



Научная статья

УДК 550.4:550.8

<https://elibrary.ru/ranysc>

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211>

Стадийность формирования рудной зоны Холоднинского колчеданно-полиметаллического месторождения

Ю.И. Тарасова^а, А.Е. Будяк^б

^{а,б}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^{а,б}Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме. Холоднинское колчеданно-полиметаллическое месторождение (Байкало-Патомское нагорье, Россия) открыто в 1968 г., но до настоящего момента вопросы его генезиса остаются дискуссионными. Предполагается, что эксплозивная деятельность вулканических аппаратов южной части Байкало-Муйской зоны, а также подводные эксгаляции зоны рассеянного спрединга задугового бассейна с большой вероятностью могли оказывать влияние на геохимические особенности амагматических отложений Бодайбинской и Патомской зон. Для исследований влияния подводной гидротермальной деятельности на геохимические особенности неопротерозойских углеродсодержащих осадков Байкальской горной области была выбрана Олоkitская зона, являющаяся фрагментом спрединговой зоны задугового бассейна. Согласно геохимическим параметрам, отложения итыkitской и ондокской свит, вмещающих Холоднинское месторождение, попадают в область осадконакопления палеобассейнов дальнетайгинского времени. Проведенное сопоставление развития сульфидной минерализации рудных объектов Бодайбинской и Олоkitской структурно-формационных зон позволяет сделать предположение о единстве процессов формирования месторождений в пределах Байкальской горной области. Наличие фрамбоидального пирита указывает на то, что ранние этапы формирования руд Холоднинского гидротермально-стратиформного полиметаллического месторождения являлись синхронными с осадконакоплением. Источником обогащения рудной зоны месторождения цинком, свинцом, серебром и другими элементами, свойственными для низко- и среднетемпературных ассоциаций, являлся гидротермальный раствор зоны рассеянного спрединга задуговых бассейнов. Вероятно, эксплозивная и эксгаляционная деятельности южной Байкало-Муйской зоны в пределах исследуемого региона имела распространение и дальше в северном направлении, тем самым оказывая влияние на формирование сидерохалькофильной геохимической специализации амагматических черносланцевых толщ Бодайбинской и Патомской зон.

Ключевые слова: колчеданно-полиметаллические руды, Байкало-Муйская зона, Олоkitская зона, Холоднинское месторождение

Финансирование: Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по проекту IX.130.3.1 (№ 0284-2021-0001). Работа осуществлена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск).

Для цитирования: Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Стадийность формирования рудной зоны Холоднинского колчеданно-полиметаллического месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 201–211. <https://elibrary.ru/ranysc>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211>.

Original article

Formation stages of the Kholodninskoye pyrite-polymetallic deposit ore zone

Yulia I. Tarasova^а, Alexander E. Budyak^б

^{а,б}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{а,б}A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The Kholodninskoye pyrite-polymetallic deposit (Baikal-Patom plateau, Russia) was discovered in 1968, but the questions of its genesis still remain controversial. It is assumed that the explosive activity of volcanic apparatuses of the southern part of the Baikal-Muya zone as well as underwater exhalations of the scattered spreading zone of the back-arc basin could have most likely influenced the geochemical features of amagmatic deposits of the Bodaibo and Patom zones.

© Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., 2023



To investigate the influence of underwater hydrothermal activity on the geochemical features of Neoproterozoic carbon-bearing sediments of the Baikal Mountain region, the Olokit zone, which is a fragment of the spreading zone of the back-arc basin, was chosen. According to the geochemical parameters, the sediments of the Itykit and Ondokskaya formations hosting the Kholodninskoye deposit fall into the sedimentation area of DalnyaTaiga period paleobasins. Having compared the development of sulfide mineralization of ore objects of the Bodaibo and Olokit structural-formation zones, the authors suggest the unity of deposit formation processes within the Baikal Mountain area. The presence of framboidal pyrite indicates that the early stages of ore formation of the Kholodninskoye hydrothermal-stratiform polymetallic deposit were synchronous with sedimentation. The source of deposit ore zone enrichment with zinc lead, silver and other elements typical for low- and medium-temperature associations was a hydrothermal solution of the scattered spreading zone of back-arc basins. It is likely that the explosive and exhalation activities of the southern Baikal-Muya zone within the studied region also spread further northward, thus influencing the formation of siderochalcophilic geochemical specialization of amagmatic black shale strata of the Bodaibo and Patom zones.

Keywords: pyrite-polymetallic ores, Baikal-Muya zone, Olokit zone, Kholodninskoye deposit

Funding: The study was carried out as a part of the implementation of the state assignment under the project IX.130.3.1 (no. 0284-2021-0001). The research employed the scientific equipment of the Multiple-Access Center "Isotopic-Geochemical Studies" of the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (Irkutsk).

For citation: Tarasova Yu.I., Budyak A.E. Formation stages of the Kholodninskoye pyrite-polymetallic deposit ore zone. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):201-211. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ranysc>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-201-211>.

Введение

Холоднинское колчеданно-полиметаллическое месторождение, открытое в 1968 г. геологами Бурятского филиала Томского государственного университета, до настоящего момента остается недоизученным с точки зрения генезиса объекта. Согласно проведенному анализу фондовых материалов [1, 2] и статей в периодических изданиях [3–6 и многие другие], посвященных как изучению непосредственно Холоднинского полиметаллического месторождения, так и литолого-геохимической зональности отложения всего Байкало-Патомского палеобассейна в общем и Олоkitской структуры в частности, реконструируется последовательный ряд обстановок осадконакопления, соответствующих задуговому бассейну [7]. В предложенной схеме задуговой бассейн состоит из трех основных частей: из прибрежного шельфа (Патомская зона) – отложений, расположенных севернее Тонодского и Нечерского поднятий, из зоны глубоководного дистального шельфа (Бодайбинская зона) – центральной части Бодайбинского синклиория, а южнее (Муйская зона) – непосредственно из островодужной системы [7–9]. Высказано мнение о том, что эксплозивная деятельность вулканических аппаратов южной части Байкало-Муйской зоны, а также подводные эксгаляции зоны рассеянного спрединга задугового бассейна с большой вероятностью могли оказывать влияние на геохимические особенности амагматических отложений

Бодайбинской и Патомской зон. Для исследования влияния подводной гидротермальной деятельности на геохимические особенности неопротерозойских углеродсодержащих осадков Байкальской горной области была выбрана Олоkitская зона, являющаяся фрагментом спрединговой зоны задугового бассейна. По геохимическим параметрам отложения итыkitской и ондокской свит, вмещающих Холоднинское месторождение, попадают в область осадконакопления дальнетайгинского времени, отложения которого в пределах Бодайбинского района вмещают все известные крупные месторождения золота. При этом геохимический фон отложений дальнетайгинского стратоевня в пределах Байкальской горной области характеризуется халькосидерофильной геохимической специализацией [4].

Принимая во внимание единую структуру, в которую входили Олоkitская, Бодайбинская и Патомская зоны, можно предположить единство процессов формирования рудной минерализации месторождений в пределах данной территории. Таким образом, было выдвинуто предположение, что рудная специфика в пределах рудных объектов всех трех зон имела единый источник полезного компонента, а эволюция минералообразования протекала по однотипному сценарию, связанному с общей для всех историей геодинамической эволюции региона. В данной статье приводятся результаты изучения последовательности ми-



нералообразования Холоднинского месторождения Олоkitской структуры.

Материалы и методы исследования

Холоднинское месторождение находится на севере Прибайкалья и приурочено к юго-восточному крылу Олоkitской структурно-металлогенической зоны. Вмещающими являются интенсивно дислоцированные углеродисто-слюдистые сланцы ондокской свиты верхнепротерозойского возраста. Метаморфизм пород соответствует зеленосланцевой фации (рис. 1).

Рудная зона представляет собой стратиформные колчеданные и колчеданно-полиметаллические залежи, смятые в диагональном направлении совместно с вмещающими их породами. Главными рудными минералами в рудах Холоднинского полиметаллического месторождения являются сфалерит, галенит, пирит, халькопирит, пирротин; реже установлены арсенопирит, тенантит, тетраэдрит, бурнонит, самородное золото, рутил.

Аналитические исследования химического состава пород и руд проводились в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии

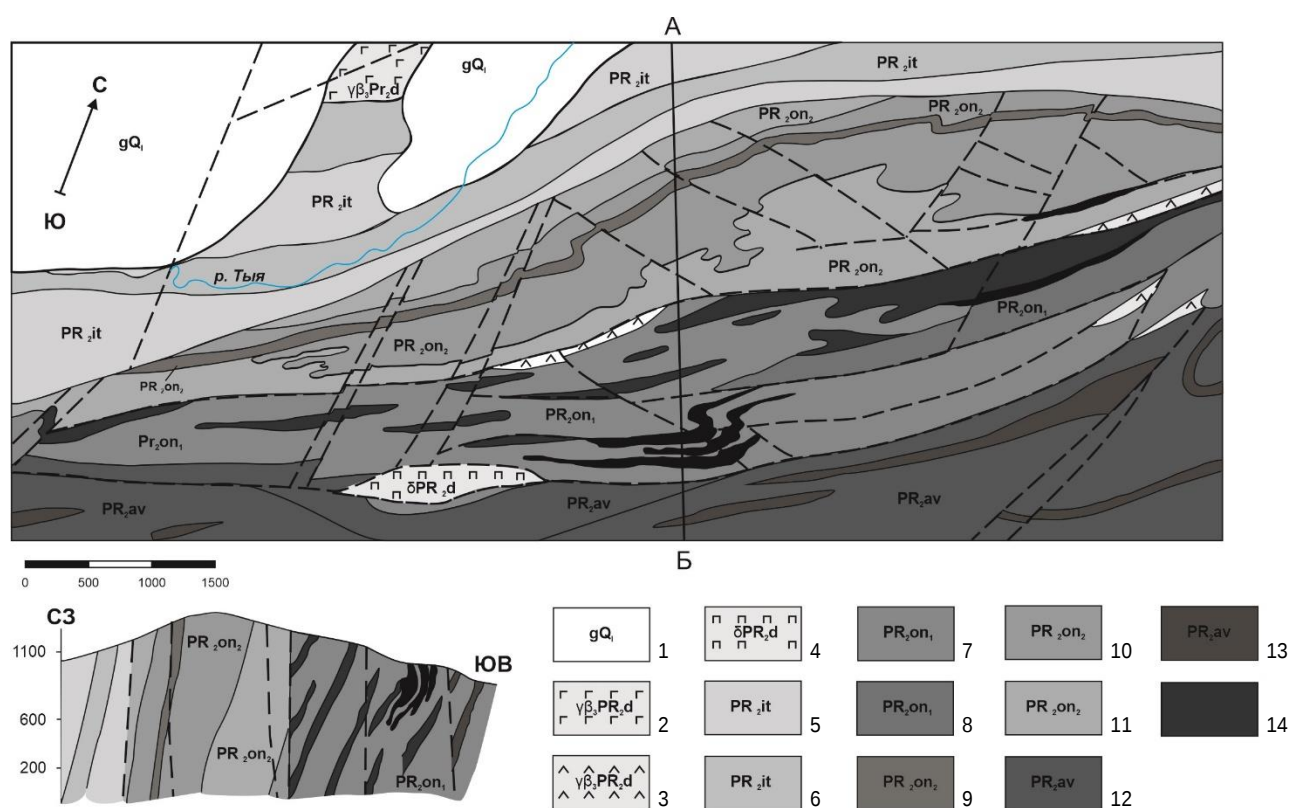


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Холоднинского месторождения [3]:

1 – четвертичные отложения: среднее звено, ледниковые валуны, глыбы, галечники; 2–4 – Давыренский интрузивный комплекс: 2 – третья фаза, габбро, 3 – третья фаза, габбро-диабазы, 4 – первая фаза, апоперидотиты; 5, 6 – итыkitская свита: 5 – кристаллические известняки, 6 – филлитовидные и углистые сланцы; 7–11 – ондокская свита: 7 – гранатсодержащие графит-слюдисто-кварцевые сланцы, 8 – слюдистые кварциты, 9 – графит-слюдисто-кварцевые сланцы, 10 – графит-карбонат-слюдисто-кварцевые сланцы, 11 – графит-слюдисто-известковые метасоматиты; 12–14 – авkitская свита: 12 – гранатсодержащие слюдисто-кварцевые сланцы, 13 – метаморфизованные известняки, 14 – кварц-слюдисто-карбонатные метасоматиты с гранатом

Fig. 1. Schematic geological map of the Kholodninskoye deposit [3]:

1 – Quaternary sediments: middle part, glacial boulders, blocks, pebbles; 2–4 – Davyren intrusive complex: 2 – the third phase, gabbro, 3 – the third phase, gabbro-diorites, 4 – the first phase, apoperidotites; 5, 6 – Itykit formation: 5 – crystalline limestones, 6 – phyllite and carbonaceous shales; 7–11 – Ondokskaya formation: 7 – garnet-bearing graphite-mica-quartz schists, 8 – micaceous quartzites, 9 – graphite-mica-quartz schists, 10 – graphite-carbonate-mica-quartz schists, 11 – graphite-mica-calcareous metarocks; 12–14 – Aukit formation: 12 – garnet-bearing mica-quartz schists, 13 – metamorphosed limestones, 14 – quartz-mica-carbonate metasomatites with garnet



им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск). Подготовка материала осуществлялась на анализаторе фрагментов микроструктуры твердых тел «Минерал С7» с линией пробоподготовки в Межрегиональном научно-образовательном центре «Байкал» (г. Иркутск).

Состав минералов и включений был получен с помощью сканирующего микроскопа TESCAN MIRA 3LMU с системами микроанализа Aztec Energy XMax 50+ в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. Ускоряющее напряжение составляло 20 кэВ, размер зонда – 5 нм.

Изотопный анализ серы проводился в Лаборатории стабильных изотопов в Приморском аналитическом центре локального элементного и изотопного анализа Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток) с применением локального лазерного метода с использованием фемтосекундного комплекса лазерной абляции NWR Femto [10, 11].

Результаты исследования

С целью восстановления стадийности формирования месторождений Олоkitской структуры были проведены исследования рудной минерализации Холоднинского месторождения. Визуально руды характеризуются переменными соотношениями таких минералов, как пирит, сфалерит и галенит, которые образуют слойки, чередующиеся с прослойками вмещающих сланцев мощностью от долей сантиметра до 10 см (рис. 2).

Пирит установлен в виде четырех разно-

видностей. Пирит-1 отмечается в рудах довольно редко, представлен фрамбоидами, встречающимися в виде рассеянной вкрапленности или образующими скопления округлой формы (рис. 3). Также в скоплениях отмечаются идиоморфные кристаллы пирита-2. Пирит-2 корродирует кристаллы пирита-1. В составе таких агрегатов и концентрически-зональных скоплениях отмечаются галенит и сфалерит, развивающиеся в центральной части агрегатов или заполняющие межзерновое пространство между фрамбоидами пирита.

Пирит-3 наиболее часто устанавливается в рудных образцах и представляет собой ориентированные пойкило-гранобластовые агрегаты. При травлении этих агрегатов выявляются реликты пирита-1 и пирита-2 в виде самостоятельных редких зерен (рис. 4) или почковидных и зональных образований. Пирит-3 встречается в сростаниях со сфалеритом, галенитом, халькопиритом, кварцем и карбонатами. Отмечаются как сростания с единичными кристаллами перечисленных минералов, так и совместные сростания всей минеральной ассоциации.

Пирит-4 развит в рудах незначительно и образует равномерную вкрапленность крупных (0,8–3 мм) зерен в полях галенита и сфалерита, образующих шариковые руды. Крупные зерна имеют идиоморфные очертания с округлыми границами. Зерна пирита-4 по краям содержат цепочки закономерно ориентированных включений сфалерита, нередко содержат направленные или изометричные включения галенита.



Рис. 2. Полосчатые (а) и массивные (b) руды Холоднинского месторождения
Fig. 2. Banded (a) and massive (b) ores of the Kholodninskoye deposit



Рис. 3. Фрамбуидальный пирит
Fig. 3. Framboidal pyrite

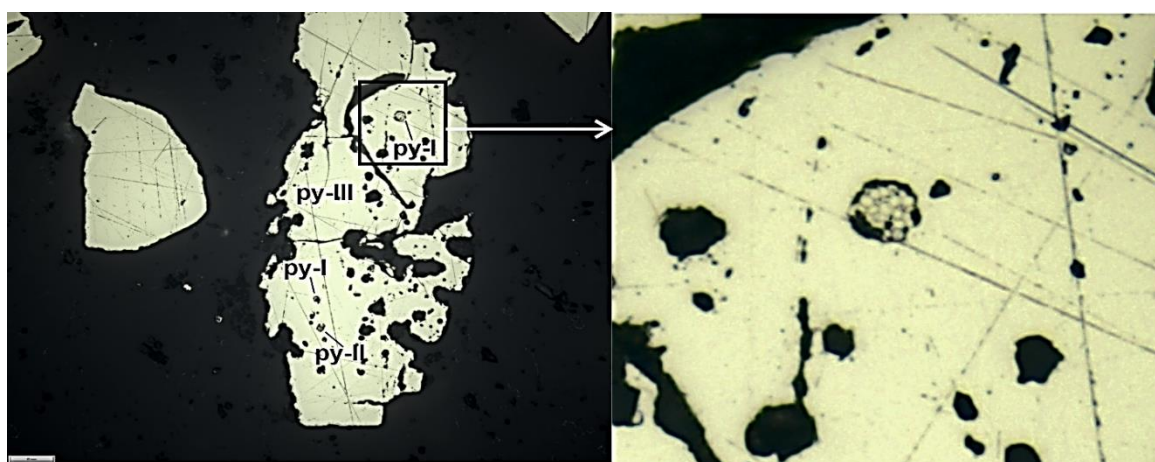


Рис. 4. Реликты пирита-1 и пирита-2 в агрегате пирита-3
Fig. 4. Relicts of pyrite-1 and pyrite-2 in the pyrite-3 aggregate

Состав пирита изучен с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой при содействии лазерной абляции и характеризуется рядом типоморфных особенностей. В пирите установлены примеси меди, серебра, свинца, никеля, кобальта, цинка, мышьяка, золота, таллия и бария (таблица).

Сфалерит представлен двумя разновидностями. Сфалерит-1 развит весьма незначительно и ассоциирует с пиритом-1. Он образует глобулы размером 0,01–0,02 мм, как правило, с оторочкой поперечно-волокнистого графита или выполняет центральные части или отдельные зоны концентрически-зональных и колломорфных образований сульфидов. Глобулы сфалерита совместно с пиритом-1 и пиритом-2 образуют совместные скопления округлой формы. Реликты сфалерита-1 установлены в более крупных агрегатах пирита-3 и сфалерита-2.

Сфалерит-2 образует гнезда размером 0,1–2 мм в ассоциации с пиритом-3, галенитом и халькопиритом. В некоторых зернах сфалерита наблюдается эмульсионная вкрапленность халькопирита, иногда с галенитом. Границы сростаний сфалерита-2 с пиритом-3 ровные и слабо корродированные (рис. 5), с галенитом и халькопиритом – существенно коррозионные.

Халькопирит также представлен двумя морфологическими разновидностями. Халькопирит-1 обнаружен в виде характерной мелкой рассеянной эмульсионной вкрапленности в сфалерите, а также в виде крупных вытянутых выделений, развивающихся по периферии зерен сфалерита-2. Халькопирит-2 – в виде крупных изометричных агрегатов, часто вытянутой формы. Крупные зерна развиваются совместно с рудной ассоциацией, представленной пирротинитом, пиритом-3, сфалеритом-2, галенитом, теннантитом.



Состав сульфидов Холоднинского месторождения, ppm Composition of Kholodninskoye deposit sulfides, ppm

Элемент	Минерал					
	Py-1,2	Py-3	Py-4	Gln	Cpy	Sp
V	22,9 0,2 – 32	23,33 0,04 – 32	16,12 0,12 – 32	23,36 0,11 – 32	24,1 0,42 – 32	25,77 0,86 – 32
Cr	410,14 0,74 – 352	322 0,42 – 992	67,13 1,95 – 640	1188,7 8 – 19520	212,64 3,52 – 800	535,87 3,52 – 2240
Fe	33951 68152 – 74200	26982 10070 – 100700	26121 12720 – 53000	12761,31 9,88 – 53000	53120 15680 – 150400	10009,6 2368 – 22720
Co	27,23 12,19 – 53	6,08 0,21 – 14,84	3,68 0,21 – 11,66	6,91 0,27 – 24,91	32 32 – 32	25,85 1,25 – 32
Ni	30,54 4,19 – 201,4	7,66 1,06 – 53	11,79 1,17 – 53	10,68 0,12 – 53	16,88 6,08 – 29,76	20,84 0,54 – 32
Cu	36,35 0,93 – 487,6	5,54 1,48 – 42,93	4,84 1,64 – 11,66	8,94 0,66 – 58,3	19360 16640 – 22080	20,93 7,04 – 64
Zn	34,22 2,6 – 201,4	33,07 1,17 – 530	89,41 5,25 – 530	30,35 2,08 – 201,4	150,4 108,8 – 208	136960 118400 – 147200
Ga	39,42 0,27 – 53	47,27 0,08 – 53	41,79 0,10 – 53	13,78 0,12 – 53	24,22 0,9 – 32	8,72 0,54 – 32
Ge	22,54 0,51 – 53	10,26 0,22 – 53	4,67 0,36 – 53	11,52 0,02 – 53	17,44 2,62 – 32	26,01 2,05 – 32
As	76,14 7,95 – 169,6	56,2 7,95 – 238	43,23 7,95 – 95,4	43,29 2,08 – 392,2	16,64 15,04 – 19,84	16,06 5,44 – 38,4
Ag	1,61 Н. о. – 7,95	3,82 0 – 169,6	2,47 0 – 20,14	266,3 3,55 – 699,4	158,16 11,52 – 278,4	70,68 1,57 – 320
Sn	0,22 Н. о. – 1,01	0,17 0 – 1,38	0,21 0 – 1,38	4,45 0,06 – 14,04	10,8 7,04 – 15,68	3,08 Н. о. – 9,6
Sb	10,66 Н. о. – 68,37	7,49 0 – 50,35	12,49 0 – 50,35	188,82 18,02 – 492,7	11,91 0,61 – 41,6	55,04 Н. о. – 156,8
Ba	4,43 Н. о. – 31,27	0,98 0 – 9,33	1,79 0 – 9,33	1,93 0 – 12,67	1,83 0 – 3,23	1,25 Н. о. – 5,76
W	0,02 Н. о. – 0,39	0,01 0 – 0,36	Н. о.	0,1 0 – 0,64	Н. о.	Н. о.
Hg	Н. о.	0,33 Н. о. – 7,05	Н. о.	0,23 Н. о. – 5,14	7,7 Н. о. – 13,12	17,41 Н. о. – 36,8
Pb	103,68 0,39 – 837,4	85,6 0,19 – 874	289,87 101,23 – 874,5	143653,4 1293,2 – 224900	326,63 1,73 – 1248	32409,28 14,4 – 160000
Bi	0,08 0,01 – 0,28	0,03 0,02 – 0,65	0,06 0,01 – 0,65	196,84 0 – 448	0,1 0,06 – 0,42	26,75 0,06 – 133,76
Au	0,04 Н. о. – 0,16	0,05 Н. о. – 0,21	0,04 Н. о. – 0,19	0,02 Н. о. – 0,13	0,04 Н. о. – 0,18	0,14 Н. о. – 0,35

Примечание. Py – пирит, Gln – галенит, Cpy – халькопирит, Sp – сфалерит. Содержания приведены в следующем порядке: в числителе – среднее арифметическое, в знаменателе – диапазон. Н. о. – ниже предела обнаружения.

Галенит формирует крупные аллотриоморфные выделения на контакте с агрегатами сфалерита, пирротина. Агрегаты галенита часто имеют вытянутую форму. В виде включений в галените отмечается пирротин, повторяя морфологию галенита.

Пирротин представлен в виде интерстициальных выделений на границе зерен пирита-3, халькопирита-2, сфалерита-2, галенита. В результате диагностического травления в пир-

ротинных агрегатах выявляются мелкие кубические кристаллики пирита-2, равномерно расположенные в пределах агрегата.

Обсуждение полученных результатов

При изучении рудной минерализации была установлена следующая последовательность образования минералов: на ранней стадии в осадочных толщах были сформированы

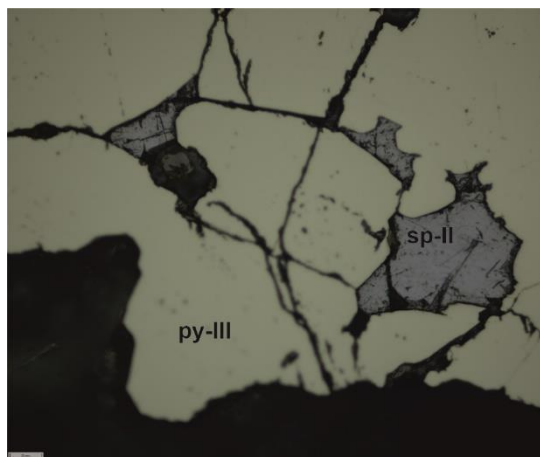


Рис. 5. Включения сфалерита в пирите-3
Fig. 5. Sphalerite inclusions in pyrite-3

микросталлы пирита-1 и пирита-2, образующие сферические агрегаты, близодновременно с ними формировались аналогичные образования сфалерита-1 (рис. 6). Такие выделения пирита-1 и пирита-2 можно отнести к первично образовавшимся из коллоидных растворов, но в дальнейшем претерпевшим частичную перекристаллизацию. Позже при процессах повышения температуры и давления происходило замещение пирита пирротинном с последующей кристаллизацией пирита-3, галенита, халькопирита и сфалерита-2 при постепенном снижении температуры. Формирование пирита-4 происходило при условиях, отличающихся от прерудной и собственно рудной стадий формирования месторождения. Таким образом, при формировании рудной минерализации в пределах Олоkitского прогиба предполагается как минимум три стадии:

1. Стадия поступления гидротермального флюида, обогащенного среднетемпературными халькофильными элементами (свинец, цинк, серебро, сурьма, в меньшей мере золото), в результате чего в области разгрузки гидротермального флюида формируется эксгалляционно-осадочное месторождение.

2. Стадия метаморфического воздействия, которое приводит к перераспределению полезного компонента с отложением рудной минерализации на регрессивном этапе метаморфизма.

3. Пострудная стадия, связанная с наложенными геодинамическими событиями, вероятно, оторванными во времени от основной рудной стадии формирования. На данной стадии происходит формирование пирита-4, не

несущего рудной нагрузки.

Пирит является минералом, образование последовательно сменяющих друг друга генераций которого связано с разными стадиями формирования месторождения. Соответственно, изменение условий отражалось и на характеристиках разновидностей пирита.

Анализ данных о составе генераций пирита позволил выявить ряд типоморфных особенностей:

1. Выделенные разновидности пирита имеют близкие величины отношения серы и железа, однако наблюдается тенденция к увеличению этого отношения от пирита-1 к пириту-4 (см. таблицу).

2. К главной типоморфной особенности пирита следует отнести вариации содержания кобальта и никеля и их отношения. Для пирита-1, пирита-2 и пирита-3 характерно сопоставимое содержание никеля с кобальтом (соотношение кобальта и никеля колеблется в пределах 0,7–1). В пирите-3 содержание кобальта и никеля снижается более чем в пять раз, при этом отношение кобальта и никеля остается в тех же значениях, что и для пирита-1 и пирита-2. В пирите-4 отношение кобальта и никеля снижается до 0,3. Возросшее содержание никеля предполагает изменение *РТ*-условий формирования, что возможно при геодинамической активизации региона, повлекшей за собой метаморфические преобразования. Предложенная последовательность формирования рудной минерализации Холоднинского месторождения не противоречит представлениям о формировании Байкальской горной области [4, 12–20].



ГЕОС, 1999. 163 с.

9. Станевич А.М., Советов Ю.К., Корнилова Т.А., Галушкина И.О. Микрофоссилии и биотопы позднего протерозоя Присяня (Восточная Сибирь) // Новости палеонтологии и стратиграфии. 2006. Т. 47. № 9. С. 9–19.

7. Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 729–747. <https://elibrary.ru/mktvod>.

10. Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Budnitskiy S.Y., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V. and Levitskii V.I., 2018. Precision analysis of multisulfur isotopes in sulfides by femtosecond laser ablation GC-IRMS at high spatial resolution // Chemical Geology. 2018. Vol. 493. P. 316–326. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.06.006>.

11. Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V. An improved femtosecond laser-ablation fluorination method for measurements of sulfur isotopic anomalies ($\Delta^{33}\text{S}$ and $\Delta^{36}\text{S}$) in sulfides with high precision // Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2019. Vol. 33. Iss. 22. P. 1722–1729. <https://doi.org/10.1002/rcm.8528>.

12. Chugaev A.V., Chernyshev I.V. Pb-Pb isotopic systematics of orogenic gold deposits of the Baikal-Patom folded belt (Northern Transbaikalia, Russia) and assessment of the role of the Neoproterozoic crust in their formation // Geochemistry International. 2017. Vol. 55. P. 1010–1021. <https://doi.org/10.1134/S0016702917110040>.

13. Дубинина Е.О., Иконникова Т.А., Чугаев А.В. Неоднородность изотопного состава серы пирита на месторождении Сухой Лог и определяющие ее факторы // Доклады Академии наук. 2010. Т. 435. № 6. С. 786–790. <https://elibrary.ru/ncawex>.

14. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A. [et al]. Indicator and isotope geochemical characteristics of iron sulfides from the Golets Vysochaishy deposit, East Siberia // Geology of Ore Deposits. 2022. Vol. 64. P. 503–512. <https://doi.org/10.1134/S1075701522070108>.

15. Chang Z., Large R.R., Maslennikov V., Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: evidence for an early timing and a seawater sulfur source // Geology. 2008. Vol. 36. Iss. 12. P. 971–974. <https://doi.org/10.1130/G25001A.1>.

16. Конкин В.Д., Донец А.И., Ручкин Г.В. Минералогическо-геохимические типы и региональные геологические особенности стратиформных свинцово-цинковых месторождений в карбонатных толщах // Отечественная геология. 2018. № 4. С. 52–62. <https://elibrary.ru/kuvrgt>, <https://doi.org/10.24411/0869-7175-2018-10005>.

17. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Gold Province, Russia // Economic Geology. 2007. Vol. 102. Iss. 7. P. 1233–1267. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>.

18. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et al. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasnyi gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // Ore Geology Reviews. 2020. Vol. 119. P. 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>.

19. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Горячев Н.А., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Блинов А.В. [и др.]. Типоморфизм сульфидов золоторудного месторождения Угхан (Байкало-Патомское нагорье) // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. 2022. Т. 503. № 1. С. 12–17. <https://elibrary.ru/eojdko>, <https://doi.org/10.31857/S2686739722030136>.

20. Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Плотинская О.Ю., Новоселов К.А., Масленников В.В., Котляров В.А. [и др.]. Эволюция состава пирита на золоторудных месторождениях Копыловское и Кавказ в черносланцевых толщах (Бодайбинский район, Россия) по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 1. С. 71–92. <https://elibrary.ru/tgwayx>, <https://doi.org/10.7868/S0016777015010025>.

References

1. Bogdanov Yu.A., Lisitsyn A.P., Sagalevich A.M., Gurvich E.G. *Hydrothermal ore genesis of the ocean floor*. Moscow: Nauka; 2006. 527 p. (In Russ.).

2. Distanov E.G., Kovalev K.R., Ponomarev V.G. Genetic features of the pyrite-polymetallic mineralization of the Northern Baikal region. In: *Geologiya i poleznye iskopayemye v polose BAM Severnogo Pribaikal'ya = Geology and mineral resources in the Baikal-Amur Mainline belt of Northern Baikal region*. Moscow: Nauka; 1983, p. 33–37. (In Russ.).

3. Ruchkin G.V., Donets A.I. Hydrogenic generation concept of ore-forming systems of stratiform lead-zinc deposits in carbonate strata. In: *Fundamental'nye problemy geologii mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh i metallogenii: trudy XXI Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya akad. V.I. Smirnova = Fundamental problems of mineral deposit geology and metal-*

logeny: proceedings of the 21st International scientific conference devoted to the 100th birth anniversary of the Academician V.I. Smirnov. 26–28 January 2010, Moscow. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 2010, p. 93–106. (In Russ.).

4. Budyak A.E., Skuzovatov S.Y., Tarasova Y.I., Wang K.L., Goryachev N.A. Common Neoproterozoic – early paleozoic evolution of ore-bearing sedimentary complexes in the southern Siberian craton. *Doklady Akademii nauk*. 2019;484(3):335-339. (In Russ.). <https://elibrary.ru/mimdqw>, <https://doi.org/10.31857/S0869-56524843335-339>.

5. Dobrovolskaya M.G., Eremin N.A. Metamorphism and the time of the lead-zinc ores formation in the Kholodninskoe deposit (North-Pribaikal area). *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Research*. 2010;1:30-35. (In Russ.). <https://elibrary.ru/lkyfdv>.



6. Rytsk E.Yu., Shalae V.S., Rizvanova N.G., Krymskii R.Sh., Makeev A.F., Rile G.V. Olokit zone of the Baikal folded region: new isotopic-geochronological and petrogeochemical data. *Geotektonika*. 2002;1:29-41. (In Russ.). <https://elibrary.ru/hltnhi>.

8. Konnikov E.G., Tsygankov A.A., Vrublevskaya T.T. *Baikal-Muya volcano-plutonic belt: structural-material complexes and geodynamics*. Moscow: GEOS; 1999. 163 p. (In Russ.).

9. Stanevich A.M., Sovetov Yu.K., Kornilova T.A., Galushkina I.O. Late Proterozoic microfossils and biotopes adjacent to the Sayan area (East Siberia). *Novosti paleontologii i stratigrafii*. 2006;47(9):9-19. (In Russ.).

7. Nemerov V.K., Stanevich A.M., Razvozhayeva E.A., Budyak A.E., Kornilova T.A. Biogenic sedimentation factors of mineralization in the Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(5):729-747. (In Russ.). <https://elibrary.ru/mktvod>.

10. Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Budnitskiy S.Y., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V. and Levitskiy V.I., 2018. Precision analysis of multisulfur isotopes in sulfides by femtosecond laser ablation GC-IRMS at high spatial resolution. *Chemical Geology*. 2018;493:316-326. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.06.006>.

11. Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V. An improved femtosecond laser-ablation fluorination method for measurements of sulfur isotopic anomalies ($\Delta^{33}\text{S}$ and $\Delta^{36}\text{S}$) in sulfides with high precision. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2019;33(22):1722-1729. <https://doi.org/10.1002/rcm.8528>.

12. Chugaev A.V., Chernyshev I.V. Pb-Pb isotopic systematics of orogenic gold deposits of the Baikal-Patom folded belt (Northern Transbaikalia, Russia) and assessment of the role of the Neoproterozoic crust in their formation. *Geochemistry International*. 2017;55:1010-1021. <https://doi.org/10.1134/S0016702917110040>.

13. Dubinina E.O., Ikonnikova T.A., Chugaev A.V. Heterogeneity of the sulfur isotopic composition of pyrite at the Sukhoi Log deposit and its controlling factors. *Doklady Akademii nauk*. 2010;435(6):786-790. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ncawex>.

14. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., et al. In-

dicator and isotope geochemical characteristics of iron sulfides from the Golets Vysochaishy deposit, East Siberia. *Geology of Ore Deposits*. 2022;64:503-512. <https://doi.org/10.1134/S1075701522070108>.

15. Chang Z., Large R.R., Maslennikov V., Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: evidence for an early timing and a seawater sulfur source. *Geology*. 2008;36(12):971-974. <https://doi.org/10.1130/G25001A.1>.

16. Konkin V.D., Donets A.I., Ruchkin G.V. Mineralogical-geochemical types and regional geological special characteristic of stratiform carbonate-hosted lead-zinc deposits. *Otechestvennaya geologiya = National Geology*. 2018;4:52-62. (In Russ.). <https://elibrary.ru/kuvrgt>, <https://doi.org/10.24411/0869-7175-2018-10005>.

17. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Gold Province, Russia. *Economic Geology*. 2007;102(7):1233-1267. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>.

18. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et al. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasnyi gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*. 2020;119:103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>.

19. Tarasova Y.I., Budyak A.E., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Blinov A.V., et al. Typomorphism of pyrite from the Ugakhan gold deposit (Baikal-Patom highlands). *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o zemle*. 2022;503(1):12-17. (In Russ.). <https://elibrary.ru/eojdko>, <https://doi.org/10.31857/S2686739722030136>.

20. Palenova E.E., Belogub E.V., Plotinskaya O.Y., Novoselov K.A., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., et al. Chemical evolution of pyrite at the Kopylovsky and Kavkaz black shale-hosted gold deposits, Bodaybo district, Russia: evidence from EPMA and LA-ICP-MS data. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2015;57(1):71-92. (In Russ.). <https://elibrary.ru/tgwayx>, <https://doi.org/10.7868/S0016777015010025>.

Информация об авторах / Information about the authors



Тарасова Юлия Игоревна,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник департамента рудной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
заведующая Лабораторией геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
✉ j.tarasova84@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8741-9645>



Yulia I. Tarasova,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Department of Ore Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Head of the Laboratory of Ore Formation Geochemistry
and Geochemical Methods of Exploration,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
✉ j.tarasova84@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8741-9645>



Будяк Александр Евгеньевич,

кандидат геолого-минералогических наук,
руководитель департамента рудной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
заместитель директора по научной работе,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
budyak@igc.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0814-2583>

Alexander E. Budyak,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Department of Ore Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Deputy Director for Science,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
budyak@igc.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0814-2583>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 23.05.2023; одобрена после рецензирования 07.06.2023; принята к публикации 23.06.2023.

The article was submitted 23.05.2023; approved after reviewing 07.06.2023; accepted for publication 23.06.2023.