УДК 551.441.(571.65)

СЕРЕБРО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ПЕРЕВАЛЬНОЕ ДУКАТСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (БАЛЫГЫЧАНО-СУГОЙСКИЙ ВУЛКАНОПРОГИБ, СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)

© 2025 г. Н. Е. Савва[a], *, А. В. Волков[b], **

[a]*Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, ул. Портовая, 16, Магадан, 685000 Россия*
[b]*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия*
**e-mail: nsavva7803@mail.ru*
***e-mail: tma2105@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.12.2024 г.
После доработки 14.01.2025 г.
Принята к публикации 18.02.2025 г.

Впервые рассмотрены геолого-структурные и минералого-геохимические особенности серебро-полиметаллического месторождения Перевальное (северо-восток России). Месторождение расположено на северо-восточном фланге Дукатского рудного поля в центральной части Балыгычано-Сугойского рифтогенного вулканопрогиба, сформировавшегося синхронно со структурами Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП). Месторождение залегает на периферии вулкано-купольного поднятия и локализовано в крупной субвулканической дайке позднемеловых порфировых риолитов (невадитов) на глубине 140–160 м от поверхности. Наиболее богатая минерализация контролируется коленообразными перегибами дайки. Основное количество серебра в рудах связано, главным образом, с Ag-тетраэдритом и фрейбергитом. Кроме того, существенная доля серебра обусловлена пираргиритом, самородным серебром, акантитом и сернистым аналогом жеффруаита ($(Ag, Cu, Fe)_9(Se, S)_8$). Незначительная часть серебра связана с редкими (для данных руд) минералами – пруститом, аргентопиритом и минералами изоморфного ряда ленаит ($AgFeS_2$) – халькопиритом. Главная минералогическая особенность руд – широкое развитие крупночешуйчатого мусковита и рутила, присутствие родонита, анатаза, циркона и лейкоксена. Среди карбонатов преобладают сидерит и родохрозит. Для месторождения Перевального установлено двухэтапное рудообразование – телескопированное наложение высокотемпературных грейзенов (позднего этапа) на серебро-полиметаллические руды (раннего этапа) с отчетливыми признаками термометаморфизма последних и связанных с этим природным обогащением Ag. Грейзенизация и поступление высокотемпературных растворов, по-видимому, связаны с внедрением поздней фазы не вскрытого интрузивного массива. Результаты минералогических исследований позволяют отнести Ag-полиметаллическое месторождение Перевальное, как и другие месторождения Омсукчанской металлогенической зоны к промежуточно-сульфидизированному классу эпитермальных месторождений.

Ключевые слова: северо-восток России, Охотско-Чукотский вулканогенный пояс Балыгычано-Сугойский рифтогенный вулканопрогиб, Дукатское рудное поле, Перевальное серебро-полиметаллическое месторождение, грейзены, титановая минерализация

DOI: 10.31857/S0203030625030024, **EDN:** PYUMXD

ВВЕДЕНИЕ

Месторождение Перевальное было открыто в 1980 г. в процессе поискового бурения на уголь, проводившегося Дукатской ГРЭ. В скважинах на глубине 140–160 м от поверхности выявлена богатая серебро-полиметаллическая минерализация.

Месторождение Перевальное расположено в Омсукчанском районе Магаданской области, в 30 км от райцентра – пос. Омсукчан (рис. 1, врезка) в 8 км от центрального участка Дукатского золотосеребряного месторождения.

Лицензия на право разведки и добычи рудного серебра, свинца, цинка и меди на месторождении Перевальное принадлежит ЗАО “Серебро Магадана”, аффилированному с АО “Полиметалл”. Балансовые запасы месторождения категории C_2 для подземной отработки составили: руда – 1092 тыс. т, Ag – 426 т, Cu – 3.65 тыс. т, Zn – 23.73 тыс. т, Pb –25.06 тыс. т, при средних содержаниях: Ag – 389 г/т, Cu – 0.33%, Zn – 2.17%, Pb – 2.29%.

Главная цель настоящей статьи – анализ новых геолого-структурных и минералого-геохимических данных, полученных в результате изучения месторождения Перевальное и уточнение на этой основе модели рудообразования.

На основе анализа и обобщения фондовых материалов подготовлен раздел “Геологическое строение месторождения”. Минеральный состав руд изучен в отраженном и проходящем свете с использованием оптического микроскопа Axioplan Imagin фирмы Carl Zeis. Химический состав минералов и руд определялся в Северо-Восточном центре коллективного пользования СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан. Составы рудных минералов получены

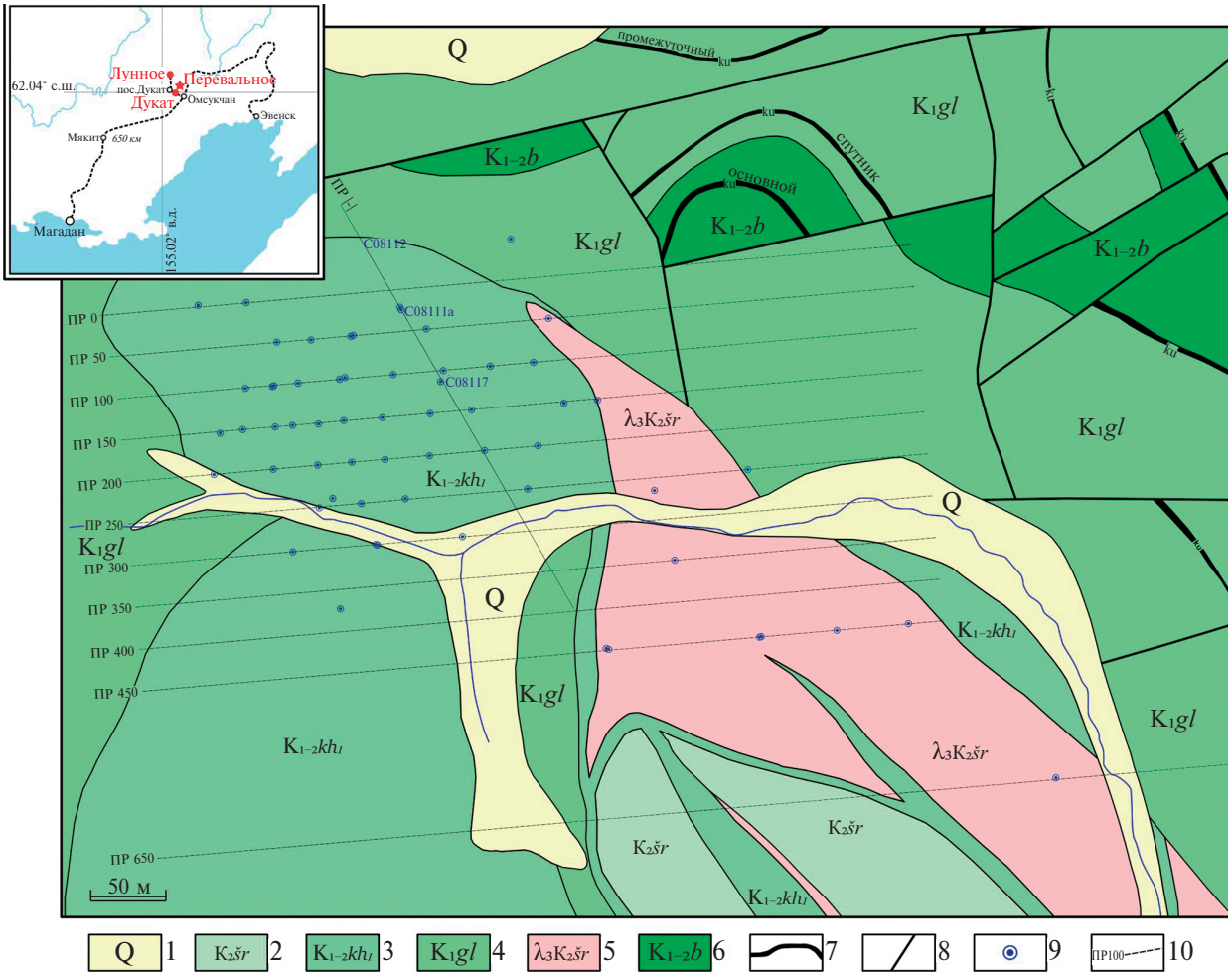

Рис. 1. Геологический план рудного поля месторождения Перевальное (данные В.И. Зайцева, “Полиметалл УК”, 2010).
1 – четвертичные отложения (галечники, пески, валунники); 2 – шороховская свита, кристаллокластические игнимбриты риолитов; 3 – каховская свита, нижняя подсвита, андезиты; 4 – омсукчанская серия, галимовская свита, алевролиты и аргиллиты с прослоями каменных углей; 5 – позднемеловой шороховский субвулканический комплекс, дайки риолитов (невадитов); 6 – Быстринский интрузивный комплекс, силлы диоритовых порфиритов; 7 – пласты каменных углей; 8 – тектонические нарушения; 9 – буровые скважины; 10 – линии буровых профилей и их номера.

с помощью рентгеновского электронно-зондового микроанализатора Camebax с приставкой INCA Oxford Instruments (аналитик Е.М. Горячева).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение Перевальное расположено в центральной части Балыгычано-Сугойского рифтогенного вулканопрогиба, сформировавшегося синхронно со структурами Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Прогиб вытянут в меридиональном направлении на 350 км при ширине 15–20 км в северной и до 60 км в южной части и сложен осадочно-вулканогенными породами мелового возраста, которые несогласно залегают на геосинклинальных отложениях Верхоянского комплекса, представленными морскими осадочными породами триас-юрского возраста.

Месторождение Перевальное, площадью 0.7 км^2, располагается на внешнем обрамлении северо-восточного фланга Дукатского рудного поля, контролируемого одноименным интрузивно-купольным поднятием, в 8 км от его центра, и структурно совпадает с зоной Кэнского магмоконтролирующего разлома, вдоль которого внедрилась крупная субвулканическая дайка порфировых риолитов – невадитов (см. рис. 1).

В геологическом строении месторождения принимают участие терригенные и вулканогенные толщи мелового возраста, прорванные интрузивными и субвулканическими телами кислого и среднего составов ранне–позднемелового и позднемелового возрастов (см. рис. 1).

Отложения нижней подсвиты галимовской свиты (K_1*gl*) слагают большую часть площади месторождения и представлены переслаивающимися алевролитами и песчаниками с редкими прослоями гравелитов, конгломератов и аргиллитов с пластами угля различной мощности. Угольные пласты приурочены, главным образом, к слоям алевролитов, реже к тонкозернистым углефицированным песчаникам, частично инъецируются силлами диоритовых порфиритов. Мощность подсвиты свыше 500 м.

Каховская свита (K_{1-2}*kh*) широко распространена в западной части месторождения, сложена андезитами, их кластолавами и туфами, залегает на породах галимовской свиты с угловым и стратиграфическим несогласием. Мощность не превышает 150 м.

Отложения шороховской свиты (K_2*šr*) развиты в южной части, где они с размывом перекрывают вулканиты каховской свиты. Свита сложена игнимбритами риолитов. Мощность свиты более 100 м.

Магматические образования на площади месторождения представлены контрастной серией пород от основного до кислого состава и относятся к ранне–позднемеловому каховскому и позднемеловому шороховскому вулканоплутоническим комплексам. Рудовмещающие невадиты (λ_3K_2*šr*) представляют собой крупное субвулканическое дайкообразное тело, вытянутое в северо-западном направлении, размером 2.6×0.4 км с коленчатым строением (см. рис. 1, рис. 2). Эти образования прорывают отложения галимовской и каховской свит, а также субвулканическое тело афировых риолитов.

Тектоника. Основной структурно-тектонический элемент в геологическом строении месторождения – глубинный магмо- и рудоконтролирующий Кэнский разлом, прослеживающийся полосой сближенных субмеридиональных разрывов и контролирующий размещение ранне-позднемеловых интрузивных тел среднего состава и субвулканических тел невадитов. Породы галимовской свиты разбиты многочисленными разрывами сбросо-сдвигового характера преимущественно субмеридионального простирания.

В позднемеловых субвулканических телах наблюдаются крутопадающие зоны интенсивной трещиноватости северо-западного простирания с прожилково-вкрапленной сульфидной минерализацией, несущие серебро-полиметаллическое оруденение.

Гидротермально-метасоматические изменения пород проявлены в виде приразломных зон аргиллизации, преимущественно северо-западного простирания, прослеживающихся на значительные (до 1 км) расстояния при мощности до 20 м. Наиболее контрастно они проявлены в невадитах и афировых риолитах. В участках наиболее интенсивной тектонической проработки они представлены аргиллит-серицитовыми метасоматитами и сопровождаются ореолами прожилково-вкрапленной сульфидной

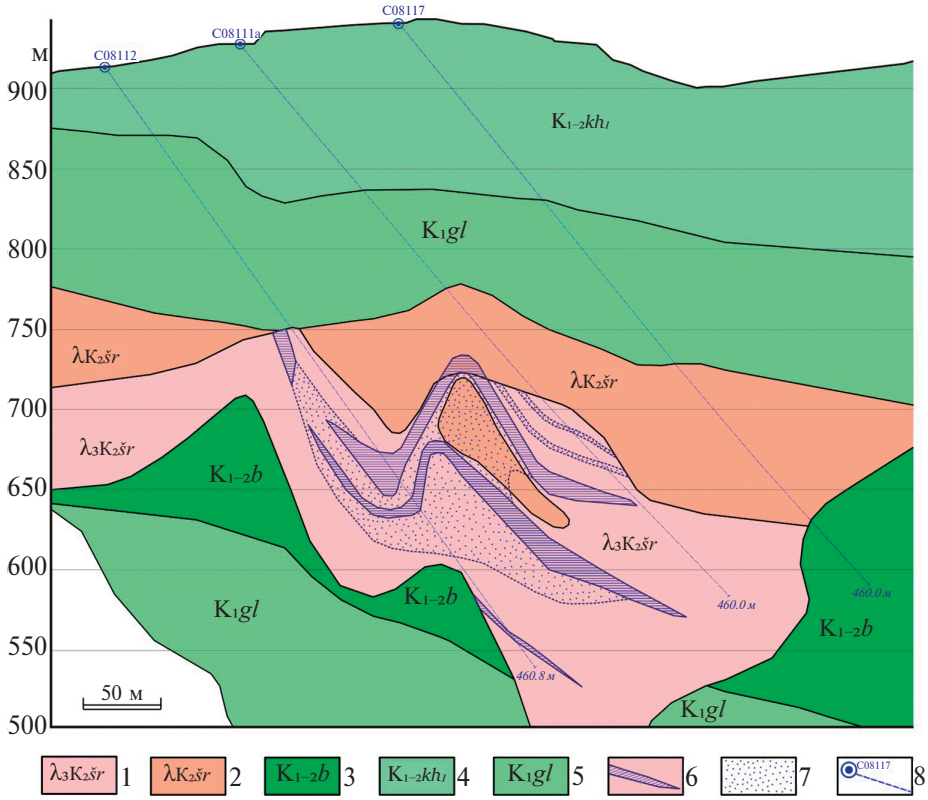

Рис. 2. Геологический разрез по результатам бурения (профиль № 14) месторождения Перевальное (данные В.И. Зайцева, “Полиметалл УК”, 2010).
1 – позднемеловой шороховский субвулканический комплекс, дайки невадитовых риолитов; 2 – шороховская свита, игнимбриты риолитов кристаллокластические; 3 – быстринский интрузивный комплекс, силлы диоритовых порфиритов; 4 – каховская свита, нижняя подсвита, андезиты; 5 – омсукчанская серия, галимовская свита, алевролиты и аргиллиты с прослоями каменных углей; 6 – тела сульфидно-сидерит-родохрозитовых метасоматитов с массивными сульфидными рудами; 7 – зоны вкрапленной сульфидно-полиметаллической минерализации; 8 – разведочные скважины и их номера.

(галенит, сфалерит, халькопирит) минерализации, несущей повышенные содержания серебра. Отмечается устойчивая корреляция содержаний серебра с количеством галенита в рудах.

ХАРАКТЕРИСТИКА РУДНЫХ ТЕЛ

В результате проведенных работ было выделено три не выходящих на дневную поверхность сближенных рудных тела (см. рис. 2). Рудные тела локализованы в крутопадающих трещинных структурах северо-западного простирания в теле дайки невадитов. Буровыми работами установлена сложная морфология рудных тел, которая по падению выражается в образовании коленчатых уступов, пережимов и перегибов до обратного падения, связанных с положением в разрезе дайки невадитов (см. рис. 2).

Рудные тела представляют собой участки с прожилково-вкрапленной сульфидной серебро-полиметаллической минерализацией, приуроченные к зонам серицит-кварцевых аргиллизитов по тектоническим брекчиям, катаклазитам и милонитам, развитым в приконтактовой части дайки невадитов (рис. 3). Степень насыщенности их сульфидами обычно от 1–3 до 20–30% объема. В отдельных телах встречаются интервалы мощностью до 4 м, где количество сульфидов возрастает до 30–60%, за счет чего они принимают облик метасоматических сульфидных жил с довольно резкими границами (см. рис. 3). Сульфидная минерализация развита в виде рассеянной вкрапленности мелких кристаллов, гнездовидных скоплений, просечек, линз и прожилков мощностью до 0.5 см. Сульфиды образуют как мономинеральные выделения, так и комплексные агрегаты.

В рудах преобладают прожилково-, гнездово- и мелковкрапленные текстуры. Гнездовые скопления сульфидов размером до 15 см располагаются в телах сидерита и родохрозита мощностью до

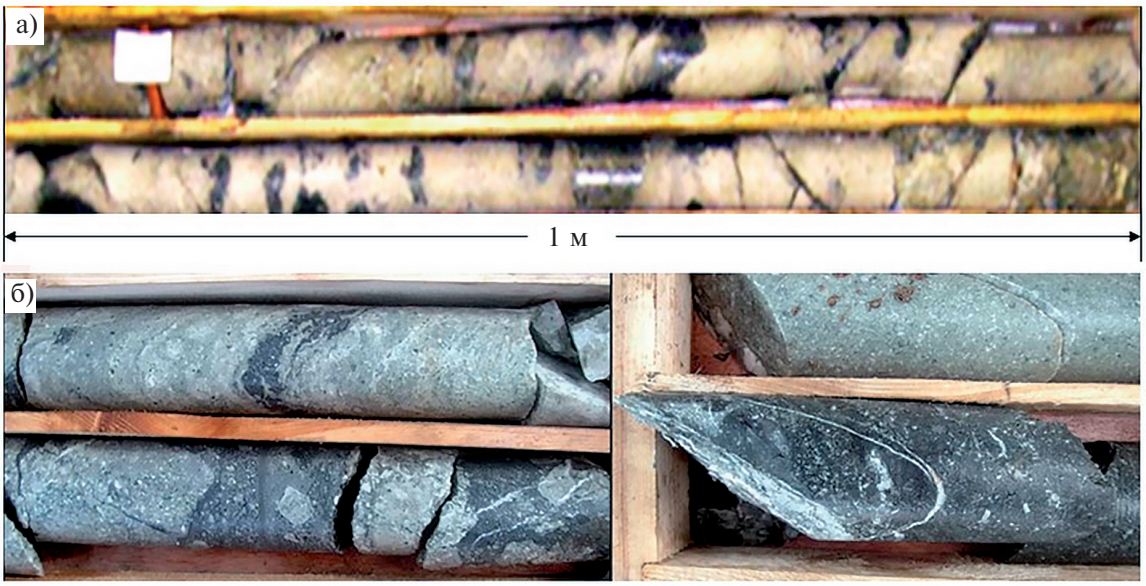

Рис. 3. Текстурные особенности руд месторождения Перевальное.
а – сульфидно-сидеритовая минерализация (скв. 08201, интервал 314.3–316.2); б – оруденелые брекчии невадитов с поздними прожилками кварца (скв. 08202, интервал 338.8–340).

4 м (см. рис. 3а). В брекчированных невадитах преобладает вкрапленная и густо вкрапленная минерализация, приуроченная к небольшим сульфидным линзам (см. рис. 3б). В отдельных телах встречаются интервалы мощностью до 4 м, где количество сульфидов возрастает до 30–60%.

Таким образом, рудные тела характеризуются сложной морфологией (см. рис. 2), имеют лентообразную с локальными раздувами и пережимами форму и небольшие размеры в плане. Простирание рудных тел северо-западное (330°–335°), ширина рудоносной полосы 40–60 м, протяженность 150–250 м. Как правило, не имеют четких геологических границ и выделяются по результатам опробования. Мощности рудных тел изменяются в пределах от 3.0 м до 14.0 м, размах промышленного серебряного оруденения по вертикали составляет 250–300 м. Средняя мощность установленных рудных тел колеблется в пределах 2.7–5.9 м. Протяженность этих рудных тел составляет: по простиранию – 150–250 м, по падению – 250–300 м. Содержания серебра внутри рудных тел изменяются от первых десятков г/т до первых кг/т с неравномерным распределением.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУД

Основные минералы руд месторождения – кварц, мусковит и гидрослюда с подчиненной ролью карбонатов – кальцита, родохрозита и сидерита (рис. 4). Состав руд по результатам количественного минералогического анализа (в классе содержаний серебра 500–1000 г/т) следующий: кварц – 34%, серицит (мусковит) – 17%, гидрослюда – 3%, хлорит – 3%, сидерит, родохрозит и кальцит – 3%, галенит – 8.5%, сфалерит – 12.1%, халькопирит – 3.3%, пирит – 0.8%, блеклые руды – до 1%. Остальные минералы относятся к разряду второстепенных и редких. Среди них определено 10 собственно серебряных минералов (данные АО “Полиметалл Инжиниринг”): фрейбергит, аргентотеннантит, аргентотетраэдрит, полибазит, пираргирит, прустит, серебро самородное, акантит, аргентопирит, хлориды серебра и семь минеральных видов, в которых серебро присутствует в виде изоморфной примеси – галенит, сфалерит, халькопирит, пирит, борнит, тетраэдрит, теннантит. Минеральный состав руд месторождения Перевальное приведен в табл. 1.

Основной полезный компонент руд – серебро, в качестве попутных компонентов выступают медь, цинк и свинец. На долю серебра приходится 58% потенциальной ценности руды. Полиметаллы имеют подчиненное значение: свинец и цинк (по 16%) и медь (около 10%). Кроме того, по данным анализов небольшого числа групповых проб, проведенных в 1980-х гг., в руде содержание олова не превышает 0.01%,

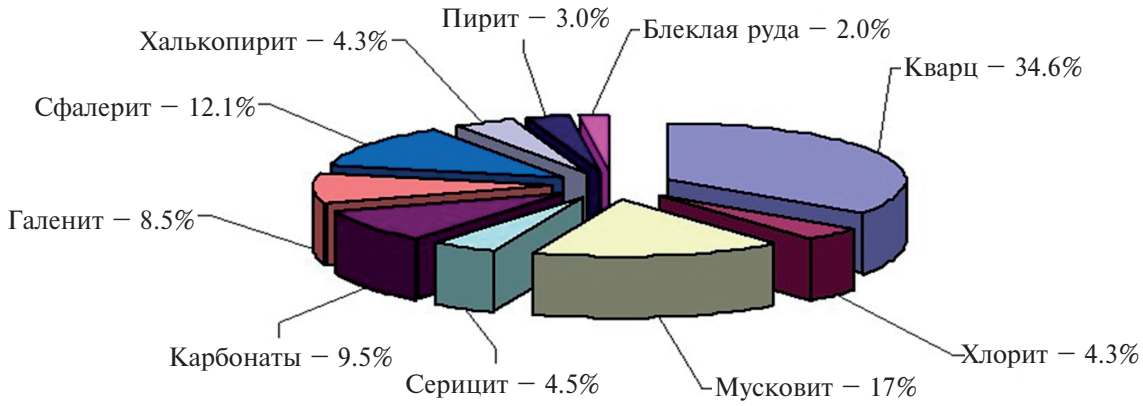

Рис. 4. Соотношения рудных минералов месторождения Перевальное по результатам минералогического анализа (данные АО "Полиметалл Инжиниринг", 2010 г.) с изменениями.

Таблица 1. Минеральный состав руд месторождения Перевальное по степени распространенности

Группы минералов	Главные	Второстепенные	Редкие
Жильные	Кварц Калишпат Сидерит Родохрозит Мусковит Серицит Рутил Анатаз	Родонит Лейкоксен Хлорит Каолинит	Циркон Аксинит? Эпидот
Рудные	Халькопирит Галенит Сфалерит Фрейбергит Пирит	Теннантит Ag-тетраэдрит Пираргирит Самородное серебро Марказит	Арсенопирит Леллингит Ленаит* Жеффруаит* Акантит Прустит Кубанит Станнин Полибазит Цугаруит $Pb_4(Co,As)_2S_7$

Примечание. * – минералы, выявленные в технологической пробе, АО "Полиметалл Инжиниринг", 2010 г.

сурьмы – 0.03%, содержание мышьяка варьирует в пределах 0.01–0.41% (среднее 0.1%).

Основное количество серебра в рудах связано, главным образом, с Ag-тетраэдритом (около 24% серебра) и фрейбергитом (более 33%). Кроме того, существенная доля серебра обусловлена пираргиритом, самородным серебром, акантитом и сернистым аналогом жеффруаита ($(Ag, Cu, Fe)_9(Se, S)_8$), доля каждого из перечисленных минералов в распределении серебра по 6–9%. Незначительная часть серебра связана с редкими (для данных руд) минералами – пруститом, аргентопиритом, минералами изоморфного ряда ленаит ($AgFeS_2$) – халькопиритом.

Кварц в технологической пробе присутствует в значительных количествах за счет большой доли невадитов, вмещающих вкрапленное оруденение. Также отмечаются отдельные прожилки кварца в самих невадитах и тонкие прожилки позднего кварца, секущего оруденелые участки.

Карбонаты слагают мощные тела (до 4 м) с гнездовыми скоплениями сульфидов. Среди карбонатов преобладает сидерит с небольшой долей родохрозита. Сидерит слагает желваки с изогнутыми краями, часто раздроблен и срастается с родохрозитом (рис. 5а, 5б). Прожилки позднего кварца пересекают ранее образованный карбонат (см. рис. 5в).

Мусковит широко распространен в карбонатно-сульфидных рудных скоплениях Минерал крупночешуйчатый (до 3–5 мм) (см. рис. 5д). В составе содержит Fe до 2 мас. %. Наложения мусковита на сульфиды образуют чрезвычайно красивые рисунки (см. рис. 5з).

Рутил и анатаз широко развиты и представлены скоплениями идиоморфных кристаллов размером до 0.5 мм (см. рис. 5е, 5ж, 5и), часто срастаются с рудными минералами. Рутил содержит Sn до 1.5 мас. %. В карбонатных раздувах наряду с рутилом и анатазом присутствует лейкоксен в виде белой мучнистой массы – лейкоксеновая “сыпучка”, как результат термометаморфизма оксидов Ti при грейзенизации.

Родонит встречается на участках развития сульфидов, в виде хорошо ограненных кристаллов, отлагается предположительно позже сульфидов (см. рис. 5г, видны скопления эмульсионного халькопирита в сфалерите вокруг кристаллов родонита).

Сфалерит – наиболее распространенный из рудных минералов, образует ксеноморфные скопления до 4–5 см и вкрапленность 0.5–2.5 мм. По облику и составу (табл. 2) можно

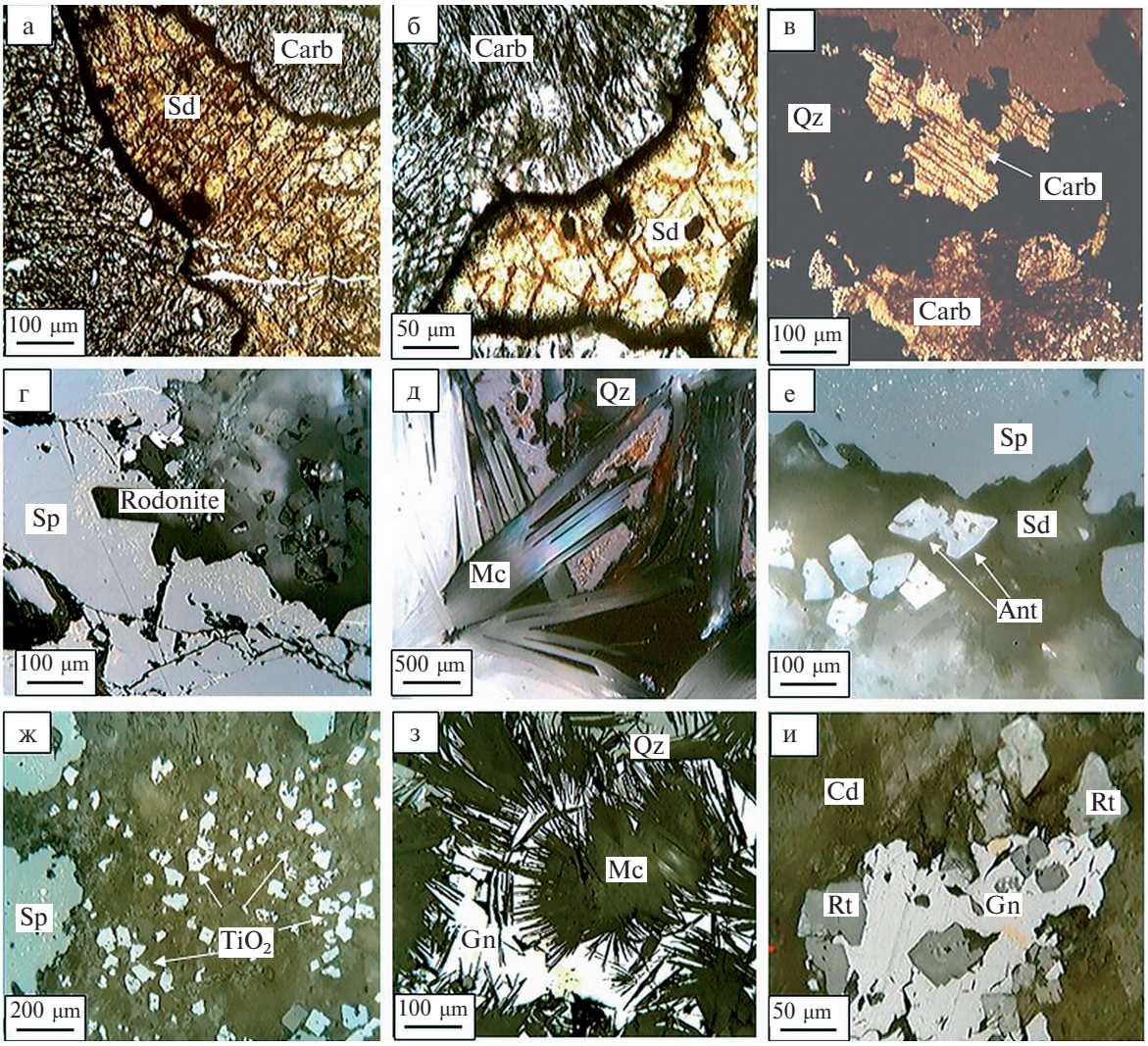

Рис. 5. Срастания жильных и рудных минералов.
а, б – формы выделения сидерита и родохрозита, в – поздний кварц корродирует карбонат (а, б – в проходящем свете; в – в отраженном); г – родонит корродирует сфалерит, в результате термометаморфизма вокруг родонита сгущается эмульсионная вкрапленность халькопирита; д – агрегат крупночешуйчатого мусковита с включениями самородного серебра в интерстициях (в проходящем свете); е – идиоморфные кристаллы анатаза в сидерите (серое сверху – сфалерит); ж – скопления рутила в сидерите; з – наложение мусковита при грейзенизации сульфидной руды; и – срастание рутила и анатаза с вкрапленником галенита в сидерите.

Таблица 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа основных минералов месторождения Перевальное

Концентрация элемента, мас. %							Σ	Формульные коэффициенты						
S	Fe	Cu	Zn	As	Ag	Sb		S	Fe	Cu	Zn	As	Ag	Sb
Блеклые руды														
Ранняя генерация Fhl-I *(теннантит–тетраэдрит)*														
25.03	1.03	34.03	9.54		3.13	27.13	100.42	13.07	0.31	8.96	2.44	0.00	0.49	3.73
25.18	1.37	35.69	6.27	2.22	3.35	26.81	100.89	13.03	0.41	9.32	1.59	0.49	0.52	3.65
28.38	4.5	39.51	3.86	19.46	5.07		100.79	13.14	1.20	9.23	0.88	3.86	0.70	0.00
28.27	4.44	39.14	3.7	19.32	4.5		99.37	13.23	1.19	9.24	0.85	3.87	0.63	0.00
25.59	11.6	24.66	4.94	7.41	13.51	15.53	103.24	12.71	3.31	6.18	1.20	1.57	1.99	2.03
Поздняя генерация Fhl-II *(Ag-теннантит, фрейбергит)*														
22.09	4.38	19.04	2.59	2.11	27.7	23.27	101.19	12.62	1.44	5.49	0.73	0.52	4.70	3.50
22.72	3.55	21.37	3.91	3.28	24.65	21.79	101.27	12.69	1.14	6.02	1.07	0.78	4.09	3.20
23.7	5.21	23.96	4.88		20.35	25.49	103.58	12.74	1.61	6.50	1.29	0.00	3.25	3.61
23.42	4.67	23.82	4.89	0.85	20.79	25.25	103.69	12.65	1.45	6.49	1.29	0.20	3.34	3.59
22.09	2.77	22.92	4.43		20.27	25.08	97.69	12.80	0.92	6.70	1.26	0.00	3.49	3.83
25.62	4.83	29.35	5.33	10.66	16.61	10.84	103.25	12.77	1.38	7.38	1.30	2.27	2.46	1.42
23.38	1.94	23.72	4.98	7.33	24.33	15.85	101.53	12.69	0.60	6.49	1.33	1.70	3.92	2.26
24.49	2.68	25.10	4.42	10.16	22.5	12.12	101.46	12.89	0.81	6.67	1.14	2.29	3.52	1.68
24.60	2.61	25.26	4.43	10.15	22.24	12.35	101.64	13.07	0.79	6.69	1.14	2.28	3.47	1.71
Основные сульфиды														
Халькопирит														
35.09	29.39	34.6	1.35	1.45	1.12	0.66	103.66	1.97	0.95	0.98	0.04	0.03	0.02	0.01
35.29	31.24	35.07	0.49				102.1	1.98	1.01	0.99	0.01			
35.29	30.73	34.74	0.9				101.66	1.99	1.00	0.99	0.02			
35.26	30.64	34.57	0.84				101.32	1.99	1.00	0.99	0.02			
33.84	30.16	33.56	1.05				98.61	1.97	1.01	0.99	0.03			
35.32	31.17	35.06					101.55	1.99	1.01	1.00				
35.76	31.04	34.9	0.5				102.19	2.00	1.00	0.99	0.01			
28.68	28.45	32.33					99.83	1.87	1.07	1.06				
34.06	29.86	33.47			2.77		101.15	1.98	0.99	0.98			0.05	
Арсенопирит														
19.51	35.57			47.09			102.17	0.97	1.02				1.01	
19.14	35.57			48.06			102.77	0.96	1.02				1.03	
20.66	35.66			44.19			101.31	1.03	1.02				0.94	
Леллингит														
0.34	26.32			70.25			97.91	0.02	1.00				1.98	
3.78	27.25			66.4			97.43	0.24	0.98				1.78	
0.3	26.68			69.46			97.43	0.02	1.01				1.97	

Галенит

Концентрация элемента, мас. %						Σ	Формульные коэффициенты					
S	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb		S	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb
12.96					86.89	99.86	0.98					1.02
13.30					87.17	100.47	0.99					1.01
13.16	0.62	1.1			86.16	101.04	0.96	0.03	0.04			0.97
13.00	0.94	1.22			85.17	100.33	0.95	0.04	0.05			0.96
12.91					86.79	99.70	0.98					1.02

Таблица 2. Окончание

12.82	0.5				86.74	100.9	0.92	0.02				0.96
13.19					86.25	99.45	0.99					1.01
12.83					86.65	99.48	0.98					1.02
12.88					86.4	99.28	0.98					1.02
12.94					87.04	99.98	0.98					1.02
Сфалерит												
Ранняя генерация – Sp-I												
33.5	1.49	1.2	64.41			100.6	1.01	0.03	0.02	0.95		
33.39	3.14	2.95	61.67	2.95		101.82	0.99	0.05	0.04	0.89	0.02	
33.3	1.02		63.32	2.24		99.89	1.02	0.02		0.95	0.02	
33.49	2.4	2.06	62.77			100.73	1.00	0.04	0.03	0.92		
33.6	2.97	2.56	62.54			101.67	1.00	0.05	0.04	0.91		
33.17	1.29	0.77	64.9			100.13	1.00	0.02	0.01	0.96		
Поздняя генерация – Sp-II												
33.21	0.7		66.02			99.93	1.01	0.01		0.98		
33.46	0.31		66.45			100.23	1.01	0.01		0.98		
33.48	0.28		65.46			99.22	1.02			0.98		

выделить две генерации сфалерита (Sp-I) – железистый с большим количеством эмульсионной вкрапленности халькопирита с примесями Fe от 1.5 до 3.1 мас. %; Cd до 2.3 мас. %; и безжелезистый (Sp-II) бесцветный и беспримесный (рис. 6а, 6б). В крупных скоплениях железистого сфалерита хорошо видна упорядоченность эмульсии халькопирита, что может свидетельствовать о его термометаморфизме (см. рис. 6в).

Галенит образует ксеноморфные выделения размером до 2–3 см и тесно срастается с блеклой рудой, халькопиритом и самородным серебром (см. рис. 6г, 6д, 6е). В отдельных случаях содержит включения станнина (см. рис. 6ж) и леллингита (см. рис. 6е). При наложении рутила отмечается текстура смятия и в галените (см. рис. 5и). Причем деформации, образуют извилистый рисунок не характерный для этого минерала. В составе содержит редкие примеси Fe и Cu (см. табл. 2).

Халькопирит – менее распространен, чем сфалерит и галенит. Образует ксеноморфные выделения 0.5–1.5 мм. Срастается с галенитом, сфалеритом, блеклой рудой, реже со станнином (см. рис. 5е, 5ж). В своем составе содержит редкие примеси As, Ag, Sb (см. табл. 2).

Арсенопирит и леллингит встречаются крайне редко в большинстве случаев образует гипидиоморфные выделения в галените, пирите, кубаните (см. рис. 6г, 6д, 6е). По составу близок к стехиометричному. В леллингите примесь серы достигает 3 мас. % (табл. 3).

Кубанит развит по трещинам катаклаза в сфалерите (см. рис. 6д), содержит включение леллингита (см. рис. 6д, табл. 3).

Блеклая руда – широко распространенный минерал в сульфидно-серебро-полиметаллических рудах. Выделения, как правило, ксеноморфны (см. рис. 6е–6и). Срастается с галенитом, сфалеритом и самородным серебром. По составу выделяется две генерации: ранняя – **Fah-I** и поздняя – **Fah-II** (см. табл. 2). Для ранней генерации это теннантит-тетраэдрит, в котором отмечается преобладание Zn над Fe, а концентрация Ag не превышает 5 мас. %. Для поздней это – фрейбергит и Ag-теннантит с концентрацией Ag от 16 до 27 мас. %, а соотношение Zn и Fe примерно 1:1 (см. табл. 2).

Самородное серебро – широко распространенный минерал в виде ксеноморфных выделений размером до 0.8 мм в ассоциации с халькопиритом и блеклыми рудами (теннантит,

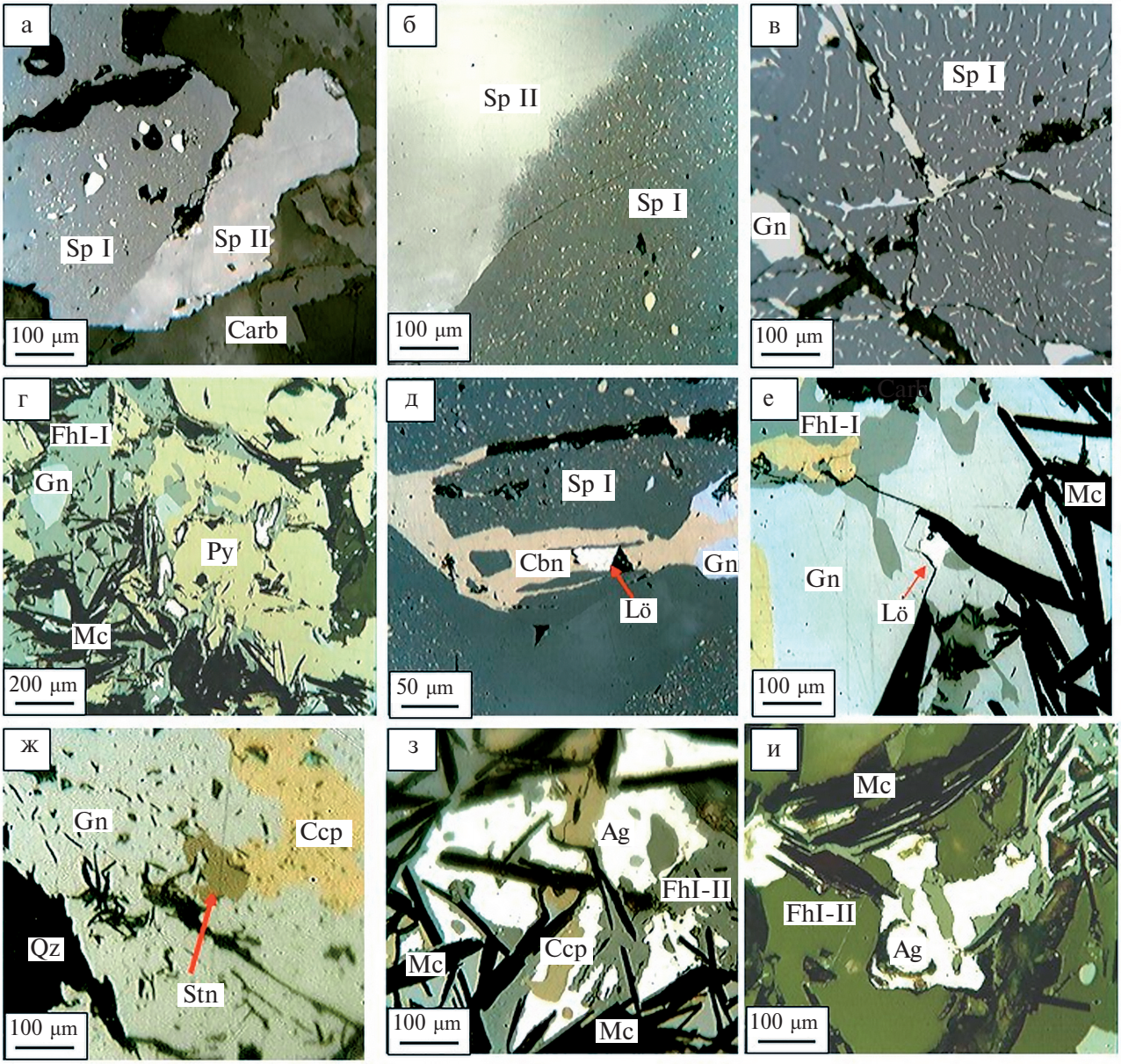

Рис. 6. Срастания рудных минералов.
а, б – срастания железистого и безжелезистого сфалерита; в – упорядочение эмульсионной вкрапленности в сфалерите; г – сложное срастание пирита, галенита и блеклой руды; д – поздний прожилок кубанита в срастании с леллингитом и галенитом пересекает сфалерит ранней генерации; е – включение леллингита в галените; ж – станнин включение в галенит-халькопиритовом минеральном агрегате; з, и – включения самородного серебра и высокосеребристой блеклой руды в интерстициях мусковита.

аргентотеннантит, тетраэдрит, фрейбергит) (см. рис. 6з, 6и).

Особый интерес представляют вкрапленники *циркона* в руде. Минерал содержит в своем составе примесь Ca до 2.0 мас. %. По огранке он также своеобразен – нет обрамлений тетрагональной пирамиды. Обладает некоторой пористостью и один край зерна оплавлен, содержит овальные включения кварца. По удлинению составляет около 200 μm (рис. 7). Срастается с марказитом, пиритом, халькопиритом и блеклой рудой. По данным микрорентгеноспектрального анализа (с плохой суммой) содержит: Si – 13.90; Ca – 2.29; Zr – 48.7; O – 40.19 мас. %.

Таблица 3. Результаты микрорентгеноспектрального анализа редко встречающихся минералов руд месторождения Перевальное

Концентрация элемента, мас. %								
S	**Sb**	**Ag**	**Fe**	**Co**	**Cu**	**As**	**Pb**	**Σ**
Кубанит								
5.32			40.73		23.92			99.98
Цугарит $Pb_4(Co, Fe, As)_2S_7$								
11.95			3.90	1.00		7.65	71.33	96.16
Полибазит нестехеомитричный $(Ag, Cu)_{16}(As, Sb)_2S_{11}$?								
13.38	7.35	78.65			3.39			102.77
12.24	7.39	79.83			1.06			100.52
14.15	7.18	78.87			2.01			102.21
14.38	5.69	79.63	0.41		1.87	0.90		102.63
Формульные коэффициенты полибазита								
9.60	1.39	16.8			1.23			
9.23	1.47	17.9			0.40			
10.1	1.35	16.8			0.73			
10.2	1.06	16.8			0.67	0.27		

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изучение Ag–Pb–Zn руд месторождения Перевальное позволило установить наложение на серебро-полиметаллические руды раннего гидротермально-метасоматического этапа высокотемпературной грейзенизации позднего этапа (рис. 8).

Структурный контроль локализации рудных тел месторождения, по результатам бурения (см. рис. 2), обусловлен флексурными перегибам мощной дайки невадитов. В таких местах предположительно создавались тектонические напряжения, в результате которых формировалась интенсивная трещиноватость и соответственно создавалась повышенная проницаемость породы. На этих участках в рудных телах обычно встречаются линзы сидерита и родохрозита, которые содержат скопления богатых сульфидных руд.

Грейзенизация и образование скарноидов с родонитом обусловлено внедрением позднемеловых гранитоидов Дукатского интрузивного массива, залегающего на глубине 1–3 км под вулканическими толщами [Константинов и др., 1998]. С грейзенизацией связан высокотемпературный метасоматоз вмещающих пород (углистых сланцев и вулканитов), под воздействием высокотемпературных кислотных гидротермальных растворов, богатых высокоактивными летучими (F, Cl, H_2O, CO_2 и др.), проникающими вдоль контактов тела невадитовой дайки, что привело к наложению крупночешуйчатого мусковита на полиметаллические руды, а также к термометаморфизму рудных минералов, ремобилизации части рудного вещества и переотложению.

В результате в рудах сформировались две генерации сфалерита: ранний – железистый с примесями Cu и Cd и поздний – бесцветный, прозрачный, практически беспримесный (см. рис. 6а, 6б, табл. 2); на позднем этапе в рудах образовался акантит, прустит, полибазит (см. табл. 3), получило широкое развитие самородного Ag. С поздним высокотемпературным этапом также связано образование двух генераций блеклой руды: ранней – теннантит-тетраэдритовой и поздней – высокосеребристой (фрейбергит) (см. табл. 2). Следует отметить, что все высокосеребристые минералы отлагались в интерстициях крупночешуйчатого мусковита.

Термометаморфизм сопровождался структуризацией эмульсионной вкрапленности халькопирита в сфалерите, образованием бесцветного сфалерита новой генерации (см. рис. 6а–6в), перераспределением и концентрированием Ag за счет твердофазной диффузии в блеклых рудах [Савва, 2018] с повышением уровня концентрации Ag от 3–5 мас. % в ранней генерации до 28 мас. % – в поздней (см. табл. 2), отложением самородного Ag и фрейбергита в

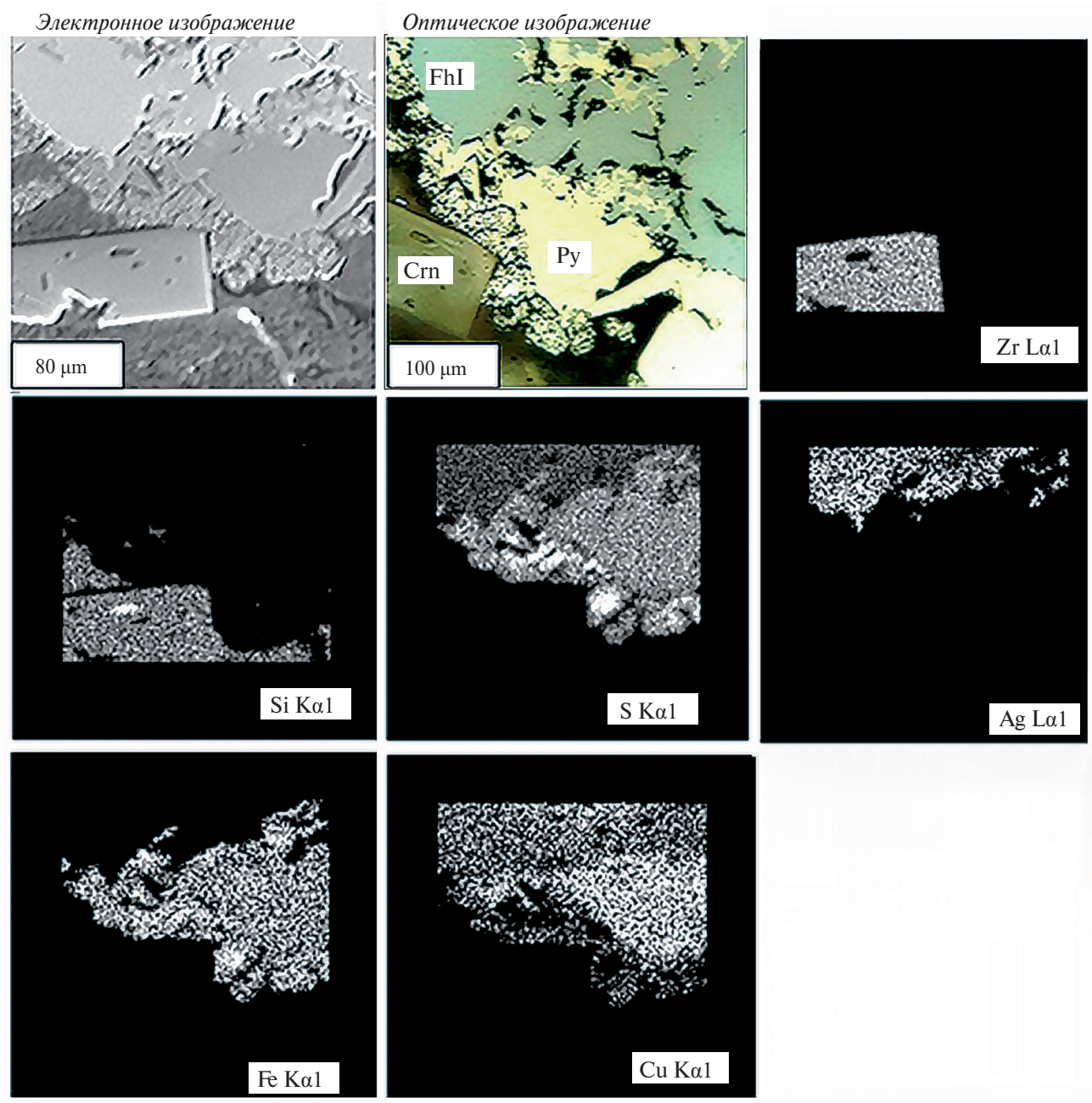

Рис. 7. Срастание циркона с сульфидно-серебро-полиметаллической рудой месторождения Перевального: электронное и оптическое изображения и распределение химических элементов в характеристических рентгеновских лучах.

интерстициях между крупных чешуй мусковита (см. рис. 6з, 6и).

В рудах месторождения Перевального в изобилии присутствуют рутил и анатаз как в метасоматитах, так и в срастании с вкрапленниками рудных минералов (см. рис. 5е, 5ж, 5и). Высокая концентрация минералов группы TiO_2, по-видимому, обусловлена интрудированием невадитовой дайкой титансодержащей угленосной осадочной толщи – галимовской свиты. Содержание TiO_2 в углях, достигают 15% [Кэтрис, Юдович, 2019]. Высокие концентрации Ti в углях обусловлены, дисперсным распределением в угольном органическом веществе микроразмерных выделений – рутила и анатаза, продуктов трансформации форм $Ti_{орг}$ в $Ti_{мин}$ [Юдович и др., 2018].

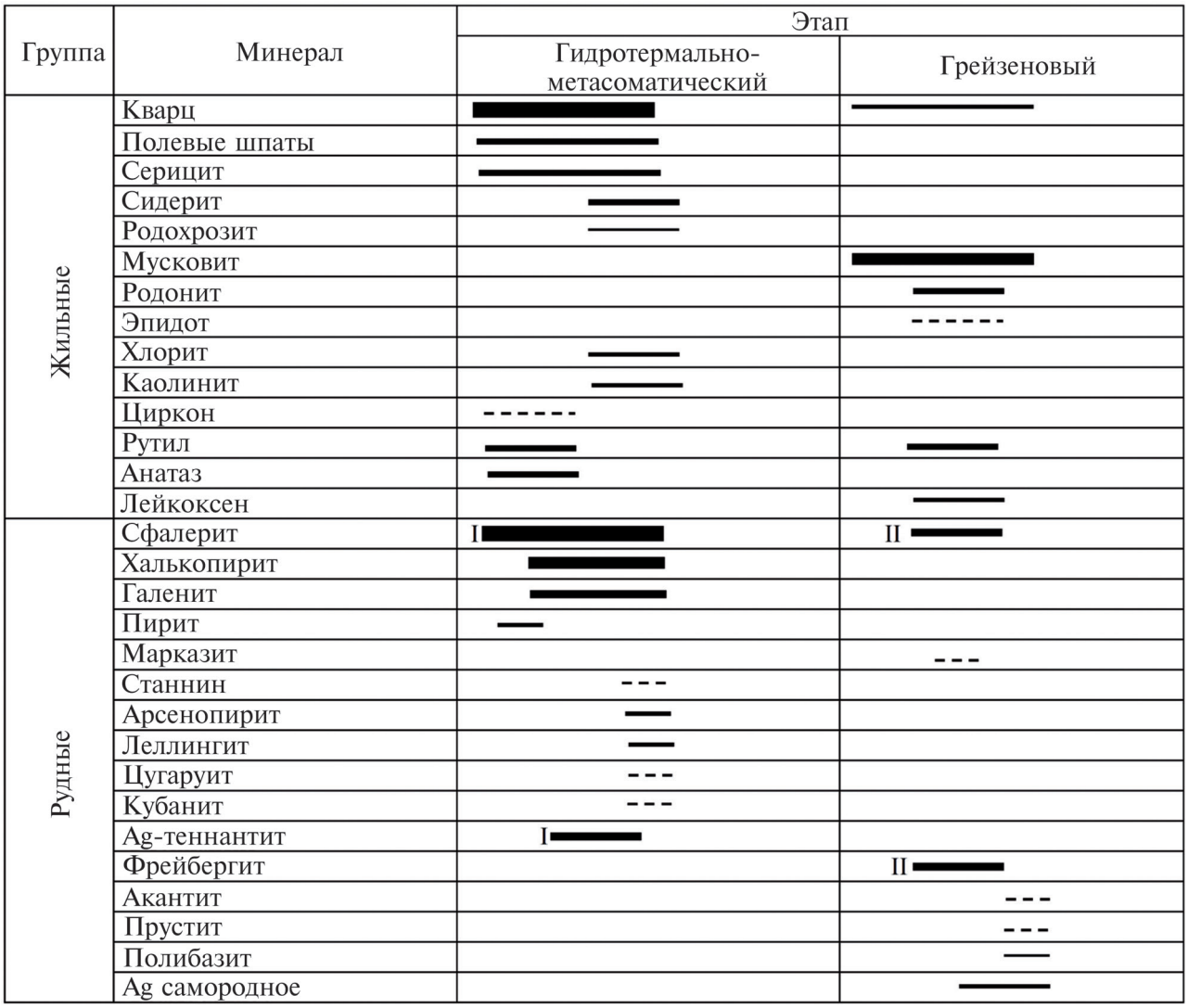

Рис. 8. Схема последовательности минералообразования в рудах месторождения Перевальное.

Изучен кристалл пористого циркона, содержащего включения кварца (см. рис. 7), найденного в сульфидно-серебро-полиметаллической в руде. Минерал содержит в своем составе примесь Ca до 2.0 мас. %. В огранке кристалла – нет обрамлений тетрагональной пирамиды. Циркон срастается с марказитом, пиритом, халькопиритом и блеклой рудой. Появление этого необычного циркона также, весьма вероятно, связана с грейзенезацией, которая активно воздействовала на вмещающие породы, когда изменялись не только породообразующие, но и акцессорные минералы, а также содержание и распределение в них элементов-примесей [Сотников, Никитина, 1963; Костерин, 1966]. Подобный циркон непригоден для U–Pb датирования [Atlas ..., 2002; Scoates, Chamberlain, 1995]. Своеобразные глинистые образования на границе вулканитов и углефицированных пород (тонштейны), обычно содержат более крупные кристаллы циркона [Арбузов, 2016; Finkelman, 1981; Brown, Swaine, 1964]. Не исключено, что появление пористого циркона с включениями кварца также связано с углистыми породами галимовской свиты, поскольку самым распространенным минералом циркония в угле, по мнению С.И. Арбузова [2016], считается именно силикат циркония.

Проблема образования Ag–Pb–Zn месторождений имеет в Дукатском рудном районе важнейшее металлогеническое значение. Большинство исследователей поддерживает модель двухэтапного формирования минерализации [Савва и др., 2021].

Первый вулканогенный этап – развитие Ag-полиметаллического оруденения в результате функционирования приповерхностной вулканогенной гидротермальной системы. По одним данным [Петров и др., 2006], рудное вещество могло иметь как мантийные, так и нижнекоровые источники. По другим [Шатков, 1997], – мобилизовалось при метасоматическом изменении вмещающих пород и переносилось в ослабленные зоны, образуя жильно-вкрапленные рудные тела. Причем количества Ag, извлеченного из областей выноса, было достаточно для образования средних по запасам месторождений.

На втором плутоногенном этапе произошло телескопирование грейзеновой минерализации на Ag-полиметаллическую в результате поступления высокотемпературного магматогенного флюида на нижние уровни приповерхностных интенсивных метасоматических преобразований в риодацитах и игнимбритах.

Такую последовательность подтверждают изотопно-геохронологические данные [Котляр и др., 2004; Петров и др., 2006]. Наши данные, приведенные в статье, также свидетельствуют в пользу этой модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые рассмотрены геолого-структурные и минералого-геохимические особенности руд серебро-полиметаллического месторождения Перевальное (Северо-Восток России).

Месторождение залегает на периферии вулкано-купольного поднятия и локализовано в крупной субвулканической дайке позднемеловых порфировых риолитов (невадитов) на глубине 140–160 м от поверхности. Наиболее богатая минерализация контролируется коленообразными перегибами дайки.

Основное количество серебра в рудах связано, главным образом, с Ag-тетраэдритом и фрейбергитом. Кроме того, существенная доля серебра обусловлена пираргиритом, самородным серебром, акантитом и сернистым аналогом жеффруаита ($(Ag, Cu, Fe)_9(Se, S)_8$). Незначительная часть серебра связана с редкими (для данных руд) минералами – пруститом, аргентопиритом и минералами изоморфного ряда ленаит ($AgFeS_2$) – халькопирит.

Главная минералогическая особенность руд – широкое развитие крупночешуйчатого мусковита, рутила и анатаза, присутствие родонита, циркона и лейкоксена. Среди карбонатов преобладают сидерит и родохрозит. Установленные в рудных минералах элементы-примеси (Co, Cd, Mn) корреспондируют с геохимическими особенностями Омсукчанского вулканопрогиба ОЧВП.

При изучении месторождения Перевального установлено двухэтапное рудообразование – наложение высокотемпературных грейзенов на ранние серебро-полиметаллические руды с отчетливыми признаками термометаморфизма последних и связанных с этим природным обогащением их Ag. Грейзенизация и поступление высокотемпературных растворов, по-видимому, связаны с внедрением поздней фазы не вскрытого интрузивного массива.

Установлено широкое развитие в рудных скоплениях карбонатов Fe, в меньшей мере Mn при практически полном отсутствии карбонатов Ca, а также значительное количество минералов группы TiO_2 – рутила и анатаза в метасоматитах и вкрапленных рудах. Изучен необычный циркон с упрощенной огранкой (тетрагональная призма при отсутствии граней дипирамиды) в срастании с рудными минералами.

Результаты минералогических исследований позволяют отнести Ag-полиметаллическое месторождение Перевальное, как и другие месторождения Омсукчанской металлогенической зоны к промежуточно-сульфидизированному классу эпитермальных месторождений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность геологу АО “Полиметалл УК” Сергею Федоровичу Петрову за предоставленную для исследований коллекцию образцов руд месторождения Перевальное.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке тем Госзадания СВКНИИ ДВО РАН и ИГЕМ РАН (№ госрегистрации 124022400144-6).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арбузов С.И. Геохимия редких элементов в углях Центральной Сибири / Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Томск, 2005. 48 с.

Кетрис М.П., Юдович Я.Э. Ценные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. 537 с.
https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005[16]

Константинов М.М., Наталенко В.Е., Калинин А.И., Стружков С.Ф. Золото-серебряное месторождение Дукат. М.: Недра, 1998. 201 с.

Костерин А.В. Некоторые особенности геохимии циркония и гафния // Геология и геофизика. 1966. Вып. 8. Т. 7. С. 120–124.

Котляр И.Н., Русакова Т.Б., Гагиева А.М. Буюндино-Сугойская рудоконцентрирующая площадь – уникальный металлогенический ареал Северо-Востока России // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23. № 1. С. 3–19.

Петров О.В., Михайлов Б.К., Шевченко С.С., Розинов М.И., Колесников Д.И., Лохов К.И., Прасолов Э.М., Прилепский Э.Б., Бережная Н.Г., Матуков Д.И., Капитонов И.Н., Быкова Э.В., Сергеев С.А. Изотопно-геохимические исследования уникального золото-серебряного месторождения Дукат как ключ к пониманию процессов вулканогенного рудообразования // Региональная геология и металлогения. 2006. № 27. С. 60–76.

Савва Н.Е. Минералогия серебра Северо-Востока России. М.: Триумф, 2018. 544 с.

Савва Н.Е., Волков А.В., Любимцева Н.Г., Прокофьев В.Ю., Сидоров А.А., Мурашов К.Ю., Сидорова Н.В. Ag–Pb–Zn месторождение Гольцовое (Северо-Восток России): геологическое строение, минералого-геохимические особенности, условия рудообразования // Геология рудных месторождений. 2021. Т. 63. № 3. С. 207–235.
https://doi.org/10.31857/S0016777021030060

Сотников В.И., Никитина Е.И. Поведение акцессорных минералов и акцессорных элементов в процессе грейзенизации // Геология и геофизика. 1963. Вып. 10. Т. 4. С. 58–78.

Шатков Н.Г. Минералого-геохимические индикаторы олово-серебряного оруднения Омсукчанского района (северо-восток России) / Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: ВСЕГЕИ, 1997. 22 с.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Рыбина Н.В. Геохимия титана. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2018. 432 с.

Atlas of Zircon Textures // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. V. 53(1). P. 469–500.
https://doi.org/10.2113/0530469

Brown H.R., Swaine D.J. Inorganic constituents of Australian coals // J. Inst. Fuel. 1964. V. 37. P. 422–440.

Finkelman R.B. Modes of occurrence of trace elements in coal // U.S. Geol. Surv. OpenFile Rep. 1981. № 81–99. 322 p.

Scoates J.S., Chamberlain K.R. Baddeleyite (ZrO_2) and zircon ($ZrSiO_4$) from anorthositic rocks of the Laramie anorthosite complex, Wyoming: Petrologic consequences and U–Pb ages // American Mineralogist. 1995. V. 80. P. 1317–1327.

SILVER-POLYMETALLIC DEPOSIT PEREVALNOYE OF THE DUCATSKY ORE FIELD (BALYGYCHANO-SUGOYSKY VOLCANIC TROUGH, NORTH-EAST OF RUSSIA)

N. E. Savva[1, *], A. V. Volkov[2, **]

[1]North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Science, Portovaya str., 16, Magadan, 685000 Russia
[2]Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Science, Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia
**e-mail: nsavva7803@mail.ru*
***e-mail: tma2105@mail.ru*

The geological, structural, mineralogical, and geochemical features of the silver polymetallic deposit Perevalnoye (Northeastern Russia) are considered for the first time. The deposit is located on the northeastern flank of the Dukat ore field in the central part of the Balygychan-Sugoysky riftogenic volcanic trough, which formed synchronously with the structures of the Okhotsk-Chukchi volcanic belt. The deposit lies on the periphery of a volcanic dome uplift and is localized in a large subvolcanic dike of Late Cretaceous porphyritic rhyolites (nevadites) at a depth of 140–160 m from the surface. The richest mineralization is controlled by the knee-shaped bends of the dyke. The main amount

of silver in the ores is mainly associated with Ag-tetrahedrite and freibergite. In addition, a significant proportion of silver is due to pyrargyrite, native silver, acanthite, and geffroite ($(Ag, Cu, Fe)_9(Se, S)_8$). A small part of the silver is associated with rare (for these ores) minerals – proustite, argentopyrite, and minerals of the lenaite ($AgFeS_2$) – chalcopyrite isomorphic series. The main mineralogical feature of the ores is the widespread development of coarse–scaled muscovite and rutile, the presence of rhodonite, anatase, zircon and leucoxene. Siderite and rhodochrosite predominate among carbonates. A two-stage ore formation has been established for the Perevalny deposit – the telescoped superposition of high-temperature greysens (late stage) on silver-polymetallic ores (early stage) with distinct signs of thermometamorphism of the latter and the associated natural Ag enrichment. Greisenization and the influx of high-temperature solutions seem to be associated with the introduction of a late phase of an undiscovered intrusive massif. The results of mineralogical studies allow us to classify the Ag–polymetallic deposit Perevalnoye, as well as other deposits of the Omsukchan metallogenic zone, to the intermediate sulfidized class of epithermal deposits.

Keywords: North-East of Russia, Okhotsk-Chukchi volcanogenic belt, Balygychano-Sugoysky volcanic trough, Ducatskoye ore field, Perevalnoye silver-polymetallic deposit, greysens, titanium mineralization