

Сульфидные минералы рудного поля Пюи де Фоль

Легенькова А. М. , Паниковский Т. Л. , Базай А. В. 

Центр наноматериаловедения ФИЦ Кольский научный центр РАН, Апатиты, legenkova93@yandex.ru; t.panikorovskii@ksc.ru; bazai@geoksc.apatity.ru

Аннотация. Проведено минералого-геохимическое исследование сульфидных руд рудного поля Пюи де Фоль. Установлен минеральный состав (пирит, халькопирит, борнит, пирротин, марказит и др.), описаны текстуры и структуры руд. Выявлены текстурно-структурные особенности руд, указывающие на много-стадийность рудообразования: вкрапленная минерализация, прожилковые выделения, глобулярные агрегаты марказита, пластинчатые выделения пирротина, псевдоморфозы пирита по органическим остаткам. В сульфидных минералах достоверно установлены примесные элементы золота (Au) и серебро (Ag), присутствующие в составе минеральных ассоциаций на всех стадиях минералообразования. Данный факт свидетельствует о стабильной миграции указанных элементов в гидротермальных растворах на протяжении всего рудообразующего процесса.

Ключевые слова: сульфиды, минералогия, геохимия, рудное поле, микрозондовый анализ.

Sulfide minerals of the Puy de Fol ore field

Legenkova A. M. , Panikovskii T. L. , Bazai A. V. 

Nanomaterials Research Centre, Apatity, legenkova93@yandex.ru; t.panikorovskii@ksc.ru; bazai@geoksc.apatity.ru

Abstract. A mineralogical and geochemical study of sulfide ores from the Puy des Folles ore field has been conducted. The mineral composition (pyrite, chalcopyrite, bornite, pyrrhotite, marcasite, etc.) was determined, and the ore textures and structures were described. Textural and structural features indicative of multi-stage ore formation were identified, including disseminated mineralization, veinlet segregations, globular marcasite aggregates, platy pyrrhotite segregations, and pyrite pseudomorphs after organic remains. Trace elements, specifically gold (Au) and silver (Ag), were reliably detected in the sulfide minerals across all stages of mineral formation. This fact indicates the stable migration of these elements in hydrothermal solutions throughout the entire ore-forming process.

Keywords: sulfides, mineralogy, geochemistry, ore field, microprobe analysis.

Введение

Рудное поле Пюи де Фоль расположено в центральной части рифтовой долины Срединно-Атлантического хребта (САХ) в пределах северной части Российского разведочного района глубоководных полиметаллических сульфидов (РРР-ГПС). Поле находится внутри подводного вулкана с одноименным названием. Вершина рудного поля находится на глубине 1950 м (координаты центра рудного поля: 20°30' с.ш., 45°38' з.д.).

Вмещающие породы представлены вулканогенными образованиями базальтового состава, отмечены преимущественно подушечные лавы, обладающие афировой структурой. Гидротермально-метасоматические преобразования зафиксированы в базальтоидах, отобранных в привершинной части вулканической постройки и выражены в развитии тонкодисперсной (микродисперсной) сульфидной минерализации, приуроченной к трещинным структурам (Насонов и др., 2011). Также присутствуют редкие выделения атакамита, диагностируемого по характерной зеленой окраске; кроме того, присутствуют маломощные гидротермальные корки, сложенные гидроксидами (гидроокислами) железа и марганца, на поверхности базальтовых образцов.

Разработка глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС), также известных как «черные курильщики», сталкивается с рядом серьезных проблем, сопряжена с комплексом существенных технологических и экономических ограничений, обуславливающих высокую сложность и капиталоемкость их освоения. Мировая цена на ключевые металлы (Cu, Ni, Zn) может колебаться, что влияет на экономическую целесообразность добычи. Кроме того, на данный момент нет полностью

отработанных и экономически выгодных технологий добычи. Одним из путей решения экономических проблем является выделение наиболее дорогостоящих рудных участков с попутным вовлечением дополнительных полезных компонентов (Au, Ag, Pb), что делает руды комплексными и повышает экономическую целесообразность добычи.

Промышленная значимость месторождения обусловлена, в первую очередь, содержанием меди (Cu) и цинка (Zn) в рудных минералах: халькопирите и сфалерите соответственно, а также золота (Au), ассоциирующего с пиритом. Результаты проведенных нами детальных минералогических исследований позволили идентифицировать дополнительные рудные минеральные фазы, включая атакамит, ковеллин, борнит и галенит. Обнаружение указанных минералов, помимо расширения таксономии рудообразующих компонентов, открывает перспективы для переоценки ресурсного потенциала и является критически важным фактором при проектировании комплексной технологической схемы обогащения и переработки данного типа руд.

Материалы и методы

Визуальная диагностика сульфидной минерализации на морском дне осуществлялась в ходе рейсов 45–47 НИС «Профессор Логачев» с использованием телевизионной системы TVS Spette (рис. 1 а.) Отбор каменного материала производился при помощи телевизионного грейфера, обеспечивающего прицельный захват образцов с поверхности донных обнажений. Первичная идентификация минеральных фаз выполнена в шести прозрачно-полированных шлифах методом оптической микроскопии на поляризационном микроскопе ПОЛАМ Р-312. Локальный химический состав минералов определялся методом волнодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (WDS) на приборе Cameca MS-46 (ГИ КНЦ РАН). Измерения проводились на четырех полированных аншлифах при ускоряющем напряжении 20 кВ, силе тока зонда 20–30 нА и диаметре электронного пучка 20 мкм.

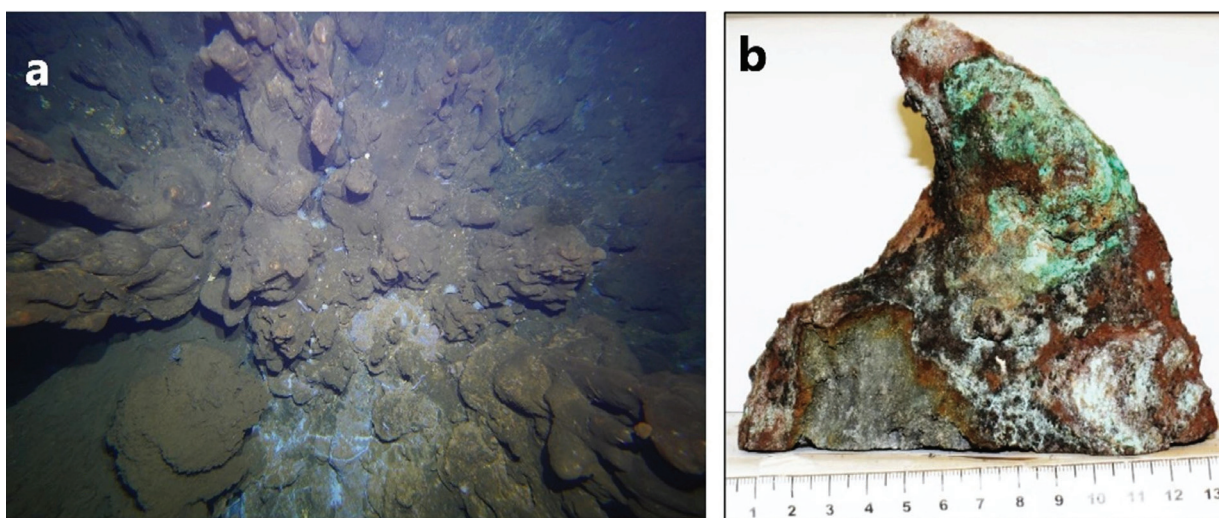


Рис.1. а гидротермальные постройки б. Во внешней зоне сульфидной постройки фиксируется развитие агрегатов гётита, а также присутствие минералов группы атакамита

Fig.1. a hydrothermal structures b. In the outer zone of the sulfide structure, the goethite crust and the presence of atacamite-group minerals are detected

Результаты

Основные сульфидные минералы: пирит, марказит, халькопирит, сфалерит и вюрцит. Пирит на рудном поле Пюи де Фоль представлен тремя генерациями: гипидиоморфной, аллотриоморфной и бактериальной (фраamboидальной) с размером зерен 10–80 мкм. В просмотренных аншлифах типичны тесные срастания пирита с его полиморфной модификацией — марказитом. Наблюдаются взаимопрорастания зерен, микропрожилковые выделения марказита в массе пирита. Пирит и марказит являются доминирующими сульфидами месторождения.

Халькопирит преимущественно представлен аллотриоморфными зернами, что свидетельствует о его формировании на поздних стадиях минералообразования, после кристаллизации ранних идиоморфных фаз (прежде всего пирита).

Сфалерит в рудах рудного поля Пюи де Фоль характеризуется преимущественно аллотриоморфной структурой зерен, что указывает на кристаллизацию в условиях ограниченного пространства и в поздние стадии минералообразования. В отдельных случаях фиксируются гипидиоморфные кристаллы с частичной огранкой. Максимальный размер минеральных выделений не превышает 0.05 мм, при этом зерна чаще встречаются единично. Морфология минеральных выделений сфалерита разнообразна и включает: аллотриоморфные зерна (наиболее распространённая форма); тетраэдрические кристаллы, отражающие присущую минералу кубическую сингонию; таблитчатые кристаллы – данный морфотип характерен для вюрцита, гексагонального политипа ZnS, который может формироваться в специфических физико-химических условиях (предположительно при повышенных температурах) (рис. 2, табл. 1).

Присутствие изокубанита подтверждено с помощью количественного рентгенофазового анализа. Установлено, что исследуемая фаза представлена халькопиритом, претерпевшим распад с формированием изокубанита в качестве вторичной минеральной фазы.

В ходе полевых работ на станциях 45L099G, 46L007G и 46L009G были подняты образцы базальтов, содержащих вкрапленники сульфидных минералов и сделаны прозрачно-полированные шлифы. В прозрачно-полированных шлифах сульфидные минералы локализованы в трещинах, формируя точечные неравномерные аллотриоморфные выделения пирита, реже – ковеллина и сфалерита. Размер рудных минералов варьирует в диапазоне 8–20 мкм. Присутствие ковеллина также подтверждено с помощью рентгенофазового количественного анализа.

Борнит можно встретить в виде пленок на халькопирите. На станции опробования 46L031G установлены идиоморфные кристаллы борнита в ассоциации с шарообразными выделениями пирита. Минерал подтвержден и с помощью микронзондового анализа.

На станции 47L010G диагностированы прослойки пирротина, представленные пластинчатыми агрегатами; минерал формирует сростания с халькопиритом и марказитом.

В ходе минералогического исследования галенит-клаусталит был выявлен исключительно с применением микронзондового анализа. Оптические методы диагностики (описание аншлифов) не позволили зафиксировать его присутствие. Размер зерен около 10 микрон (рис. 3, табл. 2).

При микроскопическом исследовании аншлифа 46L003G-1 обнаружен селенид меди, по примерному химическому составу предварительно диагностированный как клокманнит. Точная идентификация минерала затруднена в связи с субмикронными размерами выделений (≤ 1 мкм) (рис. 4, табл. 3).

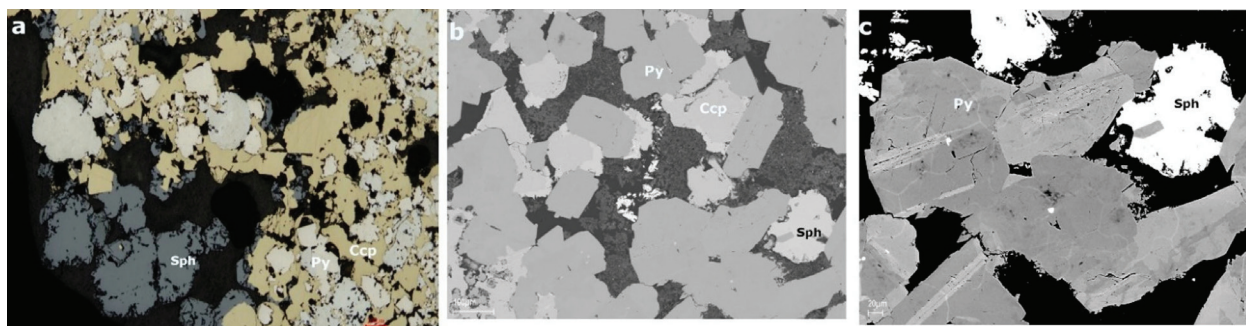


Рис. 2. а – гипидиоморфные зерна пирита (марказита), халькопирита и сфалерита. Изображения под электронным микроскопом; б – гипидиоморфные зерна пирита с аллотриоморфными зернами халькопирита и сфалерита; в – Взаимодействие зерен пирита со сфалеритом

Fig. 2. a – Hypidiomorphic-grained pyrite (marcasite), chalcopyrite and sphalerite grains. Images under an electron microscope; b – Hypidiomorphic-grained pyrite grains with allotriomorphic grains of chalcopyrite and sphalerite; c – Interaction of pyrite grains with sphalerite

Таблица 1. Химический состав основных рудных минералов, выявленных на рудном поле Пюи де Фоль.
 Содержание компонентов указаны в массовых процентах (мас. %)

Table 1. Chemical composition of the main ore minerals identified within the Puy des Folles ore field.
 Component contents are given in mass percentages (mass. %)

№обр	Fe	Ni	Co	Zn	Cu	Cd	As	Ag	Au	S	Всего	Эмпирическая формула
<i>пирит</i>												
46L033G-9.2	43.01	0.36	1.97	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	54.66	100	$(\text{Fe}_{0,919}\text{Ni}_{0,007}\text{Co}_{0,040})_{1,029}\text{S}_{2,034}$
46L033G-9.2	42.44	н.о.	1.54	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.22	55.80	100	$(\text{Fe}_{0,902}\text{Co}_{0,031}\text{S}_{2,066})$
46L031G-4.4	43.65	0.12	0.41	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.05	0.21	55.56	100	$(\text{Fe}_{0,929}\text{Ni}_{0,002}\text{Co}_{0,008}\text{Ag}_{0,000}\text{Au}_{0,001})_{0,941}\text{S}_{2,059}$
46L011G-4.6	43.83	0.14	0.56	н.о.	н.о.	н.о.	0.07	0.11	0.08	55.21	100	$(\text{Fe}_{0,934}\text{Ni}_{0,003}\text{Co}_{0,011}\text{Ag}_{0,001}\text{Au}_{0,001})_{0,950}\text{S}_{2,049}$
46L011G-4.6	43.41	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1.26	55.33	100	$(\text{Fe}_{0,929}\text{Au}_{0,008}\text{S}_{2,063})$
46L011G-4.6	42.10	н.о.	0.33	н.о.	4.26	н.о.	н.о.	н.о.	0.29	53.02	100	$(\text{Fe}_{0,911}\text{Co}_{0,007}\text{Cu}_{0,081}\text{Au}_{0,002})_{1,001}\text{S}_{1,999}$
<i>халькопирит</i>												
46L031G-4.3	13.26	н.о.	н.о.	н.о.	43.34	н.о.	н.о.	0.04	н.о.	43.36	100	$(\text{Cu}_{1,201}\text{Ag}_{0,001})_{1,202}\text{Fe}_{0,418}\text{S}_{2,381}$
46L011G-4.6	26.56	н.о.	н.о.	н.о.	40.15	н.о.	н.о.	0.05	0.42	32.82	100	$(\text{Cu}_{1,185}\text{Ag}_{0,001}\text{Au}_{0,004})_{1,189}\text{Fe}_{0,892}\text{S}_{1,919}$
46L011G-4.6	30.43	н.о.	н.о.	н.о.	34.5	н.о.	н.о.	н.о.	0.30	34.77	100	$(\text{Cu}_{0,999}\text{Au}_{0,003})_{1,02}\text{Fe}_{1,003}\text{S}_{1,996}$
46L011G-4.6	25.14	н.о.	н.о.	н.о.	40.95	н.о.	н.о.	н.о.	0.62	33.29	100	$(\text{Cu}_{1,207}\text{Au}_{0,006})_{1,213}\text{Fe}_{0,843}\text{S}_{1,944}$
46L011G-4.6	25.59	н.о.	н.о.	н.о.	41.57	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	32.84	100	$\text{Cu}_{1,225}\text{Fe}_{0,858}\text{S}_{1,918}$
<i>сфалерит</i>												
46L033G-9.2	4.94	н.о.	н.о.	61.54	н.о.	0.85	н.о.	н.о.	н.о.	32.67	100	$(\text{Zn}_{0,916}\text{Fe}_{0,086}\text{Cd}_{0,007})_{1,009}\text{S}_{0,991}$
46L033G-9.2	4.88	н.о.	н.о.	62.46	н.о.	0.52	н.о.	н.о.	н.о.	32.14	100	$(\text{Zn}_{0,932}\text{Fe}_{0,085}\text{Cd}_{0,005})_{1,022}\text{S}_{0,978}$
46L011G-4.6	19.28	н.о.	н.о.	38.69	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	42.03	100	$(\text{Zn}_{0,527}\text{Fe}_{0,307})_{0,834}\text{S}_{1,166}$
46L011G-1	7.93	н.о.	н.о.	59.93	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	32.14	100	$(\text{Zn}_{0,890}\text{Fe}_{0,138})_{1,027}\text{S}_{0,973}$
46L011G-4.7	3.65	н.о.	0.26	63.95	н.о.	0.79	н.о.	н.о.	н.о.	31.35	100	$(\text{Zn}_{0,962}\text{Fe}_{0,064}\text{Co}_{0,004}\text{Cd}_{0,007})_{1,038}\text{S}_{0,962}$

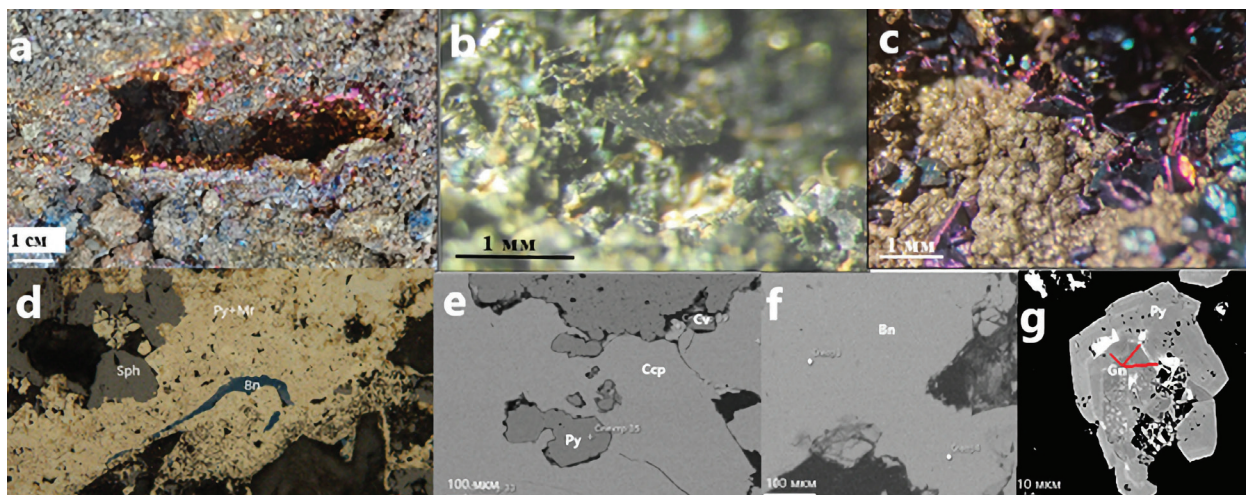


Рис. 3. а – образец со станции 47L009G: канал в свежем сколе сульфидной постройки с идиоморфными кристаллами борнита, развитыми на стенках; б – образец со станции 47L010G: пластинчатые агрегаты пирротина в ассоциации с глобулярным марказитом; с – образец со станции 46L031G: псевдоморфозы пирита по фораминиферам в ассоциации с идиоморфными кристаллами борнита; д – аншлиф: развитие борнита по трещине; минерал окружен агрегатами пирита и марказита; е – BSE-изображение: аллотриоморфное зерно ковеллина в парагенетической ассоциации с халькопиритом и пиритом; ф – BSE-изображение: зерно борнита; г – BSE-изображение: зерна галенита-клаусталита, локализованные по граням роста кристалла пирита

Fig. 3. a – Sample from station 47L009G: a conduit in a fresh fracture of a sulfide chimney with idiomorphic bornite crystals developed on the walls; b – Sample from station 47L010G: platy pyrrhotite aggregates in association with globular marcasite; c – Sample from station 46L031G: pyrite pseudomorphs after foraminifera in association with idiomorphic bornite crystals; d – Polished section: bornite development along a fracture; the mineral is enclosed by pyrite and marcasite aggregates; e – BSE image: an allotriomorphic covellite grain in a paragenetic association with chalcopyrite and pyrite; f – BSE image: a bornite grain; g – BSE image: galena-clausthalite grains localized along the growth faces of a pyrite crystal

Таблица 2. Химический состав рудных минералов, выявленных на рудном поле Пюи де Фоль. Содержания компонентов указаны в массовых процентах (мас. %)

Table 2. Chemical composition of ore minerals identified within the Puy des Folles ore field. Component contents are given in mass percentages (mass. %)

№ обр.	Cu	Fe	Zn	Pb	Au	Se	S	Всего	Кристаллохимическая формула
КОВЕЛЛИН									
46L031G-4.4	54.17	7.2	н.о.	н.о.	0.34	н.о.	38.29	100	$(\text{Cu}_{0.783}\text{Fe}_{0.1184}\text{Au}_{0.0016})_{0.903}\text{S}_{1.097}$
46L031G-4.4	55.02	7.63	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	37.35	100	$(\text{Cu}_{0.7989}\text{Fe}_{0.1261})_{0.925}\text{S}_{1.075}$
46L031G-4.4	53.66	7.74	н.о.	н.о.	1.19	н.о.	37.41	100	$(\text{Cu}_{0.7833}\text{Fe}_{0.1286}\text{Au}_{0.0056})_{0.9175}\text{S}_{1.0825}$
46L031G-4.4	53.85	7.64	н.о.	н.о.	1.49	н.о.	37.02	100	$(\text{Cu}_{0.7896}\text{Fe}_{0.1275}\text{Au}_{0.007})_{0.9178}\text{S}_{1.0759}$
46L031G-4.7	54.22	7.33	н.о.	н.о.	0.86	н.о.	37.59	100	$(\text{Cu}_{0.7895}\text{Fe}_{0.1215}\text{Au}_{0.004})_{0.9114}\text{S}_{1.085}$
46L031G-4.7	56.64	7.74	н.о.	н.о.	0.03	н.о.	35.59	100	$(\text{Cu}_{0.8329}\text{Fe}_{0.1295}\text{Au}_{0.003})_{0.9627}\text{S}_{1.0373}$
БОРНИТ									
46L009G-1	64.73	4.54	н.о.	н.о.	0.29	н.о.	29.41	98.97	$\text{Cu}_{4.44}\text{Fe}_{0.35}\text{S}_4$
ГАЛЕНИТ									
46L003G-1	0.35	1.00	н.о.	84.04	н.о.	7.17	8.05	100.61	$(\text{Pb}_{1.18}\text{Fe}_{0.05}\text{Cu}_{0.02})_{1.22}(\text{S}_{0.73}\text{Se}_{0.29})_{1.00}$
	1.01	0.65	2.79	80.44	н.о.	7.52	7.59	100.00	$(\text{Pb}_{1.18}\text{Fe}_{0.05}\text{Cu}_{0.02})_{1.22}(\text{S}_{0.73}\text{Se}_{0.29})_{1.00}$
	н.о.	2.46	н.о.	83.09	н.о.	7.08	8.34	100.97	$(\text{Pb}_{1.14}\text{Fe}_{0.13})_{1.26}(\text{S}_{0.74}\text{Se}_{0.26})_{1.00}$

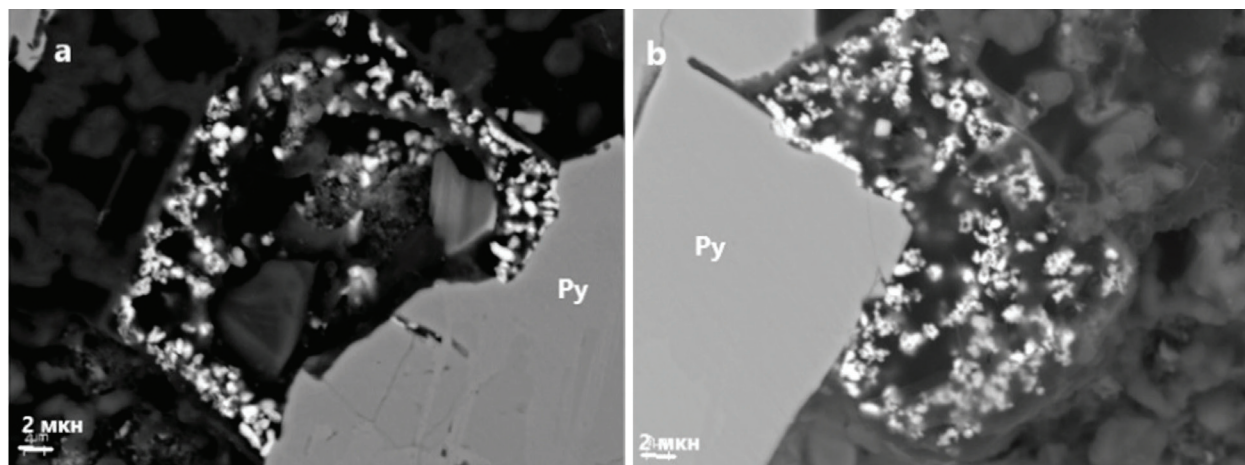


Рис. 4. BSE-изображения: выделений селенида меди (контрастные зёрна) с идиоморфным пиритом (a, b)
 Fig. 4. BSE images: copper selenide precipitates (contrast grains) with idiomorphic pyrite (a, b)

Таблица 3. Химический состав селенида меди.
 Содержания компонентов указаны в массовых процентах (мас. %)
 Table 3. The chemical composition of copper selenide is given.
 The component contents are given in mass percentages (mass. %)

элемент								
№	Cu	Fe	Zn	Ag	Se	S	Cl	Всего
1	34.09	1.67	0.43	0.50	58.65	2.18	0.87	98.39
2	36.59	1.10	0.78	0.59	58.53	1.85	0.57	100.01
3	36.75	1.11	0.62	0.62	58.31	2.17	0.42	100.00

Обсуждение результатов

В ходе исследования сульфидных руд рудного поля получены данные, позволяющие существенно уточнить представления о минералого-геохимических особенностях оруденения и условиях его формирования. Сульфидная минерализация рудного поля характеризуется полиминеральным составом, включающим пирит, халькопирит, борнит, пирротин, марказит, изокубанит, ковеллин и галенит. Основу рудной ассоциации составляют три доминирующих минерала: халькопирит (CuFeS_2), пирит (FeS_2) и сфалерит (ZnS), определяющие минералого-геохимическую специфику оруденения. Выявленные минеральные ассоциации демонстрируют устойчивые парагенетические соотношения, отражающие последовательность кристаллизации и эволюцию рудообразующей системы в пределах рудного поля. Анализ текстур и структур руд позволяет выделить три последовательные стадии минералообразования, которые различаются по температурным условиям.

На ранней (высокотемпературной) стадии происходит кристаллизация идиоморфных выделений пирита, халькопирита и пирротина (рис. 5 а). Среднетемпературный этап характеризуется формированием ассоциации пирита, халькопирита, сфалерита и галенита (рис. 5 б). В ходе низкотемпературной стадии фиксируются образования пирита и марказита по органическим остаткам, а также развитие по халькопириту вторичных минералов меди – борнита и ковеллина (рис. 5 с). Завершающим процессом является образование селенида меди в пустотном пространстве.

Анализ химического состава позволил определить присутствие элементов-примесей в составе сульфидов: в пирите – Ni, Co, Au и Ag, что типично для гидротермальных систем; в халькопирите – примеси Au и Ag. Примечательно, что примесь Au выявлена и в более поздних минералах – борните и ковеллине. Приведенные данные свидетельствуют о поступлении Au на протяжении всего процесса минералообразования. Обнаружение селенида меди (предположительно клокманнита) подтверждает наличие восстановительных условий на поздних стадиях минералообразования.

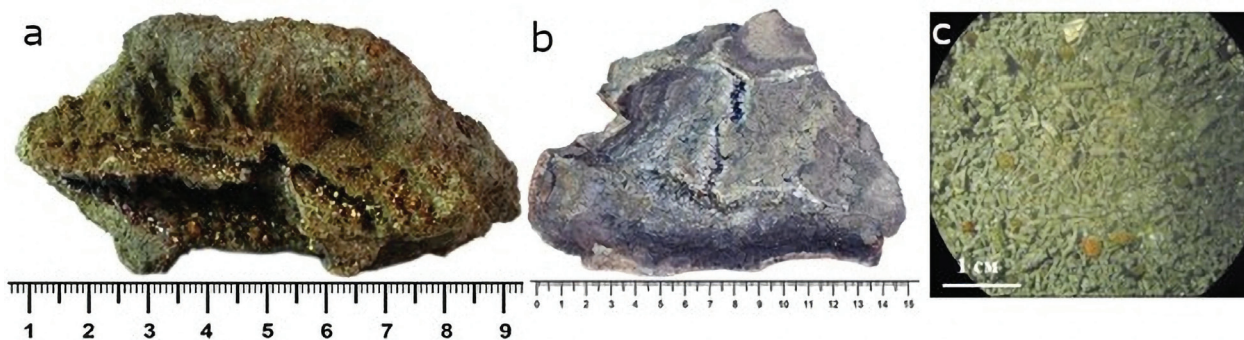


Рис. 5. а – станция 47L009G, халькопирит-пиритовая руда; б – станция 47L010G-5 халькопирит-сфалерит-пиритовая руда; с – фото под бинокляром: станция 47L014, псевдоморфозы тонкозернистого пирита по трубкам червей

Fig. 5. a – Station 47L009G, chalcopyrite-pyrite ore; b – Station 47L010G-5, chalcopyrite-sphalerite-pyrite ore; c – Binocular photograph: station 47L014, pseudomorphs of fine-grained pyrite after worm tubes

Выводы

На основе изучения сульфидных минералов рудного поля Пюи де Фоль обоснована трехстадийная схема гидротермального рудогенеза, отражающая направленную эволюцию единой термодинамической системы от раннего высокотемпературного этапа (формирование пластинчатого пирротина и прожилково-вкрапленного халькопирита) к среднетемпературному (кристаллизация сфалерит-галенитовой ассоциации) и финальному низкотемпературному. Последний характеризуется преобладанием восстановительных условий, проявившихся в развитии глобулярного марказита, образовании селенидов меди в пустотах и метасоматическом замещении сульфидами железа органических остатков бактериальных матов (рис. 6).

Выявлено широкое развитие процессов гальмиролиза (низкотемпературного подводного выветривания) первичных руд, выраженное в метасоматическом замещении халькопирита вторичными сульфидами меди — борнитом и ковеллином. Формирование этих минеральных кайм фиксирует этап наложенного воздействия придонных морских вод на остывающую сульфидную постройку.

Минерал	Высокотемпературная стадия 400-300°C	Среднетемпературная стадия 300-200°C	Низкотемпературная стадия 200-100°C
пирит	[Progressive decrease in mineral presence from high to low temperature]		
халькопирит	[Progressive decrease in mineral presence from high to low temperature]		
сфалерит	[Progressive increase in mineral presence from high to low temperature]		
марказит	[Progressive increase in mineral presence from high to low temperature]		
вюрцит	[Progressive increase in mineral presence from high to low temperature]		
изокубанит	[Progressive increase in mineral presence from high to low temperature]		
борнит	[Progressive increase in mineral presence from high to low temperature]		
ковеллин	[Progressive increase in mineral presence from high to low temperature]		
галенит	[Progressive increase in mineral presence from high to low temperature]		
пирротин	[Progressive decrease in mineral presence from high to low temperature]		
Селенид меди	[Progressive increase in mineral presence from high to low temperature]		

Рис. 6. Этапы минералообразования по температурным условиям
 Fig. 6. Mineral formation stages categorized by temperature conditions

Установлен сквозной характер распределения благородных металлов в рудном матриксе на всех этапах минералообразования, от раннего пирита до поздних вторичных сульфидов меди (борнита и ковеллина). Общие ресурсы благородных металлов в пределах рудного поля оценены в 4 тонны золота и 1693 тонны серебра. Стабильное накопление элементов-примесей на фоне резкого преобладания серебра (соотношение Au/Ag = 1:423), а также сохранение золотоносности во вторичных сульфидах меди, свидетельствует об устойчивом функционировании единого глубинного рудогенерирующего источника и фиксирует специфическую серебро-направленную геохимическую специализацию флюидов на протяжении всей истории жизнедеятельности гидротермальной системы Пюи де Фоль.

Литература

1. Легенькова А. М. Вещественная характеристика и прогнозные ресурсы рудного поля Пюи де Фоль // *Материалы VI междунар. конференции молодых ученых и специалистов памяти А. П. Карпинского*, 2024. С. 163–166.
2. Насонов Д. А. и др. Отчет по проекту «Оценочные работы на рудных месторождениях в северной части глубоководного бассейна России, Район разведки полиметаллических сульфидов в Атлантическом океане (ПМГРЭ, Ломоносов, 2021).
3. Черкашёв Г. А. Морфология и внутреннее строение гидротермальных рудных тел, формирующихся в различных геологических обстановках мирового океана // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 2. С. 295–306. DOI: 10.31857/S0030157421020039.
4. Черкашёв Г. А., Бельтенёв В. Е., Егоров И. В. и др. Геологоразведочные работы на глубоководные полиметаллические сульфиды в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта: результаты исследований в Российском разведочном районе // *Океанологические исследования*. 2023. Т. 51, № 4. С. 167–185. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).7.
5. Bonatti E., Guerstein-Honnorez B.-M., Honnorez J. Copper-iron sulfide mineralizations from the equatorial Mid-Atlantic Ridge. *Econ. Geol.* 1976. V. 71. P. 151–1525.
6. Haymon R. M. *Hydrothermal Vents at Mid-Ocean Ridges* // *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. 2014. doi: 10.1016/b978-0-12-409548-9.09050-3.