

Роль взаимодействия порода-вода в формировании рудоносных растворов и процессах гидротермального рудообразования

Борисов М.В., Бычков Д.А.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия,
E-mail: borisov@geol.msu.ru*

Волкова М.М.

Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ: Для гидротермального жильного Pb-Zn месторождения Джими (Северная Осетия), выполнена оценка источников вещества жил на основе распределения редкоземельных элементов в рудах и вмещающих породах. Установлено, что в формировании руд месторождения принимают участие оба типа преобладающих пород района: палеозойские граниты (главные рудовмещающие породы на месторождениях Садонского района) и докембрийские метаморфические породы (характерные только для Джими). Источник рудного вещества чаще всего является комбинированным и включает породы субстрата в различных пропорциях, которые можно установить по спектрам РЗЭ в рудах. Выполнено термодинамическое моделирование в системах с комбинированными источниками рудных компонентов. Установлены принципиальные различия в рудообразовании в моделях со сменой последовательности и пропорций пород субстрата при их взаимодействии с исходным безрудным раствором.

1 ВВЕДЕНИЕ

Определение источников компонентов флюидов является фундаментальной проблемой в изучении гидротермального рудообразования. Одним из источников вещества, который может полностью обеспечить формирование рудных тел многих типов гидротермальных месторождений, являются породы района. Эти породы могут быть вмещающими для рудных тел, а могут располагаться на отдалении от них. Доказательств и фактов для обоснования значимости процессов мобилизации рудных компонентов из различных пород достаточно много в литературе.

Исследования, представленные в настоящей работе, выполнялись по двум направлениям – термодинамическому и геохимическому. Термодинамическое (равновесно-динамическое) моделирование – разработка методик моделирования геохимических процессов, исследование количественных термодинамических моделей формирования рудных тел. Анализ процессов рудообразования проводится от областей формирования рудоносных растворов до областей рудообразования. Термодинамическое моделирование базируется на пакете программ NCh [5, 6]. Геохимическое направление - изучение закономерностей распределения рудных, сопутствующих и редкоземельных элементов (РЗЭ) по разрезам через полиметаллические жилы и околожильные породы. Используются различные инструментальные методы анализа: РФА, ААС, АЭС, ИСП-МС и др. Данные геохимических исследований являются необходимым элементом для создания геологической модели процесса для последующего термодинамического моделирования, но, в основном служат, для верификации результатов моделирования. Эталонными объектами для исследования процессов жильного рудообразования являются Pb-Zn месторождения Садонского рудного района (Северная Осетия, Россия), где проводятся полевые работы, задачи которых часто определяются результатами моделирования.

Вероятным источником рудных компонентов гидротермальных жильных Pb-Zn месторождений Садонского рудного района являлись палеозойские граниты садонского типа (PZ₃), которые вмещают основную часть рудных жил, сформированных в предкембрийское время (J₂). Впервые такой вывод был сделан в работе А.И. Тугаринова с коллегами [4] на основании данных по изотопному составу Pb в галенитах из 11 месторождений Северной Осетии и в калиевых полевых шпатах магматических и метаморфических пород района. Была установлена тождественность изотопного состава Pb галенитов из руд и полевых шпатов. Отсюда следовал вывод, что «непосредственным источником свинца месторождений послужили палеозойские гранитоиды», а «процесс извлечения свинца связан с метасоматической переработкой полевошпатовой части гранитоидов» в средней юре.

Этот вывод подтверждается нашими данными исследований тонкой структуры распределения рудных элементов в первичных ореолах на разных горизонтах месторождений Холст, Архон, Згид, Джими, а также результатами термодинамического моделирования процессов мобилизации и рудообразования [1, 2, 7].

Для этих месторождений нами предложена следующая геологическая модель гидротермальной системы [2]. В пределах Садоно-Унальского глубинного сброса, ограничивающего с юга область распространения месторождений, в дорудное время происходила циркуляция минерализованных углекисло-хлоридных вод. Внедрение в средней юре даек и штоков субвулканических и гипабиссальных пород (диориты, гранит-порфиры, трахиандезиты и др.) и интенсивные тектонические подвижки инициировали гидротермальный процесс: интрузивные тела создали необходимый источник тепла, закладывались рудоконтролирующие трещины скола и отрыва СЗ и СВ простирания, образовалась зона разуплотнения пород. Нагретые растворы из глубинного сброса фильтровались через зону разуплотнения в палеозойских гранитах (или в других породах) и вступали в реакцию с ними. Формировалась область мобилизации различных компонентов из вмещающих пород, в том числе рудных металлов и сульфидной серы. Эта область была приурочена к зоне сочленения глубинного разлома и оперяющих трещин. Рудоносные растворы из области мобилизации двигались вверх по рудоконтролирующим трещинам. Постепенное охлаждение рудоносных растворов за счет обмена теплом с более холодными вмещающими породами и потери тепла при локальной гетерогенизации приводило к формированию полиметаллических жил выполнения и околожильных ореолов. Такая геологическая модель является основой термодинамического моделирования процессов жильного гидротермального рудообразования, результаты которого представлены в настоящей работе.

2 ОЦЕНКА ИСТОЧНИКА ВЕЩЕСТВА ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЖИЛ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛАНТАНОИДОВ В РУДАХ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ

В отличие от большинства месторождений района (Згид, Садон, Архон и др.), где палеозойские граниты являются основным типом рудовмещающих пород, на месторождении Джими преобладающая часть рудных жил сосредоточена в метаморфических породах буронской свиты (PR₃–PZ₁). Палеозойские граниты подстилают данные породы, контактируя с ними по пологим тектоническим нарушениям, но их выходы в пределах изученных нами рудных тел отсутствуют.

В настоящем исследовании сделана оценка источников вещественного состава жил месторождения Джими по характеру распределения РЗЭ в рудах и вмещающих породах. Получены данные для 27 рудных проб из 12 разрезов по рудным телам Центральное, Основное, Цагарсар (штольни 47 и 49, средние горизонты месторождения Джими) и для 10 типов преобладающих пород района.

Суммарное содержание РЗЭ в полиметаллических жилах меньше, чем во вмещающих породах, и изменяется от 2 до 52 г/т. В палеозойских гранитах сумма РЗЭ изменяется в различных пробах от 54 до 213 г/т, в докембрийских метаморфических породах максимальное суммарное содержание РЗЭ зафиксировано в слюдяном сланце – 198 г/т, а в кварц-хлорит-эпидотовом и кварц-хлорит-альбитовом сланцах только 127 и 83 г/т, соответственно. Для двух проб гранит-порфира суммы РЗЭ близки: 104 и 127 г/т, также как и для юрских вулканогенных пород и даек основного состава – 120 и 121 г/т. Для всех рудных тел на уровне штолен 47 и 49 вмещающими породами являются только докембрийские кристаллические сланцы, для главных представителей которых характерно отсутствие минимума по европию ($Eu/Eu^*=1$) и низкие отношения La/Yb . Минимум по европию и высокие отношения La/Yb характерная черта гранитов.

По значению Eu/Eu^* рудные пробы можно разделить на три группы (примеры на рис. 1): первая - значения Eu/Eu^* менее 0.65, т.е. отчетливо проявлен европиевый минимум (13 проб); вторая – значения Eu/Eu^* от 0.7 до 0.94, где европиевый минимум проявлен слабо или практически отсутствует (11 проб); третья - значения Eu/Eu^* более 1, т.е. присутствует европиевый максимум (3 пробы). Происходит и уменьшение La/Yb отношения от первой группы к третьей. Некоторые спектры руд полностью тождественны спектрам палеозойских гранитов или докембрийских метаморфитов [3], а спектры большей части проб указывают на комбинированный источник вещества.

Внести некоторую ясность в комбинированную природу части спектров позволяют данные представленные на рис. 2, где показаны характеристики спектров «смешения» между кристаллическим сланцем (№919) и гранитами (№862, 1066, 1081). «Смешение» устроено с шагом 10% и для каждой такой смеси рассчитаны Eu/Eu^* и La_N/Yb_N , которые нанесены на диаграмму. Видно, что 17 рудных проб, отнесенных к первой и второй группам, в этих координатах хорошо

соответствуют общему тренду от кристаллического сланца к палеозойскому граниту или юрскому гранит-порфиру (стрелка А).

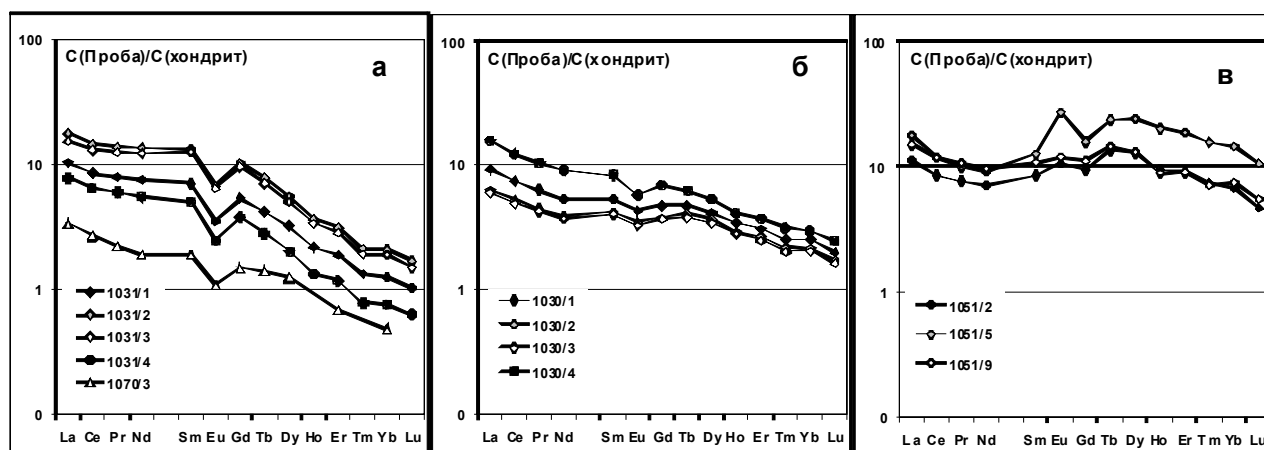


Рисунок 1. Примеры трех групп спектров РЗЭ в рудных пробах месторождения Джими.

а - с максимальным проявлением европиевого минимума (указаны номера проб); **б** - с минимальным проявлением европиевого минимума; **в** - с отчетливым проявлением европиевого максимума.

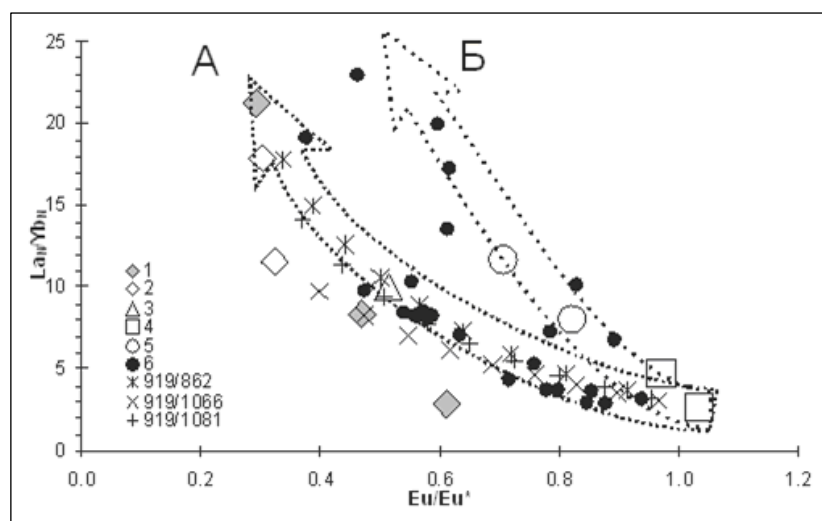


Рисунок 2. Характеристики спектров РЗЭ для рудных проб, вмещающих пород и спектров смешения «гранит – кристаллический сланец».

Обозначения: 1 – гранит садонского типа (PZ_3); 2 – гранит-порфир (J_2); 3 – слюдяной сланец (PR_3-PZ_1); 4 – кристаллический сланец (PR_3-PZ_1); 5 – андезито-дацитовая дайка (J_2) и вулканит андезитового состава (J_1); 6 – рудные пробы;

спектры смешения (значки идут через 10% от одной породы до другой): 919/862 – смешение палеозойского гранита (№862) и кристаллического сланца (№919) - тренд обозначен пунктирной стрелкой А; 919/1066 и 919/1081 – смешение гранит-порфира и кристаллического сланца. Пунктирная стрелка Б – предполагаемое изменение характеристик спектров рудных проб за счет дополнительного влияния юрских вулканогенных пород.

Можно считать, что при формировании интервалов рудных жил, описанных 17 рудными пробами, участвовали гидротермальные растворы, прошедшие через взаимодействие в разных пропорциях с палеозойскими гранитами и метаморфитами буронской свиты, которые, вероятно, и являются основными источниками РЗЭ и рудного вещества в исследуемых полиметаллических жилах. Спектры 7 рудных проб сдвинуты от тренда А в сторону более высоких отношений La/Yb или Eu/Eu^* . Можно предположить, что таким образом проявляется влияние на спектры РЗЭ рудных проб дополнительного источника компонентов, к которым относятся юрские вулканогенные породы. Возможный вариант такого влияния обозначен на рис. 2 пунктирной стрелкой Б.

Таким образом, можно считать установленным, что в формировании состава полиметаллических жил месторождения Джими играют роль оба типа преобладающих пород

(палеозойские граниты и докембрийские метаморфические породы) при активизации гидротермально-метасоматических процессов в среднеюрское время. Вероятно, что источник рудного вещества чаще всего является комбинированным и включает породы субстрата в различных пропорциях, а их соотношение можно установить по специфическим характеристикам спектров РЗЭ в рудных жилах (рис. 2). Эти данные послужили основой для развития методик термодинамического моделирования.

3 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЖИЛЬНОГО ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ С КОМБИНИРОВАННЫМ ИСТОЧНИКОМ РУДНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Проведен анализ результатов термодинамического моделирования, позволяющий оценить влияние различных комбинаций вмещающих пород в источнике на процессы жильного полиметаллического рудообразования (пакет программ HCh [5, 6], система H-O-K-Na-Ca-Mg-Al-Si-Fe-C-Cl-S-Zn-Pb-Cu). Структура моделей: *область мобилизации* – реакция различных комбинаций пород (последовательные или параллельные реакторы, рис. 3), содержащих одинаковые количества Zn, Pb, Cu и сульфидной серы, с 50 порциями безрудного раствора (1 m NaCl, 0.5 m H₂CO₃, 1 кг H₂O) при 420 С и 1 кбар; *область жильного рудообразования* – 31 реактор при понижении температуры от 400 до 100 С с шагом 10 С при 1 кбар. Жилу формирует рудоносный раствор из области мобилизации (50 последовательных волн или W). Ранее нами по данным моделирования было показано, что при таких Т и Р в области мобилизации могут формироваться жилы с валовым содержанием сфалерита порядка 30% и локальными (в разрезе жилы) более 60-70% [2]. Отложение вещества в жиле описано слоевым механизмом (из каждой порции раствора образуются минералы, которые не вступают в реакцию с последующими порциями раствора, т.е. создаются как бы отдельные, нарастающие слои) [1, 7].

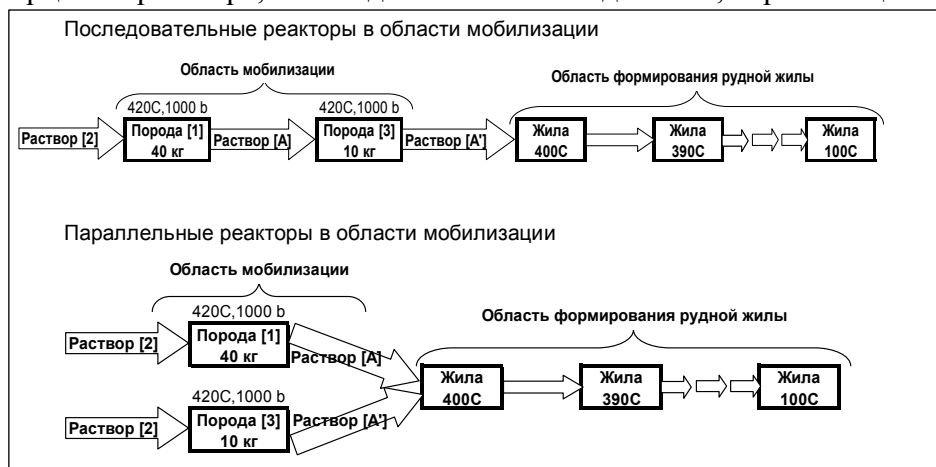


Рисунок 3. Схема проведения расчетов, использованная при равновесно-динамическом моделировании.

Для системы последовательных реакторов в области мобилизации проведены расчеты для нескольких вариантов соотношений пород:

20% кристаллического сланца (CD) в первом реакторе и 80% гранита (Y) во втором реакторе при соотношении порода/вода 10 и 40, соответственно (на графиках обозначается “20%CD 80%Y”); 80% CD и затем 20% Y при соотношении порода/вода 40 и 10 (итоговые результаты для концентраций рудных компонентов для этих двух вариантов показаны на левых графиках рис. 4);

80% гранита (Y) в первом реакторе и 20% кристаллического сланца (CD) во втором реакторе при соотношении порода/вода 40 и 10, соответственно; 20% Y и затем 80% CD при соотношении порода/вода 10 и 40 (итоговые результаты для этих двух вариантов показаны на правых графиках рис. 4).

По данным рис. 4 видно, что общий характер мобилизации рудных компонентов для этих четырех вариантов близок. Однако имеются и различия: 1) разное «время» полного выщелачивания рудных элементов (45W и более - для левых графиков, 35-40W - для правых); 2) стабильным сульфидом железа являются пирротин (левые графики, где взаимодействие с

гранитом завершает процесс мобилизации) или пирит (правые графики, где последним идет кр.сланец); 3) заметные различия в концентрациях рудных компонентов (особенно заметно по цинку). Естественно, что минеральные составы изменяющихся гранита и кристаллических сланцев различные (исходно это породы кислого и основного состава). Рост концентраций рудных компонентов в вариантах мобилизации, где завершающей породой является кристаллический сланец и устойчив пирит, приводит к сокращению интервала «времени» (в нашем случае – W) полного выщелачивания. Отличия в области мобилизации возникают из-за различных окислительно-восстановительных потенциалов, создающихся при реакции безрудного раствора с той или иной породой при заданном порододоминирующем режиме.

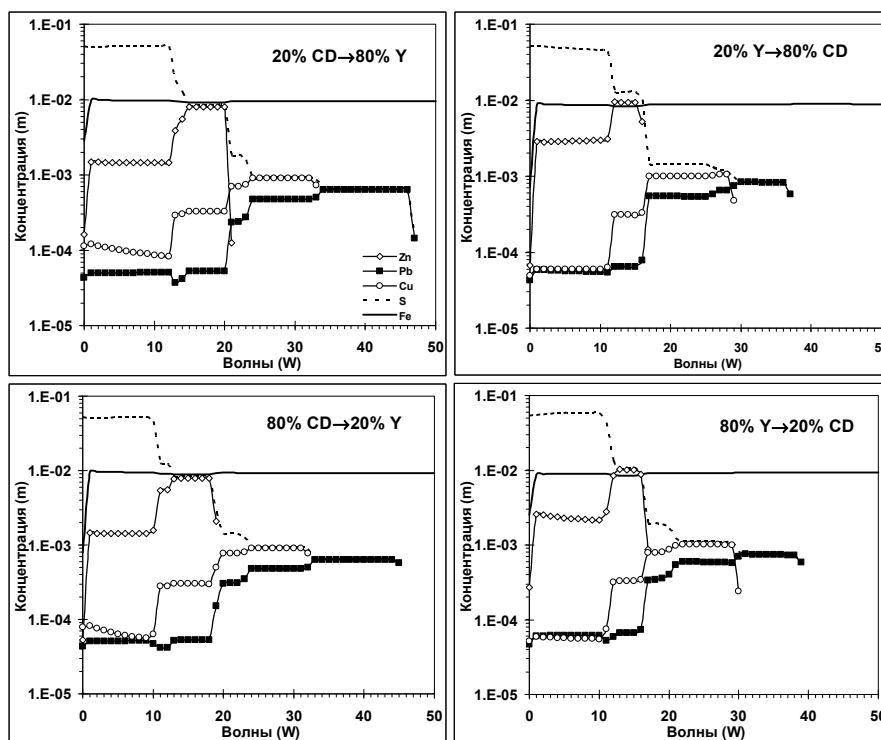


Рисунок 4. Составы рудоносных растворов из зоны мобилизации при изменении последовательности взаимодействия пород с исходным безрудным раствором и соотношений количеств пород.

Указанные различия в области мобилизации приводят к изменениям в минеральном составе модельных жил выполнения. На рис. 5 представлены примеры, демонстрирующие последовательность и интенсивность отложения рудных минералов в модельных жилах на одном из уровней по восстанию (отвечает температуре 200 С). Интервал температур от 150 до 200 С отвечает уровню максимального отложения сфалерита и галенита.

Из рудоносного раствора, образующегося при реакции с последовательностью «кристаллический сланец гранит» (левые графики), отлагается ранняя ассоциация (приконтактовая область жилы или первые слои) минералов с трехкратным преобладанием пирита над сфалеритом (пирит – 50-60%, сфалерит до 20%), которая сменяется моносфалеритовым слоем (с содержаниями до 60%). Моносфалеритовые образования типичны для рассматриваемых месторождений. Из рудоносного раствора, образующегося при реакции с последовательностью гранит кристаллический сланец (правые графики), отлагается ранняя ассоциация минералов с незначительным преобладанием пирита над сфалеритом (пирит около 40%, сфалерит до 30%), которая сменяется моносфалеритовым слоем в расчетах с меньшей долей кристаллического сланца или отсутствием такой области в расчетах с большей долей сланца. При 150 С моносфалеритовый слой образуется только в модели с последовательностью 20% кристаллического сланца в первом реакторе и 80% гранита во втором.

В моделях с зоной мобилизации «кристаллический сланец гранит» отлагается пирротин в нижних (самых высокотемпературных) частях жил, что является характерной чертой всех (и Джими) месторождений района. В модели с зоной мобилизации «гранит кристаллический сланец» отложение пирротина в высокотемпературных областях жилы не происходит, а по

восстанию всей жилы преобладает только пирит. Это приводит к значительному понижению максимальных валовых содержаний пирита в жилах.

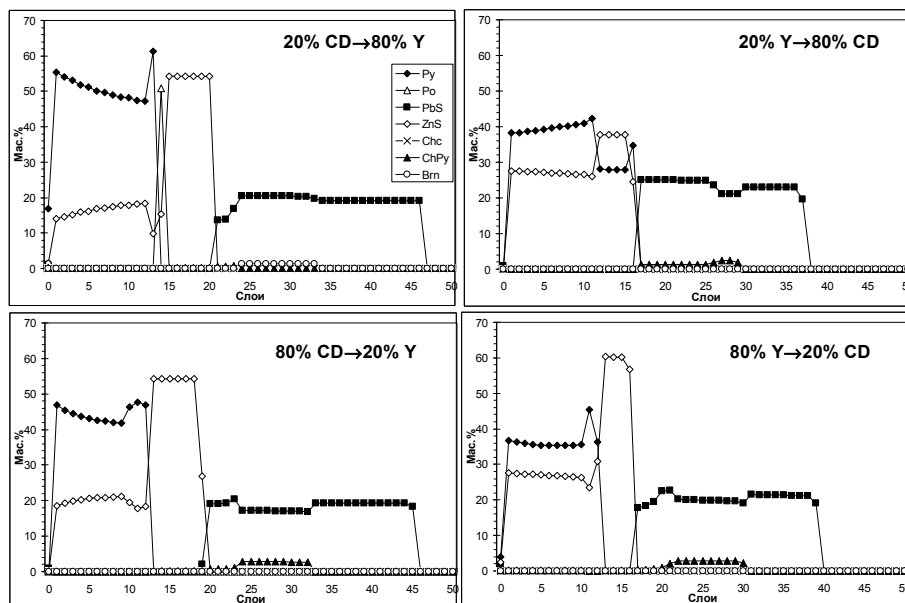


Рисунок 5. Структуры модельных жил выполнения на одном из уровней по восстанию (200 С) в зависимости от принятой модели мобилизации (расположение графиков соответствует рис. 4). Условные обозначения: Py - пирит; Po - пирротин; PbS - галенит; ZnS - сфалерит; Chc - халькозин; ChPy - халькопирит; Brn - борнит.

Для системы параллельных реакторов *в области мобилизации* проведены расчеты для двух вариантов - преобладание раствора от реакции с гранитом или от реакции с кристаллическим сланцем (80 и 20%, и наоборот). В первом варианте образуются характерные для месторождений ассоциации, описанные выше для моделей с зоной мобилизации «кристаллический сланец гранит» или только гранит. Во втором варианте - для моделей с зоной мобилизации «гранит кристаллический сланец».

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные геохимические исследования и термодинамическое моделирование процессов гидротермального жильного рудообразования показывают, что поведение рудных элементов подчинены взаимодействию вода-порода. Установлено, что в формировании руд месторождения Джими принимают участие оба типа преобладающих пород района: палеозойские граниты и докембрийские метаморфические породы. Источник рудного вещества чаще всего является комбинированным и включает породы субстрата в различных пропорциях, которые можно установить по спектрам РЗЭ в рудах. Термодинамическое моделирование в системах с комбинированными источниками рудных компонентов показало, что в системах с последовательностью «гранит кристаллический сланец» в формировании состава рудоносных растворов или при смешении растворов с преобладанием участия кристаллических сланцев над гранитом, а такие фиксируются для большого количества рудных проб по РЗЭ (рис. 2), не удастся получить минеральных ассоциаций характерных для реальных месторождений.

Отсюда можно сделать два вывода: либо в составе кристаллического сланца содержание Fe_2O_3 определено с ошибкой (что вполне можно допустить), либо докембрийские метаморфиты подключаются к процессам рудообразования на ограниченных по времени этапах развития гидротермальной системы или это подключение происходит на ограниченных интервалах по восстанию жил.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ, грант №14-05-00062.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов М.В. Геохимические и термодинамические модели жильного гидротермального рудообразования. – М.: Научный мир, 2000. – 360 с.

2. Борисов М.В., Бычков Д.А., Шваров Ю.В. Геохимические структуры полиметаллических жил выполнения и параметры гидротермального рудообразования // Геохимия – №11. – 2006. – С. 1218-1239.
3. Борисов М.В., Волкова М.М., Бычков Д.А., Бычкова Я.В. Распределение редкоземельных элементов в рудных телах Джамидонского полиметаллического месторождения и вмещающих породах (Северная Осетия, Россия) // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология – №4. – 2011. – С. 48-52.
4. Тугаринов А.И., Бибилова Е.В. и др. Применение свинцово-изотопного метода исследования для решения вопросов о генезисе свинцовых месторождений Северо-Кавказской рудной провинции // Геохимия – №8 – 1975. – С. 1156-1163.
5. Шваров Ю.В. HCh: новые возможности термодинамического моделирования геохимических систем, предоставляемые Windows // Геохимия – № 8. – 2008. – С. 898-903.
6. Шваров Ю.В. Алгоритмизация численного равновесного моделирования динамических геохимических процессов // Геохимия – № 6. – 1999. – С. 646-652.
7. Borisov M.V. Geochemical and thermodynamic models for the genesis of low- and medium-temperature vein mineralization and metasomatism in the wall rocks // Geochemistry International – V. 41, suppl. 2. – 2003. – P. S145-S312.

Статья опубликована

Борисов М.В., Бычков Д.А., Волкова М.М. Роль взаимодействия порода-вода в формировании рудоносных растворов и процессах гидротермального рудообразования // Материалы II Всероссийской конференции с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами», Владивосток, Изд. Дальнаука, 2015, 10-16.