

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАМОРФОГЕННОЙ И ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКОЙ СТАДИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ.

Брюханова Н.Н., Бычинский В.А., Будяк А.Е.

*Институт геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН, г. Иркутск,
e-mail: nnb@igc.irk.ru*

Одним из инструментов проверки достоверности сценария геологического события, результатом которого было формирование месторождения, может являться физико-химическое моделирование. Конечной целью наших исследований является создание термодинамической модели формирования месторождения золота Сухой Лог по схеме, предложенной В.К. Немеровым [Немеров и др., 2005]. Задачей настоящего этапа исследований явилось построение модели и расчет основных параметров заключительной метаморфогенной и гидротермально-метасоматической стадий рудообразования.

Предлагаемая схема формирования золоторудных месторождений сухоложского типа предусматривает следующую последовательность реконструируемых событий.

1) Седиментогенное накопление сидеро-халькофильно специализированных углеродистых толщ, обусловленное синхронным осадконакоплением вулканизмом и подводной гидротермальной деятельностью в спрединговых задуговых бассейнах.

2) Катагенетическая трансформация углеродистых осадочных толщ с генерацией металлоносных нафтидов и миграцией их в сторону конседиментационных поднятий и в своды раннеколлизийных пологих антиклиналей. В результате формируются аномально специализированные нефте-флюидометаллоносные ловушки («резервуары»), металлогенетический потенциал которых способен реализоваться в процессах последующих термодинамических преобразований.

3а) Стрессовые воздействия, в условиях тектоно-магматической активизации (складкообразование, метаморфизм), с разрушением металлоносных углеродистых веществ в нефтеносных «резервуарах» и формированием последовательно: метаморфогенной самородной минерализации и метаморфогенно-метасоматических высокотемпературных руд благородных металлов. В начале *метаморфогенно-метасоматической стадии (III^а)* при температурах 420-380°C и давлении 500-600 МПа образуется рассеянная ультратонкая (0,5-10 мкм) самородная минерализация Pt, Au, Fe, Cr, W, Ti, Pb, Sn, Cu, Al, что свидетельствует о резко восстановительных условиях, возникших в процессе, сопряженного с метаморфическим разложением углеродистых соединений. Затем, при температурах 380°-280°C появляется сидерит-кварц-сульфидная минеральная ассоциация с самородным золотом. Одновременно образуются сульфиды и арсениды платины: куперит и сперрилит. Перечисленные руды в полной мере соответствуют подклассу метаморфизованных. 3б) Унаследованная деформация рудоконтролирующих структур с формированием в осевых частях изоклинально-чешуйчатых зон трещиноватости с интенсивными гидротермально-метасоматическими средне-низкотемпературными золоторудными и пострудными процессами по ним, где и происходит становление золоторудных тел штокверкового и жильного типов. При этом, рудоносный флюид мобилизуется из резервов вмещающей металлонафтидоносной структуры. Рудная минерализация, отвечающая *гидротермально-метасоматической стадии (III^б)*, формируется благодаря активности флюидов, возникших при завершении предыдущей стадии из резервов вмещающих углеродистых пород. В конце этого этапа образуется низкотемпературная анкерит-кварц-пиритовая с дисперсным золотом минеральная ассоциация.

В предложенной схеме, одним из важнейших рудоподготовительных этапов формирования месторождения является стадия катагенетических трансформаций. Собственно рудообразование осуществляется в указанных структурах на следующей стадии развития рассматриваемой системы под воздействием региональных термодинамических

преобразований металлоносных катагенных скоплений флюидов в условиях прогрессивного метаморфизма.

Для решения поставленной задачи – построение модели и расчет основных параметров заключительной метаморфогенной и гидротермально-метасоматической стадий рудообразования – была сформирована обобщенная модель системы (рис. 1): вмещающие породы (состав кварц, плагиоклаз, серицит, карбонаты и др.) + элизионные воды + углеводороды + рудные металлы (Au, Ag, сульфиды и др.) ± F-Cl-CO₂, CH₄, N₂, независимые компоненты – Al - Si - Na - K - Mg - Fe - Ca - Ti - (Au, Pt, Cu, Pb, Zn) - N - H - O - C - F - Cl - P - S - e, где e обозначает электрон. В список зависимых компонентов включено 518 соединений, из них 349 – водные, 21 – газовые и 148 – конденсированные компоненты. Термодинамические параметры взяты из согласованных баз данных программного комплекса «Селектор-W» [Карпов, 1981]. Граничные условия для моделирования определены на основании результатов изучения флюидных включений [Развозжаева, Прокофьев, 2002]. Состав вмещающей породы взят из работ Немерова В.К. [Немеров и др., 2005 и др.]

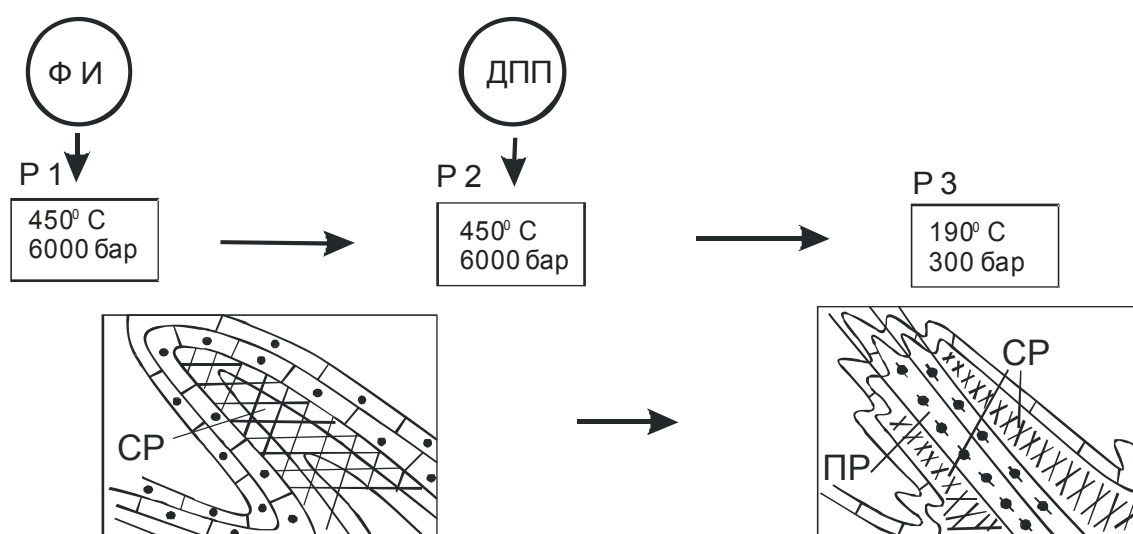


Рис. 1. Обобщенная схема термодинамической модели формирования золоторудного месторождения «Сухой Лог»: Р1 – первый, Р2 – второй, Р3 – третий резервуары; ФИ – исходный флюид. На фрагментах: НМ – нефтиды металлоносные (катагенетические скопления); СП – соскладчатые высокотемпературные руды, метаморфогенные, метаморфогенно-метасоматические; ПР – постскладчатые средне-низкотемпературные руды гидротермально-метасоматические.

Согласно принятой гипотезы из углеродистых толщ мобилизуется флюид, способный мигрировать в области конседиментационных поднятий. Собственно рудообразование осуществляется в указанных структурах под воздействием региональных преобразований металлоносных катагенных скоплений флюидов в условиях прогрессивного метаморфизма. На метаморфогенно-метасоматической стадии ($T = 420-380^{\circ}\text{C}$, $P = 6000$ бар) в восстановительных условиях, сопряженных с метаморфическим разложением углеродистых соединений, рудообразующий флюид насыщен органическим веществом. На этой стадии формируется сидерит-кварц-клинохлор-мусковит-пирротиновая минеральная ассоциация с низким содержанием самородного золота. Одновременно образуются арсениды: куперит и сперилит, апатит и халькоцит. Флюид последовательно проходит через несколько зон (резервуаров) содержащих только вмещающую породу. Для того, чтобы поддерживать состав флюида стабильным, на каждом этапе модели времени флюид последовательно проходит через новую, не измененную порцию породы. Таким образом в действие вовлекается весь объем вмещающих пород, а не только предрудная зона.

На регрессивном этапе рудная минерализация, отвечающая гидротермально-метасоматической стадии (золотопродуктивная среднетемпературная стадия – 220-190°C), формируется благодаря разгрузке флюидов, приходящих из вмещающих углеродистых пород. Рудообразование осуществляется в зонах трещиноватости, рассланцевания, где происходит становление золоторудных тел штокверкового и жильного типов. Для этой стадии характерна минеральная ассоциация мусковит-кварц-пиритовая с самородным золотом. В конце этапа (190-150°C и ниже) возникает низкотемпературная биотит-кварц-гидроксил-апатитовая с дисперсным золотом минеральная ассоциация.

Рассмотрим процессы, происходящие в первом и втором резервуарах: через вмещающую породу (Т 450°C, Р 6000 бар) движется обогащенный органическим веществом и серой флюид. Рассчитанный равновесный состав системы достаточно точно отвечает хорошо изученному минеральному составу пород. Таким образом флюиды наследуют микроэлементный состав вмещающих пород. Несмотря на то, что модель рассматривает процесс в условном времени (то есть флюид поступает в систему неоднократно), качественный состав равновесного минерального парагенезиса не меняется, а изменяется лишь количество (рис. 2).

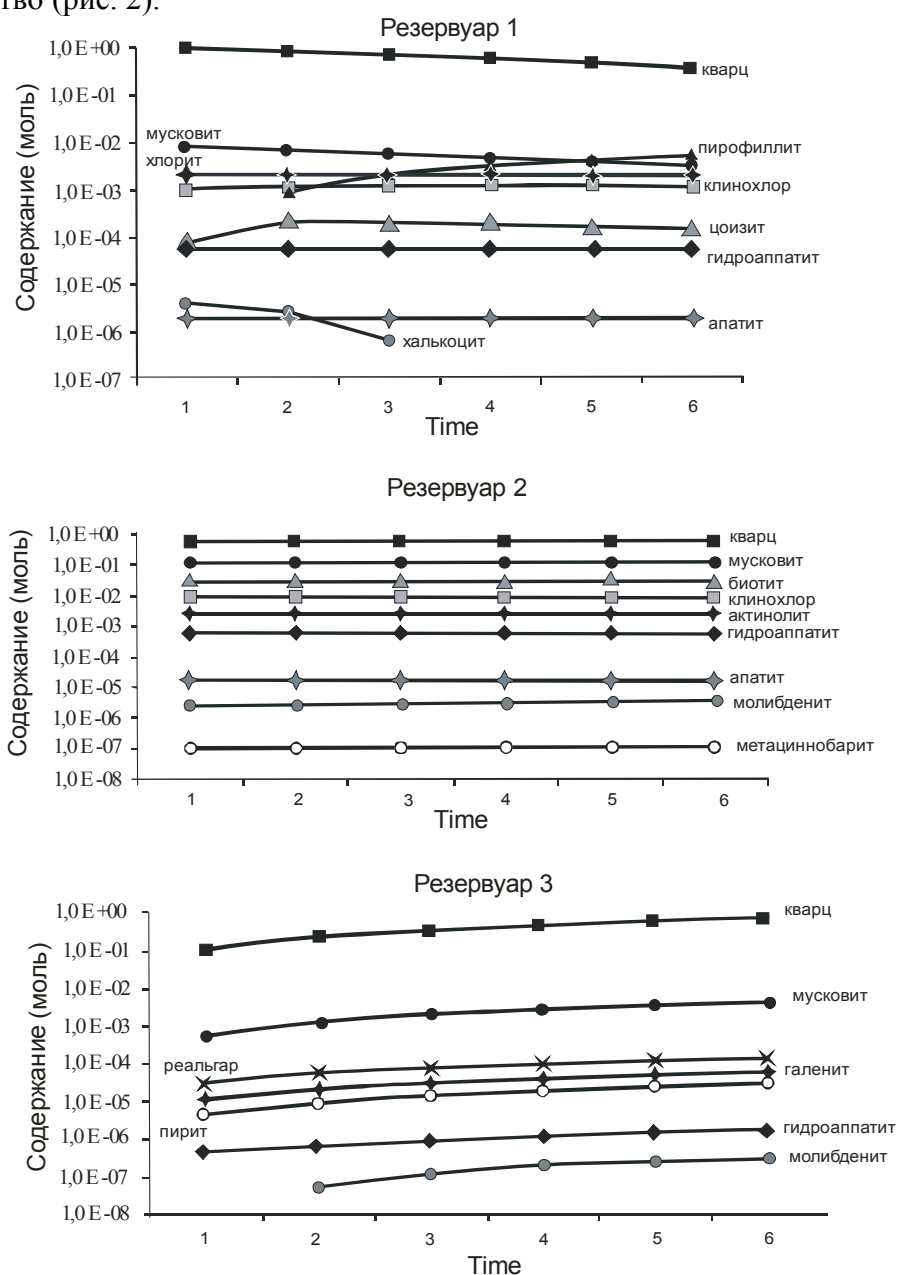


Рис.2. Накопление минералов в резервуарах.

Этот процесс сопровождается образованием больших количеств углекислоты, метана, водорода, сероводорода. Формируется рассеянная минерализация. Благородные металлы присутствуют преимущественно в самородной форме или в твердых металлических растворах, не равновесных с минеральным составом вмещающих пород. По мере протекания процесса органическое вещество карбонатируется и графитизируется. Основные формы существования золота во флюиде $AuCl$, $AuHS$ и $Au(HS)_2$.

Третий резервуар соответствует метаморфогенно-метасоматической стадии минералообразования. Растворенные металлсодержащие органические комплексы разрушаются, формируется слабокислый (рН от 5,48 до 6,34) флюид. Со временем содержание растворимого золота понижается, а в твердой фазе увеличивается

Равновесная с раствором минеральная ассоциация имеет сидерит - кварц - сульфидный состав (сульфиды и арсениды платины, куперит, сперрилит). Кислые флюиды, взаимодействующие с карбонатами, нейтрализуются. Содержание золота в гидротермальных растворах в условиях высоких температур (Т 380-250°C; Р 210-120 бар) достигает 6,5 моль/кг. Снижение Р,Т-параметров приводит к формированию гидрокарбонатного флюида, углекисло-метановых газа и анкерит-кварц-пирротин-пиритовой ассоциации, содержащей самородное золото. Этот процесс можно рассматривать как пострудную стадию, на которой формируется сидерит, анкерит, кварцевая ассоциация. Собственно рудная ассоциация и сопутствующие ей элементы – Au, Ag, Cu, Ni, Co, Fe, Pb, Zn, As, Sb, S (рис.2) накапливаются в системах разрывов и трещиноватости пород за счет циркуляции элизионных вод при снижении температуры до 220-190°.

Характер преобразования, наложенный на прогрессивный этап метаморфизма, проявляется в развитии кварц-биотит-анкерит-карбонатных прожилков по зонам дробления метаморфических пород. Она происходит наиболее активно вдоль трещиноватых, ослабленных зон ввиду их максимальной проницаемости и не захватывает всю массу породы. Становится очевиден изохимический характер процесса рудообразования и явная зависимость минерального состава руд от вмещающих пород.

Из проведенных геологических наблюдений, анализа минеральных парагенезисов, результатов физико-химического моделирования следует, что процессы рудообразования происходили в послеинверсионный период на регрессивном этапе метаморфизма, в обстановке начавшегося растяжения и раскрытия системы. На этом этапе в условиях зеленосланцевой фации регионального метаморфизма им сопутствовало формирование серий кварцевых жил. При раскрытии трещин и локальном падении давления в них отлагались кварц, карбонаты, золотоносный пирит и прочие рудные минералы.

Рассчитанная модель показывает возможность образования месторождений золота по предлагаемой схеме – без дополнительного привноса рудного компонента из внешних источников. Адекватность рассчитанной модели подтверждается множественными петрографическими данными изучаемого объекта. Сформированную модель можно считать базовой для проведения физико-химического моделирования образования месторождений золота метаморфогенно-гидротермального (сухоложского) типа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-05-00084-а и интеграционного проекта ИП-№31.

Литература

Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии.– Новосибирск: Наука, 1981. – 247 с.

Немеров В.К., Спиридонов А.М., Развозжаева Э.А., Матель Н.Л., Будяк А.Е., Станевич А.М. Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов сухоложского типа //Отечественная геология. 2005. № 3. С. 17-24.

Развозжаева Э.А., Прокофьев В.Ю., Спиридонов А.М. Благородные металлы и углеродистое вещество в рудах месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия) // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44, № 2. С. 116-124.