

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И СТАДИЙНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ
ЗОЛОТОНОСНЫХ РОДИНГИТОВ КАРАБАШСКОГО МАССИВА
НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

В. В. Мурзин, Д. А. Варламов

Полоса золотоносных родингитов (хлограпитов) Карабашского массива имеет направление согласное с простираем массива и прослеживается непрерывно вдоль центральной части массива на 2.5 км. Отдельные тела родингитов имеют мощность до 2–3 м (местами до 8 м), протяженность – до 600–700 м и сложены агрегатами трех основных минералов – диопсида, граната и хлорита различной зернистости, присутствующими в различных количественных соотношениях. Они оторачиваются зонами хлоритолитов, которые, в свою очередь, постепенно переходят в хризотилитовые или антигоритовые серпентиниты. Массивные родингиты и хлоритолиты разбиваются сетью лестничных прожилков существенно диопсидового или кальцитового состава. Наиболее богатая золотом центральная часть полосы известна в литературе под названием “месторождение Золотая Гора (Карабашское)”.

Минеральный состав родингитов массива изучался многими исследователями (М.П. Ложечкиным, А.П. Переляевым, Н.И. Бородаевским, М.И. Новгородовой, П.В. Покровским, Р.О. Берзном и др.), однако наиболее полные данные о составе минералов и последовательности их отложения получены Э.М. Спиридоновым и П.А. Плетневым [5]. Этими исследователями выделены ранние родингиты, поздние родингиты, наиболее поздние жильные родингиты трех поколений, хлоритолиты реакционной оторочки, а также наиболее поздние листвениты, с которыми связана высокая золотоносность пород, представленные кальцитовыми прожилками. По данным ряда исследований, в том числе и наших, выделение лиственитов в телах родингитов является мало обоснованным [2, 4], а схема стадийности минералообразования, предложенная в [5], требует переосмысления.

В данном исследовании применен этапно-стадийный подход. Этот подход базируется на выделении этапов – значительных по времени перерывов между отдельными отрезками рудообразования и стадий – промежутков времени, в течение которых происходит отложение присущих им парагенезисов минералов и отделяющихся друг от друга периодами деформаций и дробления (В.И. Смирнов, Н.В. Петровская, А.Д. Генкин и др.). Реализация этого подхода привела нас к заключению, что процесс рудообразования на месторождении является одноэтапным, со-

пряженным со становлением собственно родингитов и трехстадийным (табл. 1). В качестве межстадийных рассматриваются правосторонние сдвиговые деформации II и III стадий по [1].

Химический состав минералов, слагающих родингиты, достаточно полно приведен в [5]. Полученные нами дополнительные данные, в целом, хорошо согласуются с таковыми в цитируемой работе. Поэтому в настоящей статье приводится химический состав некоторых акцессорных минералов, обнаруженных в изученных родингитах впервые (табл. 2).

РОДИНГИТЫ 1 СТАДИИ

Родингиты 1 стадии – темноокрашенные мелко-среднезернистые существенно хлоритовые, гранат-хлоритовые, везувиан-гранат-хлоритовые породы (ранние родингиты по Э.М. Спиридонову), которые плавно сменяются хлорит-гранат-пироксеновыми породами с различными соотношениями этих минералов и, соответственно, различно окрашенными. Переходы между разноокрашенными разновидностями пород постепенные, и какие-либо закономерности в распределении их указать трудно.

По данным [5], гранат родингитов принадлежит Ti – гидроандрадиту и Ti – гидрогроссуляру-гидроандрадиту (до 9.5 мас. % TiO_2), а при замещении им хромшпинелида – хромсодержащему гидроандрадиту (до 6 мас. % Cr_2O_3). Гроссуляровая компонента граната составляет обычно менее 10%, однако фиксировались отдельные зерна со значительно более высоким ее содержанием – до 47%. Клинопироксен представлен Fe-диопсидом (до 7.6 мас. % FeO). Хлорит в везувиансодержащих родингитах – пеннин и талькохлорит, в диопсидсодержащих – пеннин и клинохлор. Почти повсеместно родингиты содержат 1–2 до 5% апатита. Апатит не содержит значимых количеств F и Cl и является, по-видимому, гидроксиапатитом.

Акцессорные минералы родингитов 1 стадии представлены как реликтовым хромшпинелидом, так и новообразованными – халькозином, самородной медью, арсенидами никеля (маухерит и никелин), медистым золотом, а также впервые установленными нами на месторождении цирконом, бадделитом, алланитом-Се, ториянитом и уранинитом.

Частицы акцессорных минералов присутствуют в ранних родингитах в виде мелких (менее 0.1 мм)

Таблица 1. Стадийность формирования и минеральный состав золотоносных родингитов и хлоритолитов Карабашского массива

Минералы	Стадии рудообразования		
	1	2	3
	Родингиты		
Основные	Хлорит (клинохлор, пеннин), гранат (Ti-гидроандрадит), клинопироксен (Fe-диопсид)	Клинопироксен (диопсид), гранат (гидроандрадит)	Кальцит
Второстепенные	Везувиан, апатит	Хлорит (пеннин), апатит, магнетит, ильменит, доломит, кальцит	Хлорит (пеннин), магнетит
Акцессорные	Mn-Zn-хромшпинелид, халькозин, никелин NiAs, маухерит, самородная медь, циркон*, бадделейт ZrO ₂ *, торанит ThO ₂ *, ортит*, уранинит UO ₂ *	Титанит CaTiSiO ₅ , перовскит CaTiO ₃ , кальциоанкилит-(Ce) (Ca,Sr)Ce(CO ₃) ₂ (OH)·(H ₂ O)*, самородная медь, маухерит Ni ₁₁ As ₈ , халькозин, халькопирит, борнит, Со-пентландит CoNi ₃ Fe ₅ S ₈ , Со-купропентландит CuCo _{2.5} Ni _{2.5} Fe ₃ S ₈	Титанит, ильменит, рутил, куприт, галенит, халькозин, гринокит CdS, самородные Cu, Sb и Pb, антимониды Cu, Ni, Fe (нисбит NiSb ₂ , сейнйюкит FeSb ₂ , купростибит Cu ₂ Sb, златогорит CuNiSb ₂ , гудмундит FeSbS, ульманнит NiSbS, брейтгауптит NiSb)
Минералы золота	Тетрааурикуприд AuCu, аурикуприд AuCu ₃	Аурикуприд AuCu ₃ , Hg-электрум	Самородное золото Au-Ag, Hg-серебро
Хлоритолиты			
Основные	Хлорит (клинохлор, пеннин)	Хлорит	Хлорит
Второстепенные	Fe-диопсид, антигорит, магнетит,	Магнетит	Кальцит
Акцессорные	Апатит, самородная медь, пентландит, хизлевудит Ni ₃ S ₂	Халькозин, пентландит, маухерит Ni ₁₁ As ₈ , орселит Ni _{5-x} As ₂ , никелин NiAs, хизлевудит Ni ₃ S ₂ , годлевскит (Ni,Fe) ₇ S ₆ , миллерит NiS	Магнетит
Минералы золота		Распавшиеся твердые растворы AuCu-Au ₃ Cu ₇ -Au ₃ Cu	

Примечание. * – обнаружены впервые.

Таблица 2. Типовой химический состав зерен титанита (ttn), перовскита (ps), алланита – Се (all) и кальциоанкилита (anc) из родингита

№ зер./ № точки	1/4	2/78	2/79	1/5	2/77	2/97	3/104	1/70	2/96	3/148	1/94	2/98
	ttn	ttn	ttn	ps	ps	all-1	all-1	all-2	all-2	anc	anc	anc
SiO ₂	30.11	29.12	29.97	0.48	0.25	30.19	28.53	29.81	30.13	0.21	н. о.	0.78
TiO ₂	39.09	37.82	38.64	56.28	56.80	2.36	3.34	6.01	5.81	0.62	н. о.	н. о.
Al ₂ O ₃	0.18	0.41	0.42	0.04	0.15	10.87	9.14	5.25	5.27	0.97	0.16	н. о.
FeO*	0.57	0.79	0.71	0.76	0.31	11.75	15.12	6.48	6.56	0.76	0.12	0.68
MnO	н. о.	н. о.	0.04	н. о.	н. о.	0.72	0.74	0.34	0.40	н. о.	н. о.	н. о.
MgO	н. о.	н. о.	0.06	0.32	н. о.	4.27	3.18	4.43	5.73	1.16	1.56	н. о.
CaO	27.76	26.74	28.05	39.59	39.35	9.48	9.80	23.49	24.07	9.82	7.25	7.73
V ₂ O ₃	0.58	0.64	0.67	0.56	0.74	0.19	0.08	0.54	0.29	н. о.	0.26	0.11
SrO	0.21	н. о.	0.16	0.77	0.29	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	0.21	2.02	4.24
Nb ₂ O ₅	0.12	н. о.	0.20	0.22	0.40	0.08	0.20	0.17	н. о.	0.32	н. о.	н. о.
La ₂ O ₃	0.32	0.12	0.72	0.40	1.51	14.01	9.80	4.22	5.77	13.99	11.25	27.45
Ce ₂ O ₃	0.84	0.13	0.63	0.92	1.19	12.80	14.73	10.80	10.44	30.46	29.96	22.81
Pr ₂ O ₃	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	0.53	н. о.	0.83	0.77	2.50	3.31	0.75
Nd ₂ O ₃	н. о.	0.08	н. о.	0.08	н. о.	0.23	0.78	2.57	1.37	6.90	8.43	1.81
Sm ₂ O ₃	н. о.	0.07	0.03	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	0.88	н. о.	0.22	0.56	н. о.
Eu ₂ O ₃	н. о.	0.62	0.10	н. о.	н. о.	0.32	н. о.	0.33	н. о.	0.48	0.76	н. о.
Gd ₂ O ₃	н. о.	0.58	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	0.32	0.20	0.74	1.30	0.32
Tb ₂ O ₃	н. о.	0.28	н. о.	0.01	н. о.	0.11	0.14	0.59	0.23	0.62	1.13	н. о.
Dy ₂ O ₃	н. о.	0.24	н. о.	0.85	н. о.	0.03	н. о.	0.43	н. о.	н. о.	0.44	н. о.
ThO ₂	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	0.51	0.12	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
F	н. о.	1.27	2.48	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Сумма	99.91	98.91	102.88	101.37	100.99	97.94	96.09	97.61	97.04	70.08	68.51	66.68

Примечание. н. о. – ниже пределов обнаружения. Электронно-зондовый микроанализ выполнен в ИЭМ РАН на электронном сканирующем микроскопе CamScan MV2300, оснащенный энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором Link INCA Energy. FeO* – пересчет измеренного железа на FeO.

ксеноморфных выделений среди агрегатов породообразующих минералов, реже в виде включений в них. Кристаллы хромшпинелида неоднородны – с поверхности, а также вдоль отдельных микротрещин в них фиксируются зоны резкого обогащения марганцем и цинком, ширина которых не превышает 5–6 мкм. Концентрации марганца и цинка (до 6.45 мас. % MnO и до 2.21 мас. % ZnO) связаны между собой прямой зависимостью и изоморфно замещают магний в структуре этого минерала. Никелин (NiAs) и маухерит ($\text{Ni}_{11}\text{As}_8$) обнаружены в виде мелких включений в гранате. Эти арсениды никеля содержат примеси Fe и Co, соответственно, 1.5–2.5 и 1–3 мас. %. Самородная медь чистая, не содержащая примеси других элементов.

Алланит-Се образует хорошо ограниченные зональные кристаллы размером 0.1–0.2 мм, выполняющие, совместно с апатитом, хлоритом и минералами титана, полости в гранат-диопсидовом агрегате. Центральная часть кристаллов алланита часто содержит пустоты – поры, иногда заполненные редкими минералами 2 стадии (кальциоанкилитом, Ca-REE карбонатно-силикатными и карбонатно-фосфатными фазами). Выделяются две разновидности алланита-Се (см. табл. 2). Первая разновидность этого минерала, локализуемая в виде небольших участков в центральной части зональных кристаллов, характеризуется наиболее высокими концентрациями Fe, Al, REE (La, Ce). Вторая разновидность алланита слагает промежуточные и внешние части кристаллов и более богата, по отношению к первой, Ca, Ti, Mg. Следовательно, реализуется характерная для структуры эпидота схема гетеровалентного изоморфизма – $\text{Ca}^{2+}\text{Al}^{3+} \leftrightarrow \text{REE}^{3+}\text{Fe}^{2+}(\text{Mg}^{2+})$. Концентрации титана в алланите достигают 8.5 мас. % TiO_2 .

Минералы редких и радиоактивных элементов представлены мелкими (до 60 мкм) кристаллами циркона с линзочками бадделеита (ZrO_2), содержащими вросстки уранинита (UO_2) и торинита (ThO_2). Обнаруженные нами частицы самородного золота из родингитов 1 стадии имеют размер до 0.5 мм и локализованы в хлоритовой массе родингита. Они представлены тетрааурикупридом (AuCu) с широкой каймой, сложенной аурикупридом (AuCu_3). Мелкие зерна аурикуприда (2–5 мкм) фиксировались также в ассоциации с маухеритом и никелином в виде включений в гранате.

Синхронно со становлением тел родингитов 1 стадии в экзоконтактной их зоне шириной до 3 м вмещающие серпентиниты превращены в хлоритолиты – породы, сложенные почти нацело тонко- и мелкозернистым хлоритом. Хлорит этих пород, как и в родингитах, – пеннин и клинохлор, однако обогащенный примесным никелем – до 1% по [5]. В хлоритолитах местами сохраняются реликтовый антигорит. Хлоритовые породы насыщены также выделениями магнетита, в центральных частях

которых часто наблюдаются хроммагнетит и хлорит – продукты замещения хромшпинелида. Акцессорные минералы хлоритолитов – апатит, самородная медь, пентландит, хизлевудит [5].

РОДИНГИТЫ 2 СТАДИИ

Становление родингитов 2 стадии отделено от ранних периодом внутрирудных деформаций, проявленных в образовании зон брекчирования, смятия, кливажирования ранних образований, а также появлении в них открытых трещин субширотного простирания и южного падения. Вдоль этих трещин родингиты 1 стадии перекристаллизованы с возникновением прожилков лестничного типа более крупнозернистых пород (поздние родингиты и наиболее поздние родингиты первого и второго поколения по Э.М. Спиридонову). Перекристаллизация пород местами сменялась переотложением вещества и перемещением его вдоль трещин в боковые серпентиниты на расстояние до 2 м в виде жил крупнозернистого диопсида мощностью до 10 см. Жилы диопсида являются определенно телами выполнения, иногда с зонами геометрического отбора.

Продукты 2 стадии часто развиты не только в виде жильных образований, но рассеянных минералов, образованных в результате метасоматического замещения массы раннего родингита в наименее деформированных его участках (поздние родингиты по Э.М. Спиридонову). Особенностью участков вмещения продуктов 1 и 2 стадий является химическая неоднородность всех породообразующих минералов – клинопироксена, граната и хлорита. Эта неоднородность является результатом неполного замещения Fe-диопсида, Ti-андрадит, хлорита менее титанистыми и железистыми разновидностями этих же минералов. Освободившиеся в результате замещения Fe и Ti **зафиксированы во вновь образованных магнетите, ильмените, перовските, титаните.**

В целом, в образованиях 2 стадии преобладает мало- или безжелезистый диопсид (не более 2–3 мас. % FeO) и **титансодержащий андрадит** (менее 1%, редко до 3–5 мас. % TiO_2 , до 10%grossулярового минала). В меньших количествах присутствует хлорит – клинохлор-пеннин (2.85–10.01 мас. % FeO), иногда в смеси с пикнохлоритом-диабантином (17.2–20.6 мас. % FeO), а также апатит, магнетит (содержит до 0.5 мас. % Co), ильменит (4–9 мас. % MnO, 1–2 мас. % MgO) и карбонат. Концентрации фтора и хлора в апатите не превышают чувствительности микроанализа, что свидетельствует о том, что он принадлежит гидроксипатиту. Отдельные зерна апатита существенно обогащены стронцием (до 4.8 мас. % SrO). **Карбонат, заполняющий небольшие полости в родингите и цементирующий кристаллы диопсида, представлен маложелезистым доломитом, практически не содержащим железо и другие примеси.** В этой же пози-

ции часто присутствует и кальцит, однако по отношению к доломиту он более поздний и, возможно, синхронизируется с прожилковым кальцитом 3 стадии. Кальцит, в отличие от доломита, постоянно содержит стронций – 0.9–1.3 мас. % SrO.

Акцессорные минералы родингитов 2 стадии представлены, прежде всего, минералами титана: титанитом и перовскитом, часто ассоциирующими с апатитом. Титанит в виде частиц размером, как правило, менее 0.2 мм иногда содержит фтор (до 2.5 мас. %). Перовскит образует вроски в центральных частях зерен титанита, возможно, он реликтовый. Оба минерала титана характеризуются повышенным содержанием легких редкоземельных элементов (РЗЭ) – до 1.5 мас. % La_2O_3 и до 1.2 мас. % Ce_2O_3 .

Легкие РЗЭ максимально концентрируются в собственных минеральных фазах – кальциоанкилите $(\text{Ca}, \text{Sr})\text{REE}(\text{CO}_3)_2(\text{OH}) \cdot (\text{H}_2\text{O})$, недоизученных Ca-REE карбонатно-силикатных и карбонатно-фосфатных фазах, богатых La, Ce, Pr, Nd, Sr. В диопсиде обнаружены также мелкие включения частиц граната, содержащего до 4 мас. % REE. Выделения кальциоанкилита (0.7–0.8 ф. е. Ca) размером 5–20 мкм выполняют интерстициальные полости в агрегатах Ti-андрагита. Он представлен почти непрерывным изоморфным ($R_{\text{сорт}} = -0.91$) рядом между La и Ce разностями от преимущественно лантановых ($(\text{La} + \text{Pr})/(\text{Ce} + \text{Nd}) > 1.1$) до существенно цериевых ($(\text{La} + \text{Pr})/(\text{Ce} + \text{Nd}) < 0.5$). Содержание стронция варьирует от почти полного отсутствия до 4.25 мас. % SrO, то есть от практически чистого кальциоанкилита до промежуточного члена ряда кальциоанкилит – анкилит.

Среди рудных акцессорных минералов в диопсидовых прожилках 2 стадии обнаружены наиболее крупные частицы медистого золота (до 2–3 мм), сложенные аурикупридом. Аурикуприд обычно содержит вроски Hg-электрума (до 12 мас. % Hg). В поздних родингитах ранее [5] описаны самородная медь, маухерит, а также ряд сульфидов меди, кобальта и никеля (халькозин, халькопирит, борнит, Со-пентландит, Со-купропентландит), которые также могут быть выделены в составе родингитов 2 стадии.

Прилегающие к родингитам серпентиниты и хлоритолиты повторно хлоритизированы по сети тонких трещин. В отличие от раннего хлорита, поздняя прожилковая генерация этого минерала образует крупнозернистые агрегаты. Хлоритовые прожилки, местами с доломитом, диопсидом вместе с диосидовыми и диопсид-хлоритовыми жилами формируют оторочки вдоль тел родингитов с максимальной мощностью до 1.5 м в их лежащем боку. Прожилки хлорита часто содержат вкрапленность медистого золота, представленными продуктами распада золото-серебро-медных твердых растворов с содержанием золота более 50 ат. % [3].

Среди акцессорных минералов хлоритолитов ранее описаны также халькозин, арсениды и сульфиды никеля – маухерит, никелин и, орселит $\text{Ni}_{5-x}\text{As}_2$ (содержит до 4 мас. % Co), хизлевудит, пентландит, годлевскит, миллерит [5].

РОДИНГИТЫ 3 СТАДИИ

Формирование минерализации закончилось отложением кальцита в родингитах, а местами в хлоритолитах и серпентинитах (наиболее поздние родингиты третьего поколения и лиственитизированные родингиты по Э.М. Спиридонову). Отложению кальцита предшествовал период деформаций, в результате которых родингиты ранних стадий участками деформированы и рекристаллизованы. Кальцит развит по сети тонких (не более 2–3 см) прожилков, слагает цемент брекчий деформированных родингитов ранних стадий или отлагается в свободном пространстве среди агрегатов минералов крупнозернистых родингитов. Вместе с кальцитом в заметных количествах отлагались хлорит (пеннин и талькохлорит) и магнетит. Местами вдоль стенок трещин отчетливо проявлено замещение кальцитом ранних минералов – диопсида и, особенно активно, Ti-граната. Продуктами такого замещения являются магнетит (содержит до 1 мас. % Co), ильменит (пластинки в магнетите), титанит и рутил (кристаллы в кальците). Освобождающийся кремнезем связывается в хлорите и лишь очень редко он фиксируется в тонких (не более 1–2 мм) прожилках прозрачного кварца, который в свободном пространстве трещин образует натечные почковидные формы. Последнее обстоятельство может свидетельствовать и о гипергенном происхождении такого кварца. Кальцит из прожилка этого минерала как в родингите, так и во вмещающем серпентините характеризуется низким содержанием всех примесей, кроме стронция (1.2–2.2 мас. % SrO).

В 3 стадию отлагались также акцессорные рудные минералы – самородная медь, ртутистое серебро (19–26 мас. % Hg), куприт (замещает по краям медь), халькозин (содержит до 0.5 мас. % Se), маухерит, никелин, гриноцит. Кроме того, в одном из образцов кальцита ранее было обнаружено гнездо самородной сурьмы с многочисленными мелкими включениями нисбита, купростибита, златогорита, ульманнита, сейняйокита, гудмундита, а также галенита и свинца (!) [5].

Как было указано выше, ряд исследователей указывает на преимущественную приуроченность частиц медистого золота к кальцитовым прожилкам и их зальбандам [5]. По их мнению, медистое золото замещает кальцит, самородную медь или же образует метасоматические вроски в агрегатах хлорита и диопсида поздних родингитов. Нами выделения золота в карбонате встречены только однажды – на стенке полости в диопсид-хлоритовой массе,

заполненной кальцитом. Частицы золота размером до 1 мм имели желтый цвет, свидетельствующий об их принадлежности к золото-серебряным фазам. Находки медистого золота в кальците мы склонны трактовать как минералы более ранних стадий родингитизации, сохраненные после замещения кальцитом силикатных минералов родингитов.

В заключение отметим, что, несмотря на хорошую минералогическую изученность родингитов, положение многих минералов в схеме последовательности формирования руд остается неопределенным. Эта неопределенность связана, прежде всего, с пространственным совмещением минеральных ассоциаций разных стадий в телах родингитов, а также незначительным содержанием и обособленной локализацией различных рудных минералов друг от друга. Между тем, связь золота с родингитизирующим процессом представляется очевидной, о чем свидетельствует присутствие частиц медистого и медьсодержащего золота в образованиях всех стадий родингитов.

Исследования проведены по Программе № 2 фундаментальных исследований ОНЗ РАН, финансируемой УрО РАН (проект 09-Т-5-1011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Знаменский С.Е.* Структурные условия формирования коллизионных месторождений золота восточного склона Южного Урала. Уфа: Гилем, 2009. 348 с.
2. *Мурзин В.В., Сазонов В.Н.* Происхождение оруденения с медистым золотом в альпинотипных гипербазитах // Докл. АН. 1999. Т. 366, № 6. С. 797–798.
3. *Мурзин В.В., Сустанов С.Г.* Твердофазные превращения в природном медистом золоте // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 11. С. 94–104.
4. *Сазонов В.Н.* Золотопродуктивные метасоматические формации подвижных поясов (геодинамические обстановки и РТХ-параметры образования, прогностическое значение). Екатеринбург: УГГГА, 1998. 181 с.
5. *Спиридонов Э.М., Плетнев П.А.* Месторождение медистого золота Золотая Гора. М.: Научный мир, 2002. 220 с.