Примечание: формульные единицы в расчёте на 29 атомов; «–» – содержание ниже предела обнаружения.

связаны с упорными рудами из минерализованных зон, где золото концентрируется преимущественно в сульфидах.

Золото-I отмечается в виде включений (от 2 до 15 мкм в диаметре) и прожилок (протяжённостью до 25 мкм) в Ру-I, Ру-II и арсенипирите-I (см. рис. 10, *d-i*), нередко частицы локализируются на контакте Ру-I (обеднённого As) с Ру-II (обогащённого As) и арсенипиритом-I. Оно образуется на золото-сульфидном этапе, в сростании с золотом отмечены халькопирит-I и тетраэдрит-I. В золоте-I установлены

ристе-I (см. рис. 10, *d-i*), нередко частицы локализируются на контакте Ру-I (обеднённого As) с Ру-II (обогащённого As) и арсенипиритом-I. Оно образуется на золото-сульфидном этапе, в сростании с золотом отмечены халькопирит-I и тетраэдрит-I. В золоте-I установлены



Табл. 6. Химический состав минералов бурнонит-зелигманитового ряда, SEM/EDX, мас. %

Table 6. Chemical composition of minerals of the burnonite-zeligmanite series, SEM/EDX, wt. %

№ образца	Fe	Cu	Pb	Sb	As	S	Сумма	Формула	Sb/(Sb+As)
Sh-14	–	13,01	41,38	24,3	–	18,9	97,59	$Cu_{1,03}PbSbS_{2,96}$	1,00
Sh-13	–	12,99	41,58	24,54	–	18,86	97,97	$Cu_{1,03}PbSb_{1,01}S_{2,95}$	1,00
Sh-13	2,69	12,37	41,53	23,29	–	19,48	99,36	$(Fe_{0,23}Cu_{0,94})_{1,17}Pb_{0,97}Sb_{0,92}S_{2,93}$	1,00
Sh-13	2,24	12,24	42,06	23,79	–	19,2	99,53	$(Fe_{0,2}Cu_{0,94})_{1,14}Pb_{0,99}Sb_{0,95}S_{2,92}$	1,00
Sh-11	–	11,04	37,97	21,23	9	19,06	98,3	$Cu_{0,84}Pb_{0,88}(As_{0,58}Sb_{0,84})_{1,42}S_{2,86}$	0,59
Sh-10	6,57	10,95	36,16	21,13	8,55	18,67	102,03	$(Fe_{0,53}Cu_{0,77})_{1,3}Pb_{0,78}(As_{0,51}Sb_{0,78})_{1,29}S_{2,62}$	0,60
Sh-11	–	10,89	38,7	21,73	8,26	18,9	98,48	$Cu_{0,83}Pb_{0,91}(As_{0,53}Sb_{0,87})_{1,4}S_{2,86}$	0,62

Примечание: формульные единицы в расчёте на 6 атомов; «–» – содержание ниже предела обнаружения.

примеси Ag (до 11,9 мас. %), Cu (до 0,9 мас. %), Pb (до 4,3 мас. %), последние две являются механическими.

Золото-II наблюдается в виде прожилковых форм, размером от 10 до 300 мкм (см. рис. 10, а, б). Частицы изометрического, уплощённого и удлинённого облика наблюдаются в сростании с кварцем-II, редко в ассоциации с халькопиритом, галенитом, тетраэдритом-II и бурнонитом. Иногда золото-II образует прожилки в арсенипирите-I мощностью до 5 мкм (см. рис. 10, с). Ввиду крайне малых размеров частиц самородного золота набрать представительную статистику для микрозондового изучения состава золотин оказалось делом весьма затруднительным, отчего приводимые данные можно считать ориентировочными, но не количественными. По результатам SEM/EDX построена гистограмма пробности золота (рис. 11), на которой отчётливо выделяются два пика, где золото-I имеет широкий диапазон пробности 870–940 ‰, а золото-II – весьма высокопробное.

Обсуждение результатов. Существует несколько моделей образования месторождений золота в метаморфических толщах [26], однако у каждой из них имеются свои преимущества и недостатки. Предполагается пять возможных источников золота: мантийный [22], глубинный метаморфический, глубинный кремнекластический [27], глубинный магматический [28] и осадочный. Наиболее популярен у исследователей осадочный источник

[34], где золото локализуется в богатых органикой и пиритом сланцах. Считается, что пирит наиболее полно отражает эволюцию руд месторождений орогенного типа [8, 13, 32, 34, 35]. Ряд работ показывает, что фромбоидальный пирит может образовываться в осадке на стадии раннего диагенеза [23] и в водной массе [40] в пределах первых миллиметров от поверхности раздела осадок–вода на дне бассейна в бескислородных условиях [39]. При изучении химического состава пиритов орогенных месторождений Мира установлено обогащение диагенетического пирита Mn, Zn, Mo, Cu, V, Ba, Ag, Cd, Tl, Co, Ni, Bi, Pb и Te, а метаморфического и гидротермального пирита – As, Ni, ±Co [32, 33].

На месторождении Южные Ашалы ранний (сферический, сферически-прожилковый) Py-I обогащён Au, Ag, Ni, Co, V, Cu, Ti, W, Pt, Hg, Pb, Zn и Bi относительно более поздних генераций (см. табл. 1) и интерпретируется нами как «диагенетический» пирит, образующийся в условиях осадконакопления и раннего диагенеза. Об этом свидетельствует субсогласное залегание обогащённых пиритом прослоев в породе, изотопный состав серы, отвечающий морским осадкам, и первые геохимические данные, соответствующие «диагенетическому» пириту орогенных месторождений [13, 19, 32, 34]. Небольшой объём проанализированных методом ЛА-ИСП-МС пиритов позволяет по-

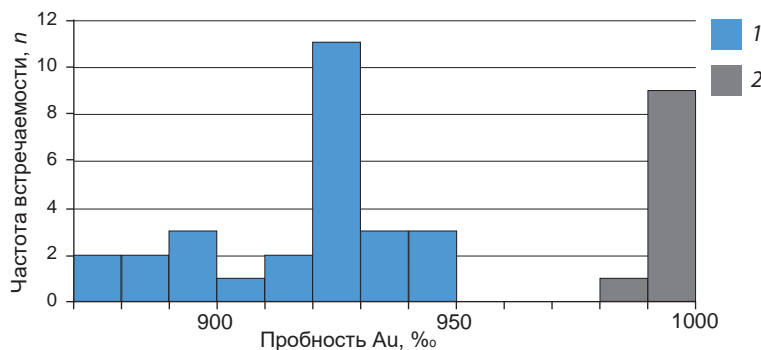


Рис. 11. Пробность золота месторождения Южные Ашалы:

типы руд: 1 – золото-сульфидный, 2 – золото-сульфидно-кварцевый; $n = 42$

Fig. 11. Fineness of gold of the Southern Ashaly gold deposit:

ore types: 1 – gold-sulfide type; 2 – gold-sulfide-quartz type; $n=42$

ка только наметить некоторые тренды в распределении микроэлементов в зависимости от стадий преобразования сульфидов. Несомненно, материалы будут накапливаться, что позволит в будущем более аргументированно подтверждать или уточнять полученные данные.

Предполагается, что Au и Ag изначально накапливались в условиях осадконакопления в породах буконьской свиты и концентрировались в диагенетическом пирите (рис. 12, а; рис. 13, а). Полученное изображение (см. рис. 12, а) прекрасно иллюстрирует данный тезис. В результате позднего диагенеза образуются сферическая (Ру-Ів) и прожилковая (Ру-Ів) разности пирита (см. рис. 13, б). Далее, в результате метаморфического преобразования толщи, происходит частичная рекристаллизация диагенетического Ру-І с образованием вкрапленных кристаллов, где диагенетический Ру-Ів (ядерная часть) обрастает эвгдральным Ру-ІІ (краевая часть) (см. рис. 13, с). При этом в ядерной части золото высвобождается, образуя микровключения (см. рис. 6 и рис. 12, б). Краевая часть обедняется такими элементами, как Zn, Cu, Pb, Ag, Mo, и обогащается As, Au. В результате последующей гидротермальной активности образуются рудные жилы золото-кварц-сульфидного типа с видимым золотом и безрудные кварц-карбонатные прожилки (см. рис. 13, d).

Концентрация золота, по результатам ЛА-ИСП-МС анализа, во вкрапленных зёрнах пирита (см. рис. 6, а) уменьшается от центра к периферии: в центральной части (Ру-Ів) – до 484 г/т, в промежуточной части (кайма-1, Ру-Іа) – 85 г/т, в краевой части (кайма-2, Ру-ІІб) – до 56 г/т (рис. 14). Также установлено зональное распределение мышьяка: в центральной части – до 0,89 %, в промежуточной – до 2,94 %, а на периферии – до 2,18 % (рис. 15). Наибольшие концентрации золота наблюдаются в Ру-Ів (484 г/т, микровключения) и в арсенипирите-І (230 г/т, равномерное распределение), меньшие концентрации – в Ру-Іа (85 г/т, микровключения), Ру-ІІб (55,9 г/т, равномерное распределение), Ру-ІІІ (27 г/т) и Ру-Іб (5,5 г/т).

Изучению невидимого золота в сульфидах «черносланцевых» толщ посвящено множество работ, одно перечисление которых займёт не одну страницу, ибо начало таких исследований приходится на первую половину XX века. Ключевыми вопросами являются особенности распределения и уровни концентрирования золота в сульфидах, состав тонкодисперсных частиц Au, формы нахождения, процессы образования, а также технология извлечения золота из «упорных» руд.

Вопрос о формах нахождения золота в пирите и арсенипирите является одним из наиболее дискуссионных. Ряд исследователей

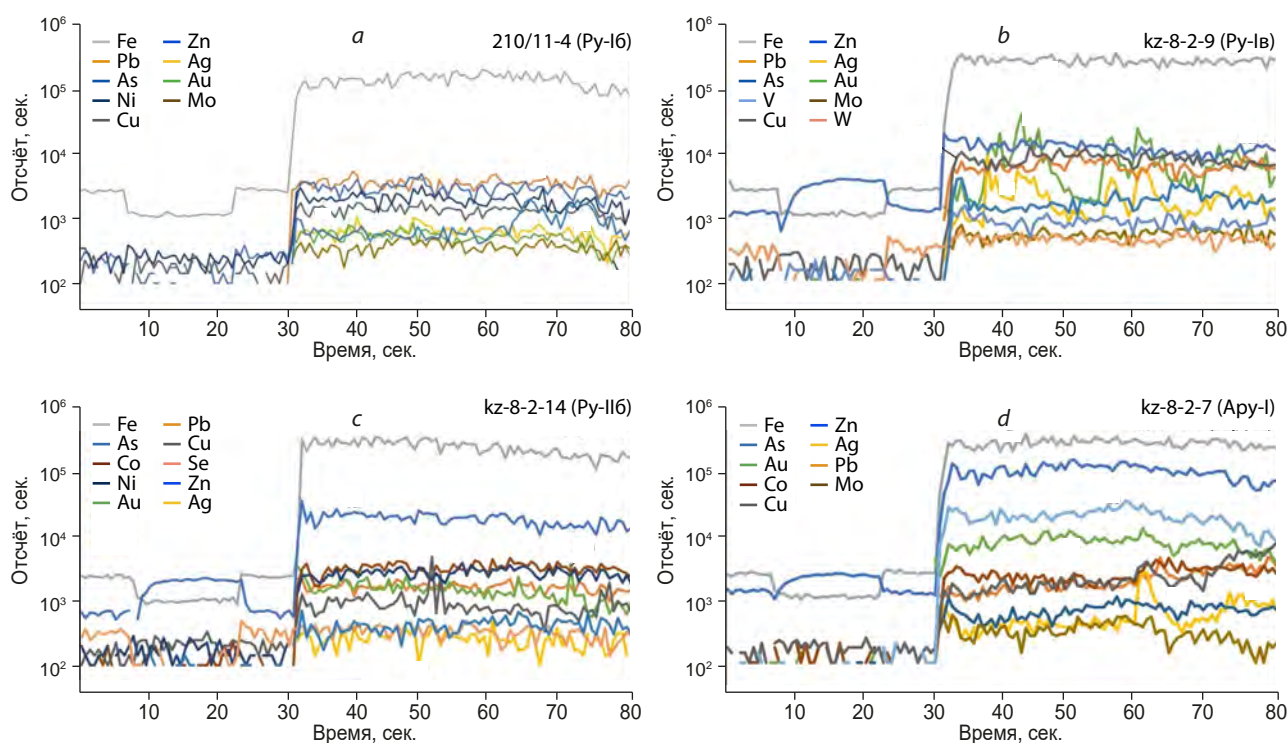


Рис. 12. Графики содержания примесных компонентов в зёрнах пирита и арсенопирита месторождения Южные Ашалы, по результатам ЛА-ИСП-МС анализа:

a – сферический Py-I из углеродисто-терригенной толщи (характер графика указывает на относительно равномерное распределение Au и Ag); *b* – преобразованный диагенетический Py-I в ядерной части Py-II (совпадающие пики Au, Ag говорят о возможном наличии микровключений (самородного золота?)); *c* – краевая часть эвгдрального Py-II (распределение Au, Ag могут говорить как о равномерном распределении, так и о наличии микровключений); *d* – дипирамидальный арсенопирит-I, обрастающий Py-II (пики значений Au, Ag, а также As и Sb, как правило, совпадают и указывают на равномерное распределение, тогда как пиковые значения Ag, Cu могут говорить о наличии микровключений (возможно, халькопирита?)); *a* – показан на рис. 5, *b–d* – показаны на рис. 6

Fig. 12. Signatures of the contents of trace elements in pyrite and arsenopyrite grains from the Southern Ashaly deposit (results of the LA-ICP-MS analysis):

a – spherical Py-I from carbonaceous-terrigenous rocks (the character of the graph indicates a relatively uniform distribution of Au and Ag); *b* – transformed diagenetic Py-I in the core section of Py-II (the coinciding peaks of Au, Ag indicate the possible presence of microinclusions (native gold?)); *c* – marginal section of euhedral Py-II (the distribution of Au, Ag may indicate both uniform distribution and the presence of microinclusions); *d* – bipyramidal arsenopyrite-I overgrowing Py-II (the peaks of Au, Ag, as well as of As and Sb values, as a rule, coincide and indicate uniform distribution, while the peaks of Ag, Cu may indicate the presence of microinclusions (possibly chalcopyrite?)). Note: *a* – shown in Fig. 5; *b–d* – shown in Fig. 6

предполагает, что золото изоморфно входит в сульфиды. Косвенными признаками этого считаются корреляционная связь с мышьяком [25, 36] и/или обеднённость арсенопирита Fe, а также равномерное распределение золота (по данным LA-ICP-MS) в сульфидах [24, 34, 37]. Но ведь нередко золото встречается

в сульфидных минералах в виде микровключений или механических примесей [35]. На месторождениях ЗКЗП выделяются две морфологические разности золотоносного арсенопирита – ранняя игольчато-призматическая и поздняя таблитчатая [10]. Мы также фиксируем определённые сходства арсенопиритов

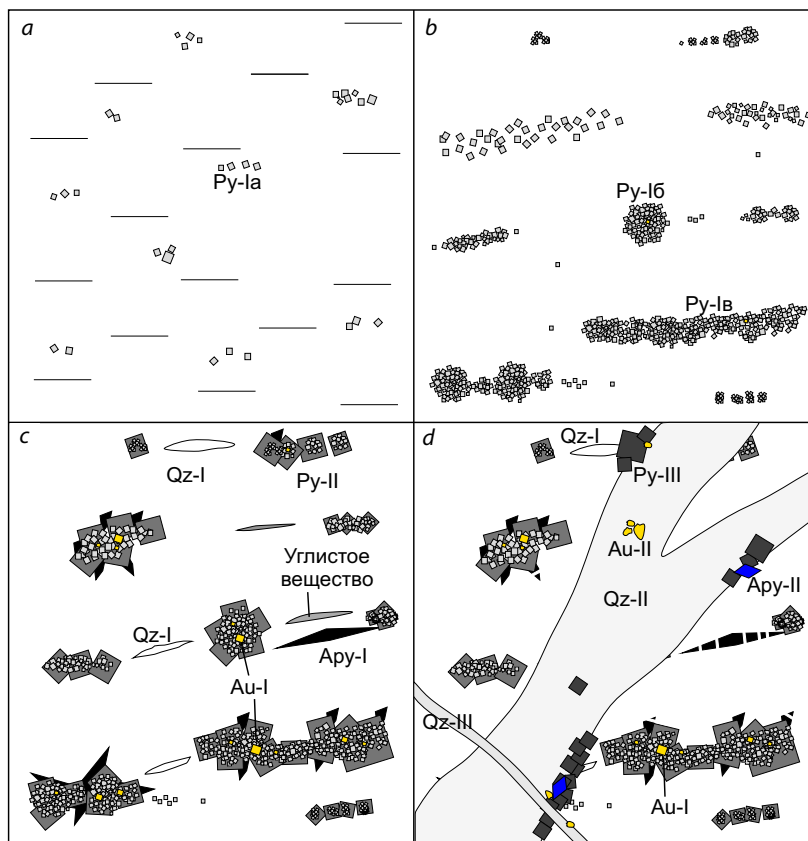


Рис. 13. Эволюция золота в пирите и арсенопирите на месторождении Южные Ашалы:

a – накопление золота во фрамбоидальном пирите (Py-Ia) и осадочной толще в условиях осадконакопления и/или раннего диагенеза; *b* – образование сферической (Py-Ib) и прожилковой (Py-Ib) разновидностей пирита, с частичным высвобождением золота (см. рис. 10, *d–f*), в условиях позднего диагенеза; *c* – образование эвгедрального пирита (Py-II) и игольчатого арсенопирита (Apy-I), обрастающих диагенетический пирит (Py-I) с микровключениями золота, в условиях метаморфизма зеленосланцевой фации; *d* – образование жил золото-кварц-сульфидного типа и пострудных прожилков кварц-карбонатного состава

Fig. 13. The evolution of gold in pyrite and arsenopyrite at the Southern Ashaly deposit:

a – accumulation of gold in framboidal pyrite (Py-Ia) and sedimentary rocks under conditions of sedimentation and/or early diagenesis; *b* – formation of spherical (Py-Ib) and veinlet (Py-Ib) varieties of pyrite, with partial release of gold (see Fig. 10, *d–f*), under conditions of late diagenesis; *c* – formation of euhedral pyrite (Py-II) and needle like arsenopyrite (Apy-I), overgrowing diagenetic pyrite (Py-I) with microinclusions of gold, under conditions of metamorphism of the green shale facies; *d* – formation of veins of the gold-quartz-sulfide type and post-ore veinlets of quartz-carbonate composition

ЗКЗП с арсенопиритами месторождения Южные Ашалы по их морфологии, геохимии и золотоносности. Типоморфизм и золотоносность «ашалинского» арсенопирита-I изучены хорошо и полностью соответствуют ранней золотоносной игольчато-призматической разновидности, встречающейся на многих место-

рождениях ЗКЗП, тогда как арсенопирит-II изучен значительно хуже. Карты Au и Ag показывают равномерное распределение элементов в пределах зёрен пирита и арсенопирита (см. рис. 6, *d–f*). Однако в Py-II содержания Au и Ag немного ниже, чем в арсенопирите-I, это также фиксируется по данным атомно-

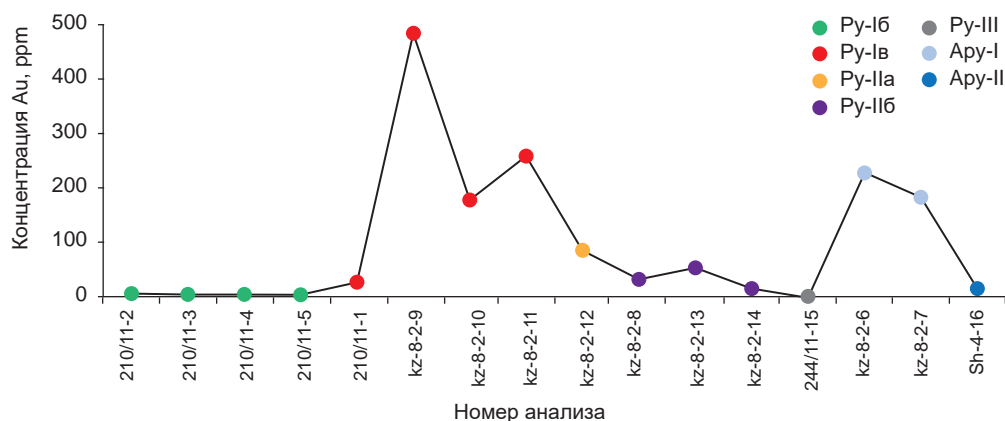


Рис. 14. Концентрация Au в пирите и арсенопирите различных генераций месторождения Южные Ашалы, по результатам ЛА-ИСП-МС анализа

Fig. 14. Concentration of Au in pyrite and arsenopyrite of various generations of the Southern Ashaly deposit, according to results of the LA-ICP-MS analysis

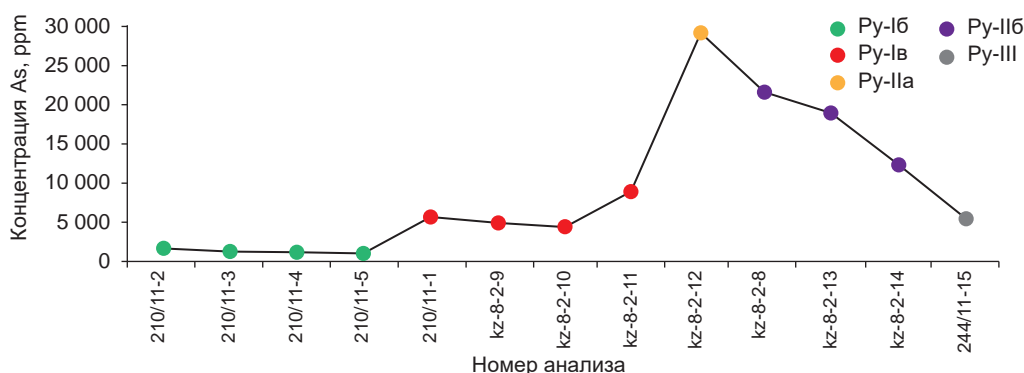


Рис. 15. Концентрация As в пирите различных генераций месторождения Южные Ашалы, по результатам ЛА-ИСП-МС анализа

Fig. 15. Concentration of As in pyrite of various generations, according to results of the LA-ICP-MS analysis

абсорбционного и ЛА-ИСП-МС анализов (см. рис. 12 и рис. 14). По данным ЛА-ИСП-МС Py-II и арсенопирита-I, Au и Ag могут находиться как в виде микровключений, так и в виде «невидимого» золота (см. рис. 12, с, d).

Повышенное содержание Co, Ni, Cr в минеральной ассоциации сульфидной стадии может быть связано как с влиянием близко расположенного Чарского офиолитового комплекса, так и с «отголосками» более поздних базитовых интрузий аргимбайского и максутского комплексов, проявленных в пределах золоторудного района.

Степень упорядоченности УВ исследовалась по методу, предложенному Кукецу с соавто-

рами [31], который может быть корректно применён для диапазона температур 150–400 °С. Оказалось, что образование вкрапленности пирита и игольчатого золотоносного арсенопирита на раннем золото-сульфидном этапе, а также преобразование УВ в углеродистых терригенно-осадочных породах буконьской свиты происходили синхронно в условиях зеленосланцевой–цеолитовой фаций метаморфизма при температурах 384–241 °С.

Исходя из вышеизложенных данных предлагается схема последовательности рудообразования на месторождении Южные Ашалы (рис. 16). Нами выделяется два этапа рудообразования: *золото-сульфидный* (ранний) и

Минерал	Этап Стадия	Золото-сульфидный		Золото-сульфидно-кварцевый	
		Пиритовая	Пирит-арсенопиритовая	Сульфидная	Полисульфидная
Кварц			██████████	██████████	██████████
Доломит			██████████	██████████	██████████
Сидерит		██████████	██████████		
Альбит			██████████		
Графит			██████		
Серицит			██████████	██████████	██████████
Пирит		██████████	██████████	██████████	██████████
Арсенопирит			██████████ ЗОЛОТОНОСНЫЙ	██████████	
Пирротин			██████		
Рутил/анатаз			████	████	
Золото		██████████	██████████	██████████	██████████
Глаукодот				████	
Герсдорфит				████	
Халькопирит		██████████		██████████	██████████
Сфалерит				██████	██████
Галенит				██████	██████
Тетраэдрит		██████████			██████████
Бурнонит					██████████
Маркизит					████

Рис. 16. Схема последовательности рудообразования месторождения Южные Ашалы: толщина линии соответствует относительной распространённости минерала

Fig. 16. The sequence diagram of the ore mineral formation of the Southern Ashaly deposit: the line thickness corresponds to the relative mineral abundance

золото-малосульфидно-кварцевый (поздний). На каждом этапе выделяется по две стадии – на золото-сульфидном: 1 – пиритовая, 2 – пирит-арсенопиритовая; а на золото-малосульфидно-кварцевом: 1 – сульфидная; 2 – полиметаллическая. Вышеописанные этапы и стадии подразделяются на основании анализа структурно-текстурных особенностей руд и непосредственных наблюдений в коренных выходах, карьере, канавах, керне скважин, а также в аншлифах и шашках.

На золото-сульфидном этапе пиритовой стадии образуются три морфологические разновидности Ру-I (в пределах месторождения минерал слабо распространён), золото-I, халькопирит-I, тетраэдрит-I и сидерит. На пирит-

арсенопиритовой стадии кристаллизуются золотоносный арсенопирит-I, Ру-II, золото-I, халькопирит-I, тетраэдрит-I, пирротин (они повсеместно распространены в пределах месторождения), а также углистое вещество (графит?), кварц, доломит, сидерит, альбит, серицит. Рудные минералы данного этапа приурочены к терригенным породам буконьской свиты, редко встречаются в виде захваченных реликтов и обломков в кварцевых жилах и гидротермальных брекчиях.

На золото-малосульфидно-кварцевом этапе сульфидной стадии образуются Ру-III, арсенопирит-II, золото-II, анатаз, глаукодот, герсдорфит, доломит и серицит, приуроченные к кварцевым жилам, которые секут даубайскую



и буконьскую свиты. На полиметаллической стадии кристаллизуются Ру-IV, халькопирит-II, галенит, сфалерит, золото-II, марказит, тетраэдрит-II и бурнонит в кварц-доломитовых прожилках. Последние в пространстве совмещены с жилами сульфидной стадии и зачастую выполняют центральные их части.

Выводы. На месторождении Южные Ашалы (Восточный Казахстан) выделено два типа руд: золото-сульфидный и золото-малосульфидно-кварцевый. Руды сопровождаются гидротермально-метасоматическими и динамометаморфическими преобразованиями, контролируемые зонами тектонических нарушений. Установлены золото-сульфидный и золото-малосульфидно-кварцевый этапы рудообразования, включающие в себя пиритовую, пирит-арсенопиритовую (ранний этап) и сульфидную, полиметаллическую (поздний этап) стадии.

На месторождении установлены последовательно образующиеся разновидности диагенетического (Ру-I), метаморфического (Ру-II) и гидротермального (Ру-III) пирита, каждому из которых присущи свои геохимические особенности. Диагенетическая разновидность Ру-I характеризуется повышенными значениями V, Ti, Mo, Sn, Sb, W, Pt, Hg, Pb и Bi относительно Ру-II и III. При этом сферическая разновидность Ру-Iб обогащена V, Ti, Mo, Sn, Sb, W, Pt, Hg, Pb, Bi, а сферически-прожилковая разновидность (Ру-Iв) – Ni, Cu, As, Se, Ag, Au относительно друг друга. Метаморфические эвгедральные кристаллы Ру-II образуются в результате рекристаллизации ранней генерации, они обеднены такими элементами, как Zn, Cu, Pb, Ag, Mo, и обогащены Au, Ag, As относительно Ру-I. Гидротермальный Ру-III

отличается неоднородностью состава и повышенными значениями As. Практически одновременно с Ру-II образуется арсенопирит-I, в котором установлено зональное распределение As, Sb и S. Впервые для месторождения определены средние содержания золота и серебра в различных генерациях пирита и арсенопирита (г/т): Ру-Iб – 4,14 и 10,4; Ру-Iв – 236,6 и 26,4; Ру-IIа – 85 и 14,5; Ру-IIб – 34 и 1; Ру-III – 35 и 2,5, а в арсенопирите-I – 230 и 20 соответственно.

Самородное золото – двух генераций: ранняя (пиритовая, пирит-арсенопиритовая стадии), в виде микровключений и тонких прожилков в сульфидах, установлена в сростании с халькопиритом и тетраэдритом; поздняя (сульфидная и полисульфидная стадии) – в виде трещинных форм в сростании с кварцем-II.

Таким образом, изученный вещественный состав руд, установленная стадийность минералообразования, выявленные особенности распределения и уровни концентрирования золота в пиритах и арсенопиритах месторождения Южные Ашалы свидетельствуют о сложности и длительности процессов рудообразования на орогенных месторождениях Западно-Калбинского золотоносного пояса. Дальнейшее изучение с привлечением результатов изотопно-геохронологических, термобарогеохимических и структурных исследований позволит создать непротиворечивую геолого-генетическую модель рудоформирующей системы, приводящей к образованию «орогенных» месторождений золота в Восточном Казахстане.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400237-8) и ИЗК СО РАН.

Список литературы

1. Ананьев Ю. С. Метасоматизм и золотое оруденение в черносланцевых толщах Западной Калбы : автореф. дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук. – Томск : ТПУ, 1999. – 18 с.
2. Беспяев Х. А., Любецкий В. Н., Любецкая Л. Д., Мукаева А. Е. Особенности металлогении Западно-Калбинского золоторудного пояса // Известия НАН РК. Сер. геологии и технических наук. – 2013. – № 5 (401). – С. 13–20.
3. Ваулин О. В. Восточно-Казахстанская область. Золото. Справочник. – Усть-Каменогорск–Бишкек : РОКИЗОЛ, 2016. – С. 285–287.
4. Государственная геологическая карта СССР м-ба 1 : 200 000. Сер. Чингиз-Саурская. Лист М-44-XXIII. Объяснительная записка. – М. : Недра. 1965.
5. Дьячков Б. А., Айтбаева С. С., Амралинова Б. Б., Ойцева Т. А. Особенности вещественного со-

- става и рудоносности плагиогранитов кунушского комплекса (Восточный Казахстан) // Вестник ВКГТУ. – 2017. – № 3. – С. 33–40.
6. Дьячков Б. А., Кузьмина О. Н., Зимановская Н. А. и др. Типы золоторудных месторождений Восточного Казахстана. – Усть-Каменогорск : ВКГТУ, 2015. – 204 с.
 7. Ермолов П. В., Полянский Н. В., Добрецов Н. Л. Офиолиты Чарской зоны / Офиолиты. – Алма-Ата : Наука, 1981. – С. 103–178.
 8. Калинин Ю. А., Гладков А. С., Боровиков А. А., Сухоруков В. П., Хусаинова А. Ш., Серебряков Е. В., Греку Е. Д. Изучение минералого-геохимических особенностей руд месторождения Аномальное и структурные условия его локализации (Восточный Казахстан). Окончательный отчет по договору № 69-21в от 27 апреля 2021 г. – Новосибирск, 2021ф. – 91 с.
 9. Калинин Ю. А., Ковалев К. Р., Гладков А. С., Сухоруков В. П., Шелепаев Р. А., Боровиков А. А., Серебряков Е. В., Хусаинова А. Ш. Геолого-структурный контроль и особенности вещественного состава золотого оруденения Ашалинского и Даубайского рудных полей (Восточный Казахстан). Окончательный отчет по договору № 83-18в от 11 июня 2018 г. – Новосибирск, 2019ф. – 155 с.
 10. Ковалев К. Р., Калинин Ю. А., Наумов Е. А., Колесникова М. К., Корольюк В. Н. Золотоносность арсенопирита золото-сульфидных месторождений Восточного Казахстана // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 2. – С. 225–242.
 11. Ковалев К. Р., Калинин Ю. А., Польшов В. И., Кыдырбеков Е. Л., Борисенко А. С., Наумов Е. А., Нетесов М. И., Клименко А. Г., Колесникова М. К. Суздальское золото-сульфидное месторождение в черносланцевых толщах, Восточный Казахстан // Геология рудных месторождений. – 2012. – Т. 54, № 4. – С. 305–328.
 12. Наливаев В. И. Рудоконтролирующие структуры и принципы прогнозной оценки Акжал-Бокко-Ашалинского золоторудного района (Восточный Казахстан) / Условия формирования и закономерности размещения месторождений золота Казахстана. – Алма-Ата : КазИМС, 1980. – С. 111–118.
 13. Паленова Е. Е., Белогуб Е. В., Плотинская О. Ю., Новоселов К. А., Масленников В. В., Котляров В. А., Блинов И. А., Кузьменко А. А., Грибоедова И. Г. Эволюция состава пирита на золоторудных месторождениях Копыловское и Кавказ в черносланцевых толщах (Бодайбинский район, Россия) по данным РСМА и ЛА-МСП-МС // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57, № 1. – С. 71–92.
 14. Париллов Ю. С., Беспяев Х. А. Проблемы Бакырчика и всего Западно-Калбинского золоторудного пояса (Восточный Казахстан) // Известия НАН РК. Сер. геологии и технических наук. – 2015. – № 6. – С. 46–56.
 15. Сердюков А. Н. О контроле золотого оруденения Ашалы-Даубайского рудного поля // Иновационные разработки и совершенствования технологий в горно-металлургическом производстве : Материалы 5 Международной конференции. – Усть-Каменогорск : ВНИИцветмет, 2009. – Т. 1. – С. 62–66.
 16. Сердюков А. Н. Южные Ашалы – новое крупнообъемное месторождение золота в Восточном Казахстане // Иновационные разработки и совершенствования технологий в горно-металлургическом производстве : Материалы 5 Международной конференции. – Усть-Каменогорск : ВНИИцветмет, 2009. – Т. 1. – С. 67–70.
 17. Сердюков А. Н., Соловьев С. А., Семилет А. В. Отчет о проведении поисково-оценочных работ на участках Ашалы-Даубайского рудного поля в 2017–2019 гг. – Усть-Каменогорск : ТОО «ГЕО.KZ», 2019.
 18. Хромых С. В. Базитовый и сопряженный гранитоидный магматизм как отражение стадий развития Алтайской аккреционно-коллизийной системы (Восточный Казахстан) // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63, № 3. – С. 330–355.
 19. Шевкунов А. Г., Масленников В. В., Ларж Р. Р., Масленникова С. П., Данюшевский Л. В. Геохимические особенности разновидностей пирита золоторудного месторождения Кумтор, Кыргызстан // Минералогия. – 2018. – № 4 (4). – С. 22–40.
 20. Щерба Г. Н., Беспяев Х. А., Дьячков Б. А., Мыслик А. М., Ганженко Г. Д., Сапаргалиев Е. М. Большой Алтай (геология и металлогения). Кн. 2. Металлогения. – Алматы : РИО ВАК РК, 2000. – 400 с.
 21. Baibatsha A. B., Dyussebaeva K. Sh., Kassenova A. Microscopic studies of gold deposit Southern Ashaly in Eastern Kazakhstan // Advanced Materials Research. – 2013. – V. 828. – P. 1–10.
 22. Barley M. E. and Groves D. I. Deciphering the tectonic evolution of Archaean greenstone belts: The importance of contrasting histories to the distribution of mineralization in the Yilgarn craton. Western Australia // Precambrian Research. – 1990. – V. 46. – P. 3–20.
 23. Berner R. A. Sedimentary pyrite formation: an update // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1984. – № 48. – P. 605–615.



24. *Deditius A. P., Utsunomiya S., Reich M., Kesler S. E., Ewing R. C., Hough R., Walshe J.* Trace metal nanoparticles in pyrite // *Ore Geology Reviews*. – 2011. – № 42. – P. 32–46.
25. *Fleet M. E., Mumin A. H.* Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis // *American Mineralogist*. – 1997. – V. 82, № 1–2. – P. 182–193.
26. *Goldfarb R. J., Baker T., Dube B., Groves D. I., Hart Craig J., Gosselin P.* Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes // *Economic Geology*. – 2005. – V. 100. – P. 407–450.
27. *Ilchik R. P., Barton M. D.* A amagmatic origin of Carlin-type gold deposits // *Economic Geology*. – 1997. – V. 92. – P. 269–288.
28. *Johnston M. K., Ressel M. W.* Controversies on the origin of world-class gold deposits, Pt. 1: Carlin-type gold deposits in Nevada-Carlin-type and distal disseminated Au-Ag deposits: Related distal expressions of Eocene intrusive centers in north-central Nevada // *Society of Economic Geologist Newsletter*. – 2004. – V. 59. – P. 12–14.
29. *Kalinin Yu. A., Kovalev K. R., Serdyukov A. N., Gladkov A. S., Sukhorukov V. P., Naumov E. A., Travin A. V., Semenova D. V., Serebryakov E. V., Greku E. D.* Age constraints and metallogenic prediction of gold deposits in the Akzhal-Boko-Ashalin ore zone (Altai accretion-collision system) // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2021. – V. 12 (2). – P. 392–408.
30. *Kovalev K. R., Kalinin Yu. A., Naumov E. A., Pirajno F., Borisenko A. S.* A Mineralogical Study of the Suzdal Sediment-Hosted Gold Deposit, Kazakhstan: Implications for Ore Genesis // *Ore Geology Reviews*. – 2009. – № 35 (2). – P. 186–206.
31. *Kouketsu Y., Mizukami T., Mori H., Endo S., Aoya M., Hara H., Nakamura D., Wallis S.* A new approach to develop the Raman carbonaceous material geothermometer for low-grade metamorphism using peak width // *Island Arc*. – 2014. – № 23. – P. 33–50.
32. *Large R. R., Danyushevsky L., Hillit H., Maslennikov V., Meffere S., Gilbert S., Bull S., Scott R., Embso P., Thomas H., Singh B., Foster J.* Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlinstyle sediment-hosted deposits // *Economic Geology*. – 2009. – V. 104. – P. 635–668.
33. *Large R. R., Halpin J. A., Danyushevsky L. V., Maslennikov V. V., Bull S. W., Long J. A., Gregory D. D., Lounejeva E., Lyons T. W., Sack P. J., McGoldrick P. J., Calver C. R.* Trace element content of sedimentary pyrite as a new proxy for deep-time ocean-atmosphere evolution // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2014. – V. 389. – P. 209–220.
34. *Large R. R., Maslennikov V. V., Robert F., Danyushevsky L. V., Chang Z.* Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log Deposit, Lena gold province, Russia // *Economic Geology*. – 2007. – № 102. – P. 1233–1267.
35. *Liu W., Deng X., Han S., Chen X., Li X., Aibai A., Wu Y., Wang Y., Shan W., Li Z., Chen Y.* Pyrite Textures and Compositions in the Dunbasitao Gold Deposit, NW China: Implications for Ore Genesis and Gold Mineralization Processes // *Minerals*. – 2023. – V. 13 (4). – 25 p.
36. *Maddox L. M., Bancroft G. M., Scaini M. J., Lorimer J. W.* Invisible gold: comparison of Au deposition on pyrite and arsenopyrite // *American Mineralogist*. – 1998. – V. 83, № 11–12. – P. 1240–1245.
37. *Reich M., Deditius A., Chryssoulis S., Li J. W., Ma C. Q., Parada M. A., Barra F., Mittermayr F.* Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2013. – № 104. – P. 42–62.
38. *Safonova I. Yu., Simonov V. A., Kurganskaya E. V., Obut O. T., Romer R. L., Seltmann R.* Late Paleozoic oceanic basalts hosted by the Char suture-shear zone, East Kazakhstan: geological position, geochemistry, petrogenesis and tectonic setting // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2012. – V. 49. – P. 20–39.
39. *Scholz F., Neumann T.* Trace element diagenesis in pyrite-rich sediments of the Achterwasser lagoon, SW Baltic Sea // *Marine Chemistry*. – 2007. – V. 107. – P. 516–532.
40. *Wilkin R. T., Barnes H. L.* Pyrite formation in an anoxic estuarine basin // *American Journal of Science*. – 1997. – V. 297. – P. 620–650.

References

- Anan'ev Yu. S. Metasomatizm i zolotoe orudene-nie v chernoslantsevyykh tolshchakh Zapadnoi Kalby [Metasomatism and gold mineralization in the black shale strata of Western Kalba: Extended abstract of candidate's thesis], Tomsk, TPU Publ., 1999, 18 p.
- Bespaev Kh. A., Lyubetskii V. N., Lyubetskaya L. D., Mukaeva A. E. Osobennosti metallogenii Zapadno-Kalbinskogo zolotorudnogo poyasa [Features of metallogeny of the West Kalba gold ore belt], *Izvestiya NAN RK. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk* [Bulletin of the NAS RK. Series of geology and

- technical sciences*], 2013, No 5 (401), pp. 13–20. (In Russ.).
3. Vaulin O. V. Vostochno-Kazakhstanskaya oblast'. Zoloto. Spravochnik [East Kazakhstan region. Gold. Handbook], Ust'-Kamenogorsk–Bishkek, ROKIZOL Publ., 2016, pp. 285–287.
 4. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR m-ba 1 : 200 000. Ser. Chingiz-Saurskaya. List M-44-XXIII. Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological map of the USSR, scale 1 : 200,000. Series Chingiz-Saursk. Sheet M-44-XXIII. Explanatory note], Moscow, Nedra Publ., 1965.
 5. D'yachkov B. A., Aitbaeva S. S., Amralinova B. B., Oitseva T. A. Osobennosti veshchestvennogo sostava i rudonosnosti plagiogranitov kunushskogo kompleksa (Vostochnyi Kazakhstan) [Features of the material composition and ore content of plagiogranites of the Kunush complex (Eastern Kazakhstan)], *Vestnik VKGTU [BULLETIN of D. Serikbayev EKTU]*, 2017, No 3, pp. 33–40. (In Russ.).
 6. D'yachkov B. A., Kuz'mina O. N., Zimanovskaya N. A. et al. Tipy zolotorudnykh mestorozhdenii Vostochnogo Kazakhstana [Types of gold deposits in Eastern Kazakhstan], Ust'-Kamenogorsk, D. Serikbayev EKTU Publ., 2015, 204 p.
 7. Ermolov P. V., Polyanskii N. V., Dobretsov N. L. Ofiolity Charskoi zony [Ophiolites of the Chara zone], *Ofiolity [Ophiolites]*, Alma-Ata, Nauka Publ., 1981, pp. 103–178.
 8. Kalinin Yu. A., Gladkov A. S., Borovikov A. A., Sukhorukov V. P., Khusainova A. Sh., Serebryakov E. V., Greku E. D. Izuchenie mineralogo-geokhimicheskikh osobennostei rud mestorozhdeniya Anomal'noe i strukturnye usloviya ego lokalizatsii (Vostochnyi Kazakhstan). Okonchatel'nyi otchet po dogovoru № 69-21v ot 27.04.2021 [Study of the mineralogical and geochemical features of the ores of the Anomalnoye deposit and the structural conditions of its localization (East Kazakhstan). Final report on agreement No 69-21v dated 27.04.2021], Novosibirsk, 2021, 91 p.
 9. Kalinin Yu. A., Kovalev K. R., Gladkov A. S., Sukhorukov V. P., Shelepaev R. A., Borovikov A. A., Serebryakov E. V., Khusainova A. Sh. Geologostrukturnyi kontrol' i osobennosti veshchestvennogo sostava zolotogo orudneniya Ashalinskogo i Daubaiskogo rudnykh polei (Vostochnyi Kazakhstan). Okonchatel'nyi otchet po dogovoru № 83-18v ot 11.06.2018 [Geological and structural control and features of the material composition of gold mineralization in the Ashala and Daubai ore fields (East Kazakhstan). Final report on agreement No. 83-18v dated 11.06.2018], Novosibirsk, 2019, 155 p.
 10. Kovalev K. R., Kalinin Yu. A., Naumov E. A., Kolesnikova M. K., Korolyuk V. N. Zolotonosnost' arsenopirita zoloto-sul'fidnykh mestorozhdenii Vostochnogo Kazakhstana [Gold content of arsenopyrite in gold-sulfide deposits of Eastern Kazakhstan], *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, 2011, V. 52, No 2, pp. 225–242. (In Russ.).
 11. Kovalev K. R., Kalinin Yu. A., Polynov V. I., Kydyrbekov E. L., Borisenko A. S., Naumov E. A., Netesov M. I., Klimenko A. G., Kolesnikova M. K. Suzdal'skoe zoloto-sul'fidnoe mestorozhdenie v chernoslantsevykh tolshchakh, Vostochnyi Kazakhstan [Suzdal gold-sulfide deposit in black shale strata of Eastern Kazakhstan], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of ore deposits]*, 2012, V. 54, No 4, pp. 305–328. (In Russ.).
 12. Nalivaev V. I. Rudokontroliruyushchie struktury i printsipy prognoznnoi otsenki Akzhal-Boko-Ashalinskogo zolotorudnogo raiona (Vostochnyi Kazakhstan) [Ore-controlling structures and principles of forecast assessment of the Akzhal-Boko-Ashalinsky gold mining region (Eastern Kazakhstan)], *Usloviya formirovaniya i zakonmernosti razmeshcheniya mestorozhdenii zolota Kazakhstana [Conditions of formation and patterns of placement of gold deposits in Kazakhstan]*, Alma-Ata, KazIMS Publ., 1980, pp. 111–118.
 13. Palenova E. E., Belogub E. V., Plotinskaya O. Yu., Novoselov K. A., Maslennikov V. V., Kotlyarov V. A., Blinov I. A., Kuz'menko A. A., Griboedova I. G. Evolyutsiya sostava pirita na zolotorudnykh mestorozhdeniyakh Kopylovskoe i Kavkaz v chernoslantsevykh tolshchakh (Bodaibinskii raion, Rossiya) po dannym RSMA i LA-MSP-MS [Evolution of pyrite composition at the Kopilovskoye and Kavkaz gold deposits in black shale strata (Bodaibo district, Russia) according to RSMA and LA-MSP-MS data], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of ore deposits]*, 2015, V. 57, No 1, pp. 71–92. (In Russ.).
 14. Parilov Yu. S., Bespaev Kh. A. Problemy Bakyrchika i vsego Zapadno-Kalbinskogo zolotorudnogo poyasa (Vostochnyi Kazakhstan) [Problems of Bakyrchik and the entire West Kalbinsky gold ore belt (Eastern Kazakhstan)], *Izvestiya NAN RK. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk [Bulletin of the NAS RK. Series of geology and technical sciences]*, 2015, No 6, pp. 46–56. (In Russ.).
 15. Serdyukov A. N. O kontrole zolotogo orudneniya Ashaly-Daubaiskogo rudnogo polya [On the control of gold mineralization of the Ashali-Daubay ore field], *Inovatsionnye razrabotki i sovershenstvovaniya tekhnologii v gorno-metallurgicheskom*



- производстве. *Materialy 5 Mezhdunarodnoi konferentsii [Innovative developments and improvements in technologies in mining and metallurgical production: Proceedings of the 5th International Conference]*, Ust'-Kamenogorsk, VNIItsvetmet Publ., 2009, V. 1, pp. 62–66. (In Russ.).
16. Serdyukov A. N. Yuzhnye Ashaly – novoe krupno-ob"emnoe mestorozhdenie zolota v Vostochnom Kazakhstane [Southern Ashali – a new large-volume gold deposit in Eastern Kazakhstan], *Inovatsionnye razrabotki i sovershenstvovaniya tekhnologii v gorno-metallurgicheskom proizvodstve. Materialy 5 Mezhdunarodnoi konferentsii [Innovative developments and improvements in technologies in mining and metallurgical production: Proceedings of the 5th International Conference]*, Ust'-Kamenogorsk, VNIItsvetmet Publ., 2009, V. 1, pp. 67–70. (In Russ.).
 17. Serdyukov A. N., Solov'ev S. A., Semilet A. V. Otchet o provedenii poiskovo-otsenochnykh rabot na uchastkakh Ashaly-Daubaiskogo rudnogo polya v 2017–2019 g. [Report on the exploration and evaluation work at the sites of the Ashali-Daubai ore field in 2017–2019], Ust'-Kamenogorsk, GEO. KZ Publ., 2019.
 18. Khromykh S. V. Bazitovyi i sopryazhennyi granitoidnyi magmatizm kak otrazhenie stadii razvitiya Altaiskoi akkretsiionno-kollizionnoi sistemy (Vostochnyi Kazakhstan) [Basic and conjugate granitoid magmatism as a reflection of the stages of development of the Altai accretion-collision system (Eastern Kazakhstan)], *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, 2022, V. 63, No 3, pp. 330–355. (In Russ.).
 19. Shevkunov A. G., Maslennikov V. V., Larzh R. R., Maslennikova S. P., Danyushevskii L. V. Geokhimicheskie osobennosti raznovidnostei pirita zolotorudnogo mestorozhdeniya Kumtor, Kyrgyzstan [Geochemical features of pyrite varieties of the Kumtor gold deposit, Kyrgyzstan], *Mineralogiya [Mineralogy]*, 2018, No 4 (4), pp. 22–40. (In Russ.).
 20. Shcherba G. N., Bespaev Kh. A., D'yachkov B. A., Mysnik A. M., Ganzhenko G. D., Sapargaliev E. M. Bol'shoi Altai (geologiya i metallogeniya). Kn. 2. Metallogeniya [Great Altai (geology and metallogeny). Book 2. Metallogeny], Almaty, RIO VAK RK Publ., 2000, 400 p.
 21. Baibatsha A. B., Dyussebaeva K. Sh., Kassenova A. Microscopic studies of gold deposit Southern Ashaly in Eastern Kazakhstan, *Advanced Materials Research*, 2013, V. 828, pp. 1–10.
 22. Barley M. E. and Groves D. I. Deciphering the tectonic evolution of Archaean greenstone belts: The importance of contrasting histories to the distribution of mineralization in the Yilgarn craton. Western Australia, *Precambrian Research*, 1990, V. 46, pp. 3–20.
 23. Berner R. A. Sedimentary pyrite formation: an update, *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1984, No 48, pp. 605–615.
 24. Deditius A. P., Utsunomiya S., Reich M., Kesler S. E., Ewing R. C., Hough R., Walshe J. Trace metal nanoparticles in pyrite, *Ore Geology Reviews*, 2011, No 42, pp. 32–46.
 25. Fleet M. E., Mumin A. H. Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis, *American Mineralogist*, 1997, V. 82, No 1–2, pp. 182–193.
 26. Goldfarb R. J., Baker T., Dube B., Groves D. I., Hart Craig J., Gosselin P. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes, *Economic Geology*, 2005, V. 100, pp. 407–450.
 27. Ilchik R. P., Barton M. D. An amagmatic origin of Carlin-type gold deposits, *Economic Geology*, 1997, V. 92, pp. 269–288.
 28. Johnston M. K., Ressel M. W. Controversies on the origin of world-class gold deposits, Pt. 1: Carlin-type gold deposits in Nevada-Carlin-type and distal disseminated Au-Ag deposits: Related distal expressions of Eocene intrusive centers in north-central Nevada, *Society of Economic Geologist Newsletter*, 2004, V. 59, pp. 12–14.
 29. Kalinin Yu. A., Kovalev K. R., Serdyukov A. N., Gladkov A. S., Sukhorukov V. P., Naumov E. A., Travin A. V., Semenova D. V., Serebryakov E. V., Greku E. D. Age constraints and metallogenic prediction of gold deposits in the Akzhal-Boko-Ashalin ore zone (Altai accretion-collision system), *Geodynamics & Tectonophysics*, 2021, V. 12 (2), pp. 392–408.
 30. Kovalev K. R., Kalinin Yu. A., Naumov E. A., Pirajno F., Borisenko A. S. A Mineralogical Study of the Suzdal Sediment-Hosted Gold Deposit, Kazakhstan: Implications for Ore Genesis, *Ore Geology Reviews*, 2009, No 35 (2), pp. 186–206.
 31. Kouketsu Y., Mizukami T., Mori H., Endo S., Aoya M., Hara H., Nakamura D., Wallis S. A new approach to develop the Raman carbonaceous material geothermometer for low-grade metamorphism using peak width, *Island Arc*, 2014, No 23, pp. 33–50.
 32. Large R. R., Danyushevsky L., Hillit H., Maslennikov V., Meffere S., Gilbert S., Bull S., Scott R., Emsbo P., Thomas H., Singh B., Foster J. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlinstyle sediment-hosted

- deposits, *Economic Geology*, 2009, V. 104, pp. 635–668.
33. Large R. R., Halpin J. A., Danyushevsky L. V., Maslennikov V. V., Bull S. W., Long J. A., Gregory D. D., Lounejeva E., Lyons T. W., Sack P. J., McGoldrick P. J., Calver C. R. Trace element content of sedimentary pyrite as a new proxy for deep-time ocean-atmosphere evolution, *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, V. 389, pp. 209–220.
34. Large R. R., Maslennikov V. V., Robert F., Danyushevsky L. V., Chang Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log Deposit, Lena gold province, Russia, *Economic Geology*, 2007, No 102, pp. 1233–1267.
35. Liu W., Deng X., Han S., Chen X., Li X., Aibai A., Wu Y., Wang Y., Shan W., Li Z., Chen Y. Pyrite Textures and Compositions in the Dunbasitao Gold Deposit, NW China: Implications for Ore Genesis and Gold Mineralization Processes, *Minerals*, 2023, V. 13 (4), 25 p.
36. Maddox L. M., Bancroft G. M., Scaini M. J., Lorimer J. W. Invisible gold: comparison of Au deposition on pyrite and arsenopyrite, *American Mineralogist*, 1998, V. 83, No 11–12, pp. 1240–1245.
37. Reich M., Deditius A., Chryssoulis S., Li J. W., Ma C. Q., Parada M. A., Barra F., Mittermayr F. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, No 104, pp. 42–62.
38. Safonova I. Yu., Simonov V. A., Kurganskaya E. V., Obut O. T., Romer R. L., Seltmann R. Late Paleozoic oceanic basalts hosted by the Char suture-shear zone, East Kazakhstan: geological position, geochemistry, petrogenesis and tectonic setting, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, V. 49, pp. 20–39.
39. Scholz F., Neumann T. Trace element diagenesis in pyrite-rich sediments of the Achterwasser lagoon, SW Baltic Sea, *Marine Chemistry*, 2007, V. 107, pp. 516–532.
40. Wilkin R. T., Barnes H. L. Pyrite formation in an anoxic estuarine basin, *American Journal of Science*, 1997, V. 297, pp. 620–650.

Греку Евгений Дмитриевич (grekued@igm.nsc.ru)
младший научный сотрудник ¹

Калинин Юрий Александрович
доктор геолого-минералогических наук, доцент, главный научный сотрудник ¹

Сердюков Александр Николаевич
ведущий геолог ²

Наумов Евгений Анатольевич
кандидат геолого-минералогических наук, первый заместитель генерального директора ³

Боровиков Андрей Александрович
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ¹

Рагозин Алексей Львович
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ¹

Гладков Андрей Станиславович
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ⁴

¹ Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

² ТОО «К-ПЛЕЙСЕР», г. Семей, Республика Казахстан

³ Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, г. Москва, Россия

⁴ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия