

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 553.041:553.08

О.В. Логвиненко, Т.В. Тимкин

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ЛОГ-26 ТОПОЛЬНИНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

Изучен вещественный состав скарнов, руд и околорудных метасоматитов рудопоявления Лог-26 Топольнинского золоторудного поля (Горный Алтай). Выявлено два типа метасоматических изменений: скарны и апоскарновые пропилиты с образованием характерных породообразующих минеральных ассоциаций. Определена стадийность формирования рудной минерализации; определен химический состав и рассчитаны кристаллохимические формулы минералов (гранаты, пироксен, амфиболы, скаполиты, хлориты, кальцит). Сделаны выводы о принадлежности рудопоявления к золото-скарновой формации.

Ключевые слова: золоторудные месторождения; вещественный состав руд; Топольнинское рудное поле; Горный Алтай.

Введение. Золото-скарновые месторождения представляют самостоятельный геолого-промышленный тип месторождений золотых руд и вызывают повышенный интерес с начала прошлого века. Месторождения этого типа неоднократно изучались рядом авторов [1–7].

В результате ревизионно-поисковых (1951–1956 гг.) и поисковых работ (1996–2001 гг.) в пределах Топольнинского рудного поля локализованы перспективные золоторудные участки. Анализ проведенных работ предшественников показал, что необходимы детальные и систематические исследования на современном уровне с целью уточнения вещественного состава, генетических связей золотого оруденения с магматическими комплексами, изучения поведения элементов-примесей в рудах и минералах. В свою очередь, правильная интерпретация вышеописанных критериев может способствовать открытию в регионе новых объектов перспективного золото-скарнового типа.

В статье представлены данные минералогических, петрографических и минераграфических исследований минеральных комплексов рудопоявления Лог-26.

Краткая геологическая характеристика объекта.

Топольнинское рудное поле расположено в Горном Алтае на северо-западной окраине Алтае-Саянского сектора Урало-Монгольского складчатого пояса. Золото-скарновые объекты размещаются в рудном поле площадью 80 км² и пространственно приурочены к экзоконтактам интрузий двух рудно-магматических систем: собственно Топольнинской (к ней пространственно относятся участки Баяниха, Сухая Грива) и Караминской (участки Лог-26, Рыбный Лог 1, Рыбный лог 2). Системы различаются магматической и рудной специализациями [5]. По данным [8] скарновые залежи представлены гранат-пироксеновой, гранат-волластонитовой, геденбергитовой, гранат-роговообманковой ассоциациями и метасоматическими изменениями скарнов эпидот-турмалинового, альбит-эпидот-кварцевого парагенезисов. Наложенная сульфидная составляющая имеет сходство с минерализацией Синюхинского рудного поля: пирит, халькопирит, борнит, халькозин [7, 8]. Золото выделялось в конце сульфидной стадии в тесном парагенезисе с кварцем III, тетрадимитом, алтаитом, редко самородным висмутом [7].

Для участка Лог-26 стратиграфический разрез представлен переслаиванием терригенно-осадочных пород полатинской (S₁ pl) и камышенской (D₁ km) свит. Порода смяты в крупную Топольнинскую синклиналь северо-западной ориентировки, прорванную в ядерной части гранитоидами. Скарнирование носит рассеянный характер, наложенная минерализация в наибольших концентрациях присутствует вблизи даек. Скарновые тела трубо- и линзообразной форм. Скарны имеют инфльтрационно-биметасоматическую природу и образуют полиминеральные прожилки и зоны [5].

Методика исследования. В рудном поле выполнена специализированная геологическая съемка и документация естественных и искусственных обнажений, горных выработок и керна скважин с отбором образцов и проб.

С использованием оптических методов анализа установлен вещественный состав, структурно-текстурное строение пород и руд, работы проводились с применением микроскопа Carl Zeiss Axio Imager.A2m.

Для идентификации тонковкрапленных и ультра-мелких включений рудных минералов в сульфидных метасоматитах использовано два способа с применением электронного микроскопа LEO-1430VP, MIRA 3LMU с системами микроанализа INCAEnergy 350, INCAEnergy 450+ и волновым спектрометром INCA Wave500 в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск, аналитик М.В. Хлестов).

1. Метод отраженных электронов, реализованный на растровом электронном микроскопе. Результатом исследований являются микрофотографии минералов и их энергодисперсионные спектры, позволяющие определять качественный химический состав минералов.

2. Исследования на микроанализаторе, позволяющем определять состав минерала в опробованной точке с точностью 0,001%. Полученные массовые концентрации пересчитываются в атомные количества, по которым затем определяется формула минерала. Исходя из состава спектров, полученных первым методом, круг определяемых элементов был ограничен следующим набором: Fe, Cu, Zn, As, Bi, Pb, S, Sb, Ag, Te.

По результатам построена парагенетическая схема последовательности формирования руд проявления Лог-26. Кристаллохимические формулы рассчитаны в

соответствии с методикой [9, 10] и номенклатурами [11, 12, 13].

Метасоматиты и их минералогическая характеристика. Наиболее детально изучались метасоматиты и рудные образования эталонного участка Лог-26, субстратом которых служат терригенно-осадочные и магматические породы (аргиллиты, алевролиты, известняки, в меньшей степени – диорит-порфириты).

По этим породам наблюдаются в основном два типа метасоматических изменений: скарны и апоскарновые пропилиты. Скарны проявлены широко на всей площади участка Лог-26, усиливаясь в зонах тектонической проработки. Изменения пропилитового типа более локальны и приурочены к периферии скарновых тел, что позволяет относить их к апоскарновым пропилитам [14]. Эти две стадии гидротермальных изменений обычно отражают преобладание в гидротермах магматической и метеорной воды соответственно [4, 15]. Мощность скарнированных зон варьирует от первых сантиметров до первых метров.

На фоне основной зеленоватой массы скарнов, сложенной темно-зеленым агрегатом сложного состава, развивается светло-кремовый гранат в виде гнездообразных скоплений и тонких прожилков-просечек; сами скарны согласны со слоистостью пород. Наблюдаются также тонкие просечки карбонат-кварцевого и кварцевого состава.

Минеральная ассоциация скарнов характеризуется присутствием кальциевых пироксенов ряда диопсид-геденбергит и кальциевых гранатов рядаgrossуляр-андрадит. Кроме того, отмечаются плагиоклазы, калиевые полевые шпаты, амфиболы ряда тремолит-актинолит, хлорит, эпидот, кальцит, в единичных случаях – скаполиты и волластонит. Акцессорные минералы – циркон, рутил, апатит, турмалин.

Под апоскарновыми пропилитами понимаются зеленокаменные гидротермально измененные породы, которые формируются в тех же структурах, что и скар-

ны, часто являясь внешними оторочками скарнов. По составу выделены две фации пропилитов [14] – средне-температурная эпидот-актинолитовая и средне-низкотемпературная эпидот-хлоритовая. На площади Топольнинского рудного поля преобладает эпидот-актинолитовая пропилитовая ассоциация. Внешне это зоны мелко- и среднезернистой структуры от травяно-до темнозеленого цвета.

Микроскопически актинолит отмечается в виде шестоватых и игольчатых агрегатов, среди которых наблюдаются изометричные, неправильные и призматические зерна эпидота. Последние иногда образуют сплошные скопления гранобластовой структуры.

Эпидот-хлоритовая ассоциация встречается спорадически и сменяет эпидот-актинолитовую по мере удаления от скарновых тел.

С апоскарновыми пропилитами связана рудная минерализация, представленная сульфидами (пирит, арсенипирит, пирротин, халькопирит, борнит, сфалерит, галенит, молибденит и др.), теллуридами и сульфотеллуридами свинца, висмута, серебра. Золото здесь встречается как с сульфидами, так и с теллуридно-сульфотеллуридно-сульфидной ассоциацией минералов.

Далее приведены краткие характеристики основных минералов метасоматитов.

Гранат образует как гипидиоморфные, так и идиоморфные или округлые зерна. Размер кристаллов варьирует от 0,1 мм до первых сантиметров. Отмечаются оптические аномалии: в скрещенных николях у зерен граната появляется серая интерференционная окраска и полисинтетические двойники. Такое секториальное двойниковое строение и анизотропия является типоморфными признаками скарновых гранатов. Максимальное содержание TiO_2 составляет 1,38%, что характерно для окисно-железистых андрадитовых гранатов. По составу гранаты относятся к grossуляр-андрадитовому ряду (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Формульные количества гранатов, пироксенов и амфиболов из метасоматитов участка Лог-26

Показатель	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Si	2,99	3,01	2,99	3,03	2,99	2,98	2,01	2,02	2,01	2,10	7,70	7,77	7,34
Ti	—	0,04	—	0,03	0,07	0,03	—	—	—	—	—	—	—
Al	0,16	0,42	1,72	1,48	0,78	1,26	—	—	—	0,06	0,52	0,40	1,12
Fe	1,87	1,59	0,32	0,50	1,22	0,81	0,18	0,81	0,42	0,76	1,68	2,55	1,98
Mn	—	—	—	—	0,02	—	0,02	0,08	0,04	0,02	0,04	0,08	0,04
Mg	—	—	—	—	—	—	0,81	0,13	0,56	0,54	3,16	2,29	2,57
Ca	2,98	2,94	2,96	2,95	2,92	2,92	0,98	0,96	0,97	0,52	1,94	1,93	1,96
Na	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,11
K	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,07
Альмандин	0,03	3,70	1,02	3,86	4,08	3,09							
Спессартин	—	—	—	—	0,64	—							
Шорломит	—	2,10	—	1,78	3,60	1,40							
Гроссуляр	7,26	18,56	84,43	74,69	35,31	59,45							
Андрадит	92,71	75,64	14,55	19,66	56,37	36,07							

Примечание. 1–6 – гранаты; 7–10 – пироксены; 11–13 – амфиболы.

Пироксен в шлифах бесцветен или имеет слабую зеленоватую окраску. Встречается в виде идиоморфных, изредка ксеноморфных зерен. В проходящем свете для него характерны высокие интерференционные окраски второго порядка, показатели преломления $n_g = 1,695–1,721$. По химическому составу пироксен относится к диопсид-геденбергитовому ряду (см. табл. 1).

Кристаллы минералов группы *эпидота* (эпидот, клиноцоизит) имеют таблитчатый или короткопризматический габитус. Агрегаты шестоватые, зернистые. В шлифах клиноцоизит бесцветен, эпидот окрашен в желтовато-зелёный цвет и плеохроирует. Показатели преломления по n_g колеблются от 1,734 у цоизита до 1,797 у эпидота, что коррелирует воз-

растанию содержания железа от клиноцоизита к эпидоту. Кроме того, клиноцоизит оптически положительный, а эпидот – отрицательный. Отмечается при-

уроченность рудного вещества к зернам «эпидотов». Химический состав минералов этой группы представлен в табл. 2.

Таблица 2

Формульные количества эпидотов и клиноцоизитов из пропилитов участка Лог 26

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8
Si	3,01	3,03	2,98	3,01	3,42	3,52	3,57	3,47
Al	1,09	1,13	1,17	1,10	1,15	1,08	1,05	1,12
Fe	0,84	0,74	0,72	0,86	0,03	0,11	0,16	0,03
Ca	1,97	1,96	1,97	1,93	2,25	2,20	2,18	2,26

Примечание. 1–4 – эпидоты; 5–8 – клиноцоизиты; TiO₂, MgO, MnO, Na₂O, Cr₂O₃ – ниже пределов обнаружения.



Рис. 1. Вариации составов граната из известковых скарноидов участка Лог-26. Grs – гроссулярь; Adr – андрадит; Prs – пиральспит

Амфиболы образуют длиннопризматические и игольчатые выделения с характерной совершенной спайностью под углом 56°. В шлифах по интерференционной окраске различаются две разновидности минерала – бесцветные кристаллы и имеющие бурую окраску. Отмечается цементация зерен амфибола пиротином. Согласно классификации [11] по своему химическому составу все исследованные амфиболы относятся к актинолит-ферроактинолитам, одно зерно попадает в область магнезиальной роговой обманки (см. табл. 1, рис. 2, а).

Магнезиальность амфиболов ($Mg/(Mg+Fe) \cdot 100$) варьирует от 34 до 65.

Скаполит был обнаружен рентгеноспектральным анализом. По химическому составу отвечает мейониту (табл. 3).

Для хлоритов характерны сноповидные и чешуйчатые агрегаты. Оптически выделены две разновидности хлоритов, отличающиеся интерференционной окраской, – это буро-зеленые и чернильно-синие агрегаты. Хлорит присутствует в виде мелких чешуй в основной массе, реже в прожилках. Крупные выделения крайне

редки. Железистость хлоритов варьирует от 0,3 до 0,6 (см. табл. 4, рис. 2, б).

Кальцит встречается в виде среднезернистых агрегатов. Для него характерно наличие полисинтетических двойников. Состав соответствует чистому кальциту без значительных примесей MgO и FeO.

Продуктивные минеральные ассоциации. Руды золотопрооявления Лог-26 представлены убоговкрапленной минерализацией. Рудообразующие минералы представлены структурами отложения (гипидиоморфно- и аллотриоморфнометазернистая), распада твердых растворов (эмульсионная и пластинчатая), замещения (коррозионная) и давления (катакластическая). Руды сложены пятью продуктивными минеральными комплексами (стадиями), внутри которых выделены отдельные ступени по результатам минераграфического, структурно-текстурного и рентгеноспектрального анализов (см. табл. 5).

Изучались образцы сульфидизированных актинолит-эпидотовых, хлорит-эпидотовых метасоматитов (апоскарновых пропилитов) и скарнов из золотоносных зон участка Лог-26.

Таблица 3

Формульные количества скаполитов из пропилитов участка Лог-26

Элемент	1	2	3	4	5	6
Si	6,92	6,96	6,96	6,94	6,89	6,83
Al	4,57	4,50	4,51	4,53	4,57	4,56
Fe	0,05	0,00	0,00	0,04	0,05	0,05
Ca	4,47	4,54	4,53	4,48	4,49	4,56

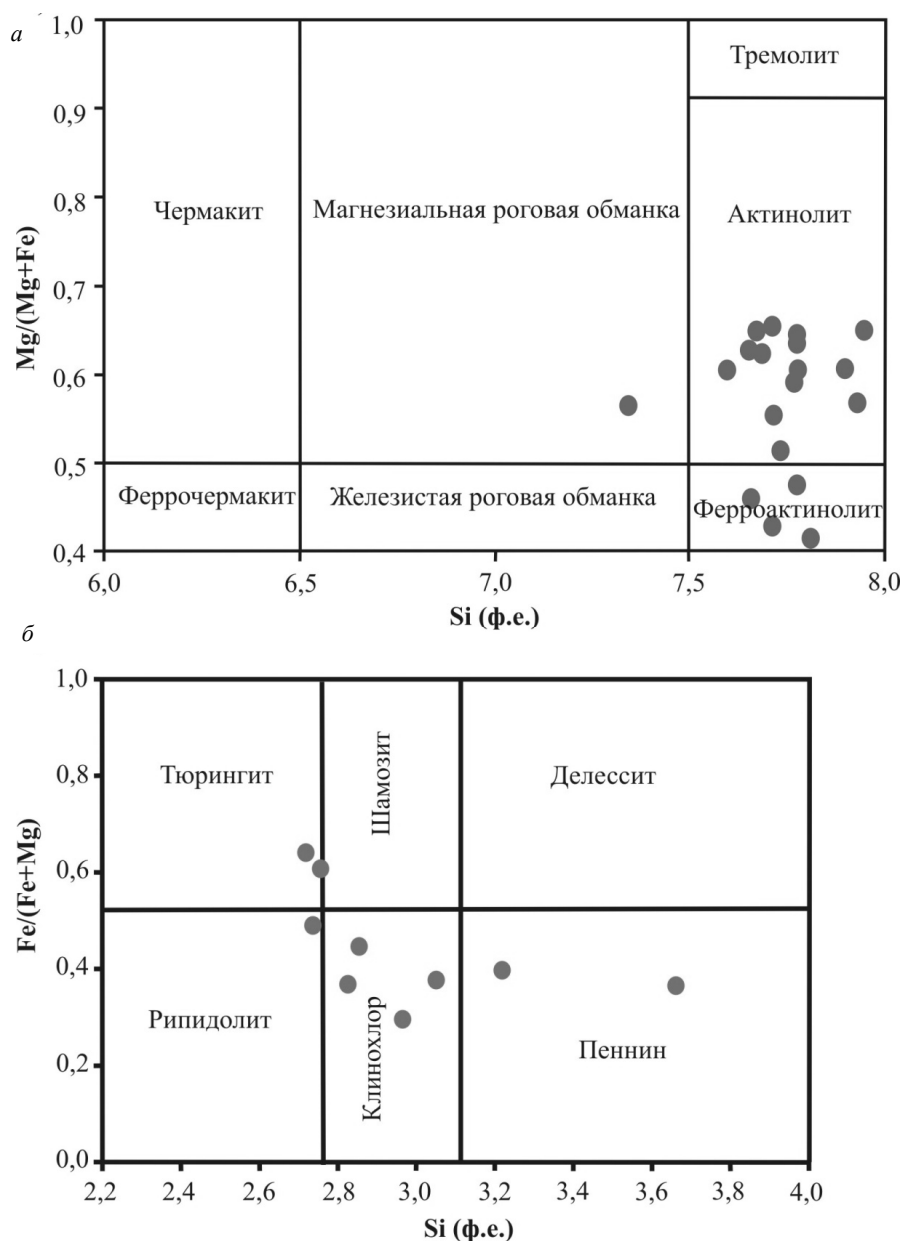


Рис. 2. Положение исследованных амфиболов (а) и хлоритов (б) на классификационных диаграммах по [11]

Формульные количества хлоритов из пропилитов участка Лог-26

Т а б л и ц а 4

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Si	2,73	3,66	2,82	2,85	3,05	2,96	2,75	2,71	3,21
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03
Al	2,55	1,93	2,37	2,38	2,25	2,33	2,69	2,75	2,64
Fe	2,32	1,62	1,75	2,14	1,75	1,40	2,74	2,90	1,59
Mn	0,03	—	0,03	0,04	—	—	0,05	0,04	—
Mg	2,37	2,73	2,96	2,58	2,87	3,27	1,77	1,60	2,35
Ca	—	0,06	—	—	—	0,04	—	—	—
Na	—	—	0,07	—	0,07	—	—	—	—
K	—	—	—	—	—	—	—	—	0,18

Примечание. Кристаллохимические формулы хлоритов рассчитаны на 10 катионов согласно формуле $(Mg,Al,Fe)_{5-6}(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ [9].

Результаты проведенных исследований в целом сводятся к следующему.

В составе гидротермальной рудной минерализации участка преобладает пирит, который часто замещается и цементируется арсенопиритом. В участках максимальной интенсивности проявления гидротермального процесса широко развиты минералы позднего полиме-

таллического парагенезиса: пирротин, галенит, сфалерит, халькопирит, блеклая руда, а также наиболее поздняя теллуридно-сульфосольная ассоциация.

Ранняя высокотемпературная стадия представлена арсенопирит-(молибденит)-пиритовой ассоциацией. В эту стадию происходило отложение следующих минералов:

Пирит относится к числу ранних новообразованных минералов и является вторым после пирротина по распространенности минералом в рудах проявления Лог-26. Его количество от рудных минералов достигает 30%. Для пирита отмечаются различные формы выделения. Для него характерны мелко- и

крупнозернистые агрегаты правильной кристаллографической формы, метакристаллы, прожилки. Кристаллы в большинстве случаев раздроблены, катклазированы. По данным оптического изучения взаимоотношений сульфидов выделена одна генерация пирита.

Т а б л и ц а 5

Формульные коэффициенты сульфидов и теллуридов рудопроявления Лог-26

№ рис.	№ Сп	S	Fe	Co	Ni	Sb	As	Cu	Mo	Te	Pb	Bi	Ag	Au	Минерал
3	3	1,67	—	—	—	—	—	—	1,00	—	—	—	—	—	Молибденит MoS_2
4	1	1,00	—	—	—	—	—	—	—	2,02	—	2,04	—	—	Тетрадимит $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$
4	2	—	—	—	—	—	—	—	—	1,00	—	1,02	—	—	Цумоит BiTe
4	3	1,0	0,86	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Пирротин II FeS
4	4	1,0	0,87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6	1	1,98	1,00	—	—	—	—	0,97	—	—	—	—	—	—	Халькопирит FeCuS_2
6	4	0,22	0,04	—	—	—	—	0,04	—	1,00	0,18	0,15	1,81	—	Гессит Ag_2Te
6	5	3,02	0,72	1,00	1,21	—	3,49	0,10	—	—	—	—	—	—	Герсдорфит $(\text{Fe,Ni,Co})\text{AsS}$
6	7	2,71	0,62	1,00	0,96	—	3,07	—	—	—	—	—	—	—	
6	9	2,81	0,68	1,00	1,03	—	3,17	—	—	—	—	—	—	—	
6	6	1,00	0,04	0,04	0,02	—	—	—	—	—	1,0	—	—	—	Галенит PbS
6	8	0,35	0,17	—	—	—	—	0,25	—	1,0	—	2,50	1,18	—	Вольнскит (AgBiTe) с самородным висмутом(?)

Примечание к таблицам и фотографиям. Аншлифы проанализированы на электронных сканирующих микроскопах LEO-1430VP, MIRA 3LMU с системами микроанализа INCAEnergy 350, INCAEnergy 450+ и волновым спектрометром INCA Wave500 в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск, аналитик М.В. Хлестов). Сп – номер спектра на рисунке.

Содержание *арсенопирита* в рудах достигает 15% от общего числа сульфидов, в отдельных образцах он может быть одним из основных минералов. Анализ взаимоотношений арсенопирита с другими сульфидами, а также данные рентгеноспектрального анализа показали, что в рудах присутствует одна генерация минерала. Арсенопирит отмечается в виде идиоморфных, часто раздробленных и деформированных агрегатов, которые встречаются в ассоциации с галенитом, пиритом, халькопиритом и пирротинном. Нередко образует колеччатые двойники и двойные прорастания. Часто полости в арсенопирите заполнены сфалеритом.

Пирит и арсенопирит не встречены в парагенезисе с *молибденитом*, что затрудняет определение их временных взаимоотношений. По аналогии с другими месторождениями предполагается, что молибденит образован в ту же стадию, но пространственно обособлен, что отражает температурную зональность отложения минерализации [7, 17]. Нередко в молибдените отмечаются прожилки и включения золота (см. рис. 3).

Вторая стадия представлена галенит-сфалерит-халькопирит-пирротинной (полиметаллической) ассоциацией. Внутри этой стадии выделяется 4 ступени: пирротинная, халькопиритовая, сфалерит-галенитовая и борнитовая.

Рудоотложение этой стадии начиналось с пирротина I. Его содержание относительно рудных минералов от 5 до 90%. Характеризуется светло-желтым цветом с коричневато-кремовым оттенком, высокой отражательной способностью. Пирротин I представлен гексагональной разновидностью, о чем свидетельствуют находки сечений кристаллов пирротина гексагонального облика, а также сильная анизотропия в скрещенных николях. Для пирротина I характерны скопления разнозернистых агрегатов вместе с другими рудными мине-

ралами. Пирротин I нередко цементирует раздробленные кристаллы арсенопирита. Наблюдаются микровключения зерен пирротина в сфалерите. По данным рентгеноспектрального анализа зафиксированы также микровключения пирротина II вместе с цумоитом в виде реакционной каймы вокруг тетрадимита, на контактах его с хлоритом (см. рис. 4).

Халькопирит часто наблюдается в ассоциации со сфалеритом, галенитом и пирротинном (см. рис. 5). Для него характерны разнообразные по форме включения в сфалерите. Выделены две генерации халькопирита. Халькопирит I ассоциирует с пирротинном, пиритом, арсенопиритом. Халькопирит II проявлен в виде эмульсий в сфалерите, которые имеют самые разнообразные формы: округлые, точечные, идиоморфные, нитевидные и др. Размеры этих включений варьируются от микроскопических до 1–2 мм, и нередко содержание их достигает до 30% площади зерна сфалерита. Детальные микроскопические исследования характера распределения включений халькопирита в сфалерите показывают, что они могли возникнуть как продукты распада твердого раствора.

Борнитовая ступень наблюдается непостоянно в силу относительной редкости борнита в рудах участка Лог-26. В ассоциации с ним отмечается присутствие до 1% алтаита.

Внутри перечисленных четырех ступеней нет признаков дробления и коррозии, контакты между минералами ровные.

В составе третьей стадии нами установлены алтаит, раклиджит, цумоит, гессит, тетрадимит, тетраэдрит, самородный висмут, герсдорфит, ульманит, кобальтин (раклиджит, цумоит, гессит, герсдорфит, ульманит и кобальтин впервые для рудного узла), которые пространственно дистанцируются от полиметаллического

парагенезиса. Эти минералы в основном образуют скопления в пустотах агрегатов вышеописанных ассоциаций, а также тонкие прожилки и просечки, залечивая трещины дробления (рис. 6). Секущих взаимоотношений между минералами внутри данной стадии не установлено.

Рудообразование завершается образованием мало-мощных (до 1,5 см) прожилков кварц-карбонатного

состава, секущих основную массу скарированных и пропилитизированных пород.

В гипергенный этап первичные сульфидные минералы подверглись окислению с образованием плёнок, примазок, охр и прожилков лимонита, малахита и азурита.

По результатам исследований построена рабочая схема последовательности минералообразования участка Лог-26 (см. рис. 7).

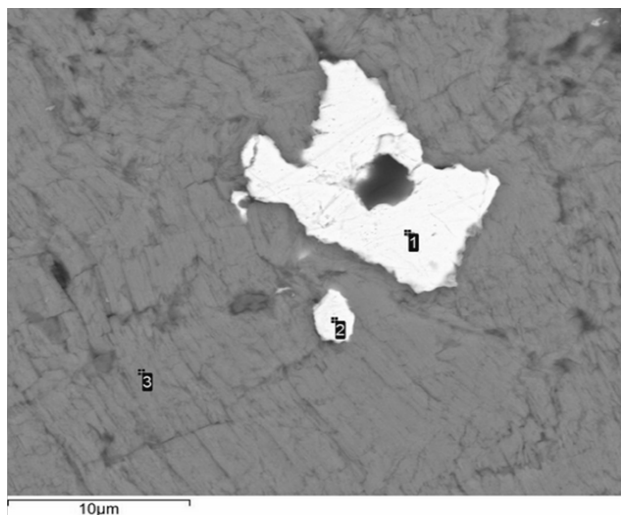


Рис. 3. Формы выделения золота в молибдените: 1–2 – золото (85,8%); 3 – молибденит. Изображение в обратно рассеянных электронах

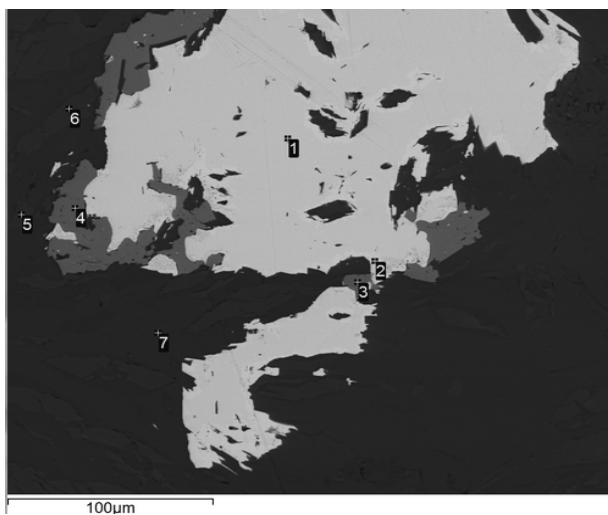


Рис. 4. Формы выделения тетрадимита и цинноита в рудах участка Лог-26: 1 – тетрадимит; 2 – цинноит; 3, 4 – пирротин II; 5, 6 – амфибол; 7 – хлорит. Изображение в обратно рассеянных электронах

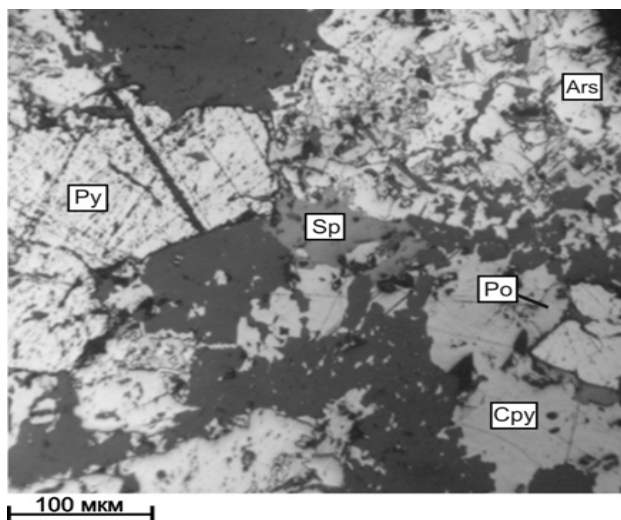


Рис. 5. Взаимоотношения сульфидов участка Лог-26: пирротин (Po), халькопирит (Cpy) и сфалерит (Sp) цементируют раздробленные кристаллы арсенопирита (Ars) и пирита (Py). Обр. № С-2/195,6 м × 100

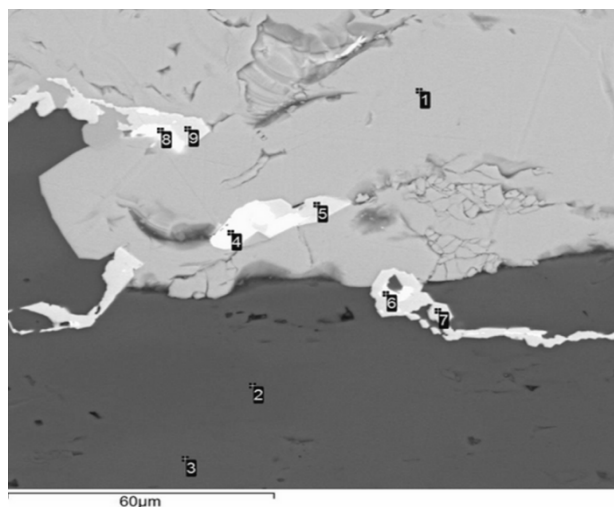


Рис. 6. Взаимоотношения сульфидов участка Лог-26: 1 – халькопирит; 2, 3 – кальцит; 4 – гессит; 5, 7, 9 – герсдорфит; 6 – галенит; 8 – волинскит с самородным висмутом (?). Изображение в обратно рассеянных электронах

Обсуждение результатов и выводы. В пределах рудопроявления Лог-26 Топольнинского золоторудного поля выявлено два типа метасоматических новообразований – скарны и апоскарновые пропилиты. Для скарнов характерен гранат-пироксеновый состав, для апоскарновых пропилитов – эпидот-актинолитовый и эпидот-хлоритовый.

Полученные данные согласуются с результатами по другим объектам-аналогам (Синохинское, Майско-Лебедское

рудное поле), в пределах которых отмечаются аналогичные ряды околорудных изменений и общая последовательность рудоотложения. Для этих месторождений характерны образование на раннем этапе скарнов, затем при понижении температуры и эволюции раствора формирование около-скарновых пропилитов, березитов, аргиллизитов (?) с сопутствующей им сульфидной минерализацией (золото-магнетит-сульфидная, золото-полиметаллическая с теллуридами, кварц-карбонатная) [8, 16, 18].

Этап	Гипогенный										Гипергенный
Стадия	Скарновая	Апоскарново-пропилитовая	Арсенопирит-(молибденит)-пиритовая		Полиметаллическая				Теллуридно-сульфотеллуридно-сульфидная	Пострудная	Гидрогетитовая (оксидная) с малахитом и азуритом
Минералы			Пиритовая	Арсенопиритовая	Пирротиновая	Халькопиритовая	Сфалерит-галенитовая	Борнитовая			
Гранат	—										
Пироксен	—										
Волластонит	—										
Кальцит		—				—					
Амфибол		—									
Скаполит	—										
Хлорит		—									
Эпидот	—	—				—					
Кварц		—									
Пирит			—								
Арсенопирит				—							
Молибденит			—								
Пирротин					—				—		
Халькопирит						—		—			
Сфалерит							—				
Галенит							—				
Борнит								—			
Тетрадимит									—		
Тетраздрит									—		
Золото (электрум)						—			—		
Висмут самородн.									—		
Теллуриды Pb, Bi и Ag*									—		
Сульфиды Ni, Co и As**									—		
Лимонит											—
Малахит											—
Азурит											—
Тектонические подвижки, интенсивность их проявления			↑	↑	↑				↑	↑	
Текстуры	Вкрапленная, прожилковая, гнездовая										Прожилки, примазки, плёнки
Структуры	Гетерогранобластовая, идиобластовая, лепидогранобластовая	Гранобластовая, катакластическая	Аллотриоморфнометазернистая, цементная, эмульсионная, прожилковая, нитевидная, кристаллическая								

Примечание:

* Теллуриды Bi, Pb, Ag: цумоит, раклит, гессит, алтаит.

** Сульфиды Ni, Co и As: герсдорфит, кобальтин, ульманит.

Рис. 7. Схема последовательности минералообразования участка Лог-26 (Топольнинское рудное поле, Алтайский край)

Для рудопроявления Лог-26 нами выделены семь продуктивных стадий минерализации: скарновая и апоскарново-пропилитовая (эпидот-актинолитовая и хлорит-эпидотовая ассоциации), три рудообразующие стадии (арсенопирит-молибденит-пиритовая, полиметаллическая и теллуридно-сульфотеллуридно-сульфидная). На завершающих стадиях образовались кварц-

карбонатные прожилки и гипергенные карбонаты (лимонит, малахит, азурит).

Очевидно, что установленные закономерности образований минеральных ассоциаций свидетельствуют о принадлежности рассматриваемого рудопроявления Лог-26 к группе перспективных месторождений золото-скарновой формации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошилов В.Г. Поисковая геолого-геохимическая модель золото-скарновых месторождений Южной Сибири // Разведка и охрана недр. 2009. № 5. С. 37–41.
2. Столбова Н.Ф. Минералогия и генезис Лебедской золотоносной скарновой зоны : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 1970. 390 с.
3. Коробейников А.Ф. Закономерности формирования месторождений золото-скарновой формации // Скарны и руды. Новосибирск, 1983. С. 50–55.
4. Einaudi M.T., Meinert L.D., Newberry R.J. Skarn deposits // Economic geology 75th anniversary volume. 1981. P. 317–391.
5. Гусев А.И. Петрология и рудоносность магмо-рудно-метасоматических систем Солонешенского рудного района Алтая. Бийск : АГАО им. В.М. Шукшина, 2013. 205 с.

6. Вахрушев В.А. Минералогия, геохимия и образование месторождений скарново-золоторудной формации. Новосибирск : Наука, 1972. 238 с.
7. Ворошилов В.Г. Аномальные структуры геохимических полей гидротермальных месторождений золота: механизм формирования, методика геометризации, типовые модели, прогноз масштабыности оруденения // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51, № 1. С. 3–19.
8. Гусев А.И. Металлогения золота Горного Алтая и юга Горной Шории : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Томск, 2006. 259 с.
9. Борнеман-Старынкевич И.Д. Руководство по расчету формул минералов. М. : Наука, 1964. 224 с.
10. Доливо-Добровольский В.В. Физическая химия геологических процессов. Методы физико-химических расчетов процессов минералообразования. СПб. : Санкт-Петербургский горный институт, 2002. 70 с.
11. Leake B.E., Woolley A.R., Birch W.D., Burke E.A.J., Ferraris G., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Schumacher J.C., Stephenson N.C.N., and Whittaker E.J.W. Nomenclature of amphiboles: Additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature // American Mineralogist. 2004. Vol. 89. P. 883–887.
12. Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginsburg J.V., Ross M., Seifert F.A., Zussmann J. Nomenclature of pyroxenes // Min. mag. 1988. Vol. 52. P. 535–550.
13. Armbruster T., Bonazzi P., Akasaka M., Bermanec V., Chopin C., Gieré R., Heuss-Assbichler S., Liebscher A., Menchetti S., Pan Y., Pasero. Recommended nomenclature of epidote-group minerals // European Journal of Mineralogy. 2006. Vol. 18. P. 551–567.
14. Методика изучения гидротермально-метасоматических образований / Е.В. Плюшев [и др.]. Л. : Недра, 1981. 262 с.
15. Ali Asghar Calagari, Ghader Hosseinzadeh. The mineralogy of copper-bearing skarn to the east of the Sungun-Chay river, East-Azarbaidjan, Iran // Journal of Asian Earth Sciences. 2000. Vol. 28. P. 423–438.
16. Коротких С.А., Ворошилов В.Г. Геолого-структурные критерии локализации золотого и волластонитового оруденения Синюхинского рудного поля (Горный Алтай) // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319, № 1. С. 58–63.
17. Ворошилов В.Г., Ананьев Ю.С. Механизмы формирования и методы выявления разноранговых аномальных геохимических полей // Разведка и охрана недр. 2013. № 8. С. 41–45.
18. Тимкин Т.В. Эндогенная рудно-метасоматическая зональность Майско-Лебедского золоторудного поля // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320, № 1. С. 55–63.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 3 февраля 2014 г.

THE MINERALOGY AND PARAGENETIC SEQUENCE OF MINERALS PRESENT IN LOG-26 ORE FIELD OF THE TOPOLNINSKOE GOLD AREA (GORNÝ ALTAI)

Tomsk State University Journal. No. 383 (2014), 212–220. DOI: 10.17223/15617793/383/33

Logvinenko Olesya V., Timkin Timofey V. Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia). E-mail: kzzzz@inbox.ru

Key words: gold deposits; mineralogy of ore; Topolninskoe gold area; Gorny Altai.

Log-26 ore field is located in the Topolninskoe area which is situated in Gorny Altai within the Ural-Mongolian mountain belt. Paragenetic and textural studies have established seven productive stages of mineralization of ores of Log-26 field. Early prograde skarn and late retrograde metasomatites are widespread in the area of Log-26 with increase in fault zones. Metasomatites of epidote-actinolite and chlorite-epidote facies form caps in the periphery of skarn bodies. The skarns are composed of clinopyroxene, garnet, calcic amphiboles (ferroactinolite, actinolite and magnesiohornblende), wollastonite, plagioclase, potash feldspar, epidote (clinozoisite, epidote), scapolite, chlorite and calcite. Garnets are grossular-andradite with 0.03 to 4.72 mol% piralspite, whereas pyroxenes are hedenbergitic to diopsidic in composition. Fine sulfide mineralization is concentrated in hydrothermally altered rocks. The research has shown that ores are formed in three mineral stages: arsenopyrite-molybdenite-pyrite, polymetallic and telluride-sulfotelluride-sulfide. For the first time, such minerals as rucklidgeite, tsumoite, hessite, gersdorffite, ullmannite and cobaltite (telluride-sulfotelluride-sulfide stage) have been detected in this area. Late stages are represented by quartz-carbonate cross-cutting veinlets and hypergene carbonates (limonite, malachite, azurite). Native gold and electrum prevail in molybdenite, bornite and are associated with telluride minerals as fine-grained inclusions; grain size varies from 5 to 20 μm . As a result of this study the paragenetic scheme was made. The chemical composition and crystallochemical formulas were determined for all silicates and opaque minerals. The results obtained are in concordance with the data received from similar ore fields (Sinyukhinskoe, Maysko-Lebedskoe). These fields show similar series of hydrothermally altered rocks such as early prograde skarns and late retrograde alterations of propilitic, beresite and argillite facies. Sulfide mineralization forms gold-magnetite-sulfide, gold-polymetallic with tellurides and quartz-carbonate assemblages. The referred facts evidence the relation of the examined Log-26 ore field to the group of perspective gold-bearing skarn formations.

REFERENCES

1. Voroshilov V.G. Search geological-geochemical model of the gold-skarn deposits of South Siberia. *Razvedka i okhrana nedr – Prospect and protection of mineral resources*, 2009, no. 5, pp. 37–41. (In Russian).
2. Stolbova N. F. *Mineralogiya i genezis Lebedskoy zolotonosnoy skarnovoy zony*: dis. kand. geol.-min. nauk [Mineralogy and genesis of Lebedskaya gold-bearing skarn zone. Geology and Mineralogy Cand. Diss.]. Tomsk, 1970. 390 p.
3. Korobeynikov A.F. *Zakonomernosti formirovaniya mestorozhdeniy zoloto-skarnovoy formatsii* [Laws of deposit formation of gold-skarn formation]. In: Kuznetsov V.A. (ed.) *Skarny i rudy* [Skarns and ores]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1983, pp. 50–55.
4. Einaudi M.T., Meinert L.D., Newberry R.J. *Skarn deposits*. In: Skinner B.J. (ed.) *Seventy-fifth anniversary volume*. New Haven: the Economic Geology Publishing Company, 1981, pp. 317–391.
5. Gusev A.I. *Petrologiya i rudonosnost' magmo-rudno-metasomaticheskikh sistem Solonshenskogo rudnogo rayona Altaya* [Petrology and ore-bearing of magmatic ore-metasomatic systems of Solonshensky ore region of Altai]. Biysk: AGAO im. V.M. Shukshina Publ., 2013. 205 p.
6. Vakhrushev V.A. *Mineralogiya, geokhimiya i obrazovanie mestorozhdeniy skarnovo-zolotorudnoy formatsii* [Mineralogy, geochemistry and formation of deposits of gold skarn formation]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1972. 238 p.
7. Voroshilov V.G. Anomaliye struktury geokhimicheskikh poley gidrotermal'nykh mestorozhdeniy zolota: mekhanizm formirovaniya, metodika geometrizatsii, tipovye modeli, prognoz masshtabnosti orudeneniya [Abnormal structures of geochemical fields of hydrothermal gold deposits: formation mechanism, methods of geometrization, typical models, ore mineralization grade]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of Ore Deposits*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 3–19.
8. Gusev A.I. *Metallogeniya zolota Gornogo Altaya i yuga Gornoy Shorii*: dis. dok. geologo-mineralogicheskikh nauk [Gold metallogeny of the Altai Mountains and the Southern Highlands of Shoria. Geology and Mineralogy Doc. Diss.]. Tomsk, 2006. 259 p.

9. Borneman-Starynkevich I.D. *Rukovodstvo po raschetu formul mineralov* [Guidance on the calculation of formulas of minerals]. Moscow: Nauka Publ., 1964. 224 p.
10. Dolivo-Dobrovolskiy V.V. *Fizicheskaya khimiya geologicheskikh protsessov. Metody fiziko-khimicheskikh raschetov protsessov mineraloobrazovaniya* [Physical chemistry of geological processes. Physical-chemical calculations of mineral processes]. St. Petersburg: Sankt-Peterburg Mountain Institute Publ., 2002. 70 p.
11. Leake B.E., Woolley A.R., Birch W.D., Burke E.A.J., Ferraris G., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Schumacher J.C., Stephenson N.C.N., Whittaker E.J.W. Nomenclature of amphiboles: Additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature. *American Mineralogist*, 2004, vol. 89, pp. 883-887.
12. Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginsburg J.V., Ross M., Seifert F.A., Zussmann J. Nomenclature of pyroxens. *Mineralogical magazine*, 1988, vol. 52, no. 367, pp. 535-550. DOI: 10.1180/minmag.1988.052.367.15
13. Armbruster T., Bonazzi P., Akasaka M., Bermanec V., Chopin C., Gieré R., Heuss-Assbichler S., Liebscher A., Menchetti S., Pan Y., Pasero. Recommended nomenclature of epidote-group minerals. *European Journal of Mineralogy*, 2006, vol. 18, pp. 551-567. DOI: 10.1127/0935-1221/2006/0018-0551
14. Plyushchev E.V., Ushakov O.P., Shatov G.P., Belyaev G.M. *Metodika izucheniya gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy* [Method for studying hydrothermal-metasomatic formations]. Leningrad: Nedra Publ., 1981. 262 p.
15. Ali Asghar Calagari, Ghader Hosseinzadeh. The mineralogy of copper-bearing skarn to the east of the Sungun-Chay river, East-Azarbaidjan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, vol. 28, pp. 423-438. DOI: 10.1016/j.jseas.2005.11.009
16. Korotkikh S.A., Voroshilov V.G. Geologo-strukturnye kriterii lokalizatsii zolotogo i vollastonitovogo orudneniya Sinyukhinskogo rudnogo polya (Gornyy Altay) [Geological and structural criteria and localization of gold and vollastonite mineralization in Sinyuhinsky ore field (Gorny Altai)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 58-63.
17. Voroshilov V. G., Anan'ev Yu.S. The formation mechanisms and detection methods of multi-faceted anomalous geochemical fields. *Razvedka i okhrana nedr – Prospect and protection of mineral resources*, 2013, no. 8, pp. 41-45. (In Russian).
18. Timkin T.V. Endogenous ore-metasomatic zonalit of Maysk-Lebedsk gold ore field. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no.1, pp. 55-63. (In Russian).

Received: February 03, 2014