

Редкие минералы Pb-Zn рудопоявления Загадочное, Таймыроозерский рудный район (Центральный Таймыр)

Григорьева А. В.¹, Волков А. В.¹, Проскурнин В. Ф.²

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ РАН), Москва

² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург

Аннотация. В экзоконтакте габродолеритовой дайки (рудопоявление Загадочное, Таймыроозерский рудный район) выявлена зона метасоматически измененных кварц-карбонатных пород, содержащих сульфидную Pb-Zn минерализацию. На контакте кварца и карбонатов отмечаются очаговые выделения агрегатов сульфидных минералов, среди которых преобладает сфалерит, обогащенный кадмием. Кроме того, сфалерит насыщен мелкозернистыми включениями барита, галенита, а также в нем обнаружен редкий минерал – хвилевит ($\text{Na}(\text{Fe}, \text{Zn}, \text{Cu})_2\text{S}_2$). Рудовмещающие карбонаты зонального строения содержат гетеролит (ZnMn_2O_4) и сложные ферросульфаты Na и Zn. Полученные результаты имеют значение для прогнозно-металлогенических исследований и оценки выявленных рудопоявлений.

Ключевые слова: Таймыр, рудопоявление Загадочное, габродолеритовая дайка, кварц-карбонатные метасоматиты, Pb-Zn минерализация, пирит, сфалерит, галенит, гетеролит, хвилевит, ферросульфаты Na и Zn.

Rare Pb-Zn minerals of the Zagadochnoe ore occurrence, Taimyroozersky ore district (Central Taimyr)

Grigoryeva A. V.¹, Volkov A. V.¹, Proskurnin V. F.²

¹ IGM RAS, Moscow

² Institute named after Karpinsky, St. Petersburg Annotation

Abstract. In the exocontact of the gabrodolerite dyke (Zagadochnoe ore occurrence, Taimyroozersky ore district) A zone of metasomatically altered quartz-carbonate rocks containing sulfide Pb-Zn mineralization has been identified. At the contact of quartz and carbonates, aggregates of sulfide are distinguished, among which cadmium-enriched sphalerite predominates. In addition, sphalerite is saturated with fine-grained inclusions of barite, galena, and a rare mineral, khvilevite ($\text{Na}(\text{Fe}, \text{Zn}, \text{Cu})_2\text{S}_4$), was found in it. Ore-bearing carbonates of zonal structure contain heterolite (ZnMn_2O_4) and complex ferrosulfates of Na and Zn. The results obtained are of great importance for predictive metallogenic studies and evaluation of identified ore occurrences.

Keywords: Taimyr, Zagadochnoe ore occurrence, gabrodolerite dyke, quartz-carbonate metasomatites, Pb-Zn mineralization, pyrite, sphalerite, galena, heterolite, hvilevite, Na and Zn ferrosulfates.

Введение

При проведении полевых работ отрядом «Института Карпинского» (Г. В. Липенков и др.) на Загадочнинской площади Суровоозерского рудного поля (Таймыроозерский рудный район) в секторе р. Южная (рис. 1) обнаружен выход на дневную поверхность вертикально залегающей дайки габродолеритов северо-восточного простирания, мощностью более 25 м. Подобного типа габродолериты встречаются обычно в ксенолитах, карбонатитах среднего-позднего триаса и являются более древними образованиями (Проскурнин, 2010). Габродолериты – массивные, меланократовые, средне-мелкокристаллические интенсивно карбонатизированные. В дайке габродолеритов, ее экзоконтакте и на удалении, протяженностью не менее 500 м, рудопоявление Загадочное, Таймыроозерского рудного района (рис. 1) выявлена зона кварц-карбонатных пород, содержащих сульфидную Pb-Zn минерализацию.

Для исследования рудной минерализации и вмещающих ее кварц-карбонатных пород были изготовлены прозрачные и полированные шлифы, которые затем изучались оптическими методами (Nikon Polarizing Microscope ECLIPSE 50i POL) в проходящем и отраженном свете. Для точной

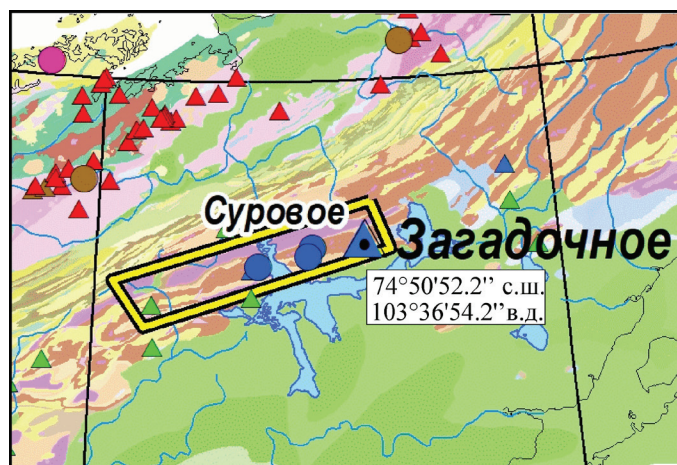


Рис. 1. Положение рудопоявления Загадочное на геологической карте п-ова Таймыр
Fig. 1. The position of the Zagadochnoe ore occurrence is on the geological map of the Taimyr peninsula

диагностики и выявления форм нахождения минералов использовался сканирующий электронный микроскоп JSM-5610LV (Япония). Исследование проведено в отраженных электронах (BSE COMPO), отображающих контраст в зависимости от среднего атомного номера элемента. Работа выполнена в кристаллохимической лаборатории ИГЕМ РАН, аналитики Л. А. Иванова, Л. О. Магазина. Химический состав породы определялся с помощью рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (XRF) на вакуумном спектрометре последовательного действия (с дисперсией по длине волны), модель Axios mAX производства компании PANalytical (Нидерланды). Спектрометр снабжен рентгеновской трубкой мощностью 4 кВт с Rh – анодом. Максимальное напряжение на трубке 60 кВ, макс анодный ток 160 мА (аналитик А. И. Якушев). Химический состав карбонатов и рудных минералов исследован на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8200 фирмы JEOL в полированных шлифах в лаборатории анализа минерального вещества, Центр коллективного пользования ИГЕМ РАН, аналитик Е. В. Ковальчук.

Представленная работа продолжает серию статей (Григорьева, 2023, 2024), подготовленных на основании детальных минералогических исследований рудной минерализации Центрального Таймыра.

Результаты исследования

Метасоматически измененные породы вблизи габродолеритовой дайки (Проскурнин, 2010), сложены молочно-белым кварцем и карбонатами (рис. 2 а), характеризующимися осцилляторной зональностью (рис. 2 б). Химический состав карбонатов варьирует в широких пределах (рис. 2 в) и отражает ряд минералов переменного состава: $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2 - \text{Ca,Fe}(\text{CO}_3)_2 - (\text{Fe,Mn})\text{CO}_3$, имеющих зональное строение (рис. 2), обусловленное изменением концентраций Ca, Mg, Mn, Fe в процессе кристаллизации породы. Осцилляторная зональность карбонатов и механизм ее образования детально рассматривается в работах (Wang, 1992; Аникина, 2020; Любимцева, 2020).

По химическому составу карбонаты отчетливо разделяются на две группы: доломита и Mn-содержащего сидерита (рис. 2 в), анкерит присутствует в незначительном количестве. Весьма вероятно, что постмагматический флюид разгружался преимущественно в Fe-карбонатах, обогащая последние рудными элементами, обходя зоны, сложенные доломитом (рис. 2 г, д) – реликтовыми островами первичных карбонатных пород.

Прожилки гидроксидов Mn, Fe, Zn и Na в Fe-карбонатах, замещают сидерит (рис. 2 е), содержание рудных элементов в гидроксидах варьирует в широком диапазоне, в зависимости от места расположения: в центральных участках прожилков преобладают гидроксиды Fe и Mn, а гидроксиды Zn и Na содержатся в меньшем количестве; в периферийных участках – железо замещается марганцем и цинком, а также увеличивается содержание натрия (рис. 2 е) сп.1 – Mn – 37.8, Zn – 25.2, Na – 9.5 мас. %; сп.2 – Mn – 24.2, Zn – 13.2, Fe – 24.5, Na – 4.6 мас. %. В наиболее широких участках (раздувах)

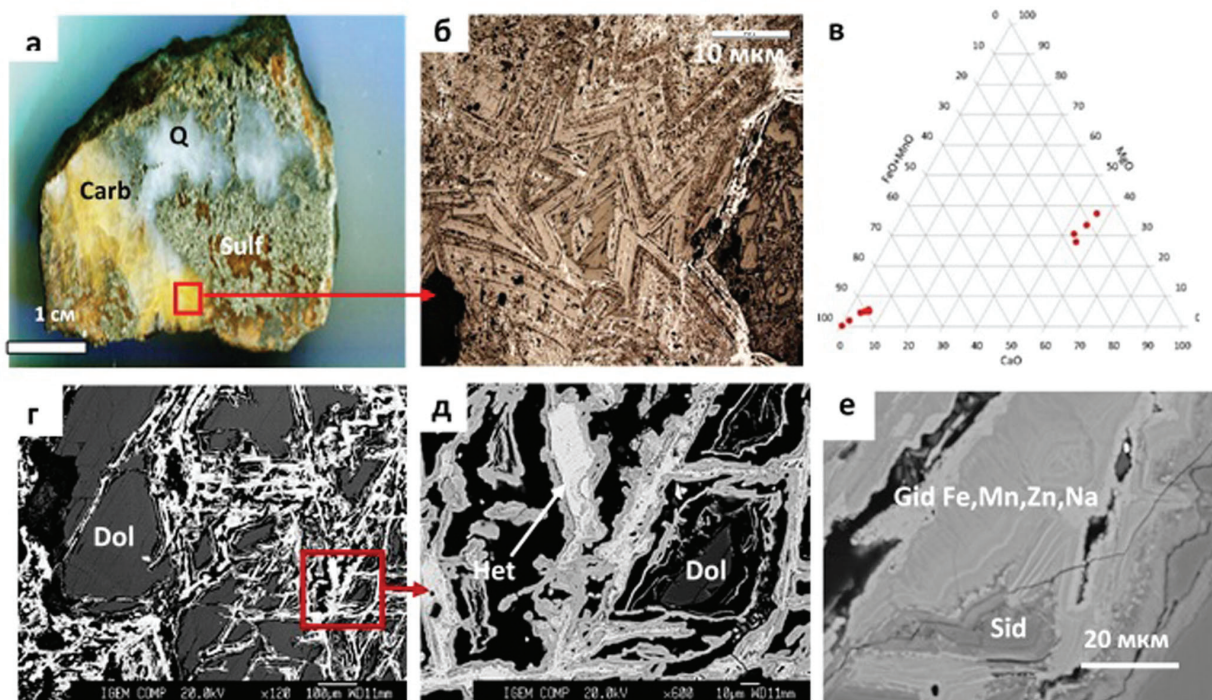


Рис. 2. Карбонаты Загадочнинского рудного поля (обр. 22053/4): а – общий вид образца 22053/4; б – зональное строение карбонатов; в – химический состав карбонатов; г – выделение гидроксидов Fe, Mn, Zn по сидериту; д – образование гетеролита (Het – ZnMn_2O_4) в центральных участках прожилков гидроксидов Fe-Mn-Zn; е – фрагмент сидерита, замещающегося оксидами и гидроксидами Fe, Mn, Zn и Na

Fig. 2. Carbonates of the Zagadochninsky ore field (model 22053/4): а – general appearance of sample 22053/4; б – zonal structure of carbonates; в – chemical composition of carbonates; г – separation of Fe, Mn, Zn hydroxides by siderite; д – formation of heterolite (Het – ZnMn_2O_4) in the central areas of Fe hydroxide veins-Mn-Zn; е – is a fragment of siderite replaced by oxides and hydroxides of Fe, Mn, Zn and Na

рудных прожилков уменьшается содержание гидроксильной группы, происходит дифференциация рудных оксидов, железо замещается марганцем с образованием гетеролита (рис. 2 д). Установлено, что Zn, Mn, Fe и Na, образуют в карбонатах оксиды и гидроксиды в разных сочетаниях с широкой вариативностью содержаний каждого элемента. В наиболее ослабленных зонах, таких как контакты карбонатных минералов разного состава, прожилки гидроксидов развиты сильнее, именно в этих зонах выделяются вышеперечисленные минеральные фазы.

Сульфидная минерализация

Выделения сульфидов в карбонатах и кварц-карбонатных сростаниях образуют крупные агрегатные сростания (рис. 2 а), а также отдельные кристаллы в карбонатной матрице (рис. 3 г, д, е). Главными минералами Загадочнинского рудопоявления являются пирит, сфалерит, галенит, а также их окисленные формы, такие как англезит, Zn-содержащий англезит, арсенаты Pb и Zn, гидроксиды Fe. Кроме того, пирит обогащен мышьяком, а в галените в виде микровключений отмечают сульфосоли свинца (рис. 3 е). По результатам РФА пород, содержащих сульфиды, Fe составляет до 16.7 %, Zn – 9.5 %, Pb – 0.6 %, Mn – 1.8 %, а в пробе отмечаются повышенные содержания As – 0.08 %, Cd – 0.03 %, Ba (190 ppm), Cu (120 ppm). Zn и Mn в значительном количестве обогащают вмещающие карбонаты, образуя в них оксиды и гидроксиды, располагающиеся в контактных зонах карбонатов разного состава (рис. 2); Fe, Pb, Zn, As, Ba образуют собственные минералы (пирит, галенит, сфалерит, арсенопирит, барит), а Cu, Cd и частично As входят в виде примеси в пирит и сфалерит.

Во вмещающих рудную минерализацию кварц-карбонатных породах отмечаются участки тонких прожилков или просечек углеродистого вещества, а также миндалины, вероятно, выполненные тонкоагрегатными минералами группы мелилита, приблизительный состав которых: Na_2O – 7.78–12.20, MgO – 3.04–3.64, Al_2O_3 – 0.85–0.16, SiO_2 – 73.97–77.94, K_2O – 0–0.43, CaO – 9.43–9.72.

Эти минералы свидетельствуют о высоких температурах гидротермального процесса, близких к температурам образования скарнов.

Сфалерит – главный минерал Загадочнинского рудопроявления, он образует крупные вкрапления как в карбонатах, так и в кварц-карбонатных образованиях. Химический состав минерала не постоянен, он изменяется в зависимости от содержания железа, содержание которого варьирует от 0.75 до 13.86 мас. %, и отвечает формуле $Zn_{0.75-0.98}Fe_{0.01-0.24}S_{1.00-1.01}$. Кроме того, сфалерит обогащен Cd и, в меньшей степени, In; спорадически в его составе появляется примесь Cu (табл. 1). В полях развития сфалерита располагаются очаговые или прожилковидные выделения пирита (рис. 3 б, в),

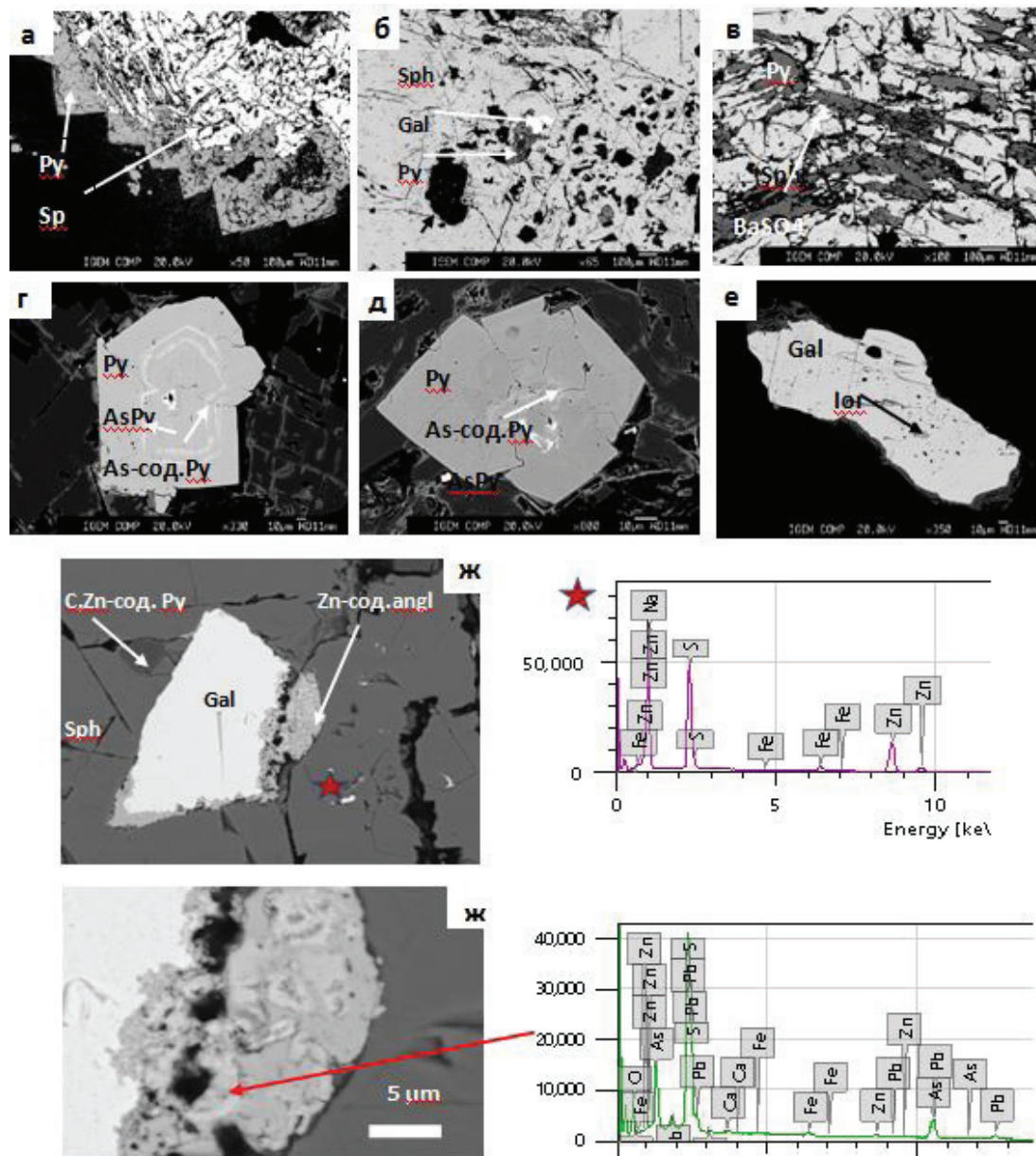


Рис. 3. Сульфидная минерализация в метасоматитах: а – кристаллическое обрамление Py вокруг крупного выделения сфалерита; б, в – пирит-сфалеритовые срастания (б – очаговые и в – прожилковидные выделения Py в сфалерите); г, д – кристаллы пирита, обогащенные мышьяком; е – сульфосоли свинца в галените; ж – включение чизлевайта (красная звездочка) в сфалерите; ж₁ – замещение галенита его окисленными формами: сульфатами Pb и Zn

Fig. 3. Sulfide mineralization in metasomatites: a – crystalline framing of Py around a large sphalerite precipitate; б, в – pyrite-sphalerite accretions (б – focal and в – veined Py precipitates in sphalerite); г, д – pyrite crystals enriched in arsenic; е – lead sulfosol in galena; ж – inclusion of chislewhite (red star) in sphalerite; ж₁ is the substitution of galena by its oxidized forms: Pb and Zn sulfates

Таблица 1. Химический состав сульфидных минералов, РСМА, мас. %
 Table 1. Chemical composition of sulphide minerals, EPMA, wt. %

№№ п/п	As	Fe	Cu	Sb	Zn	S	Σ	Формулы
Пирит FeS ₂								
1	9.70	41.32	0.57	0.04		46.43	98.11	(Fe _{0.95} Cu _{0.01}) _{0.96} (As _{0.17} S _{1.87}) _{2.04}
2	0.03	45.96	0.00	0.01		53.58	99.61	Fe _{0.99} S _{2.01}
3	2.26	43.83	0.33	0.33		51.06	97.88	(Fe _{0.97} Cu _{0.01}) _{0.98} (As _{0.04} S _{1.97}) _{2.01}
4	0.26	45.76	0.02	0.00		52.81	98.90	Fe _{0.99} S _{1.99}
5	9.98	41.42	0.92	0.03		46.07	98.47	(Fe _{0.96} Cu _{0.02}) _{0.98} (As _{0.17} S _{1.85}) _{2.02}
6	0.15	45.42	0.05	0.04		53.03	98.76	Fe _{0.98} S _{2.00}
7	0.39	45.37	0.02	0.00		53.23	99.08	Fe _{0.98} (As _{0.01} S _{2.01}) _{2.02}
8	0.68	45.63	0.09	0.00		52.86	99.32	Fe _{0.99} (As _{0.01} S _{2.00}) _{2.01}
9	0.28	45.59	0.00	0.01		53.36	99.28	Fe _{0.99} S _{2.01}
10	0.04	45.62	0.01	0.00		53.42	99.17	Fe _{0.99} S _{2.01}
11	0.01	46.07	0.00	0.00		53.12	99.25	Fe _{1.00} S _{2.00}
12	0.32	45.67	0.06	0.00		52.95	99.05	Fe _{0.99} (As _{0.01} S _{2.00}) _{2.01}
13	0.08	45.51	0.00	0.01		52.84	98.49	Fe _{0.99} S _{2.01}
14	0.02	46.09	0.01	0.03		53.45	99.64	Fe _{0.99} S _{2.00}
15	4.76	43.76	0.39	0.05		49.97	99.00	(Fe _{0.97} Cu _{0.01}) _{0.98} As _{0.08} S _{1.93}
16	–	42.76	1.25	–	1.56	54.43	100.00	(Fe _{0.92} Zn _{0.03} Cu _{0.02}) _{0.97} S _{2.04}
Арсенопирит FeAsS								
	As	Fe	S				Σ	Формулы
17	40.71	36.26	22.89				100.11	Fe _{1.02} As _{0.85} S _{1.12}
18	35.85	37.24	29.51				102.74	Fe _{0.97} As _{0.69} S _{1.33}
Галенит PbS								
	Ag	Sb	Bi	Pb	S		Σ	
19	0.00	0.04	0.17	85.97	13.43		99.61	PbS
20	0.07	0.19	0.05	85.88	13.38		99.60	PbS
Сфалерит ZnS								
	Fe	Zn	Cu	Cd	In	S	Σ	Формулы
21	1.13	64.60	0.02	0.16	0.06	32.65	98.73	Zn _{0.98} Fe _{0.02} S _{1.01}
22	13.63	51.04	0.01	0.06	0.07	33.18	98.15	Zn _{0.76} Fe _{0.24} S _{1.00}
23	0.75	65.17	0.00	0.26	0.08	32.55	98.86	Zn _{0.99} Fe _{0.01} S _{1.01}
24	13.86	50.71	0.01	0.14	0.04	33.29	98.17	Zn _{0.75} Fe _{0.24} S _{1.01}
25	3.10	62.59	0.02	0.32	0.07	32.38	98.50	Zn _{0.95} Fe _{0.06} S _{1.00}
26	1.40	64.29	0.00	0.07	0.04	32.65	98.53	Zn _{0.97} Fe _{0.03} S _{1.01}
27	1.95	63.98	0.00	0.09	0.08	32.72	98.87	Zn _{0.96} Fe _{0.03} S _{1.00}
28	4.08	61.93	0.25	0.17	0.05	32.89	99.51	Zn _{0.92} Fe _{0.07} S _{1.00}
29	3.47	61.83	0.00	0.18	0.09	33.04	98.68	Zn _{0.93} Fe _{0.06} S _{1.01}
30	2.72	63.03	0.00	0.24	0.07	32.98	99.12	Zn _{0.95} Fe _{0.05} S _{1.01}
Иорданит Pb ₁₄ As ₆ S ₂₃								
	As	Sb	Bi	Pb	Ag	S	Σ	Формулы
31	10.09	1.08	0.28	69.94	0.13	17.57	99.12	(Pb _{14.07} Sb _{0.37} Bi _{0.06} Ag _{0.05}) _{14.55} As _{5.61} S _{22.84}

так что эти минералы образуют тесное срастание между собой. Кроме того, в сфалерите закономерно выделяются микровключения барита (рис. 3 в), галенита (рис. 3 б), ферросульфида Na и Zn, предположительно, чизлевайта (см. рис. 3 ж), (Каплунник, 1988; Качаловская, 1988), и мелкие просечки или очаговые выделения гидроксидов железа (рис. 3 б).

Пирит – второй по значимости минерал сульфидов. Он присутствует во вмещающей породе в двух позициях: 1 – в тесном срастании со сфалеритом, как описано выше; 2 – в виде одиночных кристаллов в карбонатах (рис. 3 г, д). Кроме того, пирит часто окаймляет, сложенные сфалеритом очаговые образования, образуя красивые кристаллические обрамления вокруг них (рис. 3 а). В первом случае (в крупных выделениях) химический состав пирита близок к стехиометрическому, в то время как в небольших включениях в сфалерите в состав пирита входят Zn и Cu (табл. 1). Во втором случае (одиночные кристаллы пирита в карбонатной матрице в срастании с арсенопиритом) кристалл пирита обогащен мышьяком, причем распределение As в пирите имеет зональный характер (рис. 3 г, д): в центральной части кристаллов располагаются ксеноморфные выделения арсенопирита (табл. 1), ближе к периферии, отмечаются тонкие прослой As-содержащего пирита (As-сод. Py), повторяющие грани роста материнского кристалла. Такое строение кристалла наглядно отражает последовательность кристаллизации вещества при остывании рудного флюида: арсенопирит – As-сод. пирит – пирит.

Галенит содержится в породе в небольшом количестве (содержание Pb по данным РФА составляет 0.62 %, что значительно меньше, чем содержание Fe и Zn), но, тем не менее, играет заметную роль в сульфидной минерализации. Он преимущественно выделяется в виде микровключений в сфалерите, реже встречается в виде одиночных кристаллов во вмещающей породе (рис. 3 е, ж).

Химический состав минерала близок к стехиометрическому, однако в нем присутствуют примеси Bi, Sb и Ag (табл. 1). В некоторых случаях в качестве микровключений в нем отмечаются сульфосоль свинца – иорданит (рис. 3 е, табл. 1). Галенит частично замещается сульфатами свинца и цинка – англезитом и Zn-сод. англезиитом, образующими вокруг зерен галенита оторочки с раздувами, в которых выделяются сульфоарсениды свинца (рис. 3 ж). Эти минеральные образования не имеют четких границ.

Выводы

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

- 1 – в зоне метасоматически измененных пород вблизи габбродолеритовой дайки развита как оксидная (в карбонатах), так и сульфидная (в кварц-карбонатных образованиях) минерализация;
- 2 – оксидная минерализация представлена оксидами и гидроксидами железа, марганца, цинка и натрия, причем в центральных зонах рудных прожилков образуется гетеролит (ZnMn_2O_4);
- 3 – сульфидная минерализация преимущественно представлена сульфидами Zn, Fe, Pb и их окисленными формами (сульфатами свинца и цинка), причем сульфиды содержат в себе в виде микропримесей такие элементы как Sb, Bi, Ag;
- 4 – особенностью рудной минерализации является наличие гидроксидов Na, наряду с таковыми Fe, Mn и Zn, а также присутствие в сульфидах редкого ферросульфида Na – чизлевайта, что свидетельствует о том, что рудоносный флюид был обогащен натрием.

Литература

1. Григорьева А. В., Сидорова Н. В., Волков А. В. Оловосодержащий халькопирит полиметаллических руд Скалистого рудопоявления (Центральный Таймыр) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2023. № 20. С. 336–342. <https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.04>.
2. Григорьева А. В., Волков А. В., Проскурнин В. Ф. Минералогия руд Суровоозерского Pb-Zn рудного узла (Таймыр, Арктическая зона России) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2024. № 21. С. 68–75. <https://doi.org/10.31241/FNS.2024.21.009>.
3. Каплунник Л. Н., Петрова И. В., Победимская Е. А., Качаловская В. М., Осипов Б. С. Кристаллическая структура природного щелочного сульфида хвилевайта $\text{Na}(\text{Cu,Fe,Zn})_2\text{S}_2$. Представлена акад. Жариковым В. А. // Доклады АН. 1988. Т. 310. С. 90–93.

4. Качаловская В. М., Осипов Б. С., Назаренко Н. Г., Кукоев В. А., Мазмакян В. О., Егоров И. Н., Каплун-ник Л. Н. Чвилевайт – новый сульфид щелочного металла состава $\text{Na}(\text{Cu,Fe,Zn})_2\text{S}_2$ // Записки РМО. 1988. Т. 17, № 2. С. 204–207.
5. Любимцева Н. Г., Бортников Н. С., Борисовский С. Е. Осцилляторная зональность теннантита – (Fe) золоторудного месторождения Дарасун (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62, № 3. С. 195–223.
6. Аникина Е. Ю., Бортников Н. С. Полосчатые и ритмично-зональные карбонатные жилы месторождения Прогноз (Саха-Якутия, Россия): результатсамоорганизующихся процессов // Доклады РАН. 2020. Т. 495, № 2. С. 28–35.
7. Проскурнин В. Ф., Петров О. В., Гавриш А. В. и др. Раннемезозойский пояс карбонатитов полуострова Таймыр // Литосфера. 2010. № 3. С. 95–102.
8. Wang Y., Merino E. Dynamic model of oscillatory zoning of trace elements in calcite: Double layer, inhibition, and selforganization // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1992. V. 56. № 2. P. 587–596.