



УДК 549. 07

Физико-химическая модель месторождений БалеЙского золоторудного района

В. А. Скворцов, В. П. Рогова

Аннотация. Впервые на основе детального минералого-петрографического картирования с применением рентгеновского количественного фазового анализа метасоматитов и руд, изучения состава флюида построена физико-химическая (термодинамическая) модель формирования метасоматической зональности и руд месторождений БалеЙского золоторудного района. По термодинамическим параметрам (T , P , pH , Eh) и химическому составу минералов переменного состава (монтмориллонитам, иллитам, селадонитам, хлоритам и др.), составу флюида устанавливается глубина эрозионного среза всей метасоматической колонки и развивающегося в ней оруденения. Физико-химическая модель позволяет прогнозировать и искать месторождения, не выходящие на земную поверхность.

Ключевые слова: золоторудные месторождения, рентгеновский количественный фазовый анализ минералов, физико-химическое (термодинамическое) моделирование рудообразования.

Введение

БалеЙский золоторудный район расположен в центральной части Восточного Забайкалья.

Отдельные этапы его изучения отражены в работах [1, 9], где на основе минералого-петрографических исследований изложены основные черты геологического строения, минеральный состав и особенности генезиса. По результатам анализа газово-жидких включений в кварце [8] и геохимии газов [4] получены первые данные о температурной зональности рудного поля.

Но как показала практика изучения газово-жидких включений в минералах на многих месторождениях [5, 6, 7, 10], они не дают истинную картину о физико-химических условиях образования минералов по следующим причинам. При разбракровке включений нередко возникает их частичная разгерметизация, обусловленная сквозьрешетчатой диффузией протонов, возникающих при диссоциации воды [2]. Утечка протонов из включений при сверхкритических температурах гомогенизации изменяет первичный состав самих включений и препятствует получению достоверной исходной информации.

Учитывая недостатки прежних методов, применяемых при установлении температуры образования минералов, необходимо провести уточнение и определение физико-химических условий формирования золоторуд-

ных месторождений Балейского рудного района с помощью новых более совершенных методов. Одним из таких методов в настоящее время является физико-химическое моделирование природных процессов минералообразования на ЭВМ [3, 12] по модифицированной программе Селектор [11].

В результате проведенного нами в Балейском рудном районе площадного минералого-петрографического картирования масштаба 1 : 200 000 – 1 : 50 000 с применением рентгеновского количественного фазового анализа в породах и рудных телах впервые выявлены региональные разновозрастные эпигенетические изменения, уточнены локальные, определены термодинамические условия их формирования, построена физико-химическая модель.

Минеральные ассоциации

На территории рудного поля развиты региональные полихронные гидротермально-метасоматические изменения фельдшпатит-грейзен-березитовой, фельдшпатит-пропилит-березитовой и фельдшпатит-аргиллизитовой формаций (рис. 1).

Древние (нижний палеозой) минеральные ассоциация фельдшпатит-пропилит-березитовой формации закартированы в западной части площади в кристаллических сланцах, в пределах влияния субмеридионального разлома. В зонах дробления и милонитизации отмечена кварц-альбит-цоизитовая минеральная ассоциация, а в участках брекчирования кварц с цоизитом и альбитом цементируются кварцем с эпидотом и актинолитом, которые фиксируются также и в верхне-палеозойских гранитоидах.

Брекчии с полихронными парагенезисами пропилитов пересекаются прожилками, а участками цементируются кварц-эпидот-хлоритовыми и хлорит-карбонатными пропилитами, развитыми также и в мезозойских образованиях.

Фельдшпатит-грейзен-березитовая домезозойская ассоциация минералов установлена как в ксенолитах кристаллических сланцев (нижний палеозой), так и в верхнепалеозойских гранитоидах. Наиболее ранней ассоциацией является кварц-калишпатовая. Ксенолиты кристаллических сланцев неравномерно калишпатизированы, участками ортоклаз пользуется преобладающим развитием и составляет более 40 % от всей массы породы, степень моноклинной упорядоченности его ΔZ составляет – 0,7–0,8.

Порода участками приобретает сиенитовый облик. По пелитизированному ортоклазу вблизи разломов метасоматически развивается олигоклаз. Содержание его колеблется в широких пределах до 40–50 % и более, порода приобретает диоритовый облик. В восточной части площади олигоклаз замещается новообразованным калишпатом, микроклином или воднопрозрачным ортоклазом, в породе увеличивается количество кварца до 30 % и более, происходит гранитизация по сиенитам и диоритам. В зонах влияния северо-восточных нарушений увеличивается количество кварца, биотит замещается мусковитом, в небольших количествах появляется гранат, происходит региональная грейзенизация вмещающих пород, сопровождающаяся кварц-серицитовыми березитами.

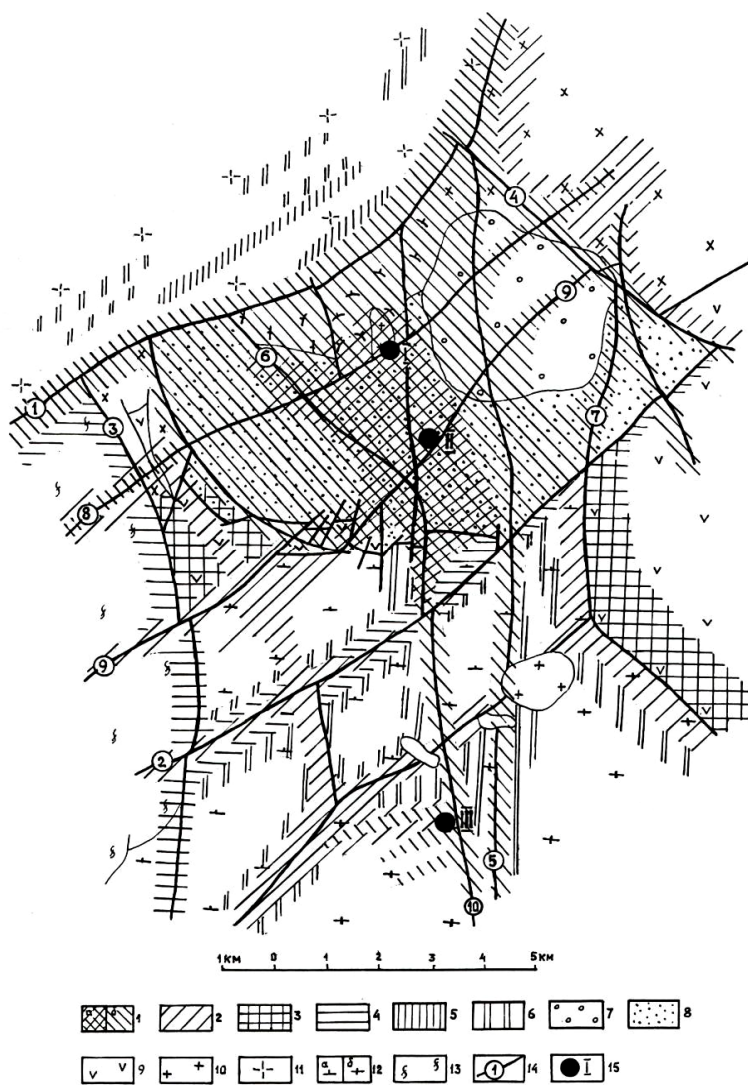


Рис. 1. Схема размещения минеральных ассоциаций в Балеysком рудном поле.

1–6 – мезозойские минеральные ассоциации: 1 – кварц-каолинит-монтмориллонит-иллитовая (со смешанослойными минералами иллит-монтмориллонит); а) существенно кварц-каолинитовая (\pm монтмориллонит); б) существенно иллитовая (\pm монтмориллонит); 2 – кварц-серицитовая; 3 – кварц-монтмориллонит-хлорит-карбонатная; 4 – кварц-эпидот-хлоритовая; 5 – кварц-мусковитовая; 6 – кварц-биотитовая. Вмещающие породы: 7 – конгломераты каменной свиты; 8 – меловые осадочно-вулканогенные породы; 9 – юрские осадочно-вулканогенные породы шадоронской серии; 10 – позднеюрский субвулканический комплекс; 11 – гранитоиды борщевочного комплекса; 12 – гранитоиды ундинского комплекса: а) массивные, б) гнейсовидные; 13 – метаморфические породы, кристаллические сланцы, кварциты; 14 – тектонические нарушения: 1 – Борщевочный, 2 – Главный сброс, 3 – Дутурульский, 4 – Каменский, 5 – Отмаховский, 6 – Диагональный, 7 – Аэродромный, 8 – Контактный, 9 – Срединный, 10 – Тасеевский; 15 – месторождения золота: I – Балеysкое, II – Тасеевское, III – Средне-Голготайское

Мезозойские минеральные ассоциации фельдшпатит-пропилит-березитовой формации развиты в вулканогенно-осадочных образованиях верхней юры и в палеозойских гранитоидах в зонах влияния разломов северо-восточного направления. Пропилитам предшествует образование мелкочешуйчатого биотита и метасоматических выделений плагиоклаза андезин-анортитового состава, образующих ореолы в палеозойских гранитоидах размером десятки квадратных метров, возможно, над нескрытыми эрозией небольшими штоками основных пород.

Мезозойские фельдшпатит-грейзен-березитовые минеральные ассоциации развиты повсеместно, наиболее интенсивно в зонах влияния северо-восточных разломов. В составе грейзен-березитовой ассоциации иногда присутствуют литийсодержащие слюды и турмалин. Верхнеюрские нижнемеловые минеральные парагенезисы фельдшпатит-аргиллизитовой формации проявлены повсеместно, но наиболее интенсивно развиты в узлах сочленения субмеридиональных и северо-восточных нарушений. Слоистым минералам предшествует выделение санидина (степень моноклинной упорядоченности $\Delta Z 0,2-0,3$), замещающего все ранее образованные минералы. Интенсивно и широко проявлены кварц, каолинит, иллит, монтмориллонит, которые образуют ореолы, имеющие зональное строение. Во внутренних частях ореолов преобладает кварц-каолиновая ассоциация, сменяющаяся к периферии иллитовой и смешанослойными минералами иллит-монтмориллонитом, хлорит-монтмориллонитом. В цементе верхнемеловых конгломератов преобладает иллит.

В ореолах аргиллизации развиты жилы и прожилки разновозрастного кварца, адуляра, кальцита, манганкальцита, в меньшей степени доломита и сидерита.

Особенностью Балейского рудного поля является устойчивая зональность домезозойских и мезозойских гидротермально-метасоматических образований. Повышенные содержания золота установлены в разновозрастных ореолах пропилитизации, грейзенизации, березитизации. Месторождения золота, формирующиеся в палеозойских породах, приурочены к зонам дробления с полихронными гидротермалитами грейзен-березитовой, пропилит-березитовой, аргиллизитовой формаций; месторождения золота в верхнеюрских-нижнемеловых образованиях образуются в зонах дробления с гидротермалитами аргиллизитовой формации.

В домезозойских и мезозойских березитизированных и аргиллизированных гранитоидах формируется Средне-Голготайское месторождение, в зонах аргиллизации непосредственно в вулканно-осадочной толще – Тасевское и на контакте её с гранитоидами – Балейское. Для каждого из них, в зависимости от эрозионного среза описанных ранее формаций, выделены преобладающие типы локальных метасоматитов (табл. 1) и установлена связь с ними эрозия.

Физико-химическая модель

Для выявления термодинамических условий формирования метасоматитов была собрана физико-химическая модель H–C–N–F–Na–Al–Si–S–Cl–K–Ca–Fe–Cu–Zn–As–Ag–Sb–Au–Pb–O. Проведенные расчеты при температурах от 500 до 100 °С с разными давлениями позволили определить некоторые параметры образования основных типов метасоматитов и оруденения (рис. 2) (номера метасоматитов в табл. 1 и на рис. 2 совпадают).

На месторождении Средне-Голготайском развиты гидрослюдисто-кальцит-кварцевые метасоматиты с золотом, пиритом и халькопиритом. Среди распространенных в районе других типов метасоматитов формирование их начинается в начале становления рудного узла в режиме изменения температур от 500 до 100 °С и интервале рН от 2 до 8, отражая, таким образом, наиболее ранние по времени образования минеральные ассоциации (рис. 2, 1).

При температуре 500 °С и давлении 100 бар в направлении от контакта жил во вмещающие породы развиваются два последовательно происходящих процесса: окварцевание при рН выше 3, тремолитизация при рН около 5. В жилах при рН выше 2 устойчива ассоциация золота с серебром и сульфидами (арсенопиритом, антимонитом и галенитом).

Когда температура 400 °С и давление 100 бар, окварцевание и тремолитизация в породах начинают фиксироваться при близких значениях рН (близких к 5), а при рН 6 происходит смена тремолита актинолитом. В составе флюида золотосодержащие комплексы при температуре 500–400 °С не наблюдаются. В жиле в направлении от ее контактов к центру идет последовательное отложение рудных минералов: образуется кварц-золото-сульфидная ассоциация. Наличие в парагенезисе с золотом пирита и халькопирита свидетельствует (в соответствии с материалами предыдущих исследователей) о том, что формирование минералов могло проходить на глубинах, превышающих 500 м.

Если температура 300 °С и давление 100 бар, в гидротермально-измененных породах при относительно близких условиях (рН выше 6) развивается кальцитизация и окварцевание. В жилах при рН выше 5 фиксируется ассоциация арсенопирита с халькопиритом, серебром и антимонитом. По сравнению с предыдущей ассоциацией в жилах отсутствует галенит. Далее с увеличением щелочности при рН 6 добавляется пирит и при рН выше 6 – сфалерит. Причем развитие последнего в жилах сопровождается кальцитизацией во вмещающих породах. Отсутствие здесь золота в ассоциации с сульфидами объясняется тем, что последнее переходит во флюид и фиксируется появлением в нем в значительных количествах золотосодержащих комплексов: $AuHS^{\circ}$, AuH_2S^{+} , $Au_2(HS)_2S^{2-}$, $Au(HS)_2^{-}$, AuH_2SHS° .

Таблица 1

Минеральный состав метасоматитов и руд

Минералы	Месторождения					
	Средне-Голготайское		Балейское		Тасеевское	
	Содержания минералов в метасоматитах и рудах, %					
	1	2	3	4	5	6
Кварц	12	48,5	29	20	87	74
Калиевый полевой шпат	0,010	–	15	–	–	0,010
Альбит	0,010	0,010	13	0,10	0,010	0,010
Гидрослюда (иллит-селадонит)	2	20,5	30	43	10	–
Каолинит – монтмориллонит	–	–	–	–	–	20
Кальцит + доломит	10	12	12	33	2	0,010
Сидерит	–	–	–	1	–	–
Хлорит	–	–	–	2	–	3
Золото	0,010	0,010	0,0002	0,0002	0,006	0,0002
Серебро	0,005	0,001	0,0002	0,0002	0,001	0,0002
Галенит	0,010	9	0,0010	0,010	0,001	0,0001
Сфалерит	0,010	9	0,0010	0,001	0,001	0,0001
Халькопирит	42	0,010	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Пирит	33	–	–	–	–	2
Арсенопирит	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
Антимонит	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010

Минеральные ассоциации: 1 – гидрослюдисто-кальцит-кварцевая с золотом, пиритом и халькопиритом; 2 – кальцит-гидрослюдисто-кварцевая с золотом, галенитом и сфалеритом; 3 – доломит-кварц-гидрослюдистая с золотом, арсенопиритом и антимонитом; 4 – кварц-доломит-гидрослюдистая с золотом, арсенопиритом и антимонитом; 5 – доломит-гидрослюдисто-кварцевая с золотом, галенитом, арсенопиритом, антимонитом; 6 – хлорит-каолинит-кварцевая с золотом, арсенопиритом, антимонитом, пиритом.

При 200 °С, давлении 100 бар и рН выше 5 в жилах наблюдается устойчивый парагенезис арсенопирита и халькопирита, к которому с увеличением щелочности при рН 7 добавляются пирит, серебро, галенит и антимонит. Появление последних происходит одновременно с кальцитизацией вмещающих пород. Из золотосодержащих комплексов в растворе преобладают AuHS^\ominus , AuH_2S^+ .

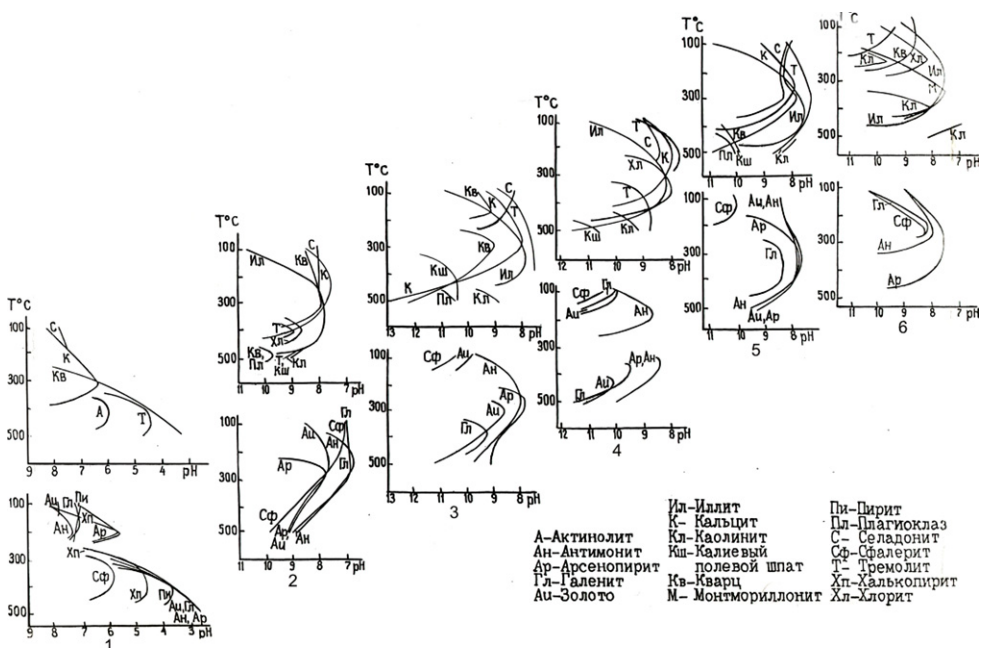


Рис. 2. Физико-химические условия формирования метасоматической зональности и руд на месторождениях:

Средне-Голготайское (1 – гидрослюдисто-кальцит-кварцевые; 2 – кальцит-гидрослюдисто-кварцевые), Балейское (3 – доломит-кварц-гидрослюдистые; 4 – кварц-доломит-гидрослюдистые), Тасеевское (5 – доломит-гидрослюдисто-кварцевые; 6 – хлорит-каолинит-кварцевые)

А при температуре 100 °С и давлении 100 бар в условиях, приближающихся к поверхности, в гидротермально-измененных породах при рН 8 с увеличением щелочности развивается калий-железистый селадонит, при рН выше 8 – кальцит. В рудных жилах происходит зональное и последовательное отложение парагенезисов при рН 7 – пирита с халькопиритом, при рН свыше 7 – галенита и серебра, при рН 8 – арсенопирита и антимонита. Условия образования золота в жилах и селадонита в породах оказываются здесь близкими. Завершается минералообразование интенсивной кальцитизацией.

Анализ термодинамических условий формирования метасоматитов показывает, что основное золото в жилах отлагается преимущественно при температуре 500 °С и рН выше 2, а при температуре ниже 400 °С, при рН больше 3, на глубине 500 м. Связано оно со слабопроявленными грейзен-березитовыми и березит-лиственит-пропилитовыми изменениями во вмещающих породах.

Формирование кальцит-гидрослюдисто-кварцевых метасоматитов с золотом, галенитом и сфалеритом на Средне-Голготайском месторождении по времени (в отличие от описанных выше) происходит позднее, при T 500–100 °С, давлении 100 бар и рН от 2 до 6 (рис. 2, 2). Наиболее ранними гидротермальными изменениями на контакте с жилами являются окварцевание и альбитизация ($T = 500$ °С, рН выше 10), которые в дальнейшем, при рН 9, сменяются калишпатизацией и тремолитизацией. И только с разрушением при рН 9 калиевого полевого шпата в породах появляется каолинит, а в жилах, в близких условиях, в ассоциации с арсенопиритом, антимонитом и галенитом – золото. При рН 8 оно становится неустойчивым и переходит в раствор, где преобладает $Au_2(HS)_2S^{2-}$ комплекс. В жилах в это время образуется парагенезис антимонита и галенита, а при рН ниже 9 устойчивым остается антимонит.

Когда температура минералообразования снижается до 400 °С зональность во вмещающих породах выглядит следующим образом: при рН 9 – тремолитизация, при рН 8 – хлоритизация и иллитизация. Одновременно с каждым из этих процессов в жилах происходит образование определенных парагенезисов: с иллитом, при рН 8 – галенита и антимонита, при рН выше 8 – золота и арсенопирита; с хлоритом, при рН ниже 9 – серебра и при рН 9 – сфалерита. Рудная ассоциация минералов: золото, арсенопирит, серебро, антимонит, галенит устойчива в жиле при рН выше 9, когда во вмещающих породах происходит последовательный цикл метасоматических процессов: кальцитизация, тремолитизация, хлоритизация.

При температуре 300 °С в гидротермально-измененных породах, при рН близким к 8, формируется ореол кальцитизации и в меньшей степени иллитизации. С иллитизацией связано образование галенита и антимонита, с кальцитизацией – золота, серебра и сфалерита. Но часть золота во время кальцитизации переходит в раствор, и тогда количество в нем золотосодержащих комплексов $AuHS^{\circ}$, AuS^{-} , $Au_2(HS)_2S^{2-}$, $AuClOH$ – возрастает.

Когда минералообразование проходит на малых глубинах, при температуре 200 °С, зональность во вмещающих породах по мере приближения к жилам характеризуется сменой кальцитизации, начинающейся при рН 7, селадонитизацией при рН 8, окварцеванием при рН выше 8 и иллитизацией при рН ниже 9. Образование золота в данном случае связано с кальцитизацией, серебра – с селадонитизацией. В растворе из золотосодержащих комплексов преобладает $AuHS^{\circ}$, AuS^{-} . Сульфидные парагенетические ассоциации: при рН 7 – галенит-антимонитовая и галенит-сфалеритовая. В целом наибольшее количество минералов в ассоциации галенит + сфале-

рит + антимонит + золото + серебро остается устойчивым при рН выше 8, когда во вмещающих породах идет последовательное телескопирование процессов иллитизации, окварцевания, селадонитизации и кальцитизации.

В приповерхностных условиях при температуре 100 °С зональность в гидротермально-измененных породах в направлении к жилам выражается в смене селадонита, образующегося при рН 8, кальцитом и далее с повышением рН больше 10 – иллитом. С каждым из них в жилах, в близких термодинамических условиях, происходит образование рудных парагенезисов.

Одновременно с селадонитом формируется галенит-сфалеритовый парагенезис, с кальцитом – золото-серебряный. В момент образования в жилах галенит-сфалеритового парагенезиса во флюиде фиксируются AuHS° , AuS^- , AuH_2S^+ комплексы, а когда в жилах появляется золото и серебро в растворе при рН более 8, остаются только AuHS° , AuS^- , при рН близком к 11 – AuS^- , AuClOH .

Таким образом, золото в процессе формирования данных метасоматитов встречается в жилах на протяжении всего температурного интервала от 500 до 100 °С в тесной ассоциации с сульфидами. Но следует заметить, что если при температурах 500 и 400 °С золото содержится только в жилах, то при 300, 200 и 100 °С часть его постоянно переходит в раствор и количество его в жилах по мере приближения к поверхности уменьшается.

Доломит-кварц-гидрослюдистые метасоматиты с золотом, арсенопиритом и антимонитом типичны для БалеЙского месторождения и являются по времени образования одними из ранних, так как только в них в исходном составе отмечаются калиевый полевой шпат до 15 % и альбит до 13 % (табл. 2). Формирование их проходит при температуре от 500 до 100 °С, давлении от 100 до 500 бар и рН от 6 до 13 (рис. 2, 3).

По сравнению с метасоматитами Средне-Голготайского месторождения в разрезе они находятся «на ступеньку» выше и характеризуют следующие по вертикали уровни эрозионного среза рудных тел. При температуре 500 °С во вмещающих породах в направлении к рудным телам наблюдается зональность, выраженная в появлении следующих минералов: при рН близком к 7 – тремолит-актинолита, при рН 9 – каолинита, при рН 10 – калиевого полевого шпата, альбит-анортита, при рН 12 – кварца и при рН 13 – кальцита. Зональность фиксируется и в рудных телах от контакта к центру жилы: при рН 9 – непосредственно у контакта – арсенопирит, далее при рН более 9 в парагенезисе с арсенопиритом появляется антимонит, при рН 10 – серебро, при рН 11 – золото. Далее с повышением щелочности к центру жилы становится устойчивой вся ассоциация минералов: арсенопирит, антимонит, серебро, золото. Отложение минералов при формировании зональности в жилах и гидротермально-измененных породах происходит в близких термодинамических условиях: арсенопирита и антимонита с каолинитом, серебра с альбитом и золота с альбитом и кварцем. Имитация при моделировании давления от 100 до 500 бар при

температуре 500 °С к изменению рисунка зональности в жилах и породах не приводит. Наблюдаются лишь незначительные смещения зон по рН.

Когда температура минералообразования снижается до 400 °С, рисунок зональности меняется. Во вмещающих породах в направлении к жилам при рН выше 8 отмечается зона тремолита и калий-алюминиевого иллита, при рН больше 9 – зона кальцита, при рН 10 – кварца и при рН выше 10 – калиевого полевого шпата. В рудных жилах от контакта к центру при рН около 9 образуется парагенезис арсенопирита и антимонита, при рН выше 9 появляется серебро, и далее при возрастании рН – золото и галенит. Термодинамические условия формирования золота в жилах оказываются близкими к образованию во вмещающих породах кальцитизации, окварцевания и калишпатизации. Изменение давления здесь от 100 до 500 бар, как и в предыдущем случае, к нарушению рисунка зональности не приводит.

Когда температура минералообразования падает до 300 °С, зональность в гидротермально-измененных породах в направлении к жилам выглядит иначе: при рН выше 7 – тремолит, при рН 8 – калий-алюминиевый иллит, кальцит, доломит, сидерит и при рН 9 – кварц. Из карбонатов преобладает кальцит. В жилах зональность достаточно плотная, сжатая: при рН 8, вблизи контакта арсенопирит, во флюиде преобладают: AuHS° , AuS^- , $\text{Au}_2(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$, AuClOH^- комплексы; при рН 8 по направлению к центру появляется серебро и антимонит, в растворе преобладают AuClOH^- AuS^- ; при рН 9, когда в жилах отмечается золото, во флюиде остаются AuClOH^- и AuS^- . Отложение золота в жилах здесь тесно связано с карбонатизацией и окварцеванием вмещающих пород.

При температуре 200 °С и давлении 100 бар золото переходит в раствор, где при рН 9 отмечаются AuH_2S^+ , AuHS° , AuS^- , $\text{Au}_2(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$, AuClOH^- комплексы, при рН 8 – AuClOH^- , AuOH° . В жилах при рН выше 8 фиксируется антимонит, во вмещающих породах при рН выше 7 – тремолит, при рН больше 8 – карбонаты (кальцит-доломит-сидерит) и при рН больше 9 – селадонит и калиево-алюминиевый иллит. Если давление повышается до 200 бар при температуре 200 °С, то антимонит в жилах и селадонит в гидротермально-измененных породах неустойчивы.

Когда процесс минералообразования приближается к поверхности и температура становится 100 °С, в жилах, в направлении к центру, проявляется зональность: при рН 9 образуется серебро, при рН более 9 – к серебру присоединяются галенит и антимонит, при рН 10 – золото и при рН более 10 – сфалерит. Во вмещающих породах по мере удаления от жил при рН до 9 развивается окварцевание, при снижении рН до 8 карбонатизация (кальцит преобладает над доломитом), тремолит, калий-магний-железистая и калий-железистая разновидность селадонита.

Рассмотрев условия формирования доломит-кальцит-кварцевых метасоматитов, становится очевидным, что золото образуется здесь в течение

двух разорванных по глубине, температуре и времени этапов: ранний этап при температуре 500–300 °С, поздний при 100–150 °С.

Кварц-доломит-гидрослюдистые метасоматиты с золотом, галенитом, арсенопиритом и антимонитом БалеЙского месторождения отличаются от описанных выше присутствием значительного количества гидрослюды и карбонатов. Формирование их происходило при температурах от 500 до 100 °С, давлении 100 бар и рН от 7 до 12 (рис. 2, 4).

При температуре 500 °С на глубине около 400 м (определенной по минеральным ассоциациям) во вмещающих породах по мере удаления от жил наблюдается зональность, обусловленная различной устойчивостью минералов в зависимости от кислотности-щелочности происходящих процессов. С понижением рН до 12 устойчив кальцит, до 11 – хлорит, до 10 – калиевый полевой шпат, до 9 – каолинит и до 8 – тремолит.

В жилах образование минералов происходит в более узком интервале рН (от контактов к центру): при рН выше 10 отмечается парагенезис арсенопирит + антимонит, при рН более 10 добавляется серебро, при рН ближе к 11 – золото и при рН более 11 – галенит.

Образование золота в жилах в ассоциации с сульфидами происходит на фоне кальцитизации, хлоритизации, калишпатизации и каолинизации вмещающих пород в близких термодинамических условиях.

Когда температура снижается до 400 °С, зональность в гидротермально-измененных породах в направлении к жиле выражается в проявлении: при рН выше 8 – иллитизации, с преобладанием калиево-алюминиевой разности иллита и хлоритизации, где доминирует магний-алюминиевая разновидность, при рН больше 8 – тремолитизации и при рН выше 9 – кальцитизации. В рудных телах от контакта к центру жилы при рН больше 8 отлагается парагенезис арсенопирит + антимонит, при рН 9 к нему добавляется серебро, галенит и золото. Золото с галенитом образуется в условиях близких с кальцитизацией.

При температуре 300 °С во вмещающих породах фиксируются две узких слабопроявленных зоны: при рН близком к 8 – кальцит-хлоритовая и при рН выше 8 – кальцит-хлорит-иллитовая, свидетельствующие при сопоставлении, по-видимому, на горизонте 366 м о надрудной части невыходящих на поверхность жил.

В том случае, когда температура минералообразования падает до 200 °С, в гидротермально-измененных породах отмечаются процессы тремолитизации при рН выше 7, кальцитизации при рН ближе к 7, селадонитизации при рН выше 8 и иллитизации, когда рН приближается к 9. В термодинамических условиях, близких с образованием селадонита, появляются антимонитовые прожилки.

В приповерхностных условиях, когда температура минералообразования снижается до 100 °С, давление до 100 бар и рН изменяется в интервале от 9 до 11, во вмещающих гидротермально-измененных породах происходит зональное отложение новообразованных минералов: при рН близ-

ком к 9 фиксируется селадонит, при рН более 9 – тремолит с кальцитом и когда рН доходит до 11, отмечается иллит. В жилах при рН 10, в связи с кальцитизацией в породах, встречается ассоциация золото + антимонит + галенит, при рН более 10, к ней присоединяется серебро и при рН выше 10 – сфалерит.

В формировании рассмотренных метасоматитов отмечаются два, разорванных по температуре и глубине, этапа золотого оруденения: близповерхностный низкотемпературный малоглубинный при $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и высокотемпературный при $T = 500\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$, на глубине 400–300 м.

Доломит-гидрослюдисто-кварцевые метасоматиты с золотом, арсенопиритом и антимонитом характеризуют главным образом нижние уровни Тасеевского месторождения и отличаются от рассмотренных ранее высокими содержаниями кварца (до 87 %), невысокими (10 %) – гидрослюды и низкими (2 %) карбонатов. Формирование минеральных ассоциаций в метасоматитах проходит при температуре от 500 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, давлении 100 бар и рН от 8 до 11 (рис. 2, 5). При температуре $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в гидротермально-измененных породах, по мере удаления от жил, наблюдается зональность: при рН от 11 и выше окварцевание, а при рН 10 развивается альбитизация, калишпатизация, до рН 9 – тремолитизация и ниже до рН 8 – каолинизация. В жилах зональность по рН фиксируется в достаточно узком интервале: при рН 9 и выше устойчива ассоциация золото + арсенопирит + антимонит, при увеличении рН к ней добавляется серебро. Образование золота в жилах происходит на фоне тремолитизации вмещающих пород. Количество золота, находящегося в растворе, ничтожно мало, из золотосодержащих комплексов присутствуют Au^{3+} при рН 9 и $\text{Au}_2(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$ при рН 8.

Когда температура минералообразования снижается до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, зональность во вмещающих породах в направлении к жилам выглядит иначе: при рН выше 7 появляются иллит, тремолит, при рН больше 8 развивается окварцевание, когда рН 9 и выше образуется кальцит и при рН 10 – калиевый полевой шпат. В рудных жилах в приконтактной части при рН 8 отлагается золото, антимонит, арсенопирит, серебро и галенит. Образование золота в жилах происходило в термодинамических условиях близких с иллитом и тремолитом во вмещающих породах. Во флюиде из золотосодержащих комплексов присутствует Au^{3+} . При температуре $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ во вмещающих породах в направлении к жиле при рН выше 7 развивается тремолит, при рН, приближающемся к 8 – иллит, кварц и выше – кальцит и селадонит. В жилах с увеличением рН от 7 устойчива ассоциация золото + серебро + арсенопирит, от рН 8 к ней добавляется антимонит и галенит. Образование парагенезисов с золотом происходит, как и в предыдущем случае, при физико-химических условиях близких к иллиту и тремолиту.

Наличие во флюиде большого количества комплексов AuClOH^- , AuOH° , AuH_2S^+ , AuHS° , AuS^- , $\text{Au}_2(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$ и др. свидетельствует о перераспределении золота из твердой фазы в раствор и приводит к снижению его содержаний в рудных жилах.

Когда температура минералообразования становится 200 °С, зональность во вмещающих породах, в направлении к жилам, проявляется в развитии при рН более 7 тремолита, при рН больше 8 карбоната, селадонита и иллита. В рудных жилах при рН 8 у контакта образуется ассоциация золота с серебром и антимонитом, которая к центру при повышении рН дополняется арсенопиритом. Физико-химические условия формирования рудного парагенезиса с золотом и кальцитизации во вмещающих породах оказываются близкими. В растворе при этих условиях преобладают такие золотосодержащие комплексы, как AuClOH^- , AuOH° , AuH_2S^+ , AuHS° , AuS^- , $\text{Au}_2(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$, свидетельствующие о том, что баланс золота в твердой и жидкой фазах постоянно нарушается, особенно при относительно невысоких (200–300 °С) температурах.

В близповерхностных условиях при температуре 100 °С от контакта жил в сторону вмещающих пород отмечается зона иллитизации до рН 11, кальцитизации и доломитизации до рН 9, тремолитизации до рН 8 и селадонитизации.

В рудных жилах вблизи контакта отлагается парагенезис золота с серебром при рН 8, с повышением рН добавляется галенит и антимонит, а при рН 10 и сфалерит. Отложение золота в жилах идет на фоне тремолитизации гидротермально-измененных пород в близких термодинамических условиях. Количество золотосодержащих комплексов во флюиде, по сравнению с температурой 200 °С, уменьшается, преобладают только AuS^- , AuHS° , AuH_2S^+ .

Хлорит-каолинит-кварцевые метасоматиты с золотом, арсенопиритом, антимонитом и пиритом широко развиты в верхней части разреза Таево-Тасеевского месторождения и фиксируются около жил по отдельным рудным зонам (например, первой по данным В. Д. Пампуры и др.) до горизонта 216–266 м. В составе их, по сравнению с предыдущими, отмечается до 20 % каолинита, около 3 % хлорита. По отношению ко всем рассмотренным ранее метасоматитам, они по времени образования являются наиболее поздними и характеризуют завершающие стадии метасоматического процесса преобразований в Балейском золоторудном районе. Формирование их, также как и всех предыдущих, мы рассматриваем в интервале от 500 до 100 °С, при давлении от 200 до 100 бар и рН от 7 до 11 (рис. 2, б).

При температуре 500 °С и давлении 200 бар в гидротермально-измененных породах при рН выше 7, а при давлении 100 бар и рН 8 развивается ореол каолинитизации. Когда температура снижается до 400 °С, при давлении до 200 бар во вмещающих породах, при рН выше 8 – иллитизация, при рН 8 отмечается каолинитизация, при снижении рН – монтмориллонитизация. В том случае, когда при температуре 400 °С, давлении 100 бар, зональность в околорудно-измененных породах характеризуется развитием новообразованных минералов: при рН выше 8 – иллита, монтмориллонита и каолинита. На фоне этих метасоматических преобразований в породах образуются жилы и прожилки с арсенопиритом.

При температуре 300 °С и давлении 100 бар во вмещающих породах количество зон сокращается: при рН выше 8 фиксируется иллит, когда рН превышает 8 – иллит, монтмориллонит. В рудных жилах при рН 8 и выше устойчивы арсенопирит, антимонит. Во флюиде отмечаются золотосодержащие комплексы AuS^- , AuHS° , AuH_2S^+ , AuClOH^- , $\text{Au}_2(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$.

Когда температура процесса минералообразования снижается до 200 °С, зональность в гидротермально-измененных породах отражается в развитии при рН близком к 8 – иллита, при рН больше 8 – хлорита, когда рН приближается к 9 – наблюдается кварц, при рН выше 10 появляется монтмориллонит, а затем с увеличением рН – каолинит. В жилах в направлении от контакта к центру, с увеличением рН, происходит последовательное отложение минералов: при рН близком к 8 – арсенопирита, антимонита, при рН выше 8 – галенита и при рН больше 9 – серебра. Образование последнего происходит в связи с развитием в породах окварцевания, а также монтмориллонитизации и каолинизации. Из золотосодержащих комплексов в растворе в это время отмечаются AuS^- , AuHS° , AuH_2S^+ , AuClOH^- , $\text{Au}_2(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$, $\text{Au}(\text{HS})_2^-$. При температуре 100 °С в близповерхностных условиях зональность в породах обусловлена развитием при рН выше 8 – окварцевания, при рН близком к 9 – иллитизации, при рН, превышающем 9 – тремолитизации и когда рН приближается к 10 и выше, появляется хлоритизация. В жилах при рН выше 8 в ассоциации с кварцем отмечается пирит, а с увеличением щелочности при рН 9 и выше арсенопирит и антимонит. В том случае, когда рН достигает 10, к предыдущему парагенезису добавляются сфалерит, галенит и серебро, при рН 11 – халькопирит. Все золото при этих условиях находится в растворе в виде комплексов AuHS° , AuH_2S^+ , AuS^- , $\text{Au}(\text{HS})_2^-$, $\text{Au}_2(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$.

Заключение

Физико-химическая модель метасоматической зональности Балейского золоторудного района позволяет наметить дополнительные критерии и признаки для оценки перспективности площадей и установить в пределах их новые участки, где есть потенциальная возможность выявления слабо проявленного оруденения.

Признаками слабо проявленного оруденения являются широкое развитие среди эпигенетических изменений новообразованных метасоматических минералов: андезин-анортита, санидина, кварца, селадонита, иллита, монтмориллонита, анальцима, клиноптилолита, связанных с эксплозивными брекчиями трубок взрыва. Непосредственные расстояния до слабо проявленного оруденения определяется по РТ условиям для каждого конкретного случая. Верхние срезы устанавливаются по селадонит-кальцитовому парагенезису, образующемуся при рН от 8 до 10 и температурах 200–100 °С. Средние части колонок для различных типов метасоматитов фиксируются по парагенетическим ассоциациям кальцит + кварц, при рН 6; иллит + кальцит, при рН 8, при температуре 300 °С;

иллит + хлорит + монтмориллонит + каолинит, при рН 10, при температуре 200 °С; иллит + монтмориллонит + каолинит, при рН 7 и температуре 400 °С. Нижние срезы метасоматических колонок выявляются по парагенезисам: кварц + тремолит, при рН 4 и тремолит + полевые шпаты + кварц + каолинит, при рН 10–12 и температуре 500 °С.

Срезы метасоматической колонки могут быть также определены и по типохимическим компонентам флюида и их концентрации на соответствующих уровнях, при определенных физико-химических условиях.

Следовательно, предлагаемая нами физико-химическая модель метасоматической зональности Балейского золоторудного района позволяет вскрывать и общие генетические закономерности рудных формаций, более целенаправленно проводить металлогенические построения, осуществлять прогнозирование скрытого и слабо проявленного оруденения на разных стадиях геологоразведочных работ, даже тогда, когда объем информации значительно ограничен.

Список литературы

1. Балейское рудное поле / ред. Н. П. Лаверов. – М. : ЦНИГРИ, ИГЕМ, 1984. – 269 с.
2. Волохов И. М. К оценке точности термобарогеохимических реконструкций условий образования магм и магматических минералов // Геология и геофизика. – 1975. – № 1. – С. 12–19.
3. Карпов И. К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии / И. К. Карпов. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1981. – 247 с.
4. Куликова Н. Н. Геохимия газов золоторудных месторождений Забайкалья / Н. Н. Куликова. – М. : Наука, 1972. – 115 с.
5. Леммлейн Г. Г. Соответствует ли наблюдаемый современный объем включения первоначальному // Докл. АН СССР. – 1950. – Т. 72. – С. 775–778.
6. Леммлейн Г. Г. Морфология и генезис кристаллов / Г. Г. Леммлейн. – М. : Наука, 1973. – 321 с.
7. Летников Ф. А. К вопросу о корректности применения хроматографических анализов при геохимических исследованиях // Геохимия. – 1980. – № 1. – С. 54–157.
8. Ляхов Ю. В. О горизонтальной и вертикальной температурной зональности в пределах Балейского рудного поля // Минералогическая термометрия и барометрия. – М. : Наука, 1968.
9. Петровская Н. В. Геологическое строение, минералогия и особенности генезиса золоторудных месторождений Балейского рудного поля (Вост. Забайкалье) / Н. В. Петровская [и др.] // Тр. ЦНИГРИ. – 1961. – Вып. 45. – Ч. 1 – 97 с. ; Ч. 2. – 129 с.
10. Скворцов В. А. Физико-химический анализ процессов редкометалльного рудообразования в докембрии Саяно-Байкальской горной области / В. А. Скворцов. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2008. – 283 с.
11. Чудненко К. В. Селектор – Windows. Программное средство расчета химических равновесий минимизацией термодинамических потенциалов (краткая инструкция) / К. В. Чудненко. – Иркутск : Ин-т геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, 2005. – 100 с.

12. *Karpov J. K.* Modeling chemical mass-transfer in geochemical processes: Thermodynamic relations, conditions of equilibria and numerical algorithms / J. K. Karpov, K. V. Chudnenko, D. A. Kulik // Amer. J. Sci. – 1997. – Vol. 297. – P. 767–806.

Работа выполнена при поддержке гранта ФЦП 2009-1.1-154-069-005 «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области географии и гидрологии суши».

Physical-chemical model of Baley gold ore region

V. A. Skvortsov, V. P. Rogova

Annotation. On the base of a detailed mineralogical and petrographic mapping with the use of X-ray quantitative phasic analysis of the metasomatic complex and ore deposits the as well as examination of composition of fluids a physical-chemical (thermodynamic) model for Baley gold ore region was created for the first time. The thermodynamic parameters (T, P, pH, Eh et al.), chemical composition of minerals (montmorillonites, illites, chlorites et al.), composition of fluid could determine the depth of metasomatic complex and gold ores. The physical-chemical model allow to prognosticate and hiccup ore deposits at depth.

Key words: gold deposits, X-ray quantitative phasic analysis of minerals, physical-chemical (thermodynamic) modeling of ore deposits.

Скворцов Валерий Александрович
 доктор геолого-минералогических наук,
 профессор
 Иркутский государственный университет
 Иркутск, ул. К. Маркса, 1
 географический факультет

Рогова Вера Парфентьевна
 доктор геолого-минералогических наук,
 профессор
 Иркутский государственный университет
 Иркутск, ул. К. Маркса, 1
 географический факультет
 тел.: 38-72-91