

Научная статья

УДК 553.25:552.13(571.651)

doi:10.52349/0869-7892_2025_104_113-129

Последовательность формирования рудной минерализации Майского месторождения (Центральная Чукотка)

Д. С. Артемьев¹✉, В. И. Леонтьев²¹ ООО «Полюс Геосервис», Санкт-Петербург, Россия,
Dima_art@inbox.ru ✉² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: упорное золото, рудное тело, гранит-порфир, триас, горст, тектоно-магматическая активизация, минеральная ассоциация

Для цитирования: Артемьев Д. С., Леонтьев В. И. Последовательность формирования рудной минерализации Майского месторождения (Центральная Чукотка) // Региональная геология и металлогения. 2025. Т. 32, № 4. С. 113–129. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2025_104_113-129

Original article

UDC 553.25:552.13(571.651)

doi:10.52349/0869-7892_2025_104_113-129

Ore mineralization formation stages in the Mayskoe deposit (Central Chukotka)

D. S. Artemev¹✉, V. I. Leontev²¹ Polyus Geoservice LLC, Saint Petersburg, Russia,
Dima_art@inbox.ru ✉² All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

© Артемьев Д. С., Леонтьев В. И., 2025

Abstract. The paper comprehensively investigates ore mineralization in the Mayskoe deposit, which involves examining structural relationships of mineral associations in mine workings, mineralogical and petrographic ore analysis, interpreting chemical and isotopic composition of sulfur sulfide. The findings identify three ore formation stages naturally associated with key geological events in North-East

Keywords: *refractory gold, ore body, granite-porphry, Triassic, horst, tectonic-magmatic activation, mineral association*

For citation: Artemev D. S., Leontev V. I. Ore mineralization formation stages in the Mayskoe deposit (Central Chukotka). *Regional Geology and Metallogeny*. 2025; 32 (4): 113–129. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2025_104_113-129

Russia. The first stage includes ore preparation, which corresponds to the Early Triassic sedimentary hydrothermal system when terrigenous siltstone-pelitic, less often psammitic sediments accumulated on the Carboniferous carbonate base in a passive continental margin. The stage involves lead-zinc and pyrite-arsenopyrite mineral association formation. The second stage is productive or ore-forming, pertains to the hydrothermal metasomatic system and is the most fertile for gold. During this stage, "greisen", polymetallic, and gold-sulfide mineral associations were formed. The latter includes the bulk of refractory gold. The third stage is subvolcanic, which aligns with a hydrothermal metasomatic system, whose severe decompression resulted in forming quartz breccias with antimonite and visible gold. Sulpho-salt-polymetallic and gold-antimonite mineral associations characterize this stage, which completes the Mayskoe deposit formation. The period featured the ore column in a cross-cutting position against mineral associations of the productive stage, which is notable for coarse (up to 2 mm) free gold.

ВВЕДЕНИЕ

На Северо-Востоке Российской Федерации в аккреционно-складчатых поясах известно множество крупнообъемных золоторудных месторождений в черносланцевых комплексах — Нежданинское, Наталкинское, Кючус, Майское. Формирование складчатых поясов происходило в мезозойское и кайнозойское время в результате коллизии Сибирского континента с Тихоокеанской тектонической плитой. Мезо-кайнозойское время характеризуется проявлением интенсивной тектоно-магматической активизации на всей территории Северо-Востока Российской Федерации, выраженной в становлении многочисленных гранитоидных массивов и образовании Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Вследствие проявления обширного магматизма сформировались многочисленные золоторудные, золото-серебряные и редкометалльные месторождения, имеющие как прямую, так и косвенную связь с магматическими комплексами. Золоторудные объекты имеют полихронный характер, выраженный в существовании нескольких минеральных ассоциаций. Золото тесно связано с сульфидной минерализацией и проявляет упорные свойства при обогащении.

Доля упорного золота в общем объеме добычи в России и в мире возрастает с каждым годом. Средние содержания золота в месторождениях с упорными рудами выше, чем в неупорных (в среднем 2,25 г/т против 1,21 г/т¹). Новые схемы обогащения упорных руд, где извлечение золота достигает 90%, и высокие цены на мировом рынке (до 4000 долларов за тройскую унцию) делают добычу таких руд рентабельной даже в условиях Крайнего Севера. В связи с увеличением доли вовлекаемых в разработку упорных руд, вопросы их геохимии и минералогии приобретают особую актуальность для усовершенствования и разработки новых, более эффективных и менее ресурсоемких технологий переработки связанного золота.

Процесс образования золоторудных месторождений в терригенных углеродсодержащих толщах является одной из наиболее дискуссионных проблем. У геологов, занимающихся исследованиями таких месторождений, нет единой точки зрения на их происхождение. Высказываются мнения

о гидротермально-осадочном, магматогенном и метаморфогенном генезисах [1–4]. Отсутствует и единое представление о последовательности образования рудных минеральных ассоциаций на этих месторождениях, так как объекты многоэтапные и поликомпонентные. Исследование рудной минерализации позволит актуализировать поисковые признаки для выявления месторождений данного типа, оптимизировать поисковые работы и повысить их эффективность. В частности, уточнение рудной зональности поможет оценить уровень эрозионного среза на перспективных проявлениях со сходным геологическим строением с последующей их разбраковкой.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Майское месторождение расположено в Чаунском районе Чукотского автономного округа, в 150 км к юго-востоку от районного центра г. Певек (рис. 1).

Подробно геологическое строение месторождения охарактеризовано в работах М. М. Константинова и др., [5], Н. С. Бортникова и др. [1], А. В. Волкова и др. [6] и других исследователей. В данной статье приведена лишь краткая характеристика геологического строения, необходимая при интерпретации полученных результатов.

В геологическом плане месторождение расположено в пределах Центрально-Чукотской складчатой области. Рудное поле изометричной формы площадью 10 км² приурочено к сложной горстовой структуре, находящейся в узле пересечения северо-западных, северо-восточных, субширотных и субмеридиональных разломов. Вмещающие породы представлены песчано-алевро-сланцевыми флишеидными отложениями кэвеемской, ватапва-амской, нерасчлененных рельекуеемской и млелю-веемской, кувеемкайской свит предположительно среднего и верхнего триаса (рис. 2). Фаунистически

¹ Motta G., Polcyn M., Saragosa E. Refractory gold ores: Challenges and opportunities for a key source of growth. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/refractory-gold-ores-challenges-and-opportunities-for-a-key-source-of-growth> (дата обращения: 01.12.2025).



Рис. 1. Майское месторождение на схеме административного деления

Fig. 1. The Mayskoye deposit on the administrative index map

охарактеризованы только породы релькувеевской, млеювеевской и кувеевской свит, которые отнесены к карнийскому ярусу. Подстилающие толщи немые и условно отнесены к среднему триасу. В алевросланцевых разностях пород автором и предшественниками [6] отмечены многочисленные сингенетические конкреции фрамбоидального пирита.

Магматические породы в пределах месторождения представлены комплексом даек раннемелового возраста, занимающих около 25% его площади. Радиологический возраст даек гранит-порфиров и гранодиорит-порфиров определен в 108 ± 1 млн лет на основании U-Pb анализа циркона методом SHRIMP-II [7]. Выходы даек образуют пояс шириной около 3 км и протяженностью более 4 км. В поясе дайки сгруппированы в серию сближенных тел меридионального простирания, с которыми пространственно связаны рудоносные зоны. Кроме кислых пород за пределами месторождения

распространены триасовые габброиды и позднемиловые эффузивы.

Майское месторождение разделено глубинными разломами на три тектонических блока — Западный, Центральный и Восточный (рис. 2), где дайки и рудные тела объединяются в восемь субмеридиональных рудных зон шириной от 100 до 300 м и протяженностью от 300 до 2500 м. В Центральном блоке находятся основные, наиболее крупные и выдержанные по мощности и падению промышленные рудные тела № 1 и 2. Они приурочены к лежащим бокам даек, занимая их экзоконтактовые зоны, представленные осадочными породами. Оруденение концентрируется в осадочных алевролитах, образуя тонкую сульфидную вкрапленность золотосодержащих пирита и арсенопирита. В редких случаях золоторудная минерализация фиксируется в дайках гранит-порфиров, изменяя их минеральный состав — проявляются процессы березитизации. Оруденелые дайки редко вовлекаются в отработку,

так как содержание золота в них ниже, чем в осадочных породах.

Более 90% запасов сосредоточено в рудных телах № 1, 2, 13, 23, где золото тонкодисперсное, в виде структурной примеси в арсенопирите и, в подчиненном количестве, в мышьяковистом пирите^{1,2} [8; 9].

Небольшая часть запасов локализована в рудных столбах, представленных кварц-антимонитовыми жилами и брекчиями мощностью до 3 м, содержащих крупное (более 1 мм) свободное золото.

Майское месторождение активно изучается с 1980-х гг., однако, несмотря на столь большой

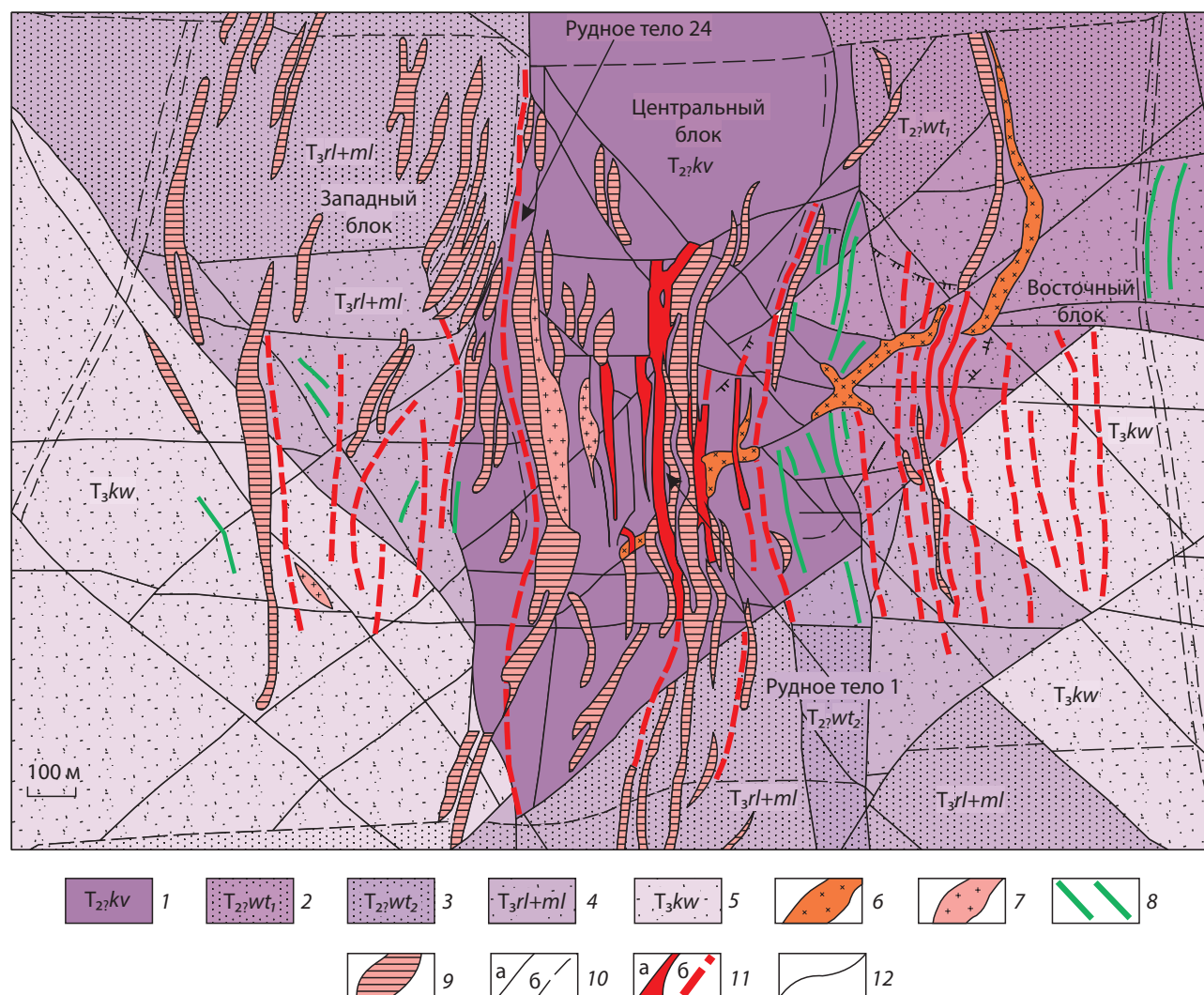


Рис. 2. Схема геологического строения Майского рудного поля

Средний(?) триас: 1 — алевролиты кэвеевской свиты; 2 — разнозернистые песчаники ватапваамской свиты, нижней подсвиты; верхний триас: 3 — разнозернистые песчаники ватапваамской свиты, верхней подсвиты; 4 — переслаивающиеся песчаники и алевролиты рельеувеевской и млеювеевской свит; 5 — переслаивающиеся песчаники и алевролиты кувеевской свиты; 6 — гранодиориты и гранит-порфиры; 7 — аплиты; 8 — лампрофилы; 9 — риолит-порфиры; 10 — разломы установленные (a) и предполагаемые (b); 11 — рудные тела, выходящие на поверхность (a), слепые (b); 12 — геологические границы

Источник: по [6]

Fig. 2. Geological structure diagram of the Mayskoye ore field

Middle(?) Triassic: 1 — Keveem Formation siltstone; 2 — uneven-grained sandstone of the Vatapvaam Formation, Lower Subformation; Upper Triassic: 3 — uneven-grained sandstone of the Vatapvaam Formation, Upper Subformation; 4 — interbedded sandstone and siltstone of the Relkuvveem and Mleluveem formations; 5 — Kuveem Formation interbedded sandstone and siltstone; 6 — granodiorite and granite porphyry; 7 — aplite; 8 — lamprophyre; 9 — rhyolite porphyry; 10 — established (a) and inferred (b) faults; 11 — ore body outcrops (a), blind ore bodies (b); 12 — geological boundaries

Source: from [6]

¹ Отчет о геологоразведочных работах на Майском золоторудном месторождении за период 1975–1980 гг. с подсчетом запасов по состоянию на 1 октября 1980 г. / С. А. Григоров [и др.] // Росгеолфонд, 1980. № 352695.

² Голень В. Б., Гречишников Д. Н., Алдаков Д. С. Отчет с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2002 г. по Майскому золоторудному месторождению (Чукотский автономный округ) // Росгеолфонд, 2002. № 46726.

период и опыт исследования этого объекта, у геологов до сих пор нет единого мнения ни о его генезисе, ни о стадийности образования рудных минеральных ассоциаций. И. Н. Томсон с соавторами полагают, что пирит-арсенопиритовая минерализация с тонковкрапленным золотом образовалась раньше «кварцевых жил и прожилков» [10]. Ю. И. Новожилов и др. [11] и М. М. Константинов и др. [5] сходятся во мнении, что на Майском месторождении выделяются два этапа минералообразования: на раннем формировалась редкометальная ассоциация, а на позднем — золоторудная. А. В. Волков выделяет четыре этапа минералообразования: метаморфогенный, редкометальный, золоторудный и сурьмяный [12]. В более поздних работах Ю. И. Новожилова и др. [13] и А. А. Сидорова и др. [14] высказано мнение о том, что кварц-антимонитовая минеральная ассоциация образовалась на самостоятельном, завершающем этапе рудообразования Майского месторождения. Н. С. Бортников с соавторами выделяют три основных этапа рудообразования: сначала сформировались золото-пирит-арсенопиритовые вкрапленные руды, затем редкометальные касситерит-сульфидные жилы, а процесс завершился образованием кварц-антимонитовых жил [1].

Таким образом, различные авторы выделяют от двух до четырех основных этапов образования рудной минерализации. Все исследователи единодушно признают продуктивный на золото пирит-арсенопиритовый этап, однако количество и время формирования остальных этапов относительно продуктивного остается дискуссионным.

В данной статье авторы на основании изучения структурных особенностей месторождения, минерального состава руд и взаимоотношений минеральных ассоциаций излагают собственную точку зрения на стадийность образования рудных минеральных ассоциаций и связывают выделенные ассоциации с различными этапами тектоно-магматической активизации Северо-Востока Российской Федерации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Фактический материал содержит представительную коллекцию образцов горных пород, руд и метасоматитов. Для химического анализа отобрана 121 проба из керна скважин по рудным и вмещающим интервалам, а также 59 штучных проб из горных выработок (рудные забои, квершлагги, рассечки) и с поверхности рудного поля. Для каждой керновой и штучной пробы из сколов изготовлены шлифы в количестве 180 шт., по рудным пробам — аншлифы (39 шт.). Каменный материал характеризует рудные зоны № 1 и 2, «бонанцевое» оруденение рудного тела № 1, их околорудное пространство и вмещающие породы. Кроме того, в работе использована авторская первичная документация наземных полевых маршрутов, забоев и стенок горных выработок Майского месторождения.

Аналитические и микроскопические исследования выполнены в Центральной лаборатории

Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А. П. Карпинского по стандартным методикам, принятым в организации. Золото определялось методом атомной абсорбции на приборе AAnalyst-800. Химические анализы на микроэлементы проводились на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) ELAN-6100 DRC. Для определения Sc использовался атомно-эмиссионный метод (прибор Optima-4300 ICP-AES), Hg — метод холодного пара на приборе «Юлия 5М», анализы на S и C_{общ} — инфракрасным спектральным методом.

Минеральный состав, последовательность формирования минеральных ассоциаций

Рудная минерализация Майского месторождения весьма разнообразна; рудные тела содержат в среднем 6–8% сульфидов. Разными авторами выделено более 50 минеральных видов, среди которых наиболее широко распространены мелкие, до субмикронного размера, пирит и арсенопирит, а также крупнокристаллический антимонит [1; 6]. В подчиненном количестве встречаются марказит, самородное золото, галенит, сфалерит, халькопирит, пирротин, станнин, касситерит и блеклые руды. К редким относятся вольфрамит, самородные висмут и мышьяк, галенобисмутит, акантит и другие минералы. Сульфиды объединяются в различные минеральные ассоциации: пирит-арсенопиритовую, редкометальные, полиметаллические, золото-антимонитовую.

На основании собственных исследований структурно-текстурных и минералого-геохимических особенностей, рудную минерализацию можно разделить на три разных этапа, связанных с различными геологическими процессами, происходившими на Центральной Чукотке. *Первый этап* соответствует ранней осадочно-гидротермальной системе и в структуре оруденения Майского месторождения является рудоподготовительным. Он характеризуется накоплением (табл. 1) в первично осадочных терригенных породах (алевролитах и песчаниках) относительно кларка земной коры [15] и черных сланцев [16] серы, сидерофильных элементов [17] — железа, хрома, никеля, золота и слабым накоплением халькофильных — серебра, мышьяка, цинка и свинца. Основным концентратором свинца является галенит; цинка, серебра и кадмия — сфалерит. Сера — неотъемлемая часть всех сульфидов, и ее содержание закономерно увеличивается с образованием рудной минерализации. Увеличение доли трехвалентного железа и уменьшение двухвалентного свидетельствуют об увеличении доли арсенопирита в породах, так как окисное железо входит в структуру арсенопирита, а закисное — в пирит.

На первом этапе нами выделяются две рудные минеральные ассоциации: свинцово-цинковая и пирит-арсенопиритовая. Первая ассоциация выделяется по геохимическому признаку — накоплению свинца и цинка в первичных вмещающих алевролитах на уровне трех кларков концентрации в земной коре (табл. 1). Судя по низким содержаниям этих

Таблица 1

Геохимические особенности терригенных пород кэвеемской свиты Майского месторождения

Table 1. Geochemical features of the Keveem Formation terrigenous rocks in the Mayskoe deposit

№ п/п	Проба	Fe ₂ O ₃ общ	C _{общ}	S	Au	Ag	As	Cr	Ni	Cu	Pb	Zn
1	5	8,37	1,97	1,92	< 0,002	0,61	37,1	161	98,1	66,9	18,2	148
2	1-12-2	7,89	2,7	0,82	< 0,002	0,59	52,2	132	95,9	59,4	11,6	147
3	1-12-4	7,44	2,33	0,35	< 0,002	0,24	68,5	114	90,4	40,7	24,6	170
4	1-12-5	5,64	1,5	0,15	< 0,002	0,14	27	62,9	36	18,4	22,7	103
5	1-12-10	7,11	2,44	0,15	< 0,002	0,19	85,3	117	86,4	67,9	35,8	216
6	1-12-11	7,44	2,49	0,28	< 0,002	0,31	67,2	111	86	52,7	16	188
7	1-12-12	8,59	2,5	0,76	< 0,002	0,28	47,1	112	103	62,8	18,5	200
8	1-12-13	7,14	2,38	0,33	< 0,002	0,19	53,1	110	86,6	46,1	8,21	187
9	1-12-17	7,74	2,48	0,38	0,0033	0,2	97,7	120	96,6	53,3	17,7	202
10	1-12-19	7,49	2,6	0,26	< 0,002	0,19	83,1	120	103	49	9,71	173
11	1-12-20	6,08	1,37	0,29	< 0,002	0,086	62	76,6	54,9	15,9	9,52	96,7
12	1-12-24	5,55	2,37	2,27	0,005	0,5	168	144	109	61,6	37,9	240
13	1-12-30	7,92	2,53	0,68	< 0,002	0,23	117	109	95,9	39,9	9,44	131
14	1-14-1	7,13	2,09	0,055	0,0024	0,075	22,6	141	59,3	38,9	4,64	98,4
15	1-14-2	8,4	2,21	0,021	< 0,002	0,054	14,6	125	61,2	39,4	3,32	88
16	1-14-9	7,81	1,94	0,29	< 0,002	0,19	57,6	120	58,5	44,8	9,8	71,7
17	1-14-10	6,39	1,72	0,18	< 0,002	0,1	56,4	122	53,4	42,5	4,39	124
18	1-14-11	6,53	1,76	0,32	< 0,002	0,11	65,3	119	50,7	38,3	8,14	120
19	1-14-34	8,22	2,16	0,11	0,014	0,046	81,4	138	54,4	12,1	8,42	71,7
20	1-14-42	9,42	2,47	0,9	< 0,002	0,086	74	129	67,8	35	8,06	157
Земная кора		5,33	0,02	0,033	0,003	0,073	1,8	93	56	53	12	68
Черные сланцы			1,8	0,42	0,0076	1,6	30	81	67	87	26	140

Примечание. Красным цветом отмечены содержания химических элементов, превышающие кларк земной коры в 2 раза и более

Источник: значения кларка земной коры — по [15], черных сланцев — по [16]

Note. The red color indicates chemical composition values exceeding crustal abundance more than once

Source: crustal abundance values — from [15], black shale abundance values — from [16]

элементов — на уровне десятков и сотен г/т, сульфиды рассеяны по массе породы и имеют наноразмерный облик либо входят в ранние кристаллы пирита и арсенопирита в качестве структурной примеси (табл. 2).

Пирит-арсенопиритовая ассоциация характеризуется наличием во вмещающих породах вкрапленной минерализации пирита и арсенопирита первой генерации. Пирит I во вмещающих алевролитах представлен вкрапленностью округлых (фрамбоидальных) зерен, часто образующих конкреционные выделения (рис. 3). Нередко минерал имеет сетчатое строение, следы коррозии, с ажурными каймами замещения по периферии марказитом. Во вмещающей толще встречается в виде неравномерных мелко- до крупнозернистых скоплений. Размер отдельных зерен — от 0,1 до 0,5 мм, в густых скоплениях достигает 1 мм (рис. 4, а).

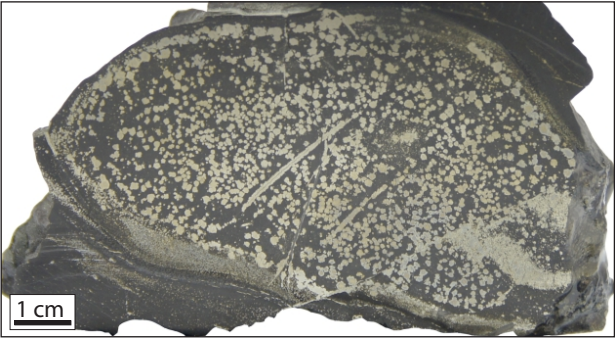


Рис. 3. Сингенетическая конкреция пирита во вмещающих алевролитах. Округлые выделения — пирит I, прожилки — пирит II

Fig. 3. Syngenetic pyrite concretion in the host siltstone. Rounded segregations — pyrite I, veinlets — pyrite II

Химический состав рудной минерализации по результатам микрозондового исследования

Table 2. Chemical composition of ore mineralization after microprobe analysis

Минерал	S	Fe	As	Pb	Cu	Zn	Sb	Bi	Co	Mn	Al	Si	Ca	Ti	Сумма
Пирит I	64,7	32,7	—	2,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Пирит I	65,1	34,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Пирит I	65,5	34,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Пирит I	66,2	33,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Пирит I измененный	60,9	35,4	—	—	—	—	—	—	—	—	1,1	1,9	0,4	0,4	100,0
Продукт распада пирита I	20,1	78,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,6	—	—	100,0
Пирит II мышьяковистый	64,9	34,1	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Пирит II измененный, мышьяковистый	41,8	55,5	2,5	—	—	—	0,2	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Пирит III мышьяковистый	60,9	32,4	6,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Пирит III мышьяковистый	62,5	31,1	6,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Арсенопирит I	21,2	37,3	41,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Арсенопирит II	26,1	23,3	49,8	—	—	—	0,8	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Арсенопирит III	25,8	22,0	52,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Халькопирит	48,6	26,0	—	—	25,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Халькопирит	49,4	26,0	—	—	24,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Галенит	86,3	1,4	—	12,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Ферротетраэдрит	38,7	10,7	—	—	31,5	4,6	14,1	—	—	0,5	—	—	—	—	100,0
Тетраэдрит	41,9	4,5	—	—	34,3	5,1	14,2	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Тетраэдрит	42,8	2,5	—	—	36,4	4,7	13,7	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Висмутин	53,3	—	—	5,4	—	—	—	41,3	—	—	—	—	—	—	100,0
Галеновисмутит	50,1	—	—	19,4	—	—	—	30,5	—	—	—	—	—	—	100,0
Бурнонит	46,6	3,4	—	29,2	13,8	—	7,0	—	—	—	—	—	—	—	100,0
Сернистый глаукодот	35,0	8,0	30,6	—	—	—	—	—	26,4	—	—	—	—	—	100,0

Примечание. Анализы выполнены на приборе CamScan MV 2300 с энергодисперсионным микроанализатором LINK Pentafet (Oxford Instruments), ток зонда 20 кВ. Аналитик: В. Ф. Сапега

Note. CamScan MV 2300 with a LINK Pentafet energy dispersive spectroscopy detector (Oxford Instruments) as an analysis source, probe voltage 20 kV. Analyst: V. F. Sapega

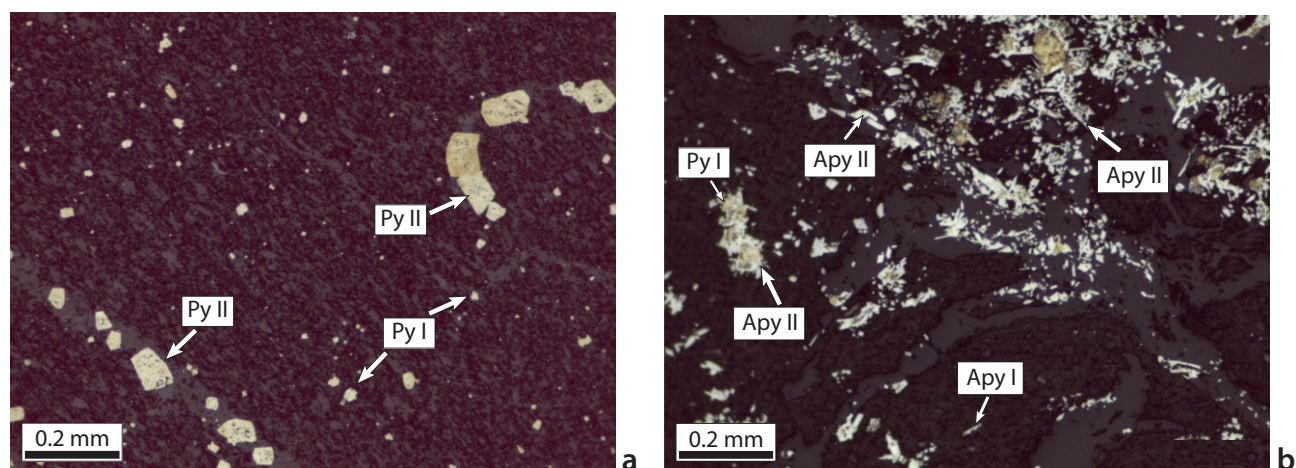


Рис. 4. Микрофотографии аншлифов в отраженном свете, взаимоотношения: *a* — пирита I и II, *b* — арсенопирита I и II с пиритом I

Py I — пирит I; Py II — пирит II; Apy I — арсенопирит I; Apy II — арсенопирит II

Fig. 4. Polished section micrographs in reflected light; relationship between: *a* — pyrite I and pyrite II, *b* — arsenopyrite I, arsenopyrite II, and pyrite I

Py I — pyrite I; Py II — pyrite II; Apy I — arsenopyrite I; Apy II — arsenopyrite II

Состав пирита I очень близок к стехиометрическому, однако в некоторых зернах обнаружен свинец — 2,6 % (табл. 2), а в структурах распада пирита содержание железа достигает 78 %. В измененных породах выявлены включения силикатных минералов, в которых содержание алюминия, кремния, кальция и титана достигает первых процентов. В пирите I из окисленного пространства установлено содержание золота до 4 г/т [10].

Арсенопирит I встречается в виде рассеянных идиоморфных изометричных и вытянутых кристаллов псевдоромбического облика, иногда образуются отдельные гнезда из сростков арсенопирита. Он распространен в виде вкрапленности во вмещающих алевролитах, иногда образует тонкие прожилки с кварцем. Размер выделений арсенопирита — от первых сотых до 1,5 мм (рис. 4, б). Состав арсенопирита I близок к стехиометрическому (табл. 2) и содержит около 37 % железа, 41 % мышьяка и 21 % серы.

А. В. Волковым проводилось изучение изотопного состава серы сульфидов из вмещающих пород —

алевролитов и песчаников продуктивной кзеевской свиты [7]. Анализировался в основном фрамбоидальный диагенетический пирит, для которого значение $\delta^{34}\text{S}$ составило в диапазоне от -20 до -24 ‰ (рис. 5). Высокая доля легкого изотопа серы типична для коровых источников [18]. С. В. Кряжев¹ описывает механизм образования легкой серы на ранних этапах формирования золото-сульфидных месторождений в черносланцевых углеродистых толщах. Он отмечает, что черные сланцы обычно содержат повышенные количества рудной минерализации по сравнению с другими осадочными породами, причем сульфиды обогащены легким изотопом, который образуется за счет бактериальной сульфат-редукции.

Второй этап включает три рудные минеральные ассоциации, выделяемые по структурно-текстурным и геохимическим признакам. В конце этапа сформировался основной объем золотого оруденения, связанного с сульфидами. Образование рудной минерализации сопровождалось интенсивными тектоническими подвижками, заложением субмери-

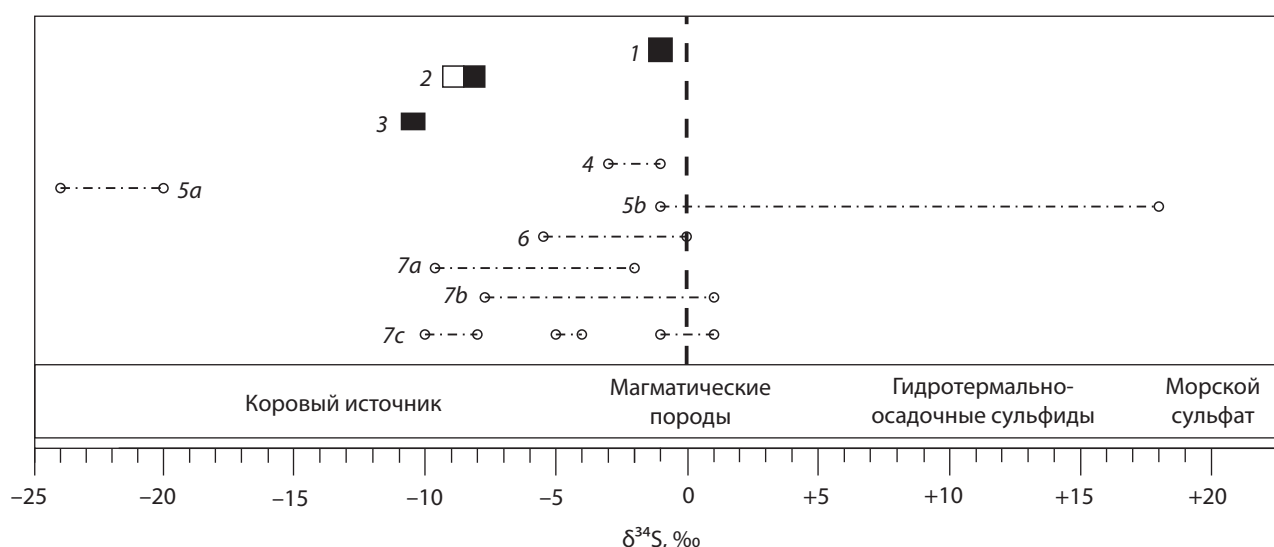


Рис. 5. Диапазоны вариаций изотопного состава серы сульфидов Майского месторождения*

1 — пирит, арсенопирит, проба Od-100; 2 — арсенопирит, проба 170–2ю; 3 — антимонит, проба Ant; 4 — галениты, 4 пробы; 5a — сульфиды из вмещающих алевролитов, 5b — из рудных тел; 6 — золотоносный арсенопирит, 4 пробы; 7a — пирит и арсенопирит продуктивного золото-сульфидного этапа, 15 проб, 7b — сульфиды полиметаллического этапа, 26 проб, 7c — антимониты золото-антимонитового этапа, 9 проб

Источник: 4 — по [19], 5 — по [6], 6 — по [8], 7 — по [1]

Fig. 5. Variation ranges of sulfur sulfide isotopic composition in the Mayskoe deposit**

1 — pyrite, arsenopyrite, sample Od-100; 2 — arsenopyrite, sample 170–2ю; 3 — antimonite, sample Ant; 4 — galena, 4 samples; 5a — sulfide from host siltstone, 5b — sulfide from ore bodies; 6 — gold-bearing arsenopyrite, 4 samples; 7a — pyrite and arsenopyrite of the productive gold-sulfide stage, 15 samples, 7b — sulfide of the polymetallic stage, 26 samples, 7c — antimonite of the gold-antimonite stage, 9 samples

Source: 4 — from [19], 5 — from [6], 6 — from [8], 7 — from [1]

* Кряжев С. В. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук : 25.00.11. М., 2017. 52 с.

** Kryazhev S. V. Genetic models and criteria for forecasting gold ore deposits in carbon-terrigenous complexes: Abstr. of DSc diss. (Geology and Mineralogy): 25.00.11. Moscow; 2017. 52 p.

¹ Кряжев С. В. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук : 25.00.11. М., 2017. 52 с.

диональных разломов во вмещающих алевролитах и песчаниках, вдоль которых проявились интенсивные гидротермально-метасоматические преобразования. Наиболее распространенными новообразованными жильными минералами являются кварц, серицит, карбонаты (доломит, анкерит, сидерит) и каолинит.

К первой — «грейзеновой» ассоциации — авторы отнесли высокотемпературные минералы — молибденит, вольфрамит и касситерит в кварцевых прожилках; взаимные пересечения с рудными телами не выявлены. Минералы «грейзеновой» ассоциации на Майском месторождении развиты довольно слабо, промышленной значимости не имеют, приурочены к центральной части месторождения, к границе Центрального и Восточного тектонических блоков. Перечисленные минералы и их ассоциации с кварцем не образуют взаимных пересечений (по крайней мере, авторами и предшественниками [1; 6] этих взаимоотношений выявлено не было), и очередность их кристаллизации не ясна.

Молибденит, вольфрамит и касситерит объединены нами в одну стадию, так как эти минералы являются высокотемпературными, встречаются совместно в грейзеновых и скарновых месторождениях. В ряду В. Х. Эммонса при циркуляции гидротермальных металлоносных растворов минералы выпадают одними из первых [20]. Химические свойства молибдена, вольфрама и олова весьма сходны — имеют близкие ионные и атомные радиусы.

Вольфрамит встречается весьма редко, преимущественно на границе Центрального и Восточного блоков. Он распространен в виде вкрапленности в кварцевых жилах и прожилках, секущих дайку гранодиорит-порфиоров. Форма кристаллов таблитчатая, призматическая, размеры зерен составляют от 0,05 до 0,2 мм.

Молибденит, как и вольфрамит, распространен слабо и пространственно смещен с его ореолом. Молибденит образует редкую вкрапленность в кварцевых прожилках и просечках. Серия сближенных прожилков кварц-молибденитового состава формирует штокверк с весьма бедной минерализацией, размеры которого уменьшаются с глубиной, превращаются в зону тонкого прожилкования. Глубже горизонта +200 штокверк кварц-молибденитового состава исчезает, но снова появляется на глубине около 1,5 км в скважинах колонкового бурения. Форма кристаллов таблитчатая, встречаются агрегаты неправильной формы с извилистыми границами, размеры зерен редко превышают 0,1 мм.

Касситерит распространен несколько шире, чем вольфрамит и молибденит. Чаще всего он встречается в Восточном блоке месторождения, в кварцевых прожилках, секущих вмещающие алевролиты и песчаники. Касситерит обычно образует отдельные кристаллы столбчатого, изометричного, таблитчатого облика, либо агрегаты. Размеры кристаллов редко превышают 0,7 мм. В некоторых случаях касситерит замещается станнином, который образует тонкие каемки по периферии кристаллов, иногда выполняет тонкие прожилки в касситерите до 0,1 мм.

Полиметаллическая ассоциация довольно широко распространена в пределах Майского месторождения, наиболее проявлена в Центральном блоке. По мнению авторов, вслед за «грейзеновой» ассоциацией произошла кристаллизация халькопирита, станнина, сфалерита, галенита, пирита и арсенопирита второй генерации, мелкого свободного золота и других минералов. Полиметаллическая ассоциация сформировалась до золото-сульфидной. Доказательством служит наблюдение взаимоотношений в рудном забое: на горизонте +110 зафиксировано пересечение крутопадающей зоной дробления, вмещающей золото-сульфидное оруденение продуктивной стадии, пологой наклонной (падающей под углом 40°) жилы халькопирит-сфалерит-галенитового состава [21].

Одним из ранних минералов полиметаллической ассоциации является халькопирит, который часто встречается в кварцевых прожилках с пиритом, пирротинном и реже с блеклыми рудами. Структурно-текстурные особенности минералов свидетельствуют о том, что халькопирит кристаллизовался раньше станнина и сфалерита. Его мелкие включения встречаются в кварце, пирите и арсенопирите первой генерации. В сфалерите часто наблюдается эмульсионная вкрапленность халькопирита (рис. 6, а, б). В редких случаях халькопирит содержит вкрапленность сфалерита в виде «звездочек», а также включения самородного золота размером 5–8 мкм [1]. Химический состав халькопирита по данным микрозондового исследования (табл. 2) близок к стехиометрическому.

Пирротин в рудах Майского месторождения распространен весьма слабо. Он обнаружен в кварц-сульфидной прожилке мощностью до 2 см совместно с пиритом, халькопиритом, минералами висмута и теллура. Пирротин интенсивно замещается марказитом и пиритом с образованием типичных текстур «птичий глаз». В крупнокристаллических агрегатах пирита и арсенопирита первой генерации обнаружены обособления пирротина либо его сращения с халькопиритом размером менее 0,1 мм. По данным рентгеноспектрального микроанализа, состав пирротина соответствует формуле $\text{Fe}_{0,89}\text{S}$ [1].

Самородное золото обнаружено в виде редких округлых, каплевидных вкраплений в халькопирите и образует сращения с блеклой рудой. По данным Н. С. Бортникова [1], пробность этого золота составляет 773–883‰; из примесей присутствует серебро (11,0–20,8%), медь (0,1–1,2%) и ртуть (0,2–1,4%). По данным А. В. Волкова [6], пробность золота составляет от 789 до 920‰, а из примесей выявлены селен (0,01–0,19%), реже ртуть (до 0,12%) и медь (до 0,2%).

Сфалерит в тесной ассоциации со станнином sporadически встречается по всей площади месторождения, преимущественно в околорудном пространстве. Их зерна часто имеют взаимные границы, что свидетельствует о синхронном образовании. Взаимоотношения сфалерита и станнина с галенином и сульфосолями указывают на более позднее формирование последних. Однако в ряде случаев сфалерит обрастает зерна и агрегаты станнина,

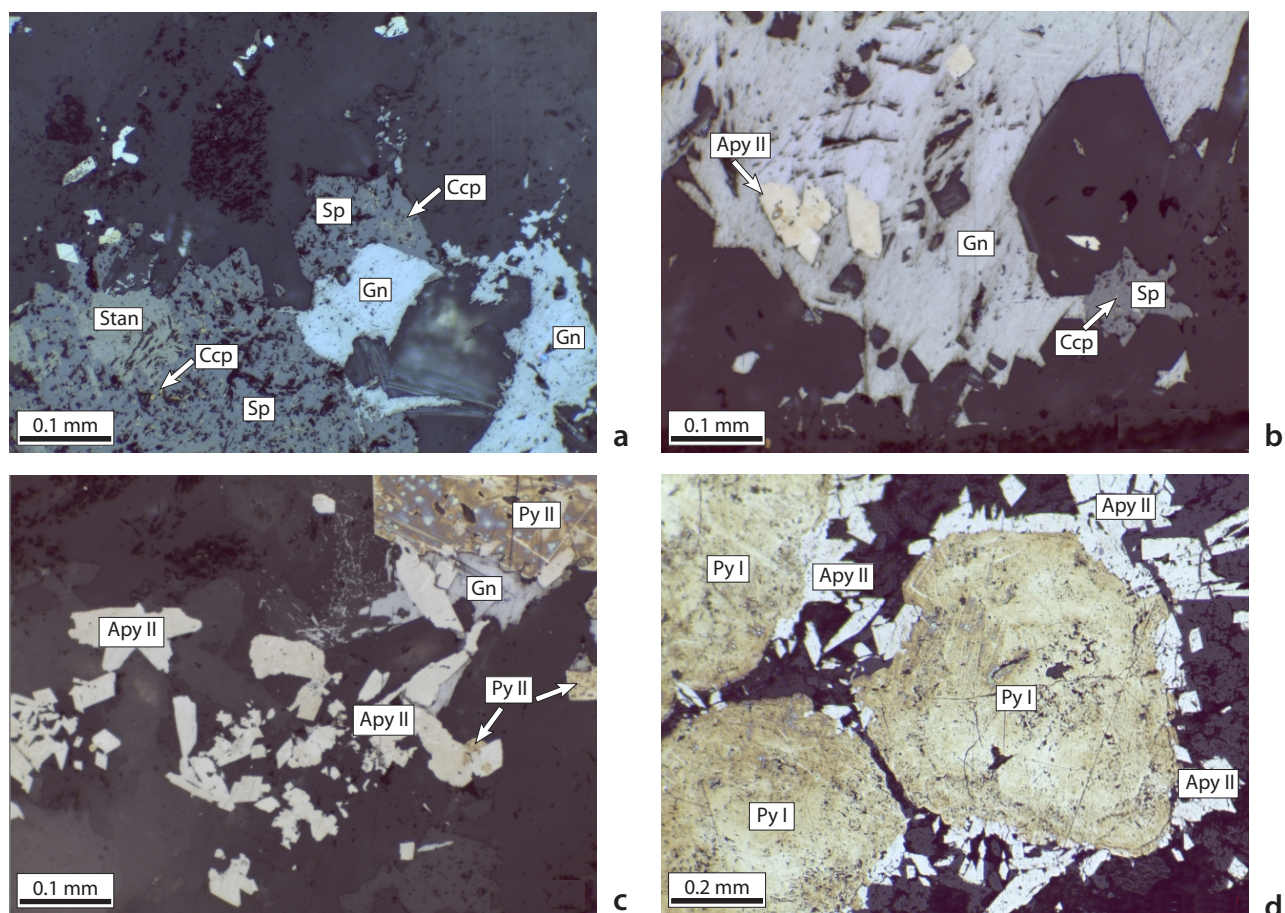


Рис. 6. Микрофотографии в отраженном свете полиметаллической рудной ассоциации

a — взаимоотношения галенита, станнина, эмульсионная вкрапленность халькопирита в сфалерите; *b* — прорастание арсенопирита II в галените; *c* — нарастание арсенопирита II на пирит и галенит; *d* — обрастание фрамбоидальных зерен пирита I арсенопиритом II: Py I — пирит I, Py II — пирит II, Apy I — арсенопирит I, Apy II — арсенопирит II, Stan — станнин, Ccp — халькопирит, Sp — сфалерит, Gn — галенит

Fig. 6. Reflected light micrographs of the polymetallic ore association

a — relationship between galena and stannite, emulsion dissemination of chalcopyrite in sphalerite; *b* — growth of arsenopyrite II into galena; *c* — growth of arsenopyrite II on pyrite and galena; *d* — coating of framboidal pyrite I grains with arsenopyrite II: Py I — pyrite I, Py II — pyrite II, Apy I — arsenopyrite I, Apy II — arsenopyrite II, Stan — stannite, Ccp — chalcopyrite, Sp — sphalerite, Gn — galena

отлагаясь позже (рис. 6, *a*). Сфалерит чаще всего ксеноморфен, образует агрегаты размером до первых мм и содержит множество включений вмещающих алевролитов, углистого вещества и жильной минерализации. Редко встречаются таблитчатые, призматические кристаллы.

Н. С. Бортников [1] отмечает изменчивый химический состав сфалерита. Содержание цинка изменяется от 51,3 до 62,0%, железа — от 1,8 до 10,4%, кадмия — от 0,6 до 2,8%. А. В. Волковым по результатам абсорбционного и нейтронно-активационного анализов в сфалерите установлены содержания золота от 0,8 до 61,5 г/т и серебра от 145 до 1032 г/т [6].

Станнин очень часто наблюдается в сростаниях со сфалеритом, образует ксеноморфные выделения размером от 0,05 до 0,3 мм (рис. 6, *a*). Он может находиться как во внутренних частях сфалерита, так и образовывать каймы вокруг него. Встречаются сростания с касситеритом, в котором станнин может образовывать тонкие просечки и обрастать

по периферии. В редких случаях станнин замещает пирит и арсенопирит первой генерации, образуя в последних прожилки и каймы обрастания. Химический состав изменчив, всегда присутствует цинк от 1,6 до 11,8%, железо варьирует от 3,5 до 13,3%.

Галенит является распространенным минералом, но проявлен незначительно, промышленных скоплений не образует. Он встречается в виде самостоятельных кристаллов в кварцевых прожилках, в сростаниях с пиритом, сфалеритом и арсенопиритом. Иногда крупнокристаллический арсенопирит псевдоромбического габитуса прорастает в центральных частях галенита (рис. 6, *b*). Характерны включения и структуры обрастания идиоморфного дипирамидального кварца. Формы кристаллов галенита в основном ксеноморфные, встречаются грани кубов, характерны треугольники выкрашивания. Размеры индивидов от 0,05 мм до первых мм. По периферии зерна галенита могут обрастать сульфоантимонитами свинца.

По данным микрозондового исследования, состав галенита близок к стехиометрическому (табл. 2); он слабо обеднен серой и содержит примесь железа (1,4%). Н. С. Бортниковым отмечены незначительные (до 1%) примеси серебра, сурьмы и висмута [1]. А. В. Волковым по результатам абсорбционного и нейтронно-активационного анализов в галените установлены содержания золота от 0,4 до 1,3 г/т и серебра от 319 до 1200 г/т [6].

Блеклая руда встречается в тесной ассоциации с галенитом, пиритом и арсенопиритом второй генерации, образует ксеноморфные сплошные массы размером в десятые доли мм. Блеклые руды представлены тетраэдритом и ферротетраэдритом (табл. 2); в последнем отмечена примесь марганца (0,5%). Н. С. Бортниковым отмечены примеси серебра (до 9,2%) и мышьяка (до 1,7%) [1].

Пирит II характеризуется неоднородным строением, обусловленным наличием мышьяка в его структуре. Об этом свидетельствует его яркая аномальная оптическая анизотропность и мозаичность в строении. Он образует изометричные зерна пентагондодекаэдрического габитуса, а также кубического облика (рис. 4, а, б, с). Эти кристаллы образуют как равномернозернистые единичные зерна, так и гнезда, прожилки, просечки. Пирит обладает свойственной слабой трещиноватостью и ситовидным строением. При травлении кристаллов пирита выявляется их зональное, реже микроблоковое строение. Иногда в центре зерен наблюдается кубический кристалл, сменяющийся к периферии пентагондодекаэдром. В центре кубических и пентагондодекаэдрических форм изредка встречаются округлые зерна [1]. В массивных рудах отмечено обрастание изометричных зерен удлиненными иголочками арсенопирита размером около 0,2–0,5 мм, а также сростки пирита и арсенопирита.

Химический состав пирита II несколько отличается от стехиометрического; в виде примеси отмечаются мышьяк (до 2,5%) и сурьма (до 0,2%) (табл. 2). Кроме того, по данным Н. С. Бортникова, в некоторых зернах пирита II обнаружено золото (до 0,3%) [1]. А. В. Волков по результатам абсорбционного и нейтронно-активационного анализов выявил содержания золота до 40,4 г/т и серебра от 3,6 до 154 г/т [6].

Арсенопирит II представлен вытянутыми, шестоватыми и короткостолбчатыми кристаллами, имеющими псевдоромбический облик (рис. 4, б, 6). Размер индивидов изменяется в широких пределах — от долей до 5–7 мм. Арсенопирит часто корродирует фрамбоидальные зерна пирита I, образует вокруг него каемки обрастания, нередко встречаются включения в галените. В кварцевых жилах и прожилках он образует скопления кристаллов различной морфологии. Для арсенопирита характерна осцилляторная зональность, выявляемая травлением, а также полисинтетическое и миметическое двойникование [1].

Химический состав арсенопирита II весьма изменчив и в большинстве случаев отличается от стехиометрического. По нашим данным, он обогащен мышьяком и может содержать примесь сурьмы

до 0,8%. Н. С. Бортников отмечает, что содержание железа может варьировать от 32,8 до 34,9%, мышьяка — от 43,1 до 51,4%, а сурьмы может достигать 1,5% [1]. Внутреннее строение зерен также неоднородно: в некоторых кристаллах по направлению от центра к краю содержание серы и сурьмы уменьшается, а мышьяка увеличивается. Арсенопирит II содержит золото — от 4,5 до 117,2 г/т. А. В. Волковым также выявлены содержания золота в арсенопирите II — 1,7–75,8 г/т и серебра — 5,2–336,0 г/т [6].

А. В. Волковым [6; 20] и Н. С. Бортниковым [1] проводилось изучение изотопного состава серы из сульфидов полиметаллического этапа. В сфалерите, галените, пирите и арсенопирите второй генерации значение $\delta^{34}\text{S}$ составило в диапазоне от -7 до $+1\text{‰}$ (рис. 5), подавляющее большинство измерений находятся в диапазоне от -3 до 0‰ . Полученные значения свидетельствуют о магматическом источнике серы для изученных сульфидов. Отклонения в сторону увеличения доли легкой серы свидетельствуют о заимствовании легкого изотопа остаточными гидротермальными растворами, которые могли растворять диагенетический пирит. При кристаллизации сульфидов полиметаллической ассоциации большая часть серы имела глубинный источник, и лишь небольшая часть извлечена из вмещающих пород.

Золото-сульфидная ассоциация представлена ассоциацией пирита и арсенопирита третьей генерации. Она является наиболее распространенной в рудных телах Майского месторождения и заключает в себе более 90% запасов золота, связанного с сульфидами. Пирит и арсенопирит третьей генерации проявлены практически во всех минерализованных зонах, в особенности в структуре рудного тела № 1. Минеральная ассоциация контролируется субмеридиональными зонами разрывных нарушений, секущих вмещающие терригенные породы продуктивной кзеевской свиты, обогащенной углеродом. Последний представлен как в самородной, так и в карбонатной форме. Рудные тела вмещаются трещинами скалывания, представленными линейными зонами смятия и дробления, висячий контакт обычно представлен зеркалом скольжения с глиной трения. Пирит и арсенопирит образуют тонкую вкрапленность, иногда выполняют кварц-сульфидные жилы и прожилки в березитизированных алевритах и песчаниках (рис. 7). Из нерудных минералов, кроме кварца, распространены серицит, гидросерицит, карбонаты (кальцит, анкерит и сидерит), каолинит, хлорит, монтмориллонит. Содержание золота в пирит-арсенопиритовой ассоциации резко преобладает над серебром — $\text{Au} : \text{Ag}$ от 4 до 43 [6].

Пирит III развит в основном в тонких кварцевых прожилках и просечках в виде зерен разнообразной морфологии и агрегатов. Облик таких выделений пирита представлен в виде сетчатых, скелетных агрегатов с правильными гранями куба и кубооктаэдра. В березитах вне кварцевых прожилков пирит встречается в виде тонкой и мелкой вкрапленности размером до 0,1 мм, иногда образует скопления размером до первых мм. Формы зерен и агрегатов разнообразны — от округлых изометричных

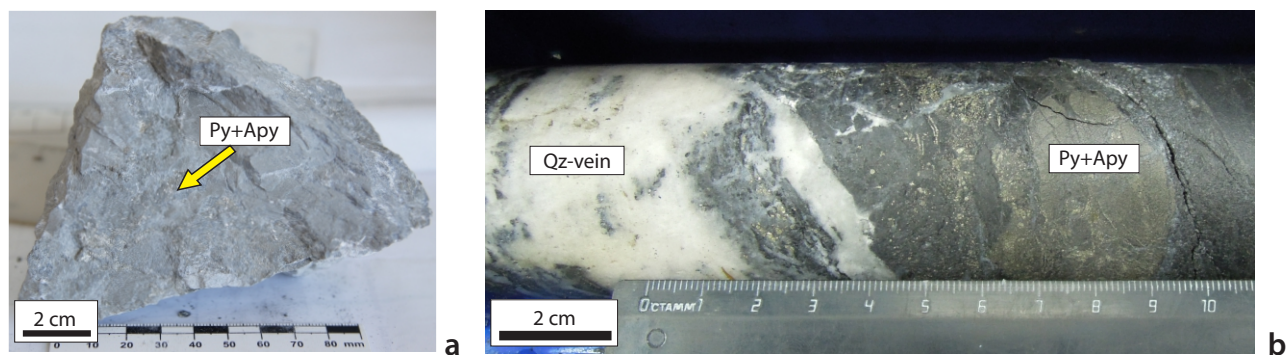


Рис. 7. Рудная минерализация золото-сульфидной ассоциации

a — вкрапленность пирита и арсенопирита третьей генерации в гидросерцитовых березитах; *b* — массивные кварц-сульфидные прожилки в углеродсодержащих березитах: Py — пирит, Apy — арсенопирит, Qz-vein — кварц-сульфидные прожилки

Fig. 7. Ore mineralization of the gold-sulfide association

a — dissemination of pyrite and third-generation arsenopyrite in hydrosericite beresite; *b* — massive quartz-sulfide veinlets in carbonaceous beresite: Py — pyrite, Apy — arsenopyrite, Qz-vein — quartz-sulfide veinlets

выделений до кристаллов с правильными гранями куба и октаэдра. Часто встречаются срастания с тонкоигльчатым арсенопиритом, образующие скопления минеральных агрегатов размером до первых мм, и кварц-сульфидные прожилки мощностью до 10 см (рис. 8).

Состав пирита продуктивной стадии отличается от стехиометрического, в нем всегда присутствует примесь мышьяка (до 6,8%) (табл. 2). А. В. Волков при микрорентгеноспектральном сканировании пиритов установил, что повышенные содержания мышьяка приурочены к периферии кристаллов и образуют тонкую (1–4 мкм) кайму вокруг них [8].

В пирите продуктивной стадии присутствует золото, содержание которого составляет 25–57 г/т, в то время как в пирите из околорудного пространства — до 4 г/т [9]. По данным А. М. Гаврилова,

среднее содержание золота в пирите составляет 60 г/т [22]. С помощью рентгеноспектрального микроанализа установлено, что содержание золота в пирите может достигать 0,4%, атомно-абсорбционным анализом установлены содержания 1,44–42,74 г/т [1]. А. В. Волков по результатам абсорбционного и нейтронно-активационного анализов выявил содержания золота в пирите от 2,3 до 209 г/т и серебра от 0,3 до 210 г/т [6].

Арсенопирит III образует идиоморфные тонкоигльчатые кристаллы удлиненно-призматического облика и их густовкрапленные скопления в друзовидном и жильном кварце, а также в виде вкраплений в обоих типах березитов (рис. 8). Характерно наличие звездчатых тройников. Кристаллики арсенопирита часто располагаются на контакте кварца и березитизированных алевролитов. Размер

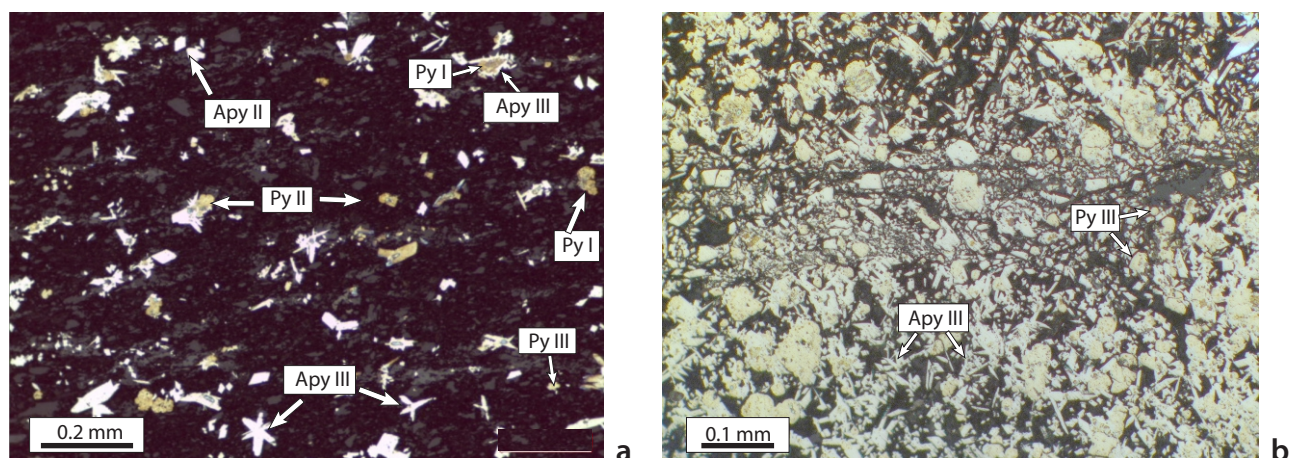


Рис. 8. Микрофотографии в отраженном свете рудной минерализации золото-сульфидной стадии

a — вкрапленность пирита и арсенопирита разных генераций в углеродсодержащих березитах; *b* — густая вкрапленность вплоть до массивной золотоносных пирита и тонкоигльчатого арсенопирита. Условные обозначения сокращений см. на рис. 7

Fig. 8. Reflected light micrographs of ore mineralization from the gold-sulfide stage

a — dissemination of pyrite and arsenopyrite of various generations in carbonaceous beresite; *b* — impregnation of gold-bearing pyrite and fine acicular arsenopyrite, including its massive type. Fig. 7 presents abbreviated symbols

индивидов составляет в основном сотые доли мм, редко достигая первых мм.

Исследованные микрозондовым анализом зерн арсенопирита III имеют нестехиометрический состав — пересыщены мышьяком, содержание которого достигает 62,6% (табл. 2). Исследованиями Н. С. Бортникова установлено, что содержание железа может меняться в диапазоне 33,5–36,3%, мышьяка — 38,7–46,0%, серы — 20,3–24,5%, а золота — от порога обнаружения до 1,2% (рентгеноспектральный анализ) [1]. Кроме того, по результатам атомно-абсорбционного анализа в незначительных содержаниях обнаружены никель и кобальт; содержание золота может составлять от 182,4 до 1030,0 г/т.

О. А. Толканов отмечает, что в удлиненно-призматическом, игольчатом арсенопирите содержание золота составляет 600–700 г/т, а в изометричном — до 14 г/т [9]. А. В. Волковым микрорентгеноспектральным, абсорбционным и нейтронно-активационными методами анализа определены содержания золота, равные 1,0–1554,0 г/т, в среднем — 320,0–689,0 г/т, серебра — 1,3–880,0 г/т [6; 8]. А. М. Гавриловым проведены специальные исследования рудной минерализации Майского месторождения с применением растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа [22]. Эти исследования позволили выявить на поверхности кристаллов тонкоигольчатого арсенопирита неравномерные, в том числе отдельные кучные скопления округлых включений самородного золота в арсенопирите размером от 0,04 до 0,3 мкм. Расчетная пробность золота составила 1000‰. Вероятно, эти включения являются основной формой нахождения золота в сульфидах Майского месторождения.

Авторами, А. В. Волковым [6; 8] и Н. С. Бортниковым [1], проводилось изучение изотопного состава серы из золотоносных пирита и арсенопирита. Отмечается значительная дифференциация изотопного состава серы в сульфидах продуктивного этапа. Величина $\delta^{34}\text{S}$ изменяется в диапазоне от –8 до +17‰ (рис. 5), подавляющее большинство измерений находятся в диапазоне от –5 до +8‰. Полученные значения свидетельствуют о смешанной природе серы для изученных сульфидов. Наибольшее число измерений, согласно диаграмме, соответствует глубинному источнику, однако есть отклонения в сторону увеличения доли как легкой (до –8‰), так и тяжелой (до +17‰) серы. Поскольку золотое оруденение значительно удалено от магматического тела (скважинами колонкового бурения на глубине более 1,5 км так и не встречено пород нескрытого интрузива, а по геофизическим данным оно залегает на глубине более 2,5 км), остаточные растворы магматического очага «прошли долгий путь» к гипсометрическому уровню рудных тел Майского месторождения и «профильировали» колоссальный объем вмещающих пород, и, по-видимому, произошло смешение серы из различных источников. Авторы считают, что гидротермальные растворы магматического происхождения, поднимаясь, растворяли и извлекали из корового субстрата и диагенетических сульфидов серу, тем самым обогащаясь легким и тяжелым изотопом.

Третий этап завершает рудообразование на Майском месторождении, для которого наиболее характерным признаком является наличие кварцевых жил с сульфосолюно-полиметаллической минерализацией и кварц-антимонитовых жил с элементами брекчирования и высокопробным свободным золотом. Рудная минерализация этого этапа образует рудный столб и пространственно тяготеет к структуре рудного тела № 1, отчетливо пересекая тонкодисперсные руды [21]. Система кварц-антимонитовых жил до горизонта +185 имеет крутое западное падение (до 90°), которое с глубиной меняется на восточное, тогда как вкрапленное оруденение всегда имеет восточное падение. Рудный столб содержит фрагменты и обломки разного размера (от первых мм до десятков см) углеродсодержащих березитов и пирит-арсенопиритовых руд с тонкодисперсным золотом. В горных выработках кварц-антимонитовая система жил с увеличением глубины имеет тенденцию к уменьшению мощности, на горизонте +80 превращается в систему тонкого прожилкования. Скважинами колонкового бурения рудный столб прослеживается на глубину более 1 км.

Структурно-текстурные особенности взаимоотношения рудных минералов третьего этапа позволяют нам выделить две минеральные ассоциации, последовательно сменявшие друг друга. Первая соответствует сульфосолюно-полиметаллической ассоциации, вторая — кварц-антимонитовой с самородным золотом. Минералы первой ассоциации образуют кварц-сульфидные жилы, пересекающие и брекчирующие вкрапленное золото-сульфидное оруденение. Завершают рудообразование кварц-антимонитовые жилы с видимым золотом, занимающие секущее положение относительно предыдущих ассоциаций.

Минералы сульфосолюно-полиметаллической ассоциации встречаются в кварцевых жилах, парагенетически связанных с дайками риолит-порфиров, и локализуются главным образом в их лежащих боках. В составе ассоциации отмечены минералы висмута, буланжерит, цинкенин, бурнонит, джемсонит, блеклые руды, сульфотеллуриды и другие минералы.

На Майском месторождении из минералов висмута распространены самородный висмут, висмутин, козалин и галенобисмутит, которые часто образуют взаимные сростания. *Козалин* является наиболее часто встречаемым минералом этой группы, распространен в кварцевых прожилках в виде зерен неправильной формы с ровными округлыми краями, размером 0,01–0,05 мм. Он часто содержит включения галенобисмутита и сульфотеллуридов висмута. По нашим данным, его химический состав близок к стехиометрическому (табл. 2).

Самородный висмут обнаружен в виде микровключений в висмутовых сульфосолях. В нем установлены примеси Ag и Hg [1].

Бисмутин наблюдается в сростаниях с висмутовыми сульфосолями, а также в виде самостоятельных выделений в кварце. Формы кристаллов в большинстве случаев изометричные, округлые, размером до 0,1 мм. Бисмутин может содержать примесь

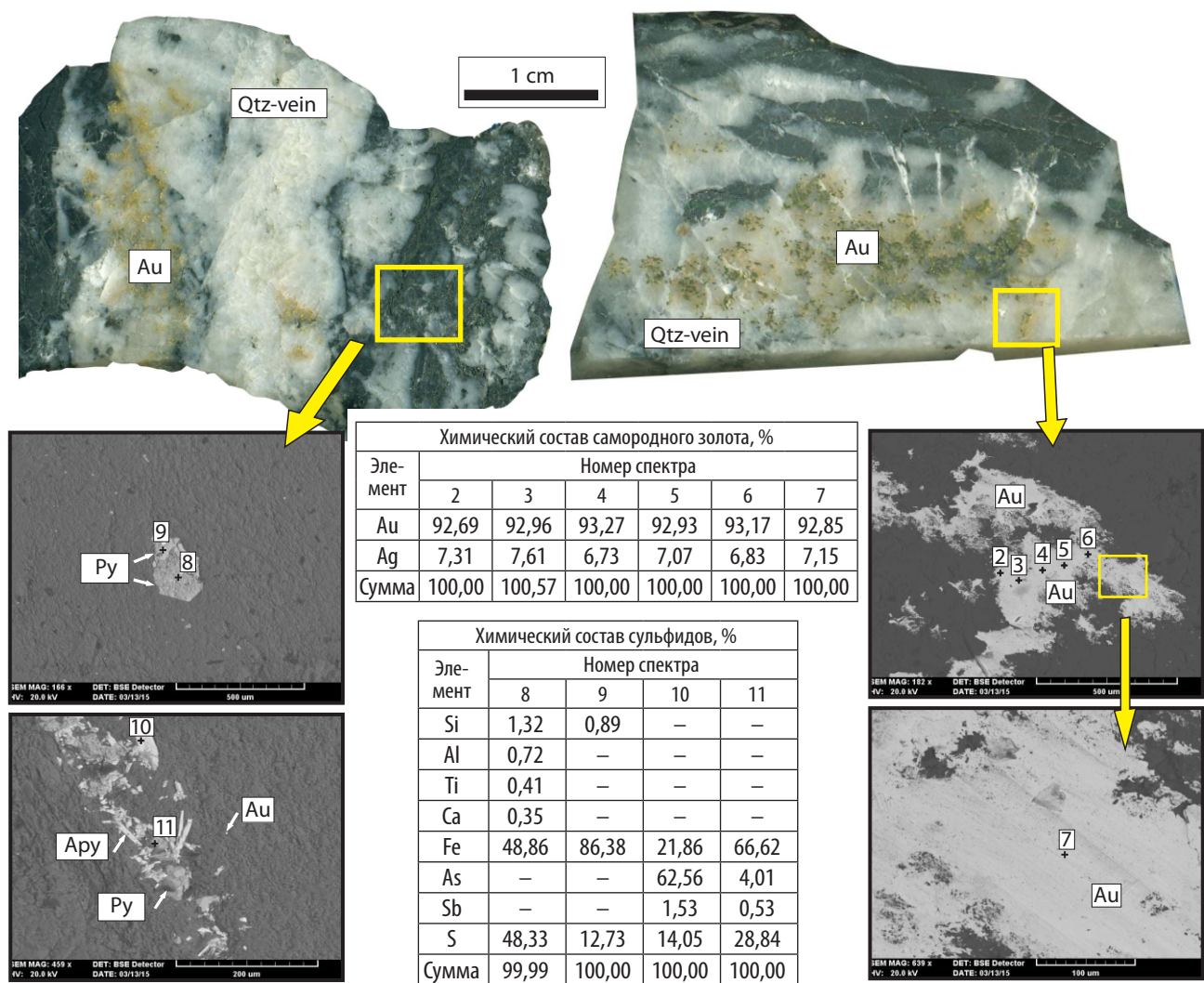


Рис. 9. Характеристика самородного золота из рудного столба Майского месторождения

Условные обозначения сокращений см. на рис. 7

Fig. 9. Native gold characteristics in the Mayskoye deposit ore column

Fig. 7 presents abbreviated symbols

свинца — 5,4% (табл. 2). Кроме того, отмечены: медь (до 0,9%), сурьма (до 0,6%), селен (до 0,4%), а в некоторых анализах ртуть и серебро [1]. Галено-бисмутит встречается достаточно редко, в основном в сростаниях с козаликом и бисмутином, иногда наблюдается в виде отдельных игольчатых кристаллов. В химическом составе отмечается повышенная доля серы (табл. 2), обнаружены примеси сурьмы и селена (первые десятки доли процента), спорадически обнаруживается ртуть (до 0,4%) [1].

Ассоциация сульфоантимонитов свинца в рудах развита достаточно широко, но по объемам проявлена незначительно. В пределах рудного тела № 14 она наблюдается чаще обычного. Сульфоантимониты свинца, среди которых установлены буланжерит, джемсонит, цинкениит, плагионит, а также андорит и бурнонит, развиты преимущественно в ассоциации с галеником, сфалеритом и блеклыми рудами полиметаллической ассоциации второго этапа, обрастают вокруг и выполняют просечки в последних. Цинкениит и джемсонит иногда образуют

полостчатую структуру, корродируя кристаллы галенита по периферии и залечивая в нем трещинки. Редко наблюдаются их рассеянные отдельные игольчатые выделения в карбонате, иногда занимают интерстиции в кварце. В этой же ассоциации обнаружены андорит, аргентит и золото [1; 6].

Результаты рентгеноспектральных [1] и микрозондовых (табл. 2) анализов этих минералов хорошо пересчитываются на их идеализированные формулы. Сульфоантимониты свинца содержат примеси серебра и небольшое количество золота. Наибольшие концентрации отмечены в цинкениите и джемсоните: серебра — 854–2697 г/т, золота — 0,9–4,8 г/т [6].

Золото-антимонитовая ассоциация является самой поздней в ряду эндогенного рудообразования на Майском месторождении и характеризуется богатым (бонанцевым) оруденением. Основными рудными минералами являются антимонит, блеклая руда, самородный мышьяк и золото. Минерализация завершающей стадии пространственно связана со структурой рудного тела № 1, локализуется

в разрывных нарушениях, образуя жилы выполнения, системы прожилкования, зоны брекчирования.

Антимонит весьма широко распространен в рудах месторождения. Он представлен массивными лучистыми агрегатами, гнездовидными включениями в друзовидном кварце, тонкоигольчатыми выделениями; кристаллы имеют удлиненно-призматический облик. Также встречаются массивные сростания кристаллов антимонита, имеющие «чугунный» облик. Размер кристаллов доходит до 5 см в длину. Характеризуется ярким полисинтетическим механическим и коленчатым двойникованием. Зачастую кристаллы антимонита имеют следы наложенных деформаций: сколы, разрывы, изгибы.

Антимонит, по данным рентгеноспектрального микроанализа [1], содержит 71,6% сурьмы, 27,3% серы и 0,4% мышьяка, что близко к теоретическому составу. В единичных анализах обнаружено 0,4% ртути и 0,7% висмута. Минерал также содержит следовые концентрации серебра, меди, цинка, железа и селена. А. В. Волков отмечает наличие в антимоните золота до 15,0 г/т и серебра 0,4–78,0 г/т [6].

Авторами и Н. С. Бортниковым [1] изучался изотопный состав серы антимонита; значение $\delta^{34}\text{S}$ сильно дифференцировано, варьирует от $-10,4$ до $+1$ ‰. Можно предположить о комбинированном источнике серы, получившемся при смешении коровой и магматической компонент.

Блеклая руда II наблюдается в виде мелких включений в кварце, часто в сростании с самородным золотом, иногда образует включения в нем. Ее состав существенно отличается от состава блеклой руды I, содержание сурьмы в ней меньше практически в 2 раза, а мышьяка — на порядок выше, содержит заметно больше цинка и меньше железа [1].

Самородный мышьяк встречается в рудных телах № 1 и 9, образует рассеянную вкрапленность в кварц-антимонитовых жилах, нарастает на антимонит, часто расположен в непосредственной близости с самородным золотом, но сростаний с последним не обнаружено. Формы кристаллов розетковидные, округлые ксеноморфные. Самородный мышьяк может содержать до 0,5% ртути, до 1,1% сурьмы, до 0,6% серы и до 0,2% селена [1].

Самородное золото распределено в кварце в виде интерстициальных прожилков, цементационных выделений в брекчиях, приуроченных к зальбандам; может образовывать сростания с антимонитом и блеклой рудой. Размеры выделений золота колеблются от долей мм до 1–2 мм; формы выделений разнообразны — комковидная, чешуйчатая, петельчатая, округлая, каплевидная, ксеноморфная. По результатам микрозондового анализа (рис. 9) отмечена весьма высокая пробность самородного золота, которая составляет 920–980 ‰, единственной примесью является серебро (до 7%). В позднем золоте Н. С. Бортниковым отмечена примесь ртути от 0,1 до 1,5%, максимальная концентрация которой выявлена в зернах, ассоциирующих с самородным мышьяком [1]. Кроме того, может присутствовать до 1,2% меди; висмут, селен и теллур в некоторых анализах достигают первых десятых долей процента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования каменного материала авторами выделены три основных этапа формирования рудной минерализации Майского месторождения, связанных с различными геологическими событиями, происходившими на территории Северо-Востока Российской Федерации. Первый этап отвечает ранней осадочно-гидротермальной системе и в структуре оруденения Майского месторождения является рудоподготовительным. Второй этап — продуктивный, в течение него сформировался основной объем золотого оруденения, связанного с сульфидами. Третий этап завершает рудообразование на Майском месторождении, для которого наиболее характерным признаком является наличие кварцевых жил с сульфосолюно-полиметаллической минерализацией и кварц-антимонитовых жил с элементами брекчирования и высокопробным свободным золотом.

Схема эволюции рудного процесса на Майском месторождении выглядит следующим образом:

1. Накопление геохимически специализированных толщ с надкларковыми содержаниями полезных компонентов — железа, меди, свинца, цинка, золота.

2. Заложение разрывных нарушений северо-восточного простирания, складкообразование и региональный метаморфизм зеленосланцевой фации терригенно-осадочных толщ с образованием кварц-пиритовой ассоциации.

3. Формирование магматических очагов и циркуляция вдоль ослабленных зон гидротермально-метасоматических растворов, приведшая к образованию «грейзеновой» и полиметаллической ассоциаций.

4. Внедрение даек различного состава и максимальная активность гидротермально-метасоматических растворов, формирование промышленной пирит-арсенопиритовой минерализации с тонкодисперсным золотом.

5. Образование сульфосолюно-полиметаллической и золото-антимонитовой ассоциаций с самородным золотом и мышьяком, предположительно связанных с внедрением эффузивных пород.

Описанная последовательность формирования рудных минеральных ассоциаций не противоречит исследованиям предшественников, а дополняет их [5; 6; 10; 13; 23].

Мнение авторов несколько отличается от исследования, проведенного Н. С. Бортниковым [1], который считает, что формирование золото-сульфидной ассоциации предшествует «грейзеновой» и полиметаллической, так как данная последовательность противоречит температурной зональности эндогенных месторождений, выявленной В. Х. Эммонсом [20]. На наш взгляд, приведенные Н. С. Бортниковым оценки температур формирования флюидов золото-сульфидной ассоциации (350–250 °C) и «грейзеновой» ассоциации (500 °C) также противоречат выводам авторов. В динамике формирования Майского месторождения происходила постепенная декомпрессия и снижение температуры в системе за счет воздымания территории, раскрытия многочисленных трещин и образования горстовой

структуры. В таких условиях логично предположить снижение значений Р-Т условий в системе от раннего этапа к позднему.

На Майском месторождении выделяются три этапа рудообразования. Во время первого этапа сформировались свинцово-цинковая и пирит-арсенопиритовая ассоциации. Второй этап, наиболее продуктивный на золото, отвечает «грейзеновой», полиметаллической и золото-сульфидной ассоциациям. Последняя включает основной объем упорного золота. В течение третьего этапа сформировались сульфосолюльно-полиметаллическая и золото-антимонитовая минеральные ассоциации, завершившие рудообразование Майского месторождения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Майское многоэтапное прожилково-вкрапленное золото-сульфидное месторождение (Чукотка, Россия): минералогия, флюидные включения, стабильные изотопы (О и S), история и условия образования / Н. С. Бортников [и др.] // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46, № 6. С. 475–509.
2. Сидоров А. А., Томсон И. Н. Условия образования сульфидизированных черносланцевых толщ и их металлогеническое значение // Тихоокеанская геология. 2000. Т. 19, № 1. С. 37–49.
3. Геолого-генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах / Н. К. Курбанов [и др.] // Руды и металлы. 1994. № 2. С. 55–69.
4. Hodgson C. J., Love D. A., Hamilton J. V. Giant mesothermal gold deposits: Descriptive characteristics, genetic model and exploration area selection criteria // *Giant ore deposits* / Eds. B. H. Whiting, C. J. Hodgson, R. Mason. Littleton, USA : Soc. of Econ. Geol., 1993. P. 157–212. <https://doi.org/10.5382/SP.02.05>.
5. Золоторудные гиганты России и мира / М. М. Константинов [и др.] ; отв. ред. М. З. Зиннатуллин, Ю. В. Прусс. М. : Науч. мир, 2000. 269 с.
6. Волков А. В., Гончаров В. И., Сидоров А. А. Месторождения золота и серебра Чукотки. М. : ИГЕМ РАН ; Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2006. 221 с.
7. Артемьев Д. С. Гранитоиды Майского золоторудного узла (Центральная Чукотка) // Региональная геология и металлогения. 2017. № 69. С. 107–121.
8. Волков А. В., Генкин А. Д., Гончаров В. И. О формах нахождения золота в рудах месторождений Наталкинское и Майское (Северо-Восток России) // Тихоокеанская геология. 2007. Т. 25, № 6. С. 18–29.
9. Толканов О. А. Неоднородность вещественного состава золото-сульфидных руд месторождения Майское, Северо-Восток России // Минералогия. 2019. Т. 5, № 2. С. 69–82.
10. О новом типе углерод-ильменит-сульфидной минерализации негидротермального происхождения / И. Н. Томсон [и др.] // Доклады Академии наук СССР. 1984. Т. 279, № 3. С. 727–730.
11. Новожилов Ю. И., Гаврилов А. М., Сидоров А. А. Серебро в месторождениях вкрапленных сульфидных руд с тонкодисперсным золотом // Геохимия руд месторождения золота и серебра : тр. ЦНИГРИ. Вып. 167. М. : ЦНИГРИ, 1982. С. 60–67.
12. Волков А. В. Золоторудные месторождения Центральной Чукотки (Россия) // Геология рудных месторождений. 1995. Т. 37, № 6. С. 482–499.
13. Новожилов Ю. И., Гаврилов А. М. Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. М. : ЦНИГРИ, 1999. 175 с.

14. Сидоров А. А., Волков А. И. Уникальный рудный район Чукотки (Северо-Восток России) // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 20, № 4. С. 3–18.

15. Геохимическая и металлогеническая специализация структурно-вещественных комплексов / Г. С. Гусев [и др.]. М. : ИМГРЭ, 1999. 529 с.

16. Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция / пер. с англ. Р. Н. Соболева, Л. Т. Соболевой. М. : Мир, 1988. 384 с.

17. Goldschmidt V. M. *Geochemistry*. Oxford : Clarendon Press, 1954. 730 p.

18. Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits // *Stable isotopes in high temperature geological processes : Reviews in mineralogy* / Eds. J. W. Valley, H. P. Taylor, J. R. O'Neil. Vol. 16. Washington, DC : Miner. Soc. of America, 1986. P. 491–560.

19. Волков А. В., Сидоров А. А. Уникальный золоторудный район Чукотки. Магадан : СВКНИИ ДВО РАН ; М. : ИГЕМ РАН, 2001. 180 с.

20. Эммонс В. Х. Изменение первичного оруденения с глубиной / пер. В. Ф. Логачева. М. ; Л. : Геолразведиздат, 1933. 40 с.

21. Артемьев Д. С. Геолого-генетическая модель формирования Майского месторождения и прогнозно-поисковые критерии локализации оруденения майского типа (Чукотка) // Региональная геология и металлогения. 2018. № 74. С. 98–103.

22. Субмикроскопическое золото в сульфидах некоторых месторождений вкрапленных руд / А. М. Гаврилов [и др.] // Советская геология. 1982. № 8. С. 81–86.

23. Сидоров А. А., Волков А. В. Майское золото-сульфидное месторождение вкрапленных руд (Центральная Чукотка) // Российская Арктика: геологическая история, минерагения, геоэкология / гл. ред. Д. А. Додин. В. С. Сурков. СПб. : ВНИИОкеангеология, 2002. С. 711–729.

REFERENCES

1. The Maiskoe multimegastage disseminated gold-sulfide deposit (Chukotka, Russia): Mineralogy, fluid inclusions, stable isotopes (O and S), history and conditions of formation / N. S. Bortnikov [et al.]. *Geology of Ore Deposits*. 2004; 46 (6): 409–440. (In Russ.).
2. Sidorov A. A., Tomson I. N. Conditions of origin for black shale complexes and their metallogenic implication. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2000; 19 (1): 37–49. (In Russ.).
3. Geological-genetic models of gold deposits in carbonaceous terrigenous complexes / N. K. Kurbanov [et al.]. *Ores and Metals*. 1994; (2): 55–69. (In Russ.).
4. Hodgson C. J., Love D. A., Hamilton J. V. Giant mesothermal gold deposits: Descriptive characteristics, genetic model and exploration area selection criteria. *Giant ore deposits* / Eds. B. H. Whiting, C. J. Hodgson, R. Mason. Littleton, USA: Soc. of Econ. Geol.; 1993. P. 157–212. <https://doi.org/10.5382/SP.02.05>.
5. Gold giants of Russia and the world / M. M. Konstantinov [et al.]; Publ. Ed. M. Z. Zinnatullin, Yu. V. Pruss. Moscow: Sci. World; 2000. 269 p. (In Russ.).
6. Volkov A. V., Goncharov V. I., Sidorov A. A. Deposits of gold and silver in Chukotka. Moscow: IGEM RAS; Magadan: NEISRI FEB RAS; 2006. 221 p. (In Russ.).
7. Artemiev D. S. Granitoids Mayskoye gold cluster (Central Chukotka). *Regional Geology and Metallogeny*. 2017; (69): 107–121. (In Russ.).
8. Volkov A. V., Genkin A. D., Goncharov V. I. The forms of the presence of gold in the ores of the Natalka and May deposits (Northeast Russia). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2007; 25 (6): 18–29. (In Russ.).
9. Tolkanov O. A. Heterogeneous composition of gold-sulfide ores from the Maiskoye deposit, Northeast Russia. *Mineralogy*. 2019; 5 (2): 69–82. (In Russ.).

10. New type of carbon-ilmenite-sulfide mineralization of non-hydrothermal origin. *Doklady Earth Sciences*. 1984; 279 (3): 727–730. (In Russ.).

11. Novozhilov Yu. I., Gavrilov A. M., Sidorov A. A. Silver in deposits of disseminated sulfide ores with fine-grained gold. *Ore geochemistry in gold and silver deposits: TsNIGRI Proc.* Vol. 167. Moscow: TsNIGRI; 1982. P. 60–67. (In Russ.).

12. Volkov A. V. Gold ore deposits of Central Chukotka (Russia). *Geology of Ore Deposits*. 1995; 37 (6): 482–499. (In Russ.).

13. Novozhilov Yu. I., Gavrilov A. M. Gold-sulfide deposits in carbon-terrigenous sequences. Moscow: TsNIGRI; 1999. 175 p. (In Russ.).

14. Sidorov A. A., Volkov A. I. Unique ore district of Chukotka (Northeastern Russia). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2001; 20 (4): 3–18. (In Russ.).

15. Geochemical and metallogenic trend of structural and material complexes / G. S. Gusev [et al.]. Moscow: IMGRE; 1999. 529 p. (In Russ.).

16. Taylor S. R., McLennan S. M. The continental crust: Its composition and evolution. Oxford: Blackwell Sci. Publ.; 1985. 312 p.

17. Goldschmidt V. M. Geochemistry. Oxford: Clarendon Press; 1954. 730 p.

18. Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Stable isotopes in high temperature geological processes: Reviews in mineralogy* / Eds. J. W. Valley, H. P. Taylor, J. R. O'Neil. Vol. 16. Washington, DC: Miner. Soc. of America; 1986. P. 491–560.

19. Volkov A. V., Sidorov A. A. A unique gold mineral district in Chukotka. Magadan: NEISRI FEB RAS; Moscow: IGEM RAS; 2001. 180 p. (In Russ.).

20. Emmons W. H. Change of primary ore mineralization with depth. Moscow; Leningrad: Geolrazvedizdat; 1933. 40 p. (In Russ.).

21. Artem'ev D. S. Genetic model of the May deposit and prognostic-search criteria for the localization of mineralization of the mayskoye type (Chukotka). *Regional Geology and Metallogeny*. 2018; (74): 98–103. (In Russ.).

22. Submicroscopic gold in sulfides of some disseminated ore deposits / A. M. Gavrilov [et al.]. *Soviet Geology*. 1982; (8): 81–86. (In Russ.).

23. Sidorov A. A., Volkov A. V. The Mayskoye disseminated gold-sulfide deposit (Central Chukotka). *The Russian Arctic: Geological history, minerogenesis, environmental geology* / Chief Eds. D. A. Dodin, V. S. Surkov. St. Petersburg: VNIIOkeangeologia; 2002. P. 711–729. (In Russ.).

Дмитрий Сергеевич Артемьев

Ведущий геолог

ООО «Полюс Геосервис», Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0009-0003-8140-9990>

SPIN-код РИНЦ 6774-9966

Dima_art@inbox.ru

Dmitry S. Artemev

Leading Geologist

Polyus Geoservice LLC, Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0009-0003-8140-9990>

RSCI SPIN-code 6774-9966

Dima_art@inbox.ru

Василий Иванович Леонтьев

Кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора Центра прогнозно-металлогенических исследований

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0000-0001-7183-4772>

Scopus Author ID 57195316170

ResearcherID P-3351-2017

SPIN-код РИНЦ 4563-2326

vasiliy_leontiev@karpinskyinstitute.ru

Vasilii I. Leontev

PhD (Geology and Mineralogy), Deputy Head, Centre of Predictive Metallogenic Studies

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky, Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0000-0001-7183-4772>

Scopus Author ID 57195316170

ResearcherID P-3351-2017

RSCI SPIN-code 4563-2326

vasiliy_leontiev@karpinskyinstitute.ru

Вклад авторов: Артемьев Д. С. — определение концепции, разработка методологии, проведение исследования, работа с данными, создание графиков, схем, иллюстраций, написание черновика рукописи.

Леонтьев В. И. — администрирование проекта, пересмотр и редактирование рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: Artemev D. S. — conceptualization, methodology, investigation, data curation, visualization, original draft.

Leontev V. I. — project administration, review and editing.

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 17.11.2025

Одобрена после рецензирования 12.12.2025

Принята к публикации 22.12.2025

Submitted 17.11.2025

Approved after reviewing 12.12.2025

Accepted for publication 22.12.2025