Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2025. 22. С. 146–150

Атакамит и йодаргирит рудного поля Пюи де Фоль

Легенькова А. М. [1, 2], **Базай А. В.** [2], **Паникоровский Т. Л.** [3]
[1] АО «ПМГРЭ», Санкт-Петербург, Legenkovaam@rusgeology.ru
[2] Центр наноматериаловедения ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, bazai@geoksc.apatity.ru
[3] Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, t.panikorovskii@ksc.ru

Аннотация. В статье приведены данные об исследовании минерала атакамита и йодаргирита рудного поля Пюи де Фоль. Атакамит — это редкий медный минерал, относящийся к классу сульфатов, с химической формулой $Cu_2(OH)_3Cl$, но минерал распространён по всему рудному полю, встречается и в осадках, и в виде выделений на сульфидных телах. Йодаргирит, AgI, встречается в одной ассоциации с атакамитом и оба минерала образованы в результате гидротермального преобразования халькопирита.

Ключевые слова: Пюи де фоль, атакамит, глубоководные полиметаллические сульфиды, AgI.

Atacamite and Iodargyrite of the Puy de Fol Ore Field

Legenkova A. M. [1, 2], **Bazai A. V.** [2], **Panikorovskii T. L.** [3]
[1] JSC «PMGRE», St. Petersburg, Legenkovaam@rusgeology.ru
[2] Center for Nanomaterials Science, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, bazai@geoksc.apatity.ru
[3] Laboratory for Nature-like Technologies and Technospheric Safety of the Arctic, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, t.panikorovskii@ksc.ru

Abstract. The paper presents data on the study of atacamite and iodargyrite of the Puy de Fol ore field. Atacamite is a rare copper mineral belonging to the sulphate class, with the chemical formula $Cu_2(OH)_3Cl$. The mineral is widespread throughout the ore field, occurring both in sediments and in the form of precipitates on sulphide bodies. Iodargyrite, AgI, occurs in the same association with atacamite and both minerals are formed as a result of hydrothermal transformation of chalcopyrite.

Keywords: Puy de Fol, atacamite, deep-sea polymetallic sulfides, AgI.

Введение

Атакамит, $Cu_2Cl(OH)_3$, был описан в 1801 г., после чего получил свое название от региона пустыни Атакама, где его впервые обнаружили (Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона). Минерал формируется как вторичный продукт в зоне окисления медных месторождений по другим медным минералам в сухом климате. В рифтовой долине Срединно-Атлантического хребта атакамит был впервые описан Е. Боннати и его коллегами (Bonatti et al., 1976) как продукт окисления вкрапленного штокверкового халькопирита вдоль разлома слоя базальтов. Позже атакамит был отмечен на окисленных сульфидных образованиях гидротермальных полей (Scott et al., 1982; Dekov et al., 2011), особенно на рудных отложениях, возраст которых превышает десятки тысяч лет. Наиболее подробно условия формирования атакамита в океане были изучены В. М. Дековым и его соавторами (Dekov et al., 2011) на примере поля «Логачев».

Нами проведены детальные минералогические исследования минералов группы атакамита рудного поля Пюи де Фоль в зоне Срединно-Атлантического хребта. Материал для исследований был отобран в ходе работ 46-го рейса НИС «Профессор Логачев», сотрудниками АО «ПМГРЭ».

Строение рудного поля Пюи де Фоль

Рельеф дна на участке работ сложный, сильно расчленённый, что определяется его положением в пределах рифтовой долины Срединно-Атлантического хребта. Глубины океана колеблются в пределах 1920–2600 м. Рудное поле Пюи де Фоль (20°30′20» с.ш., 45°38′25» з.д.) связано с вершиной подводного вулкана центрального типа, который, в свою очередь, приурочен к зоне нетрансформно-

го разлома (20°30′ с.ш.). Кратер вулкана имеет диаметр примерно 3.5 км и находится на глубине от 1920 до 2000 м.

Вмещающие руду горные породы представлены базальтами, которые в большинстве своем являются афировыми типами подушечных лав. Гидротермальные изменения хорошо заметны в образцах базальтов, собранных с вершины вулкана, и проявляются в виде прожилков сульфидов вдоль трещин, редких скоплений зеленого атакамита, а также тонких гидротермальных корок гидроксидов железа и марганца на поверхности.

В пределах рудного поля, согласно данным, полученным с помощью телевизионного профилирования, наблюдаются протяжённые 70–80 м сульфидные гряды высотой до 6–10 м, с обрывами до 3–5 м, состоящие из глыб, осыпей сульфидных руд и продуктов их разрушения. Также имеются обособленные сульфидные постройки, увенчанные трубными комплексами высотой от 0.5 до 3 м и не активными в настоящее время. Крупнейшие сульфидные структуры представляют собой рудные столбы высотой до 7–8 м с площадью основания около 10 м^2.

Материалы и методы

Визуально атакамит был определён с использованием телевизионного аппарата TVS Sperre, установленного на НИС «Профессор Логачев». Отбор образцов осуществлялся с помощью телевизионного грейфера. Первично минерал был диагностирован в шести прозрачно-полированных шлифах при помощи микроскопа ПОЛАМ Р-312. Точечный химический анализ минералов выполнен при помощи волнодисперсионного электроннозондового микроанализатора Cameca MS-46 (ГИ КНЦ РАН; напряжение и сила тока 20 кВ и 20–30 нА, диаметр зонда 20 мкм), с использованием 2 аншлифов.

Результаты

На рудном поле Пюи де Фоль минералы группы атакамита (атакамит, паратакамит и боталлакит) распространены довольно широко. Их можно встретить вместе с окси-гидроксидными рудными корками (рис. 1 в) в осадках, а также на выветренных массивных сульфидных рудах (рис. 1 б) в виде кристаллических агрегатов. Они заполняют отдельные углубления в гидроксидных железных корках. Кроме того, эти минералы присутствуют в виде отдельных кристаллов, рассеянных в мелкозернистой массе гидроксидов железа. Минералы группы атакамита находятся в ассоциации с гидроксидами железа. Реже они встречаются вместе с гетитом, ярозитом и вторичными медными сульфидами.

Микрозондовый анализ показал, что атакамит встречается в пустотах и углублениях совместно с халькопиритом и ковеллином. В одном из аншлифов с рудного тела 1 найдена занятная ассоциация атакамита с иодаргиритом (AgI). Включения зерен атакамита, найденные во включениях свежих сульфидов преимущественно имеют изометричную форму, размерами до 6 до 8 мкм. Формы выделения иодаргирита (AgI) разнообразны, но в виде кристаллов не обнаружены. Размеры зерен не превышают 5 мкм (рис. 2).

Таблица 1. Химический состав минерала атакамита (мас. %)
Table 1. Chemical composition of the mineral atacamite (wt. %)

Анализ	CuO	FeO	Cl_2O	H_2O	Сумма	Формула
1	64.99	н.о.	19.49	н.о.	89.48	$Cu_{2.00}(OH)_{3.56}Cl_{0.44}$
2	68.03	0.71	17.54	н.о.	86.28	$(Cu_{1.98}Fe_{0.02})_{2.00}(OH)_{3.59}Cl_{0.41}$
3	69.16	1.31	20.59	н.о.	90.06	$(Cu_{1.97}Fe_{0.03})_{2.00}(OH)_{3.60}Cl_{0.40}$
4	69.99	2.08	20.28	н.о.	92.35	$(Cu_{1.95}Fe_{0.05})_{2.00}(OH)_{3.60}Cl_{0.40}$
5	68.87	2.7	18.88	н.о.	90.45	$(Cu_{1.93}Fe_{0.07})_{2.00}(OH)_{3.60}Cl_{0.40}$
6	69.41	1.44	20.3	н.о.	91.15	$(Cu_{1.96}Fe_{0.04})_{2.00}(OH)_{3.60}Cl_{0.40}$

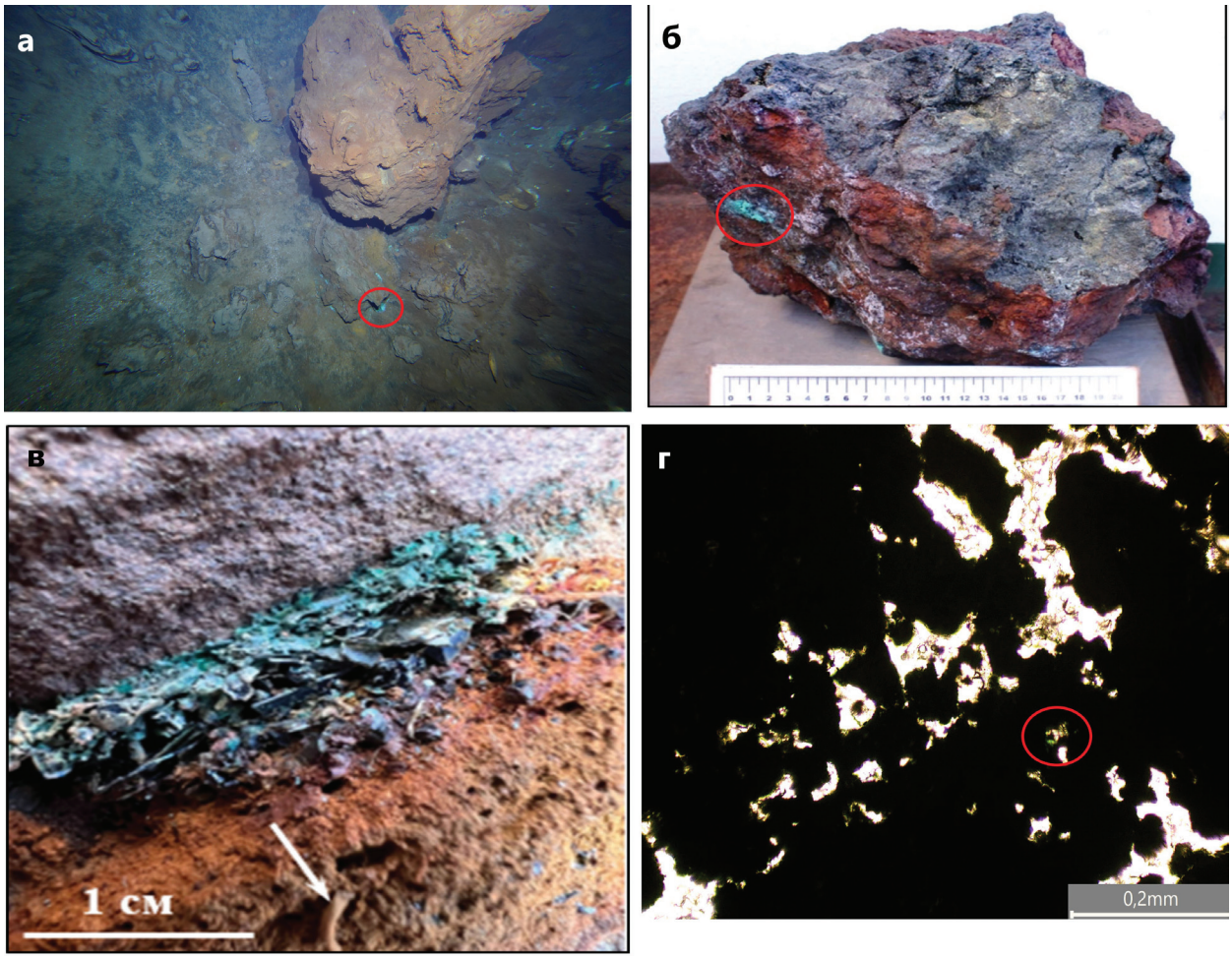

Рис. 1. а – гидротермальная постройка с проявлением атакамита (выделено красным); б – массивная сфалерит-халькопирит-пиритовая руда с атакамитом; в – минералы группы атакамита развиваются по гидроксидам железа, на контакте двух разновидностей гидроксидов железа, стрелкой показана трубка червя; г – округлое, зеленое зерно атакамита в полированном шлифе, темное – руда, светлое – SiO_2

Fig. 1. a – Hydrothermal structure with the occurrence of atacamite (highlighted in red); b – Massive sphalerite-chalcopyrite-pyrite ore containing atacamite; c – Atacamite group minerals developing on iron hydroxides at the contact of two varieties of iron hydroxides; d – Rounded green grain of atacamite in a polished thin section

Обсуждение результатов

Растворение меди из сульфидных минералов может происходить в результате проникновения холодной окислительной морской воды через пористую структуру сульфидного материала. В процессе взаимодействия с рудными залежами или осадочными породами, содержащими руду, морская вода реагирует с сульфидными минералами. Как отмечает Д. К. Нордстром (1982), в результате этого взаимодействия сульфиды трансформируются в гидроксиды, такие как $Fe(OH)_3$, а медь и часть железа переходят в раствор в виде хлоридных соединений. В. М. Деков и его коллеги (Dekov et al., 2011) предполагают, что из этих обогащенных металлами растворов может происходить осаждение двух типов атакамита. Первый тип атакамита формируется непосредственно на поверхности исходных сульфидов в процессе их окисления. Второй тип образуется в результате повторного осаждения растворенного вещества, что указывает на способность хлоридных комплексов меди перемещаться в осадках в составе низкотемпературных флюидов до их дальнейшей минерализации в виде атакамита. С геохимической точки зрения второй тип не сохраняет прямую связь с родительскими сульфидами и имеет менее «чистый» химический состав по сравнению с первым типом. Перераспределение и дифференциация исходного вещества приводят к увеличению концентраций дру-

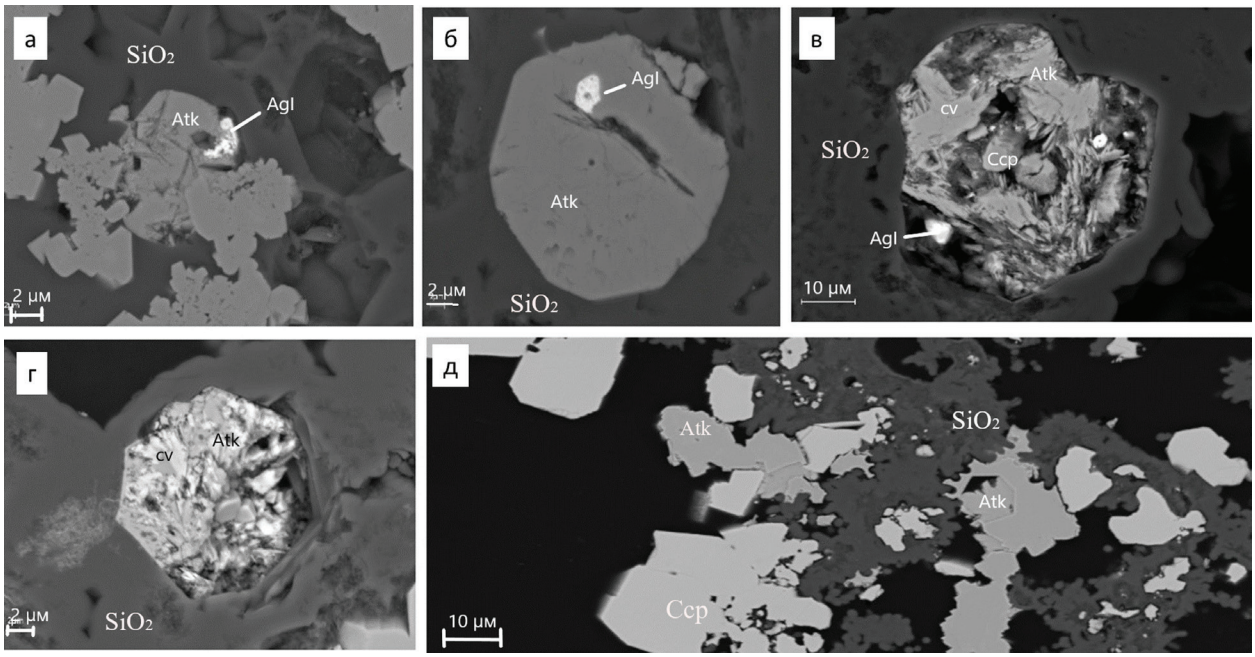

Рис. 2. Формы выделения атакамита (Atk) и йодаргирита (AgI): а – срастания атакамита(Atk) и иодаргирита (AgI) в аморфном SiO_2; б – иордаргирит (AgI)в атакамите (Atk); в – выделения ковеллина (cv), халькопирита (Ccp), атакамита (Atk), и иордаргирита (AgI) в аморфном SiO_2; г – срастания ковеллина (cv) и атакамита (Atk) в аморфном SiO_2; д – выделения халькопирита (Ccp) и атакамита (Atk)

Fig. 2. Forms of occurrence of Atacamite (Atk) and Iodargyrite (AgI): a – intergrowths of atacamite (Atk) and iodargyrite (AgI) in amorphous SiO_2; б – iodargyrite (AgI) in atacamite (Atk); в – occurrences of covellite (cv), chalcopyrite (Ccp), atacamite (Atk), and iodargyrite (AgI) in amorphous SiO_2; г – intergrowths of covellite (cv) and atacamite (Atk) in amorphous SiO_2; д – occurrences of chalcopyrite (Ccp) and atacamite (Atk)

гих металлов, включая серебро. С большой долей вероятности, катионы Ag^+ образуют соединения с иодом в растворе морской воды, что приводит к образованию йодаргирита, AgI.

Выводы

Минералы группы атакамита имеют широкое распространение на рудном поле Пюи де Фоль. Атакамит образовывается двумя способами: окислением и повторного осаждения растворенного вещества, и отличительной их особенностью является наличием примесных элементов во втором способе образования и более чистым составом в первом.

Атакамит из-за своей яркой окраски может являться хорошим поисковым признаком на поиски сульфидных руд на океаническом дне. Минералы группы атакамита содержат большое количество полезного компонента (меди), что при существенных содержаниях повысит экономическую привлекательность разработки подобных руд ввиду более низкой стоимости обогащения атакамита по сравнению с сульфидными рудами.

Литература

1. Атакамит // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона : в 86 т. (82 т. и 4 доп.). СПб. 1890–1907.
2. Атакамит // «Минералы. Сокровища Земли» : Еженедельное издание. 2011. № 1. SSN 2075-0587.
3. Добрецова И. Г., Яговкина М. А. Минералы группы атакамита из рудопроявлений на дне Атлантического океана // Вестник геонаук. 2022. №. 2. С. 37–45. https://doi.org/10.19110/geov.2022.2.4.
4. Легенькова А. М. Вещественная характеристика и прогнозные ресурсы рудного поля Пюи де Фоль // Материалы VI Международная конференция молодых ученых и специалистов памяти А. П. Карпинского, 2024. С. 163–166.
5. 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).

6. 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.
7. Dekov V., Boycheva T., Hâlenius U. et al. Atacamite and paratacamite from the ultramafic-hosted Logatchev seafloor vent field (14°45' N, Mid-Atlantic Ridge) // Chemical Geology. 2011. V. 286. P. 169–184. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.05.002.
8. Scott R. B., Temple D. G., Peron P. R. The nature of hydrothermal exchange between oceanic crust and seawater at 26°N latitude, Mid-Atlantic Ridge // The Dynamic Environment of the Seafloor / (Eds.) K. A. Fanning, F. T. Manheim. 1982. Lexington Brooks, D.C. P. 381–416.