



## Золото-мышьяково-сульфидное оруденение Каянчинской площади (Горный Алтай)

Кряжев С. Г.<sup>1</sup>, Двуреченская С. С.<sup>1</sup>, Окулов А. В.<sup>1</sup>, Федак С. И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ), г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ОСП «ГАЭ» АО «Сибирское ПГО», с. Малоенисейское, Россия

**Аннотация.** На Горном Алтае впервые выявлено оруденение золото-мышьяково-сульфидного типа. Минерализованные зоны ассоциируют с дайками лампрофиров и контролируются крутопадающими нарушениями, пересекающими терригенно-карбонатно-вулканогенную толщу венд-кембрийского возраста. Рудные тела локализованы в горизонтах метавулканитов основного состава, заключённых между слоями известняков. Околорудные метасоматиты сложены парагенезисом альбита, магнезиосидерита и серицита. Золотоносность связана с тонкой вкрапленностью мышьяковистого пирита и арсенопирита. Золото в первичных и окисленных рудах субмикроскопическое и тонкодисперсное. Изотопный состав серы сульфидов ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} = 0 \text{ ‰}$ ) указывает на связь оруденения с глубинным магматическим источником. В качестве аналога рассмотрено месторождение Кокпатас (Западный Узбекистан).

**Ключевые слова:** Горный Алтай, Каянча, золото, листвениты, арсенопирит.

Для цитирования: Кряжев С. Г., Двуреченская С. С., Окулов А. В., Федак С. И. Золото-мышьяково-сульфидное оруденение Каянчинской площади (Горный Алтай). Руды и металлы. 2023. № 4. С. 36–51. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10018.

---

## Gold-arsenic sulfide mineralization of the Kayancha area, Gorny Altai

Kryazhev S. G.<sup>1</sup>, Dvurechenskaya S. S.<sup>1</sup>, Okulov A. V.<sup>1</sup>, Fedak S. I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (TSNIGRI), Moscow, Russia

<sup>2</sup> OSP “GAE” JSC “Siberian PGO”, village of Maloeniseyskoye, Russia

**Annotation.** Gold-arsenic sulfide type mineralization has first been revealed for the Gorny Altai region. The mineralized zones associate with lamprophyre dikes and are controlled by steeply dipping faults transecting the Vendian-Cambrian terrigenous-carbonate-volcanogenic sequence. The ore bodies are localized in horizons of basic metavolcanic rocks, enclosed between limestone layers. The near-ore metasomatites are composed of the paragenesis of albite, magnesian siderite, and sericite. The gold content is related to fine dissemination of arsenic pyrite and arsenopyrite. Gold in the primary and oxidized ores is submicroscopic and finely dispersed. The sulfur isotopic composition of the sulfides ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} = 0 \text{ ‰}$ ) indicates an association of the mineralization with a deep-seated magmatic source. The Kokpatas gold deposit in western Uzbekistan is considered as an analogue.

**Keywords:** Gorny Altai, Kayancha, gold, listvenite, arsenopyrite.

For citation: Kryazhev S. G., Dvurechenskaya S. S., Okulov A. V., Fedak S. I. Gold-arsenic sulfide mineralization of the Kayancha area, Gorny Altai. Ores and metals, 2023, № 4, pp. 36–51. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10018.



**Введение.** Каянчинская площадь расположена на территории листа М-45-II, в географическом плане она находится на северном завершении структур Горного Алтая, в области их перехода к Предалтайской равнине. На объекте в период 2017–2019 гг. выполнялись поисковые работы на рудное золото. В тектоническом плане [6] Каянчинская площадь (рис. 1) приурочена к зоне сочленения двух структурно-формационных зон – Каимско-Аламбайской (западная часть) и Бийско-Катунской (восточная часть). В пределах площади и её обрамления данным структурам соответствуют Каимский аллохтон и Катунский блок одноимённого Катунского параавтохтона. Граница блоков проходит по зоне крупного Каянчинского надвига (В. А. Кривчиков и др., 2001 г.). Блоки различаются по геологическому строению, возрасту и составу интрузивных пород, а также по металлогении.

Катунский блок сложен породами эсконгинской и манжерокской свит раннего кембрия и усть-семинской свиты среднего кембрия. Отложения эсконгинской свиты в пределах площади представлены известняками, доломитами, сланцами с прослоями базальтов, алевролитов и песчаников, в разрезе манжерокской свиты преобладают базальты; усть-семинская свита состоит из базальтов, трахибазальтов, туфов и туффитов, лавобрекчий, реже – из алевролитов и прослоев известняков. Контакты свит тектонические. Интрузивные породы – габбро, диориты, кварцевые диориты и гранодиориты – относятся к различным фазам усть-беловского габбро-диорит-гранодиоритового комплекса позднего девона. Эти породы слагают малые интрузии и дайки, а также Рыбалкинский полифазный интрузивный массив. В пределах Катунского блока проявлено оруденение золото-сульфидно-кварцевого типа (участки Айский и Сухой Лог) в виде разобщённых маломощных зон прожилково-вкрапленной минерализации (кварц, пирит, пирротин) с мелким самородным золотом. Зоны сопровождаются комплексными аномалиями Au, As, Bi, Te, Cu, Zn, Pb и Sb.

Каимский блок сформирован отложениями каимской и каянчинской свит венда–ран-

него кембрия. Отложения каянчинской свиты представлены вулканитами основного состава, известняками, доломитами с редкими прослоями углеродистых сланцев. В составе отложений каимской свиты преобладают сланцы при подчинённой роли базальтов и известняков, отмечаются отдельные маломощные прослои и линзы силицитов. Площадь блока осложнена серией параллельных веерообразных надвиговых зон, которые сопровождаются милонитизацией и катаклазом. Вдоль надвиговых зон проявлены тела габбро, габбро-диоритов, апогипербазитовых серпентинитов, пироксенитов и амфиболитов мафит-ультрамафитового (офиолитового) комплекса венда–раннего кембрия. Они образуют линзовидные и линейно вытянутые тела различной протяжённости (до 3 км) и видимой мощности (до 1 км). Отложения каимской свиты прорваны крупным массивом щелочных лейкогранитов третьей фазы айского сиенит-граносиенит-гранитного комплекса раннего триаса (Айский массив в северной части площади). В южной части отложения каянчинской свиты прорваны небольшим телом щелочных гранитов того же комплекса, фиксируются дайковые тела субщелочных гранит-порфиоров, монцогаббро, лампрофиоров. Вдоль контактов гранитоидов и карбонатных пород проявлены тела скарнов. На площади Каимского блока выявлено оруденение золото-мышьяково-сульфидного типа (участок Верхнекаянчинский). Это мощные зоны сульфидной вкрапленности с содержаниями Au 1–10 г/т, которые сопровождаются первичными и вторичными аномалиями Au, As, Sb. Подобное оруденение на территории Алтая установлено впервые, с ним связываются основные перспективы дальнейших поисковых работ. В статье приведены первые результаты выполненных авторами комплексных минералого-геохимических исследований золотоносных образований Верхнекаянчинского участка.

Образцы для исследований были отображены авторами в процессе документации керн скважин 55–57, вскрывших первичные руды и околорудные метасоматиты (рис. 2). Керн опробовали методом пунктирной борозды. Окис-

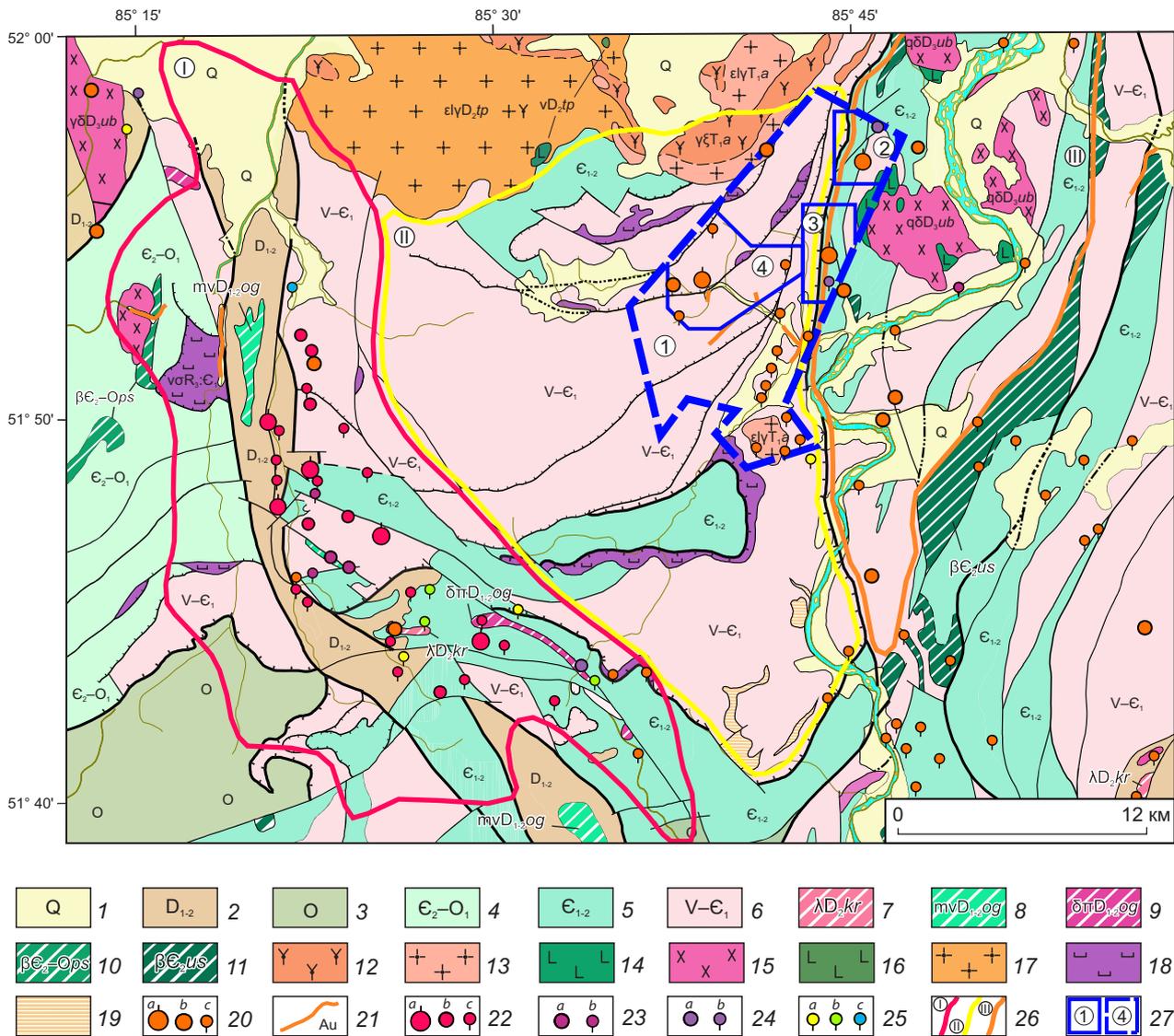


Рис. 1. Схематическая геологическая карта прогнозируемого Каянчинского золоторудного узла и его обрамления, по материалам (В. А. Кривчиков и др., 2001 г.) с уточнениями и изменениями авторов. Металлогеническое районирование дано в авторском варианте, с использованием данных [6]:

отложения: 1 – четвертичные нерасчленённые; 2 – ранне-среднедевонские (пестроцветные песчаники, алевролиты, известняки, базальты, андезиты, редко дациты, туфы, тефроиды, туффиты); 3 – ранне-позднеордовикские (пестроцветные и табачно-зелёные песчаники, алевролиты, известняки, мергели, гравелиты, конгломераты); 4 – средний кембрий–ранний ордовик (пестроцветные песчаники, алевролиты, филлиты, туффиты); 5 – ранне-среднекембрийские (тёмно-серые, табачно-зелёные алевролиты, песчаники, известняки, афировые и пироксен-порфировые базальты, трахибазальты и их туфы, лавобрекчии, силицилиты, тефроиды, туффиты); 6 – венд–ранний кембрий (известняки, доломиты, силицилиты, филлиты, сланцы, алевролиты и метаалевролиты, туффиты, песчаники, скуднопорфировые базальты, долериты); 7 – средний девон, куратинский комплекс, штоки, линейные тела риолитов (λD<sub>2</sub>kr); ранний–средний девон, онгудайский комплекс, жерловые образования: 8 – микрогаббро (mvD<sub>1-2</sub>og), 9 – диорит-порфириды (δπD<sub>1-2</sub>og); 10 – средний кембрий–ранний ордовик, песчанский комплекс, силлы долеритов (βЄ<sub>2-0ps</sub>); 11 – средний кембрий, усть-семиинский комплекс, штоки базальтов, долеритов (βЄ<sub>2</sub>us); ранний триас, айский комплекс: 12 – вторая фаза, граносиениты (γξT<sub>1</sub>a), 13 – третья фаза, субщелочные лейкограниты биотитовые и двуслюдяные, аляскиты (ελγT<sub>1</sub>a); поздний девон, усть-беловский комплекс: 14 –



первая фаза, габбро ( $vD_3ub$ ), 15 – вторая фаза, гранодиориты амфибол-биотитовые, кварцевые диориты ( $\gamma\delta, q\delta D_3ub$ ); средний девон, топольнинская ассоциация: 16 – первая фаза, амфибол-пироксеновые диориты ( $vD_2tp$ ), 17 – четвёртая фаза, субщелочные лейкограниты ( $\epsilon\gamma D_2tp$ ); 18 – позднерипейско(?)–раннекембрийские офиолитовые образования ( $\nu\sigma R_3:C_1$ ), апоперидотиты, базальты, габбро, пироксениты; 19 – чаустинский высокобарический комплекс кристаллосланцев, гнейсов, амфиболитов ( $ks, a(PR_2:PZ_3)\epsilon$ ); 20 – рудопроявления с апробированными ресурсами (a), рудопроявления (b), пункты минерализации золота (c); 21 – россыпи золота промышленные мелкие; 22 – мелкие месторождения (a), рудопроявления (b), пункты минерализации ртути (c); 23 – рудопроявления (a), пункты минерализации (b) урана; 24 – рудопроявления (a), пункты минерализации (b) железа; 25 – рудопроявления серебра (a), меди (b), мышьяка (c); 26 – металлогеническое районирование: сарасинская золото-ртутнорудная зона (I), Каянчинский прогнозируемый золоторудный узел (II), предлагаемый к выделению Айско-Катунский золоторудный узел (III); 27 – контуры поисковых площадей и участков детальных работ: Каянчинская площадь (1), участки Айский (2), Сухой Лог (3), Верхнекаянчинский (4)

**Fig. 1. Schematic geological map of the Kayancha forecasted gold ore cluster and its adjacent territories. Modified after Krivchikov et al., 2001. Metallogenic zoning presented in the author's version, using data from [6]:**

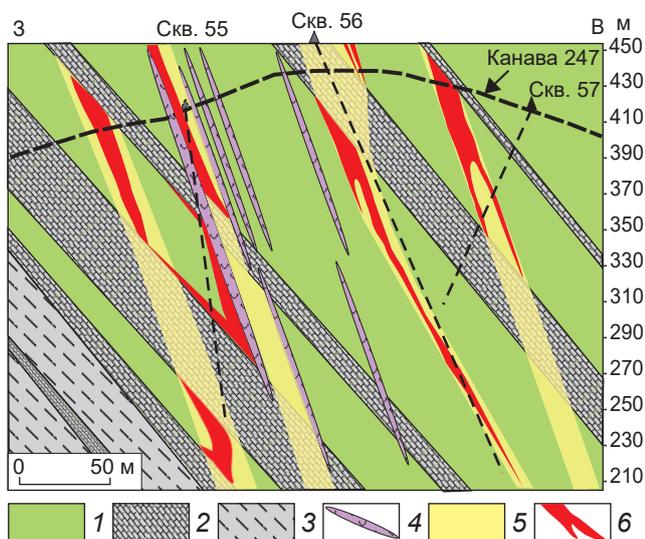
Stratified deposits: 1 – Quaternary, undivided; 2 – Early–Middle Devonian (varicolored sandstones, siltstones, limestones, basalts, andesites, rarely dacites, tuffs, tephroids, tuffites); 3 – Early–Late Ordovician (varicolored and tobacco-green sandstones, siltstones, limestones, marls, gravelstones, conglomerates); 4 – Middle Cambrian–Early Ordovician (varicolored sandstones, siltstones, phyllites, tuffites); 5 – Early–Middle Cambrian (dark gray, tobacco-green siltstones, sandstones, limestones, aphyric and pyroxene-porphry basalts, trachybasalts and their tuffs, lava breccias, silicilites, tephroids, tuffites); 6 – Vendian–Early Cambrian (limestones, dolomites, silicilites, phyllites, shales, siltstones and metasiltstones, tuffites, sandstones, rarely-porphry basalts, dolerites); subvolcanic and extrusive formations: 7 – Middle Devonian, Kurata complex: rhyolite stocks and linear bodies ( $\lambda D_2kr$ ); Early–Middle Devonian, Ongudai complex, volcanic vent formations: 8 – microgabro ( $mvD_{1-2}og$ ), 9 – diorite-porphyrates ( $\delta\pi D_{1-2}og$ ); 10 – Middle Cambrian–Early Ordovician; Peschanka complex: dolerite sills ( $\beta C_2-ops$ ); 11 – Middle Cambrian, Ust-Seminsky complex: stocks of basalts, dolerites ( $\beta C_2us$ ); plutonic associations: Early Triassic, Ai complex: 12 – second phase, granosyenites ( $\gamma\zeta T_1a$ ), 13 – third phase, biotite and two-mica subalkaline leucogranites, alaskites ( $\epsilon\gamma\Gamma_1a$ ); Late Devonian, Ust-Belovsky complex: 14 – first phase, gabbro ( $vD_3ub$ ), 15 – second phase, amphibole-biotite granodiorites, quartz diorites ( $\gamma\delta, q\delta D_3ub$ ); Middle Devonian, Topolninsky association: 16 – first phase, amphibole-pyroxene diorites ( $vD_2tp$ ), 17 – fourth phase, subalkaline leucogranites ( $\epsilon\gamma D_2tp$ ); 18 – Late Riphean(?) – Early Cambrian ophiolitic association ( $\nu\sigma R_3:C_1$ ): apoperidotites, basalts, gabbro, pyroxenites; 19 – Chaustinsky high-pressure complex of crystalline schists, gneisses, amphibolites ( $ks, a(PR_2:PZ_3)\epsilon$ ); 20 – gold ore mineralization: (a) prospects with attested forecasted resources, (b) other ore occurrences, (c) mineralization points; 21 – small economic-grade gold placers; 22 – mercury mineralization: (a) small ore deposits, (b) ore occurrences, (c) mineralization points; 23 – uranium mineralization: (a) ore occurrences, (b) mineralization points; 24 – iron ore mineralization: (a) ore occurrences, (b) mineralization points; 25 – other metals ore occurrences: (a) silver, (b) copper, (c) arsenic; 26 – metallogenic regionalization: (I) Sarasinsky gold-mercury ore zone, (II) Kayancha forecasted gold ore cluster, (III) Ai-Katun gold ore cluster proposed for allocation; 27 – outlines of prospecting areas and detailed work areas: (1) Kayancha area, (2) Ai site, (3) Sukhoi Log site, and (4) Verkhnekayanchinsky site

ленные руды изучены с поверхности по полотно канавы № 247, навески для минералогических и химических анализов массой 1 кг были отквартованы из хвостов рядового опробования.

Исследования включали изучение прозрачных шлифов и аншлифов, минералогический рентгенофазовый анализ тяжёлой и лёгкой фракций протолок. Составы минералов уточнены в ЦНИГРИ при помощи сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA, оснащённого двумя энергодисперсионными спек-

трометрами (EDSEDAX Element 30), выполненными на основе полупроводникового кремний-дрейфового детектора (SDD). Нижний предел обнаружения для большинства химических элементов составлял 0,1 мас. %.

Количественные химические анализы пород, метасоматитов и руд выполнены в аккредитованной лаборатории ООО «Стюарт Геокемикл энд Эссей». Содержания основных элементов определены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) после разложения в царской водке, содер-



**Рис. 2.** Схематический разрез центральной части Верхнекаянчинского участка:

1 – метавулканисты основного состава; 2 – известняки; 3 – углеродисто-сланцевые сланцы; 4 – дайки диоритов, габбродиоритов, лампрофиров; 5 – рудоконтролирующие тектонические зоны; 6 – золотосульфидная минерализация

**Fig. 2.** Schematic section across the central portion of the Verkhnekayanchinsky site:

1 – basic metavolcanites; 2 – limestones; 3 – carbonaceous-micaceous shales; 4 – diorite, gabbrodiorite, and lamprophyre dikes; 5 – ore-controlling tectonic zones; 6 – gold-sulfide mineralization

жания золота уточнены пробирным анализом навески 50 г с последующим определением Au методом атомно-эмиссионной спектрометрии.

Изотопный состав сульфидной серы определен в ЦНИГРИ с точностью  $\pm 0,2$  ‰ по стандартной методике [5]. В качестве эталона использовали лабораторный стандартный образец «Пирит Гайского месторождения» с  $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} = +0,7$  ‰.

**Результаты исследований.** Первичные руды и метасоматиты Верхнекаянчинского участка представлены изменёнными и минерализованными вулканитами основного состава (табл. 1, рис. 3).

Исходные рудовмещающие породы в результате прерудного метаморфизма превращены в альбит-стильпномелан-биотит-хлоритовые сланцы с вкрапленностью сфена и иль-

менита. Согласно со сланцеватостью развиваются маломощные кальцитовые прожилки и редкая линзовидно-вкрапленная пирротин-пиритовая минерализация. Судя по минеральному и химическому составу сланцев, протолитом служили субщелочные высокотитанистые базальтоиды.

Околорудные метасоматиты весьма выдержанного и своеобразного состава. Они сложены тонкозернистым агрегатом альбита и магнезиального сидерита с примесью тонкочешуйчатой калиевой слюды. Метасоматический кварц отсутствует. Зоны развития метасоматитов отчётливо выделяются благодаря характерному осветлению вулканитов, обусловленному замещением тёмноцветных железистых минералов карбонатами. В осевых частях метасоматических зон развиты кварц-альбит-анкеритовые и альбит-анкеритовые прожилки и интенсивная вкрапленная сульфидная минерализация (рис. 4).

Под микроскопом метасоматиты представляют собой тонкозернистый агрегат карбонат-альбитового состава с рассеянными тонкими чешуйками серицита и криптозернистыми полосовидными агрегатами рутила. Структура пород аллотриоморфнозернистая, текстура массивная, полосчатая, в осевых зонах с сульфидной минерализацией – плейчатая, катаклазированная и брекчиевидная. Состав метасоматитов в осевых зонах, %: альбит 40–60, сидерит 20–30, серицит 10–20, рутил 1–2, сульфиды 3–5 (до 10), кварц (в прожилках) 1–2.

По данным рентгеноспектрального микроанализа, сидерит, слагающий основную массу метасоматита, – магнезиальная разновидность с эмпирической формулой  $\text{Fe}_{0,85}\text{Mg}_{0,15}[\text{CO}_3]$ . В прожилках находится карбонат – анкерит с эмпирической формулой  $\text{Ca}(\text{Fe}_{0,55}\text{Mg}_{0,45})[\text{CO}_3]$ .

Рассматриваемые породы можно определить как листвениты – продукты низкотемпературных изменений пород основного состава под действием углекислотных флюидов. Примечательно, что по содержанию железа руды и метасоматиты не отличаются от вмещающих вулканитов, т. е. в процессе метасоматизма изменяются только минеральные формы этого элемента. Сравнение составов исход-



Табл. 1. Вещественный состав первичных руд и метасоматитов

Table 1. Composition of the primary ores and metasomatites

№ пробы	c56/ВМ*	c56/197,5	c56/207,4	c56/207,6	c55/13,4	c55/66	c57/54,2	c57/70,5
Аu, г/т (пробирный)	0,002	0,29	0,4	1,14	0,25	0,55	0,21	< 0,1
<i>Минералы</i>	<i>Содержание, %</i>							
Кварц	-	-	1	2	Следы	-	-	-
Альбит	40	45	60	55	40	60	28	50
Серицит	-	10	13	10	30	15	15	21
Анкерит	-	25	3	7	-	-	18	7
Сидерит	-	10	16	16	26	18	3	18
Кальцит	5	3	-	-	-	-	27	-
Апатит	1	2	1	2	-	-	-	-
Рутил, сфен	4	3	2	2	1	1	1	1
Хлорит	25	-	-	-	-	-	-	-
Бiotит, стильпномелан	25	-	-	-	-	-	-	-
Пирит	-	1,5	3,5	5	2,5	5,5	5,5	2,5
Арсенопирит	-	0,5	0,5	1	0,5	0,5	2,5	0,5
Халькопирит	-	-	-	Следы	Следы	-	-	-
Тетраэдрит	-	-	-	Следы	-	-	-	-
Золото	-	-	-	Ед. знаки	-	-	-	-
<i>Элементы</i>	<i>Содержание, г/т (ICP MS)</i>							
Ag	0,1	0,1	0,1	0,4	0,2	0	0,1	0,1
As	5,8	1958,7	2731,6	6941,5	1344,1	3337,6	> 10 000	1682,4
Zn	113	116	113	98	94	76	95	109
Bi	0	0	0	0,1	0,1	0	0	0
Sb	0,3	9,8	23,3	106,8	60,5	19,7	31,2	9,3
Cu	55,2	87,3	84,1	221	136,4	26,4	36,1	44,4
Pb	0,9	1,7	2,3	3,3	4,2	1,4	4,6	1,6
Mo	1,4	1,4	1	1,1	1,2	1,4	1,7	1,4
Te	< 0,01	0	0,1	0,1	0,1	0	0	0
Co	44,3	45,7	42,2	33,1	47,7	38,8	28,5	11,2
Cr	113	6	5	7	17	12	9	3
Hg	< 0,01	0	0	0	0	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Ni	104,1	63,1	74,1	72,7	117,6	75,7	50,7	5,2
W	0,2	0,7	0,4	0,5	1,5	0,7	0,5	0,3
Fe (%)	8,1	8,9	8,4	9	8,4	7,2	6,2	6,3

Примечание. В пробу c56/ВМ\* объединены вмещающие метавулканиты, отобранные из керна скважины № 56 в интервалах 140–170 и 240–260 м.

ных пород и метасоматитов показывает, что в рудах вместе с золотом накапливаются только As и Sb, в небольшой степени – Ag и Cu. Отношение Au/Ag около 3.

Сульфиды в метасоматитах представлены преимущественно кубическими кристаллами

мышьяковистого пирита (As в среднем около 0,5 мас. %), мелкими ромбическими и игольчатыми кристаллами арсенопирита. Размеры отдельных кристаллов сульфидов от десятых до сотых долей миллиметра. На участках с наиболее интенсивной минерализацией сульфидов

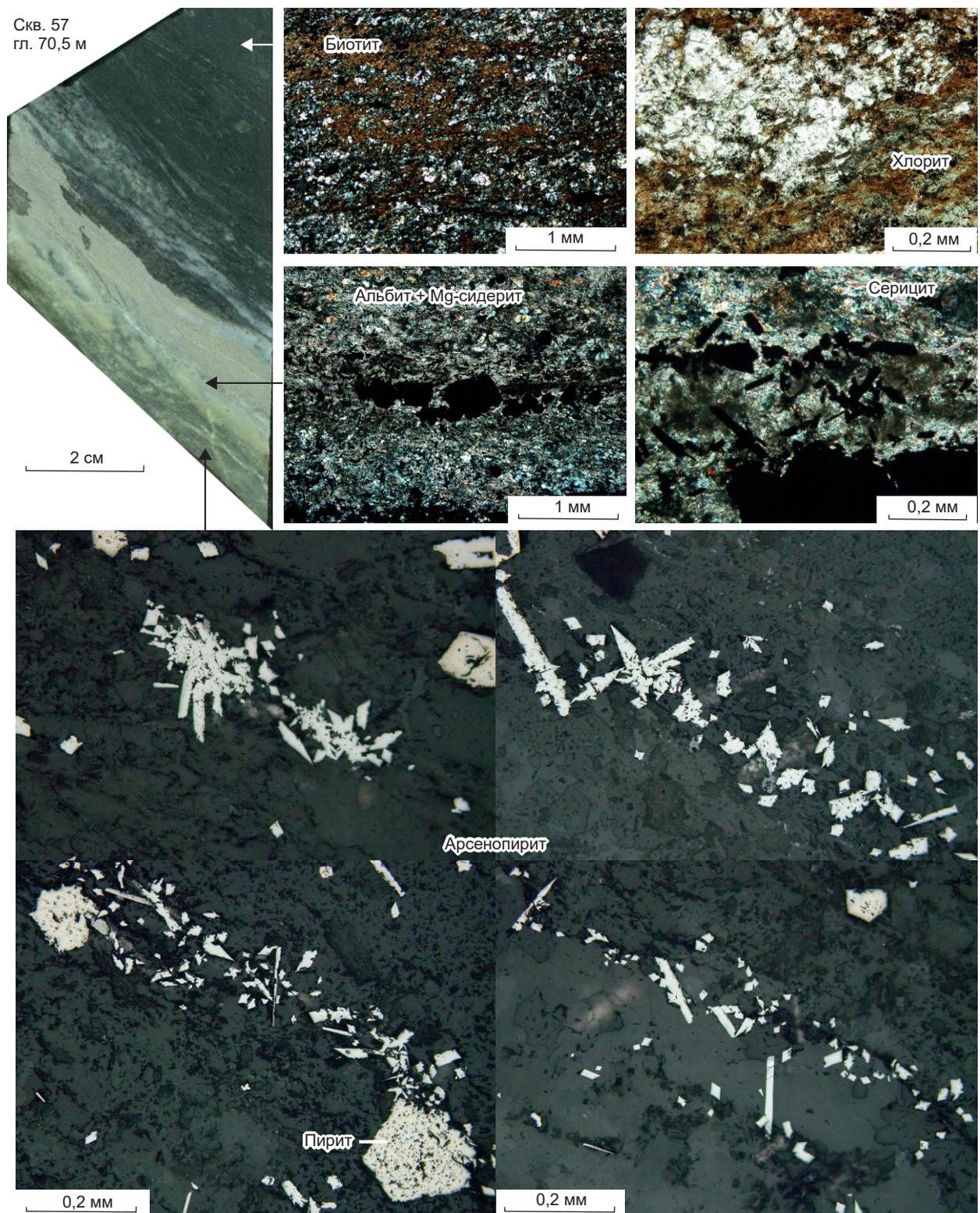


Рис. 3. Серцит-альбит-сидеритовые метасоматиты с сульфидной минерализацией

Fig. 3. Sericite-albite-siderite metasomatites with sulfide mineralization

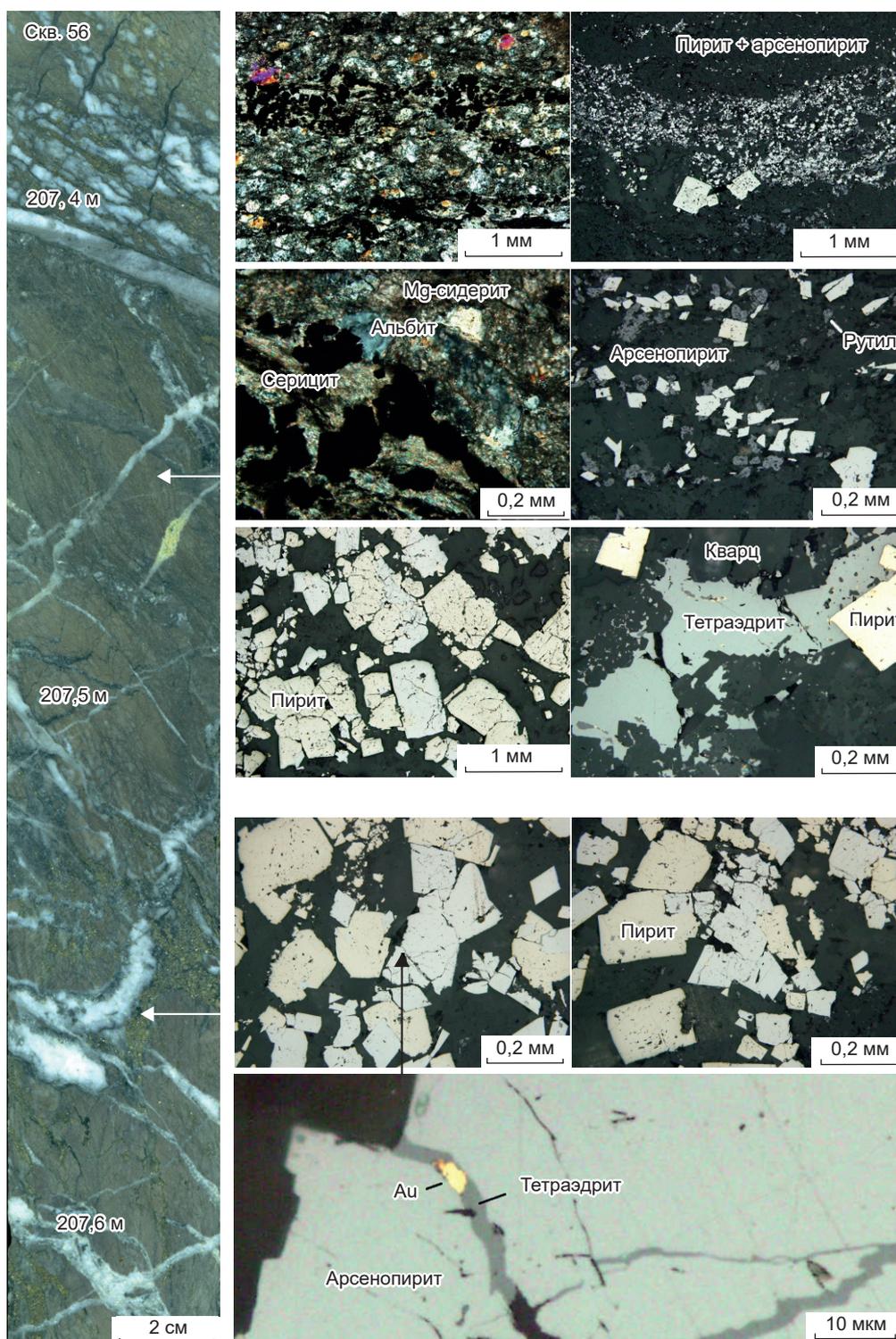
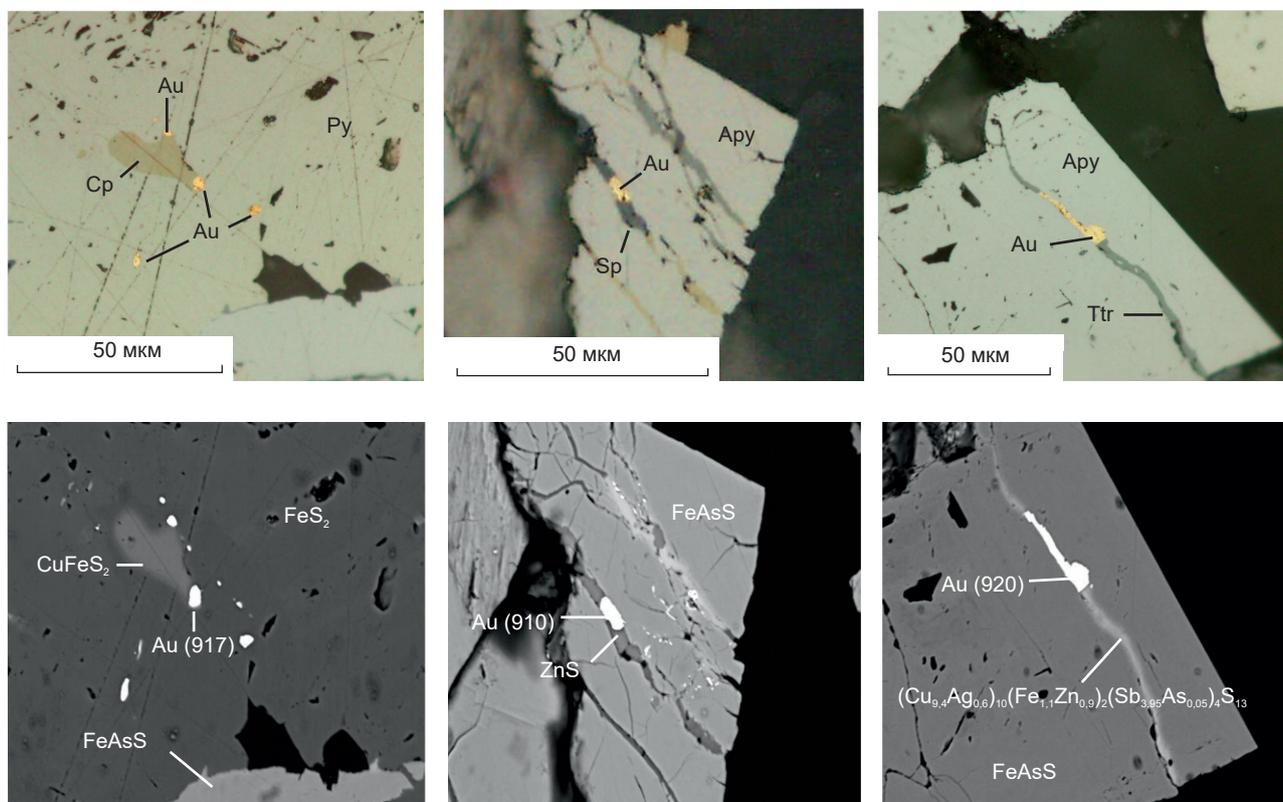


Рис. 4. Золотосульфидная минерализация в серицит-альбит-сидеритовых метасоматитах с кварц-альбитовыми прожилками

Fig.4. Gold-sulfide mineralization in sericite-albite-siderite metasomatites with quartz-albite veinlets



**Рис. 5. Микропарагенезисы самородного золота с сульфидами (скв. 56/207,6 м). Сверху фото в отражённом свете, снизу BSE-изображение с данными рентгеноспектрального микроанализа:**  
минералы: Ару – арсенопирит, Ру – пирит, Sp – сфалерит, Ср – халькопирит, Ттр – тетраэдрит, Au – самородное золото (в скобках указана пробыность, ‰)

**Fig. 5. Microparageneses of native gold with sulfides (Borehole No. 56/207.6 m). On the left is a photo in reflected light, on the right is a BSE image with X-ray spectral microanalysis data:**  
minerals: Apy – arsenopyrite, Py – pyrite, Sp – sphalerite, Cp – chalcopyrite, Ttr – tetrahedrite, Au – native gold (fineness is indicated in parentheses, ‰)

фиды образуют более крупные выделения, полиминеральные сростки, слагающие панидиоморфнозернистые агрегаты. Соотношение пирит – арсенопирит в среднем равно 5.

Изотопный состав серы арсенопирита и пирита (три определения) в пределах погрешности измерения соответствует «метеоритному» стандарту  $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} = +0 \pm 0,2 \text{ ‰}$ , что свидетельствует о глубинном источнике рудообразующих флюидов [2].

К распространённым примесям в рудах относятся халькопирит и блёклая руда, которые образуют в пирите и арсенопирите мелкие ксеноморфные включения либо нарастают на грани этих минералов и образуют в них мик-

ропрожилки (рис. 5). В единичных случаях в ассоциации с халькопиритом и блёклой рудой отмечен сфалерит. Блёклая руда – низкосеребристая сурьмяная разновидность (тетраэдрит) с эмпирической формулой  $(\text{Cu}_{9,4}\text{Ag}_{0,6})_{10}(\text{Fe}_{1,1}\text{Zn}_{0,9})_2(\text{Sb}_{3,95}\text{As}_{0,05})_4\text{S}_{13}$ .

Микроскопически видимое (более 1 мкм) самородное золото в ассоциации с пиритом и арсенопиритом не обнаружено. В парагенезисе с тетраэдритом, халькопиритом и сфалеритом отмечены тонкодисперсные (5–10 мкм) выделения высокопробного самородного золота (пробыность 910–920 ‰, единственной установленной примесью служит серебро). Более подробно типоморфные характеристики



самородного золота были рассмотрены в работе [5].

В распределении золотоносных метасоматитов следует отметить следующие закономерности. Во-первых, участки их развития приурочены к зонам контакта трещиноватых известняков и рассланцованных вулканогенных пород. Эти зоны имеют субширотное простирание и крутое (около  $60^\circ$ ) падение на юго-восток, что фиксируется по пересечениям маркирующих горизонтов известняков скважинами. Помимо структурного фактора (повышенной проницаемости таких зон) важную роль в локализации оруденения могло играть и наличие в сланцах значительного ресурса закисного железа, необходимого для осаждения сульфидов из растворов. Во-вторых, развитие метасоматитов и сульфидной минерализации в каждом пересечении контролируется системой трещин, перпендикулярных сланцеватости. Наиболее вероятно, что эти трещины являются опережающими по отношению к главным рудоподводящим структурам, секущим слоистость. Наличие таких структур фиксируется ещё и мелкими складками, осложняющими моноклиналиное залегание толщи в рудных зонах.

В центральной части участка прослеживается свита даек диоритов, габбродиоритов, лампрофиров. Простирание даек субмеридиональное с крутым (около  $80^\circ$ ) падением на восток. Контакты некоторых даек лиственитизированы и золотоносны. Можно предполагать, что между дайками и оруденением существует парагенетическая связь.

Таким образом, в качестве главного рудоконтролирующего фактора, определяющего размещение рудных тел, можно выделить литолого-структурный. Золото-мышьяково-сульфидная минерализация формируется на участках пересечения крутопадающих рудоподводящих разрывов с благоприятными по химическим свойствам горизонтами вулканитов основного состава. Слои известняков при этом выступают в качестве структурных экранов.

Схема последовательности рудообразования составлена по результатам изучения керна, а также петрографических и минераграфиче-

ских исследований (рис. 6, 7). В составе руд выделены две последовательно сформированные продуктивные минеральные ассоциации: пирит-арсенопиритовая с преимущественно невидимым (субмикроскопическим) золотом, несущая основную массу металла, и проявленная локально золото-халькопирит-тетраэдритовая с тонкодисперсным самородным золотом. Ранняя ассоциация была сформирована синхронно с метасоматитами. Поздняя ассоциация проявлена в осевых частях минерализованных зон, для которых характерно брекчирование метасоматитов и развитие кварц-альбит-анкеритовых прожилков.

*Окисленные руды.* До глубин порядка 100 м руды в разной степени окислены – от слабого замещения на глубине до полного окисления на поверхности. По содержанию железа полностью окисленные руды не отличаются от первичных (табл. 2). Магнезиально-железистые карбонаты и сульфиды в них замещены гётитом и его гидратированными разновидностями. Концентрации As и Sb при окислении руд также фактически не изменились, однако минеральные гипергенные формы этих элементов нами не обнаружены. Вероятно, мышьяк и сурьма рассеяны в массе гётита.

Данные, представленные в табл. 2, однозначно свидетельствуют о приуроченности наиболее богатых руд к метасоматически изменённым вулканитам основного состава с содержанием альбита около 70 % и небольшой долей прожилкового кварца. По указанным признакам золото-мышьяково-сульфидные руды могут быть уверенно идентифицированы в зоне гипергенеза. Значительные (до 5–10 г/т) содержания золота в них сопровождаются только аномалиями мышьяка, концентрации серебра при этом не повышаются. Не отмечается и увеличение количества микроскопически видимого самородного золота в рудах. В протоловках обнаружены только единичные пылевидные (< 50 мкм) золотины пробностью 880–910 ‰ [5]. Очевидно, что основной вклад в золотоносность окисленных руд вносит остаточное субмикроскопическое золото, высвободившееся из арсенопирита и мышьяковистого пирита при их окислении и равномерно рас-

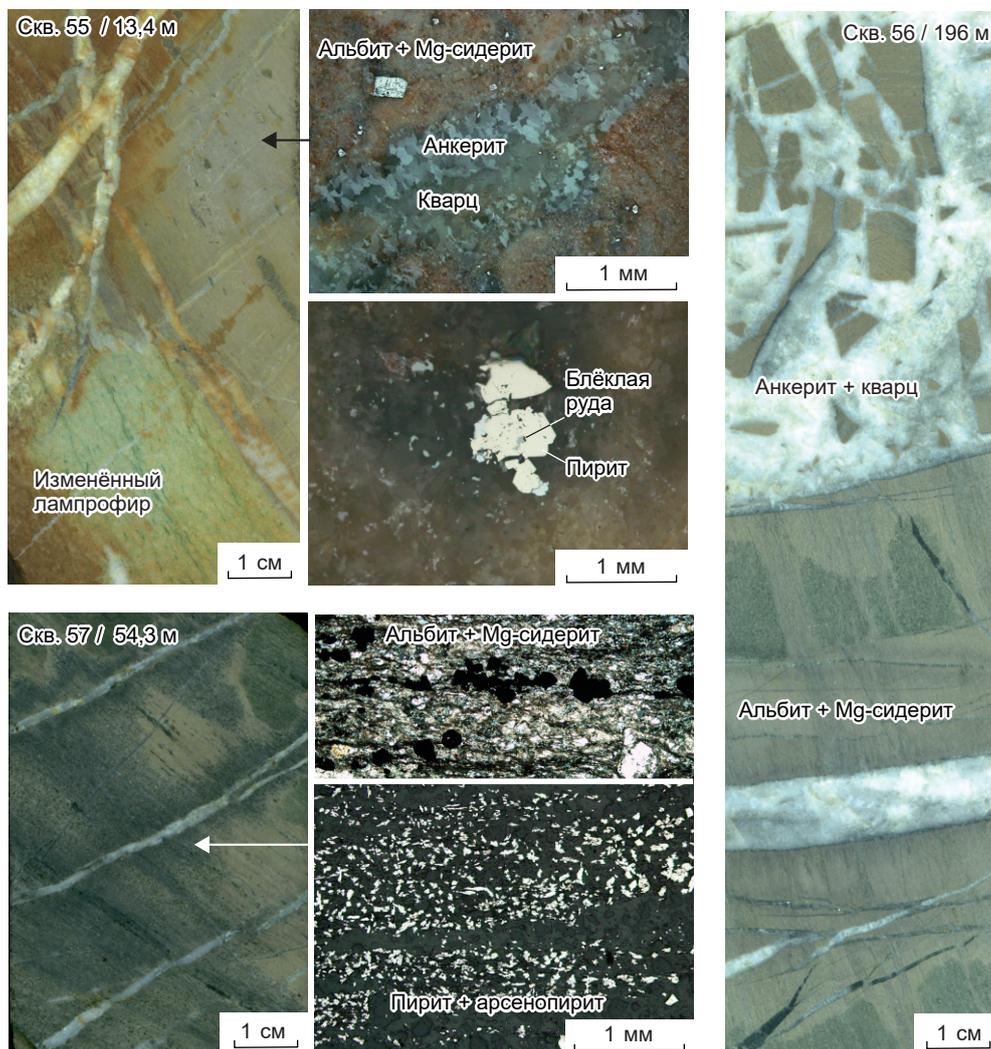


Рис. 6. Взаимоотношения серицит-альбит-сидеритовых метасоматитов, сульфидной минерализации и кварц-анкеритовых прожилков

Fig. 6. Relationships between sericite-albite-siderite metasomatites, sulfide mineralization, and quartz-ankerite veinlets

сеянное в массе гипергенных оксидов железа. Об этом также свидетельствует практическое совпадение результатов анализа Au, выполненного пробирным методом из навески 50 г и методом ICP MS из навески 0,1 г (см. табл. 2). Выходы окисленных руд, таким образом, не сопровождаются шлиховыми ореолами золота, что следует учитывать при поисковых работах.

**Обсуждение результатов.** Выявленная на участке продуктивная минерализация по всем признакам соответствует оруденению золото-мышьяково-сульфидной формации [1, 4]. Для

него характерны вкрапленные и вкраплено-прожилковые руды, слагающие «крупнообъёмные» залежи, и преобладание связанного в мышьяковистом пирите и арсенопирите «невидимого» золота. Золоторудные объекты данного типа – средние, крупные и весьма крупные по масштабам. Предполагается их связь с глубинными (мантийными или мантийно-коровыми) рудогенерирующими очагами. Закономерная геохимическая специализация руд (аномальное накопление Au-As-Sb-S при низких содержаниях других рудогенных элемен-



Этап	Пропилитовый	Лиственит-золотосульфидный		
Стадия	Дорудная	Главная продуктивная	Продуктивная	Пострудная
Минеральные ассоциации	Биотит-хлоритовая	Серицит-альбит-сидеритовая	Кварц-альбит-анкеритовая	Кальцитовая
	Пирит-пирротиновая	Пирит-арсенопиритовая	Золото-блэкморудная	
Биотит	██████████			
Хлорит	██████████			
Стильпномелан	██████████			
Кварц	████	████	██████████	
Альбит	██████████	██████████	██████████	
Серицит		██████████		
Мг-сидерит		██████████		
Анкерит		████	██████████	
Кальцит	██████████			██████████
Ильменит	████			
Рутил		████		
Арсенопирит		██████████		
Пирит	████	██████████		
Пирротин	████			
Халькопирит			██████████	
Тетраэдрит			██████████	
Сфалерит			-----	
Золото		-----	██████████	

Минералы: ██████████ главные, █████ второстепенные, ----- редкие

Рис. 7. Схема последовательности формирования золото-мышьяково-сульфидного оруденения Каянчинской площади

Fig. 7. Schematic diagram showing the sequence of formation of gold-arsenic sulfide mineralization in the Kayancha area

тов, в том числе Ag, Pb, Zn) объясняется составом рудообразующих растворов и физико-химической обстановкой минералообразования [3]. Подобные месторождения формировались при участии газообразных существенно углекислотных флюидов, мигрирующих независимо от водно-солевых растворов и осуществлявших эффективный транспорт ограниченного числа элементов, в число которых входят As, Sb, S и Au.

Большинство золото-мышьяково-сульфидных месторождений локализовано в углеро-

дисто-терригенных и карбонатно-терригенных толщах (Олимпиадинское, Кючус, Нежданинское, Майское, Бакырчик и др.). Объекты в вулканогенных комплексах редки, но тем не менее они известны. Для проявлений Каянчинской площади наиболее близким объектом-аналогом служит месторождение Кокпатас (Западный Узбекистан). По геологическим условиям локализации и минералого-геохимическим характеристикам руд указанное месторождение и золоторудные проявления Верхнекаянчинского участка весьма близки.

Табл. 2. Вещественный состав окисленных руд и метасоматитов

Table 2. Composition of the oxidized ores and metasomatites

	Интервал, м (канавка 247)						
	137,5–139,7	139,7–141,9	141,9–145,2	145,2–148,5	148,5–151,3	359,5–360,6	363,9–372,7
Аu г/т (пробирный)	0,4	8,9	5,5	0,2	0,4	3,9	1
Аu (знаки/кг)	0	2	3	0	0	6	3
<i>Минералы</i>	<i>Содержание, %</i>						
Кварц	25	2	1	25	24	4	6
Альбит	30	70	69	13	28	70	69
Слюдисто-глинистые минералы	10	1	3	13	12	17	17
Хлорит	5	-	-	19	6	-	-
Кальцит	18	15	17	20	19	2	2
Оксиды Fe, As	10	10	9	9	9	5	5
Рутил	2	2	1	1	2	2	1
<i>Элементы</i>	<i>Содержание, г/т (ICP MS)</i>						
Аu	0,7	9	5,4	0,3	0,5	4,5	1,1
Ag	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
As	2312,5	> 10 000	> 10 000	2220,6	3929,6	3193,7	2013,8
Zn	133	106	96	101,3	90	124	134,4
Bi	0	0	0	0	0	0,2	0,1
Sb	23,6	53,4	61,5	42,3	19,4	47,7	20,5
Cu	49	66,6	74,8	107,6	96	48,8	24,7
Pb	1,6	2,8	3	1,1	2,1	11,5	9,2
Mo	1,7	1	0,7	1,1	0,9	1,3	1,6
Te	0	0,1	0	0	0	0	0
Co	45,9	44,3	40,7	46,1	45	9,5	6,1
Cr	23,5	15,5	24,3	97	61,7	30	29,4
Hg	0	0	0	0	0	0	0
Ni	87,6	86,9	99,4	173	114,4	26,3	22,4
W	1	2,1	1,4	0,4	0,3	0,6	0,2
Fe (%)	8,6	9	6,8	7,7	7,2	4,2	4,2

Месторождение Кокпатас локализовано в толще вулканогенно-терригенных, эффузивных и кремнисто-карбонатных пород каменноугольного возраста [1, 4]. Положение рудного поля определяется его приуроченностью к узлу пересечения систем глубинных разломов, рудные тела пространственно тяготеют к разрывам с секущим положением по отношению к простирацию осадочно-вулканогенных толщ. При этом из более 100 выявленных рудоносных зон разного масштаба основная часть, в

том числе крупные рудные тела, локализуется в средней части разреза рудовмещающей толщи мощностью 300–400 м, сложенной преимущественно альбит-хлоритовыми сланцами. Вулканогенно-осадочная толща перекрыта кремнисто-доломитовыми отложениями, выступавшими как структурный экран при рудоотложении. Подстилающие углеродсодержащие сланцы затронуты оруденением весьма слабо.

Золотое оруденение тесно ассоциирует с комплексом даек пёстрого состава пермско-



триасового возраста. Наибольшим распространением пользуются дайки диоритов, диоритовых порфириров и лампрофиров, которые группируются в пучки, постоянно сопровождающие рудные зоны и рассматриваемые в качестве генетически самостоятельного позднеорогенного комплекса малых интрузий. Дайки образуют сложный по строению линейный каркас. Основная их часть при одинаковом с рудными зонами простирания имеет крутое встречное падение. Часть даек залегает согласно с рудными зонами. На участках пересечения рудных тел дайки обычно слабо минерализованы в краевых частях. В то же время часто отмечается повышение концентраций золота в экзоконтактах даек, а согласные с рудной зоной дайки подвержены интенсивным гидротермальным изменениям и слабой минерализации.

Первичные руды представлены гидротермально изменёнными вулканогенно-осадочными породами, пронизанными кварц-альбит-карбонатными прожилками и неравномерно минерализованными сульфидами. Наиболее минерализованные участки характеризуются повышенной сульфидизацией, максимальным развитием метасоматической карбонатной минерализации, а также наибольшей концентрацией кварц-альбит-карбонатных прожилков. Преобладают вкрапленные текстуры руд, среди которых различаются вкрапленные, прожилково-вкрапленные и полосчато-вкрапленные разновидности. В осевых, наиболее золотоносных, участках рудных тел отмечаются также брекчиевидная и, в меньшей мере, брекчиевая текстуры.

Золотоносная сульфидная минерализация приурочена к участкам гидротермальных изменений лиственит-березитового типа, которые выражены очень контрастно благодаря характерному осветлению тёмно-зелёных существенно хлоритовых пород. Метасоматиты сложены альбитом, Mg-Fe-карбонатами (преимущественно анкеритом) и неравномерно распределённым серицитом. Характерно обилие рутила.

Отчётливо выражена приуроченность повышенных содержаний золота к участкам ин-

тенсивной сульфидизации при максимальном развитии арсенопирита. Содержание пирита и арсенопирита в рудах составляет в среднем около 7–10 %, а их количественные соотношения меняются от 1 до 4. Остальные рудные минералы присутствуют в незначительных количествах. Самородное золото при микроскопическом изучении обнаруживается очень редко в виде тонкодисперсных (первые микроны) выделений. По данным фазового анализа, в составе ранней продуктивной ассоциации количество «упорного» субмикроскопического золота, связанного с пиритом и арсенопиритом, находится в пределах 53–82 %.

Арсенопирит – основной концентратор золота в рудах. В среднем его золотоносность более чем в пять раз выше, чем пирита. На наиболее сульфидизированных и золотоносных участках присутствует арсенопирит, преимущественно в виде тонкокристаллических выделений. В тонкоигольчатой разновидности среднее содержание золота составляет около 100 г/т, в более грубозернистой изометрической – около 30–40 г/т. В качестве характерной примеси в арсенопирите присутствует сурьма.

Устанавливается тесная геохимическая связь золота и мышьяка, наличие контрастных первичных ореолов Au, As, Sb, Hg и Ag.

Среди образований золоторудного этапа выделяются две продуктивные ассоциации: ранняя золото-пирит-арсенопиритовая, имеющая наибольшее распространение, и проявленная локально поздняя золото-кварц-карбонат-полисульфидная. Последняя представлена кварцевыми, кварц-альбит-карбонатными макро- и микропрожилками с неравномерно распределённой вкрапленностью пирита, тетраэдрита, халькопирита, сфалерита, бурнонита, пирротина, сульфоантимонитов свинца, самородного золота. Проявления данной ассоциации не образуют значительных скоплений, концентрируясь на наиболее минерализованных участках рудных тел вблизи тектонических швов и иногда в сильно изменённых дайках. С этой ассоциацией связано золото поздней генерации, встречающееся обычно в виде весьма тонких (чаще всего не крупнее 3 мкм, редко 10–20 мкм) включений и микро-

прожилков в пирите и арсенопирите, часто в сростании с поздними рудными минералами. Пробность самородного золота 817–885 ‰.

Средние содержания золота в рудных телах составляют 2,5–5 г/т при равномерном распределении металла; содержание в рудах ртути незначительное. Рудные тела, границы которых выявляются на основании опробования, имеют преимущественно сложную форму, обусловленную различными сочетаниями структурных и литологических факторов. Наиболее крупные тела, имеющие форму линзовидных залежей и согласное с рудовмещающей структурой кулисообразное расположение, прослеживаются по простиранию до 1 км и по падению на несколько сотен метров. Мощность их варьирует от нескольких метров до 100 м в раздувах. Рудные тела сложного внутреннего строения. Они расчленяются серией субпараллельных разрывов на отдельные линзовидные блоки с разной степенью деформированности вмещающих пород (рассланцевание, смятие, будинаж, дробление). Вблизи разрывов отмечается особенно интенсивная сульфидная минерализация, затухающая по направлению к слабее деформированным и гидротермально-изменённым породам краевых или внутренних частей рудных тел. Нередко интенсивно оруденелые породы перемежаются со слабоминерализованными или даже незатронутыми сульфидной минерализацией. Для выявления и оконтуривания рудных тел использовалась сеть поисковых скважин с шагом не более 50 м.

Месторождение Кокпатас с запасами свыше 300 т золота объединяет в себе целую группу месторождений и многочисленных рудопроявлений золото-мышьяково-сульфидного типа на площади более 70 км<sup>2</sup>.

**Выводы.** В пределах Каянчинской площади впервые установлено нетрадиционное для Горного Алтая оруденение золото-мышьяково-сульфидного типа. Золотоносность связана с вкрапленностью мышьяковистого пирита и арсенопирита в метасоматически изменённых ме-

тавулканитах основного состава, залегающих между слоями известняков. Оруденение контролируется крутопадающими разрывными нарушениями и пространственно ассоциирует с дайками диоритов, габбродиоритов и лампрофиров.

Изотопный состав серы золотоносных сульфидов соответствует «метеоритному» ( $\delta^{34}\text{S} = 0$  ‰), что свидетельствует о связи оруденения с глубинным магматическим источником.

Околорудные метасоматиты сформированы лиственитами и сложены тонкозернистым агрегатом альбита, магнезиосидерита и тонкочешуйчатой калиевой слюды. В осевых частях метасоматических зон развиты кварц-альбит-анкеритовые прожилки и наиболее интенсивная сульфидная минерализация.

В рудах выделены две последовательно сформированные продуктивные минеральные ассоциации: пирит-арсенопиритовая с субмикроскопическим золотом, несущая основную массу благородного металла, и проявленная локально золото-халькопирит-тетраэдритовая с тонкодисперсным и пылевидным (5–50 мкм) самородным золотом, пробность которого составляет  $900 \pm 20$  ‰. При окислении сульфидов в зоне гипергенеза золото остаётся в рассеянном состоянии.

По геологическим условиям локализации и вещественному составу руд золото-мышьяково-сульфидное оруденение Каянчинской площади является аналогом крупного месторождения Кокпатас в Центральных Кызылкумах, что свидетельствует о перспективах Каянчинской площади на обнаружение здесь нетрадиционного для Горного Алтая крупнообъёмного прожилково-вкрапленного оруденения с промышленными параметрами. При этом, как и на месторождениях-аналогах, здесь следует ожидать весьма сложную морфологию рудных тел, требующую проектирования соответствующей поисковой сети. Таким образом, результаты выполненных исследований говорят о перспективности дальнейших поисковых работ.



## Список литературы

1. Вихтер Б. Я. Золото-мышьяково-сульфидные месторождения терригенных комплексов складчато-орогенных областей. – М. : ЦНИГРИ, 2009. – 108 с.
2. Гриненко В. А., Гриненко Л. Н. Геохимия изотопов серы. – М. : Недра, 1974. – 272 с.
3. Кряжев С. Г. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : автореф. дис. на соискание учён. степ. д-ра геол.-минерал. наук / Кряжев Сергей Гаврилович. – М., 2017, 52 с.
4. Новожилов Ю. И., Гаврилов А. М. Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. – М. : ЦНИГРИ, 1999. – 175 с.
5. Окулов А.В. Первые данные по типоморфизму самородного золота Каянчинской площади // Сборник тезисов докладов I молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче». – М. : ЦНИГРИ, 2020. – С. 154–157.
6. Устинов В. И., Гриненко В. А. Прецизионный масс-спектральный метод определения изотопного состава серы. – М. : Недра, 1965. – 96 с.
7. Федак С. И., Туркин Ю. А., Гусев А. И., Шокальский С. П. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1 000 000 (3-е поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-45 – Горно-Алтайск. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011.

## References

1. Vikhter B. Ya. Zoloto-mysh'yakovo-sul'fidnye mestorozhdeniya terrigennykh kompleksov skladchato-origennykh oblastei [Gold-arsenic-sulfide deposits of terrigenous complexes of folded-orogenic regions], Moscow, TsNIGRI Publ., 2009, 108 p.
2. Grinenko V. A., Grinenko L. N. Geokhimiya izotopov sery [Geochemistry of sulfur isotopes], Moscow, Nedra Publ., 1974, 272 p.
3. Kryazhev S. G. Geneticheskie modeli i kriterii prognoza zolotorudnykh mestorozhdenii v uglerodisto-terrigenykh kompleksakh [Genetic models and criteria for the prediction of gold deposits in carbon-terrigenous complexes. Extended abstract of Doctor's thesis], Moscow, 2017, 52 p.
4. Novozhilov Yu. I., Gavrilov A. M. Zoloto-sul'fidnye mestorozhdeniya v uglerodisto-terrigenykh tolshchakh [Gold-sulfide deposits in carbon-terrigenous strata], Moscow, TsNIGRI Publ., 1999, 175 p.
5. Okulov A. V. Pervye dannye po tipomorfizmu samorodnogo zolota Kajanchinskoj ploshhadi [The first data on the typomorphism of native gold of Kayanchinskaya square], *Sbornik tezisev dokladov I molodnoy nauchno-obrazovatel'noj konferencii TsNIGRI "Mineral'no-syr'evaya bazaalmazov, blagorodnyh i tsvetnyh metallov – ot prognoza k dobyche"* [Collection of abstracts of the I TsNIGRI Youth scientific and educational conference "Mineral resource base of diamonds, precious and non-ferrous metals – from forecast to production"], Moscow, TsNIGRI Publ., 2020, pp. 154–157.
6. Ustinov V. I., Grinenko V. A. Pretsizionnyi mass-spektral'nyi metod opredeleniya izotopnogo sostava sery [Precision mass-spectral method for determining the isotopic composition of sulfur], Moscow, Nedra Publ., 1965, 96 p.
7. Fedak S. I., Turkin Yu. A., Gusev A. I., Shokal'skii S. P. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. M-b 1 : 1 000 000 (3-e pokolenie). Seriya Altae-Sayanskaya. List M-45 – Gorno-Altaysk. Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (3rd generation). Altai-Sayan series. Sheet M-45 – Gorno-Altaysk. Explanatory note], St. Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2011.

**Кряжев Сергей Гаврилович** (kryazhev@tsnigri.ru)

доктор геол.-минерал. наук, начальник отдела <sup>1</sup>

**Двуреченская Светлана Степановна** кандидат геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник <sup>1</sup>

**Окулов Алексей Вячеславович** кандидат геол.-минерал. наук, заместитель начальника отдела <sup>1</sup>

**Федак Степан Иванович** главный геолог <sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ОСП «ГАЭ» АО «Сибирское ПГО», с. Малоенисейское, Россия