



УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛОТОСКАРНОВЫХ РУДОПРОЯВЛЕНИЙ ТОПОЛЬНИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

О. В. Савинова

В рудном поле выявлено пять продуктивных минеральных ассоциаций: кварц-пирит-арсенопирит-кальцитовая, кварц-молибденит-кальцитовая; кварц-арсенопирит-пиритовая-кальцитовая, кварц-хлорит-полиметаллическая-эпидот-амфибол-кальцитовая и теллуридно-сульфидная. Для определения условий минералообразования были изучены газовой-жидкие включения в кальците и кварце из метасоматитов пропилитовой и березитовой формации, сопровождающие указанные минеральные ассоциации. В образовании минерализации принимали участие два флюидных потока, различающиеся по солености и металлогенической нагрузке. Установлено, что кальцитовые прожилки с молибденитом формировались при температурах 150–250 °С и солености 6–13 мас. % NaCl-экв; кварц-арсенопирит-пирит-кальцитовая ассоциация – 50–310 °С и 11–15 мас. % NaCl-экв. соответственно. Образование кварц-хлорит-полисульфидно-эпидот-амфибол-кальцитовой ассоциации происходило при температурах 150–190 °С; березитов – 187–240 °С и 4,5–9 мас. % NaCl-экв. Метасоматиты разделяются на две фации: среднетемпературные эпидот-актинолитовые с соленостью 8–18 мас. % NaCl-экв. и кальцит-хлоритовые с соленостью 5–10 мас. % NaCl-экв.

Ключевые слова: золотоскарновая формация, термобарогеохимия, флюидные включения, золото, минеральные ассоциации.

GENESIS OF AU-SKARN DEPOSITS OF THE TOPOLNINSKOE ORE FIELD (GORNYY ALTAI)

O. V. Savinova

Five mineral associations are recognized in the ore field: quartz-pyrite-arsenopyrite-calcite, quartz-molybdenite-calcite; quartz-arsenopyrite-pyrite-calcite, quartz-polymetallic-epidot-amphibole-calcite and telluride-sulfide ones. Fluid inclusions in calcite and quartz grains from metasomatites of propylitic and beresitic formations accompanying the specified mineral associations were examined in order to determine the conditions of mineral precipitation. It was found out that two fluid brines, different from each other by salinity and metallogenic load, participated in mineralization. It is determined that calcitic veinlets with molybdenite were formed at 250–150 °C and salinity of 13–6 wt.% NaCl-equiv. Quartz-arsenopyrite-pyrite-calcite association was formed at 310–150 °C and salinity of 19–11 wt.% NaCl-equiv. The quartz-chlorite-polymetallic-epidot-amphibole-calcite association formed at 190–150 °C. The metasomatites are divided into two facies: medium temperature epidot-actinolite one with salinity of 18–8 wt.% NaCl-equiv. and low temperature calcite-chlorite one with salinity of 9–4.5 wt.% NaCl-equiv. Beresites were formed at 240–187 °C and salinity of 9–4.5 wt.% NaCl-equiv.

Keywords: Au-skarn formation, microthermometry, fluid inclusion, gold, mineral association.

Топольнинское рудное поле находится на севере Горного Алтая и относится к перспективной золотоскарновой рудной формации [4]. Площадь поля сложена терригенно-карбонатными образованиями нижнего силура и девона, представленными громотухинской и камышенской свитами соответственно. Осадочные толщи смяты в крупную Топольнинскую синклинали северозападного простирания и разбиты серией субмеридиональных тектонических нарушений. Большая часть рудопроявлений локализована в экзоконтактах двух разобщенных массивов Топольнинской гранитоидной интрузии и приурочена к биметасоматически-инфильтрационным скарнам, скарнированным телам и сопутствующим им метасоматитам. Золоторудная минерализация прослеживается по всему разрезу скарнированных пород.

НИ ТПУ (Томск)

В процессе изучения в скарновых рудах нами было установлено более 30 минералов. Основные порообразующие минералы – это гранаты, пироксены, волластонит, скаполит, эпидот, кальцит, амфиболы и хлориты; рудные – пирит, арсенопирит, пирротин, молибденит, халькопирит, сфалерит, галенит, борнит, халькозин и ковеллин. В виде мелких включений и просечек присутствуют разнообразные сульфиды, блеклые руды, сульфосоли и теллуриды. Рентгеноспектральным микроанализом нами впервые для рудного поля установлены герсдорфит ($\text{Fe}_{0,17}\text{Ni}_{0,5}\text{Co}_{0,36}\text{As}_1\text{S}_{0,93}$), цумоит $\text{Bi}_{1,02}\text{Te}_1$, гессит $\text{Ag}_{1,81}\text{Te}_1$, кобальтин $\text{Co}_1\text{As}_{1,08}\text{S}_{1,19}$, скиннерит $\text{Cu}_{2,82}\text{Sb}_1\text{S}_{3,08}$, раклиджит $(\text{Bi}_{1,97}\text{Pb}_1)_{2,97}\text{Te}_{4,02}$, ульманит $\text{Ni}_1\text{Sb}_{1,35}\text{S}_{1,38}$, поубайт $\text{Pb}_1\text{Bi}_{1,71}(\text{Se}_{0,56}\text{Te}_{0,14}\text{S}_{3,85})_{4,55}$, самородный висмут.

Золото зафиксировано в виде ультрамелких включений в молибдените, в борните и в ассоциации с теллуридными минералами. Размер включений варьирует от 5 до 20 мкм. Химический со-



став золотин изменяется в следующих пределах (мас. %): Au 60,36–90,06, Ag 7,98–5,09, Fe 0,20–3,09, Cu 0,3–1,73. Среднее значение микротвердости по семи замерам – 92,845 кгс/мм².

По результатам минераграфического анализа в пределах рудого поля выявлено пять продуктивных минеральных ассоциаций: кварц-пирит-арсенопирит-кальцитовая, кварц-молибденит-кальцитовая; кварц-арсенопирит-пиритовая-кальцитовая, кварц-хлорит-полиметаллическая-эпидот-амфибол-кальцитовая и теллуридно-сульфидная. Минеральные ассоциации сопровождаются метасоматитами известково-скарновой формации, апоскарновыми метасоматитами пропилитового ряда и березитами.

Рудный процесс завершился образованием безрудных кварц-кальцитовых прожилков и гипергенных минералов (лимонит, азурит, малахит).

Методы исследований

Для микротермометрических исследований в лаборатории физических методов исследования горных пород и руд при кафедре геологии и разведки полезных ископаемых Томского политехнического университета использован компьютерный измерительный комплекс, созданный на основе микротермокамеры MDSG600 фирмы Lincam (Англия), микроскопа Axio Imager (Германия), снабженного набором длиннофокусных объективов (максимальное увеличение 50×), видеокамеры и управляющего компьютера. Комплекс позволяет в режиме реального времени производить измерения температур фазовых переходов в интервале от –180 до +500 °С, наблюдать за ними при больших увеличениях и получать электронные микрофотографии. Погрешность измерений составила не более 0,5 °С.

Исследование флюидных включений

Для определения условий минералообразования были изучены флюидные включения в таких прозрачных минералах, как кальцит и кварц, в единичных случаях – в эпидоте и волластоните. Следует отметить, что в последних и других прозрачных минералах, флюидные включения встречаются крайне редко и имеют субмикронные размеры, что затрудняет их диагностику и проведение термобарогеохимического исследования. Образцы для исследования отобраны на таких интервалах, где развита исключительно минерализация только одной из стадий рудоотложения, что позволяет достаточно точно определить относительное время образования флюидных включений в истории формирования рудного поля.

Таким образом, замеры температур фазовых переходов выполнялись в каждой полированной пластинке для максимально возможного количества одновозрастных включений (син- либо эпигенетических), различающихся по размеру и соотношению фаз в вакуоли. Так как изученные вклю-

чения не содержат минералов-узников, состоят из водных растворов солей слабой или умеренной концентрации, а в газовой фазе при охлаждении не проявили признаков низкокипящих газов (СО₂, СН₄ и др.), для них определялись следующие температуры: температура эвтектики $T_{эвт}$ (температура начала плавления льда для мелких включений) и температура полного плавления льда $T_{пл.л.}$. По $T_{эвт}$ можно судить о фазовом составе основных солевых компонентов. Растворы с $T_{эвт} = 45–54$ °С содержат преимущественно CaCl₂ с примесями хлоридов NaCl, KCl и MgCl₂; $T_{эвт} = 32–37$ °С – с MgCl₂, MgCl₂+NaCl, MgCl₂+KCl. Для растворов с NaCl характерны температуры эвтектики 21,3–23,5 °С. По температуре плавления льда рассчитывалась суммарная концентрация солей. Гомогенизация подавляющей части включений идет по первому типу, т.е. в жидкую фазу.

Результаты термо- и криометрических исследований 83 индивидуальных флюидных включений приведены в таблице. Как показано в работах [2, 4], эволюция флюидных ортомагматических систем объясняется с позиции процесса ретроградного кипения магм, в процессе которого образуются две несмешиваемые флюидные фазы: высококонцентрированный рассол со щелочной реакцией и слабоминерализованный кислый пар.

Как показали результаты исследований газовой-жидких включений Топольнинского рудного поля, на ранних этапах миграции высокосоленого флюида образовались известковые скарны. По данным [3], соленость газовой-жидких включений в гранатах и волластоните достигает 33 мас. % NaCl-экв. для проявления Баяниха (Топольнинское рудное поле) и 45 мас. % NaCl-экв. для других золотоскарновых месторождений при температурах минералообразования 450–700 °С.

Особенность изменения $T_{эвт}$ растворов состоит в том, что от периода к периоду она менялась скачкообразно, оставаясь постоянной на протяжении каждого из них (см. таблицу, столбец 4). Температура эвтектики – чуткий индикатор качественного состава растворов, не зависящий от концентрации растворенных компонентов, но индивидуально реагирующий на появление каждого из них в количестве более 1 %. Поэтому идентичность $T_{эвт}$ сравниваемых растворов с высокой вероятностью свидетельствует и о близости их качественного состава.

Максимальные температуры эвтектики зафиксированы во включениях в кальците кварц-пирит-арсенопирит-кальцитовой ассоциации (пропилиты), где они достигают –54 °С, что свидетельствует о наличии в растворе флюидных включений заметных количеств хлорида кальция. Такие хлоридные растворы достаточно агрессивны и способны растворять и переносить многие металлы.

Образование кварц-арсенопирит-пирит-кальцитовой и следующей за ней полиметаллической



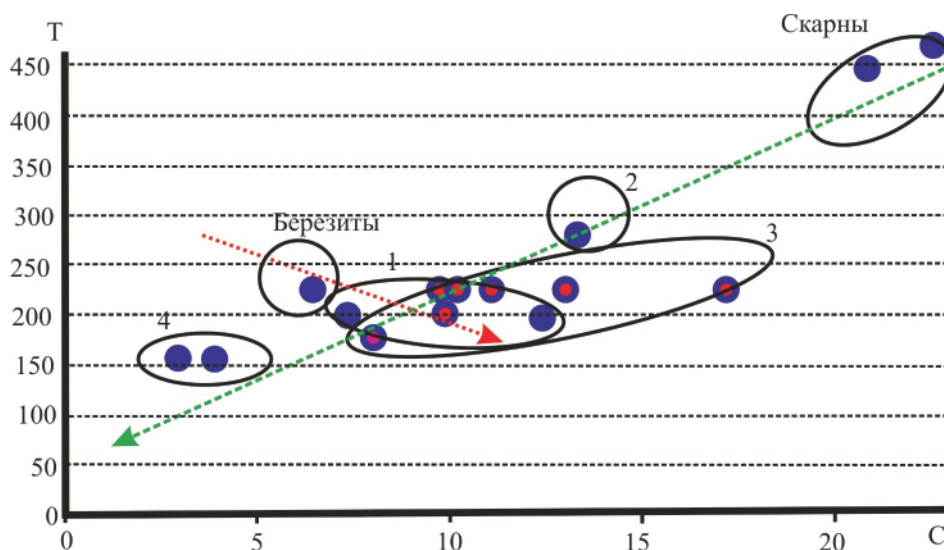
Результаты термобарогеохимических исследований

| Минерал | n | T _{гом} , °C | T _{звт} , °C | T _{пл.л} , °C | Соленость, мас. % NaCl-экв. | Компонентный состав солевой системы |
|-----------------------------------|----|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 |
| Кварц | | | | | | |
| из березитов | 5 | 187–240 | –(27–38) | –(2–5) | 4,5–9 | MgCl ₂ –KCl–NaCl–H ₂ O |
| из безрудных прожилков | 4 | 180–190 | –(32–33) | –(1–3) | 2–6 | MgCl ₂ –NaCl–H ₂ O |
| Кварцевый прожилок, секущий скарн | 3 | 257–265 | –(33–36) | –(5–6) | 9–10 | MgCl ₂ –NaCl–H ₂ O |
| Кальцит | | | | | | |
| с молибденитом | 5 | 145–250 | –(23–41) | –(3–4) | 6–8 | MgCl ₂ –KCl–NaCl–H ₂ O |
| с молибденитом | 6 | 150–210 | –(36–37) | –(0,5–8,5) | 1–13 | MgCl ₂ –FeCl ₂ –NaCl–H ₂ O |
| с арсенопиритом и пиритом | 7 | 185–305 | –(45–54) | –(7–15) | 11–19 | CaCl ₂ –MgCl ₂ –NaCl–H ₂ O |
| с хлоритом и эпидотом | 5 | 174–225 | –(27–34) | –(3–6) | 6–10 | MgCl ₂ –NaCl–H ₂ O |
| из прожилка в пропилите | 7 | 170–190 | –(25–28) | –(2,5–5) | 5–9 | MgCl ₂ –NaCl–H ₂ O |
| с пирротинном | 5 | 207–235 | –(36–38) | –(11–13) | 16–17,5 | MgCl ₂ –KCl–NaCl–H ₂ O |
| с пирротинном | 3 | 215–227 | –(37–39) | –(6–7) | 10–11 | MgCl ₂ –KCl–NaCl–H ₂ O |
| с эпидотом и пирротинном | 8 | 150–220 | –(29–32) | –(4–6) | 8–10 | MgCl ₂ –NaCl–H ₂ O |
| с эпидотом и пирротинном | 13 | 225–235 | –(36–38) | –(6–10) | 10–15 | MgCl ₂ –KCl–NaCl–H ₂ O |
| с эпидотом и пирротинном | 9 | 200–225 | –(35–38) | –(6–8) | 10–12,5 | MgCl ₂ –KCl–NaCl–H ₂ O |
| из пропилита | 5 | 174–225 | –(27–34) | –(3–6) | 6–10 | MgCl ₂ –NaCl–H ₂ O |
| из прожилка в пропилите | 7 | 170–190 | –(25–28) | –(2,5–5) | 5–9 | MgCl ₂ –NaCl–H ₂ O |
| Волластонит | 2 | 205–210 | – | –1 | 2 | |
| Эпидот | 1 | 220 | – | – | – | |

№ 3с. Ч. 1 ♦ 2014

ассоциации с сопутствующими апоскарновыми метасоматитами начиналось при температурах около 150–310 °C, при этом отмечается колебание солености (11–19 мас. % NaCl-экв.) во включениях при общем тренде понижения температуры. Это можно объяснить колебаниями давлений флюида вследствие тектонических подвижек и как результат появления инверсии в движении раствора, т.е. на начальном этапе высокое давление флюидов вытесняло воду из раствора во вмещающие породы – явление обратного осмоса. В процессе инфильтрации через вмещающие породы вода обогащается компонентами (Co, Ni, Cr, Fe, Mn, Pb, Zn), мигрирует дальше по ослабленным зонам, формируя восходящие горячие потоки. В дальнейшем эти потоки стягиваются

в одни структуры, освобождаются от указанных компонентов, формируя типичные геохимические аномалии. Вместе с тем в период угасания эндогенного источника растворов интенсивность поступления раствора снижалась, флюидное давление падало, что приводило к интенсивному подтоку метеорных вод в зону фильтрации – смена обратного осмоса прямым. В нашем случае инверсия движения растворов начиналась при температурах до 235 °C и достижении солености 9–10 мас. NaCl-экв. (см. рисунок). Разбавление флюида и затухание процесса привело к отложению минералов кварц-полиметаллической ассоциации и кварц-кальцитовых безрудных прожилков. Этот процесс отразился в составе пирита и арсенопирита из пропилитов, которые обогаще-



Соотношение температуры гомогенизации (Т) и солености (С) ГЖВ в кальците и кварце различных минеральных ассоциаций Топольнинского рудного поля (значения для скарновых минералов по данным [3]) Средние значения температуры и солености ГЖВ в отдельных пробах: 1 – кварц-молибденит-кальцитовая ассоциация; 2 – кварц-арсенопирит-пирит-кальцитовая ассоциация; 3 – кварц-полиметаллическая ассоциация; 4 – пострудные кварц-кальцитовые прожилки



ны Ni и Co, заимствованными из вмещающих пород. Нередко с ними в ассоциации встречаются другие сульфиды никеля и кобальта – кобальтин и герсдорфит.

Для низкоминерализованного флюида также характерно явление обратного осмоса. Концентрация солей в растворе, формирующем кварц-молибденит-кальцитовую и кварц-пирит-арсенопирит-кальцитовую ассоциации (березиты) в температурной области от 190 до 220 °С, увеличивается с падением температуры. Это подтверждает гипотезу нахождения флюидной системы на первых этапах миграции потока под высоким давлением (выше литостатического). Вода из флюидного потока под действием давления «выдавливалась» в окружающие породы, что привело к концентрированию раствора на фоне снижающейся температуры. При более низких температурах (235 °С – точка инверсии) концентрации солей падают с уменьшением температуры. Иными словами, в определенный момент поступление флюидного потока сократилось, давление снизилось (до литостатического), это способствовало притоку метеорных вод и разбавлению эндогенного флюида слабо концентрированными вадозными водами. Пириты и арсенопириты из березитов в отличие от сульфидов из пропилитов характеризуются типоморфной примесью меди и хрома.

Выводы

Проведенные исследования выявили следующие особенности формирования минеральных ассоциаций в пределах Топольнинского рудного поля.

В образовании минерализации принимали участие два флюидных потока, различающихся соленостью и металлогенической нагрузкой. Их пространственное положение формировало температурную зональность рудного поля. Высокоминерализованный щелочной флюид способствовал образованию на ранних этапах известковых скарнов и последующих за ним пропилитов, при этом формирование ранней кварц-арсенопирит-пирит-кальцитовой ассоциации происходило при температурах 150–310 °С и солености 11–19 мас. % NaCl-экв. Образующие ее водно-солевые раство-

ры содержали преимущественно Ca и Na. Кварц-полисульфидно-эпидот-амфибол-кальцитовая ассоциация формировалась при температурах 150–190 °С. На фоне понижающейся температуры метасоматиты по солености разделяются на две фации: среднетемпературные эпидот-актинолитовую (8–18 мас. % NaCl-экв.) и хлорит-кальцитовую (5–10 мас. % NaCl-экв.). В составе раствора отмечается присутствие хлоридов Mg, K и Na. С миграцией слабосоленого гетерогенного флюида связано образование ранних кварц-кальцитовых прожилков с молибденитом, формировавшихся при температурах 150–250 °С и солености 6–13 мас. % NaCl-экв. Кристаллизация осуществлялась из водно-хлоридных растворов, возможно с присутствием углекислоты, в составе которых содержатся растворенные соли Mg, Na и K.

Минералы каждой ассоциации отлагались в соответствии с изменяющимся фазовым составом и концентрацией флюидного раствора и в определенной последовательности. Образование каждой последующей минеральной ассоциации сопровождалось возрастанием начальной температуры относительно конечной температуры каждой предшествующей ей ассоциации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Томского политехнического университета. Проект: ВИУ_ИПР_114_2014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагина, Е. А. Минеральные комплексы руд и генезис месторождения золота Чертово Корыто (Патомское нагорье) : Автореф. дис. ... к.г.-м. н. [Текст] / Е. А. Вагина. – Томск, 2012. – 141 с.
2. Ворошилов, В. Г. Механизмы формирования и методы выявления разноранговых аномальных геохимических полей [Текст] / В. Г. Ворошилов, Ю. С. Ананьев // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 8. – С. 41–45.
3. Гусев, А. И. Металлогения золота Горного Алтая и юга Горной Шории : Автореф. дис. ... д.г.-м. н. [Текст] / А. И. Гусев. – Томск, 2006.
4. Рейф, Ф. Г. Условия и механизмы формирования гранитных рудно-магматических систем (по термобарогеохимическим данным) [Текст] / Ф. Г. Рейф. – М. : ИМГРЭ, 2009. – 498 с.