Взаимодействие вода-порода в процессах гидротермального рудообразования: геохимические данные и термодинамические модели

Борисов М.В., Бычков Д.А., Шваров Ю.В., Пчелинцева Н.Ф.

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

АННОТАЦИЯ: Для Джимидонского жильного полиметаллического месторождения (Северная Осетия, Россия), сформированного в среднеюрское время, по характеру распределения редкоземельных элементов в жилах и породах установлено, что источники РЗЭ и рудных компонентов являлись комбинацией различных по составу вмещающих пород (PR3-PZ1, PZ3) и сменялись во времени. Геохимические данные послужили основой для разработки новых методик равновесно-динамического моделирования и оценки влияния смены во времени флюидных потоков из разных источников на процессы рудообразования.

Water-rock interaction in hydrothermal ore formation processes: geochemical data and thermodynamic models

Borisov M.V., Bychkov D.A., Shvarov Yu.V., Pchelintseva N.F.

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia

ABSTRACT: For the Dzhimidonsky vein polymetallic deposit (North Ossetia, Russia), formed in the Middle Jurassic time, it was established by the nature of the distribution of rare-earth elements in the veins and rocks that the sources of REE and ore components were a combination of host rocks of different composition (PR3-PZ1, PZ3) and were replaced in time. Geochemical data served as the basis for the development of new techniques for equilibrium-dynamic modeling and the assessment of the effect of fluid flows from different sources over time on the processes of ore formation.

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы – разработка новых методических подходов для реконструкции условий жильного гидротермального рудообразования. Главной задачей исследований является установление источников компонентов флюидов, которые формируют месторождения. Породы, вмещающие жильные тела многих типов гидротермальных объектов, могут быть основным источником рудных компонентов [1, 5-7 и др.]. Изучение закономерностей распределения рудных, сопутствующих и редкоземельных элементов (РЗЭ) в жилах, околожильных и вмещающих породах позволяет определить источники вещества и их эволюцию в процессе рудообразования. Геохимические данные необходимы для создания обобщенной генетической модели формирования месторождения, которая позволяет разработать обоснованную термодинамическую модель процессов рудообразования, включающую области мобилизации и рудоотложения. Эталонными объектами в наших исследованиях являются жильные полиметаллические месторождения Садонского рудного района (Северная Осетия), по которым накоплена представительная база данных

(2000 проб, сотни образцов, шлифов и аншлифов).

Рудообразование на месторождениях района происходило в предкелловейское время (J_2), а вероятным источником рудных компонентов являлись граниты (PZ_3), которые вмещают основную часть рудных жил наиболее продуктивных месторождений (Садон, Архон, Згид и др.). Такой вывод сделан на основании данных по изотопному составу свинца в галенитах руд и в калиевых полевых шпатах вмещающих пород района [5]. Дополнительное подтверждение получено нами при исследовании закономерностей распределения рудных элементов в первичных ореолах, а также по результатам термодинамического моделирования процессов рудообразования [1, 3]. При моделировании именно граниты рассматривались как основной рудогенерирующий субстрат.

Для рассматриваемых месторождений нами предложена генетическая модель гидротермальной системы [1, 3]. Основные её положения сводятся к следующему. В пределах Садонно-Унальского глубинного сброса, который ограничивает с юга область распространения месторождений, в дорудное время происходила циркуляция минерализованных углекисло-

хлоридных вод. Внедрение в J_2 даек и штоков субвулканических и гипабиссальных пород (диориты, гранит-порфиры и др.) и интенсивные тектонические подвижки инициировали гидротермальный процесс: интрузии создали необходимый источник тепла, закладывались рудоконтролирующие трещины, образовались зоны механических деформаций пород. Нагретые растворы из глубинного сброса фильтровались через зоны дробления в палеозойских гранитах и вступали в реакцию с ними. Формировались области мобилизации различных компонентов из вмещающих пород (Zn, Pb, Cu, Fe, S(II) и др.). Рудоносные растворы из областей мобилизации двигались вверх по рудоконтролирующим трещинам. Постепенное охлаждение растворов за счет обмена теплом с вмещающими породами и потери тепла при локальной гетерогенизации приводило к формированию полиметаллических жил выполнения и околожилных ореолов. Такая геологическая модель является базой для термодинамического моделирования процессов жильного гидротермального рудообразования [1, 3].

В настоящей работе представлены новые данные о закономерностях распределения РЗЭ в жилах Джимидонского месторождения (далее Джими), которые стали основой для развития методик термодинамического моделирования. Уникальной особенностью Джими является то, что главной рудовмещающей средой являются метаморфические породы буронской свиты (PR_3 – PZ_1). Мощный блок докембрийских пород надвинут на палеозойские граниты, контактируя с ними по серии пологих тектонических нарушений. В последние годы на месторождении проводилась дополнительная разведка, закладывались новые штольни (№ 47 и 49), а вскрытые рудные тела были во многих случаях доступны. Наши предшествующие данные по РЗЭ в рудных жилах Джими [2, 4, 9] показали, что источником рудных компонентов могут быть, как граниты (PZ_3), так и кристаллические сланцы (PR_3 – PZ_1). Установлено, что источник или источники рудного вещества были комбинированными и включали породы субстрата в различных пропорциях, а их соотношение можно установить по специфическим характеристикам спектров РЗЭ в рудных жилах. Однако в этих работах исследовались отдельные пробы из 12 детальных разрезов по рудным телам месторождения, а в настоящей статье представлены данные по двум полным

сечениям, что позволило получить новую информацию об эволюции процессов рудообразования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Месторождение Джими располагается в восточной части Садоно-Унальского рудного поля и включает в себя три рудных зоны СВ простирания (Восточно-Джимидонская, Цагарсар и Бозанг). Рудные зоны месторождения вскрыты серией штолен: № 8 (1760 м абс. высота), № 3 (1680 м), № 47 (1640 м), № 45 (1560 м), № 49 (1520 м) и № 44 (1230 м). Штольни № 8, 45 и 44 недоступны уже более 20 лет. Все жилы имеют почти вертикальное падение. Мощность жил варьирует от 10 см до нескольких метров. Горными выработками жилы вскрыты по падению и простиранию более чем на 500 метров. Руды сложены пиритом, сфалеритом, галенитом, халькопиритом, пирротинном, арсенопиритом. Из жильных минералов развиты кварц, карбонаты, хлорит.

В настоящей работе представлены результаты изучения распределения рудных элементов и лантаноидов по сплошным разрезам через две апофизы Западная-1 и Западная-3 (рудная зона Бозанг, штолки Северный и Основной, жилы Центральная и Основная, шт.47, Джими). По апофизам были отобраны крупные монолиты (от контакта до контакта), из которых на полевой базе на камнерезном станке были подготовлены поперечные спилы-пластины (пример показан на рис. 1) и проведено опробование шагом 2 см (19 проб, масса отдельных проб порядка 1 кг, мощность жил до 20 см). Апофизы взяты для исследования из-за высоких содержаний Zn (до 40-44% в отдельных пробах), контрастного его распределения по разрезу и разных типов вмещающих метаморфических пород. Между местами пробоотбора около 430 м.

Рис. 1. Поперечный спил монолита по апофизе Западная-1. Показаны 2 см интервалы опробования (пробы №1013/1-1013/9)

Для подготовки проб к анализам использовалась стандартная методика кислотного разложения [3]. Анализы на РЗЭ выполнены из растворов методом ИСП-МС на приборах «Element 2 и XR». Для проверки правильности результатов одновременно с пробами измеряли образцы стандартов гранита СГ-3 и базальта BCR-2 (отклонение от паспортных значений для большинства РЗЭ не превышало 4%). Содержания рудных элементов (Fe, Zn, Pb, Cu, Cd и др.) определены в истертых пробах - рентгено-флю-оресцентный анализ (Niton XL3t 900). Термодинамическое моделирование выполнено при использовании пакета программ HCh [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Закономерности распределения рудных элементов и лантоноидов.

Апофиза Западная-1. Содержания рудных компонентов (средние и в отдельных пробах) составляют: Zn - 22.4 (8.9-40.3%), Fe - 7.0 (5.9-9.3%), Pb - 1.6 (0.1-5.1%), Cu - 1.2 (0.7-1.9%), Σ РЗЭ 9.2 (1.9-27.1 г/т). Максимальные содержания Zn приурочены к приконтактовым областям. В части приконтактовых проб при первичном описании отмечены мелкие фрагменты серо-зеленой изменённой вмещающей породы, которые представлены здесь кристаллическими сланцами кислого состава (подобны нашим пробам № 917 и 1118, описаны в [4]). Нормированные на хондрит спектры РЗЭ рудных проб представлены на рис. 2. В целом спектры достаточно близки, но отчетливо видна дифференциация по сумме РЗЭ и по конфигурации европиевого минимума.

Все пробы разреза можно разделить на две группы (рис. 3). *Первая группа* – 4 приконтактовые пробы, которые характеризуются максимальными значениями отношений La/Yb (9.4-16.4; здесь и далее все отношения приведены для нормированных значений) и минимальными Eu/Eu*. Однако между этими пробами имеются различия. В пробах №1013/1-2 низкие суммарные содержания РЗЭ (1.9-5.9 г/т) и самые высокие Zn (33.9-40.3%).

При переходе от пробы 1013/1 к пробе /2 происходит рост La/Yb (от 9.4 до 12) и ослабление европиевого минимума (от 0.51 до 0.75) при снижении суммы РЗЭ и содержаний Zn. В пробах №1013/8-9 самые высокие суммарные содержания РЗЭ (25.7-27.1 г/т) и значения от-

ношений La/Yb (12.3-16.4), низкие Eu/Eu*. При переходе от пробы 1013/9 к пробе /8 происходит снижение La/Yb (от 16.4 до 12.3) и ослабление европиевого минимума (от 0.45 до 0.61) при уменьшении содержаний Zn и росте Σ РЗЭ. Для всех 4 проб характерны отношения La/Nd более 2.1.

Рис. 2. Нормированные на хондрит РЗЭ в пробах разреза через апофизу Западная-1 (проба №1013(сб) – сборная по всему разрезу или эквивалент «штупф-ной» пробы)

Рис. 3. Зависимость отношений La/Yb от суммарного содержания РЗЭ в пробах по апофизе Западная-1

Вторая группа – пробы из центральной части жилы (рис. 3) с относительно низкими суммарными содержаниями РЗЭ (1.9-10.9 г/т) и значений отношений La/Yb (5.9-7.5), а также меньшая интенсивность проявления европиевого минимума (0.73-0.78). Для этих проб характерны отношения La/Nd менее 2. Некоторые закономерности можно увидеть при анализе спектров проб относящихся к первой и второй группам. Нужно отметить, что повышение суммарных содержаний РЗЭ возможно

связано с наличием и массой фрагментов вмещающей породы в пробах. Для вмещающей породы ранее были установлены устойчивые показатели спектров РЗЭ: $Eu/Eu^*=0.52-0.53$, $La/Yb=10-11$, $La/Nd=1.9-2$. Так в пробах №1013/7-9 отчетливо проявляется тенденция ослабления минимума по Eu от 0.45 в пробе 1013/9 до 0.74 в пробе 1013/7 и уменьшения La/Yb отношения от 16.4 до 6.4 при уменьшении содержания Zn (от 23.8 до 12.5%) и $\Sigma PZЭ$. Важно, что такие значения Eu/Eu^* и La/Yb не могут возникнуть только за счет вмещающей породы. Необходим дополнительный привнос РЗЭ с иными характеристиками спектров, которые и вызывают изменения фрагментов вмещающих пород в апофизе.

На характер распределения РЗЭ по разрезу влияние могли оказать как минимум *три типа вкладов (спектров)*, которые по разному проявляются на интервалах опробования.

Первый вклад. Вмещающие породы, характеристики спектров РЗЭ которых приведены выше. *Второй вклад.* По данным визуального описания можно считать, что первоначально жила была сформирована серым кварцем и фрагментами вмещающих пород, сосредоточенных у одного края. Можно допустить, что серый кварц отлагался из раствора, получившего нагрузку РЗЭ при взаимодействии с породами, где доля кристаллических сланцев основного состава (далее амфиболитов) была преобладающей. Характерные черты спектров РЗЭ амфиболитов: $Eu/Eu^*=1-1.6$, $La/Yb=2.4-2.7$, $La/Nd=1.2-1.3$ (аналог наших проб №919 и 1117 [2, 4]). На каких фактах основано данное предположение. Первое – повышение Eu/Eu^* до 0.74 и снижение La/Yb до 6.4 в пробе №1013/7 по сравнению с пробой №1013/9 (0.45 и 16.4), но вероятно влияние было сильнее. При этом в два раза снижается и содержание Zn. Второе – слабый и изменяющийся в узких пределах минимум по европию в центральных пробах жилы ($Eu/Eu^*=0.73-0.78$) при относительно низких $\Sigma PZЭ$. Содержание РЗЭ в кварце обычно не более 1 г/т, но в растворе, из которого образуется кварц, концентрация РЗЭ могла быть значительно выше, что и проявилось при реакции данного раствора с фрагментами вмещающей породы. Это взаимодействие вызывает ослабление минимума по Eu и уменьшение La/Yb в пробах с измененными породами. Без этого вклада невозможно получить спектры с Eu/Eu^* более 0.53 и низкими

значениями отношений La/Yb . *Третий вклад.* На этом этапе развития жилы происходило дробление раннего кварца с фрагментами уже частично измененной вмещающей породы и отложение по трещинам сфалерита. Сфалерит отлагается, вероятно, из рудоносного раствора, нагрузка Zn и РЗЭ в котором получена при взаимодействии с породами, где преобладает палеозойский гранит (например, проба №862 [4] с $Eu/Eu^*=0.3$, $La/Yb=21$, $La/Nd=2$). Сульфиды обычно содержат первые г/т РЗЭ. Чем большее количество сфалерита в пробах без вмещающих пород, тем сильнее минимум по европию и выше отношение La/Yb и La/Nd . Рассмотрим пробы №1013/2-3 с самыми низкими $\Sigma PZЭ=1.9$ г/т, где не отмечено присутствие вмещающих пород. Так в пробе №1013/2 ($Zn=33.9\%$) - $Eu/Eu^*=0.75$, $La/Yb=12.0$, $La/Nd=2.1$, а в пробе №1013/3 ($Zn=24.6\%$) - $Eu/Eu^*=0.78$, $La/Yb=5.3$, $La/Nd=1.9$. В данном случае реализуется смешение второго и третьего вкладов, но влияние последнего ограничено емкостью сфалерита относительно РЗЭ. Со стороны другого контакта жилы добавляются первый и второй вклады. Причем наличие фрагментов породы усиливает эффективность третьего вклада. Так в пробе №1013/9 - $Eu/Eu^*=0.45$, $La/Yb=16.4$ при содержании Zn 23.8%, а в пробе №1013/7 - $Eu/Eu^*=0.74$, $La/Yb=6.4$, где Zn только 12.5%. Без третьего вклада невозможно получить спектры с $Eu/Eu^*=0.45$ и значениями отношений La/Yb выше 12.

На этом формирование апофизы не заканчивается. По кварц-сфалеритовому агрегату закладываются новые трещины, которые заполняются пиритом, халькопиритом и галенитом. Такая ассоциация могла отлагаться из раствора, соответствующему третьему вкладу при эволюции состава источника.

Апофиза Западная-3. Содержания рудных компонентов: Zn - 22.6 (4.2-44.4%), Fe - 7.0 (5.5-10.6%), Pb - 0.8 (0.2-2.8%), Cu - 0.4 (0.2-0.8%), $\Sigma PZЭ$ 11.3 (2.7-37.2 г/т). Максимальные содержания Zn приурочены к приконтактовым областям. В приконтактных пробах 1002/1 и 1002/8 при первичном описании проб отмечены присутствие вмещающей породы. Вмещающие породы представлены амфиболитами в отличие от апофизы Западная-1. Нормированные на хондрит спектры РЗЭ рудных проб представлены на рис. 4. Спектры различаются сильно по конфигурации аномалии по Eu (от максимума до минимума) и по сумме РЗЭ.

Пробы данного разреза можно разделить на несколько групп. По соотношению Eu/Eu^* и $\Sigma PЗЭ$ выделяются две группы: с высокими и низкими суммарными содержаниями РЗЭ. Группа с высокими $\Sigma PЗЭ$ представлена тремя приконтактовыми пробами. Для спектров этих проб основной вклад, вероятно, дают вмещающие амфиболиты. Характерные черты спектров РЗЭ амфиболитов: $Eu/Eu^*=1-1.6$, $La/Yb=2.4-2.7$, $La/Nd=1.2-1.3$ (аналог наших проб №919 и 1117 [2, 4]). А в данных пробах: $Eu/Eu^*=1.2-1.6$, $La/Yb=2.5-3.5$, $La/Nd=1.3-1.5$, т.е. очевидно очень большое сходство. Для проб в центре жилы $\Sigma PЗЭ$ составляют 2.7-9.6 г/т и, вероятно, вмещающих пород здесь нет. По соотношению Eu/Eu^* и La/Yb (рис. 5) все пробы разделяются на три группы.

Рис. 4. Нормированные на хондрит РЗЭ в пробах по разрезу через апофизу Западная-3 (проба №1002(сб) – сборная по всему разрезу или эквивалент «штуфной» пробы)

Рис. 5. Связь отношений La/Yb и значений Eu/Eu^* в пробах по апофизе Западная-3

Первая группа – 2 приконтактовые пробы, в которых наиболее высокие содержания Zn (37 и 44.4%) и значения максимума по Eu ($Eu/Eu^*=1.6$). *Вторая группа* – пробы из центральной части жилы, имеют низкие $\Sigma PЗЭ$ (2.7-4.6 г/т). Для этих проб характерны близкие значения европиевого максимума ($Eu/Eu^*=1.1-1.2$) и отношений La/Yb (2.3-3.5). *Третья группа* – 2 пробы из центральной части жилы (№1002/3-4). Спектры этих проб резко отличаются от остальных: проявление минимума по европию ($Eu/Eu^*=0.64-0.74$) и рост отношения La/Yb до 11.

Как и для апофизы Западная-1 можно считать, что формирование итогового распределения РЗЭ по разрезу через апофизу Западная-3, вероятно, обеспечивается влиянием *трех вкладов*.

Первый вклад. Вмещающие породы, характеристики спектров РЗЭ которых приведены выше. Этот вклад – основа спектров РЗЭ в приконтактовых пробах жилы. *Второй вклад.* По данным описания проб видно, что первоначально жила была сформирована серым кварцем (аналогично и в апофизе Западная-1), вероятно, с небольшим количеством сульфидов и других новообразований, содержащих РЗЭ. Можно предположить, что эта ассоциация отлагалась из раствора, получившего нагрузку РЗЭ при взаимодействии с породами, где доля амфиболитов была преобладающей. Подтверждением этому являются спектры части проб центральной части жилы, где проявлен не очень высокий максимум по европию ($Eu/Eu^*=1.1-1.2$). Такие растворы не могли внести большой вклад в изменение спектров РЗЭ при взаимодействии с боковыми породами. *Третий вклад.* На этом этапе происходило дробление раннего серого кварца и отложение по трещинам сфалерита. Сфалерит отлагается, вероятно, из рудоносного раствора, нагрузка Zn и РЗЭ в котором получена при взаимодействии с породами, где преобладает палеозойский гранит. Поэтому чем большее количество сфалерита в пробах без вмещающих пород, тем сильнее минимум по европию и выше отношение La/Yb и La/Nd . Только за счет добавления третьего вклада происходит формирование минимума по Eu.

Данные по апофизам позволили сделать определенные обобщения и выводы.

1). В образовании апофиз приняли участие гидротермальные растворы из разных комби-

нированных и эволюционирующих источников, сменяющихся во времени. Исследованные спектры представляют собой суммарный эффект.

2). Ранняя ассоциация минералов (кварц с небольшой долей сульфидов) формируется раствором, получившим нагрузку РЗЭ при взаимодействии с породами, где доля амфиболитов была преобладающей.

3). Основная масса рудных сульфидов отлагается позже из раствора, нагрузка цинка и лантаноидов в котором получена при взаимодействии с породами, где преобладает палеозойский гранит.

4). Только по отдельным пробам из рудных тел и сборным пробам по всему сечению жил невозможно разобраться в эволюции составов рудоносных растворов и в смене источников, развивающейся гидротермальной системы.

Полученные данные послужили основанием для создания новых вариантов равновесно-динамических моделей жильного рудообразования. В этих моделях комбинированные источники рудных компонентов (преобладание той или иной породы в зоне мобилизации) сменяются во времени.

Термодинамические модели рудообразования.

Ранее [9] были исследованы два варианта моделей с комбинированными источниками рудных компонентов: *последовательные реакторы* - исходный безрудный раствор взаимодействует с первой породой, равновесный раствор после этого реагирует со второй породой, а результирующий раствор поступает в область формирования жильного рудного тела; *параллельные реакторы* - смешение двух растворов из зон мобилизации с различными породами происходит в области формирования жилы. В моделях изменялись массы и последовательности пород, вступающих в реакцию с исходным раствором. Расчеты были проведены при 420°C и 1 кбар в области мобилизации. Установлено, что в системах с последовательностью «гранит→амфиболит» в области формирования состава рудоносных растворов или при смешении растворов с преобладанием участия амфиболита над гранитом (такие фиксируются для части рудных проб по РЗЭ [4, 9]) не удастся получить характерных для реальных месторождений минеральных образований.

В настоящей работе проведено моделирование при смене во «времени» флюидных потоков из

разных источников (система H-O-K-Na-Ca-Mg-Al-Si-Fe-C-Cl-S-Zn-Pb-Cu, описанная 54 минералами постоянного и переменного состава, 78 частицами водного раствора). Структура модели (рис. 6): *первая область мобилизации* – последовательные реакторы «гранит→амфиболит» (преобладание метаморфитов – 1/4), реакция с безрудным раствором (1 м NaCl, 0.5 м H₂CO₃, 1 кг H₂O) при 420°C и 1 кбар; *вторая область мобилизации* – последовательные реакторы «гранит→амфиболит» (преобладание гранита – 4/1), реакция с безрудным раствором при 420°C и 1 кбар, но начинает работать позже вместо первой зоны (обе породы содержат одинаковые количества Zn, Pb, Cu и пирита, и через них проходит с реакцией 40-50 волн безрудного раствора); *область жильного рудообразования* – представлена 31 реакторами при понижении температуры от 400 до 100°C (шаг 10°C) при 1 кбар.

Жилу формируют заданное число последовательных волн рудоносных растворов из первой и второй областей мобилизации. Отложение вещества в жиле описано слоевым механизмом, т.е. последовательное отложение минералов слоя за слоем из новых волн-порций раствора [1, 3].

На схеме показаны только две сменяющиеся во времени области мобилизации, но их может быть и иное число, определить которое можно исследуя распределения рудных и редкоземельных элементов по разрезам реальных рудных тел. Очевидно, что подбор типов пород, их масс и последовательности в комбинированных зонах мобилизации, а также условий по T и P, и пропорции участия каждого источника в формировании жилы многообразны и определяются в каждом случае задачей моделирования, которая создается для конкретных интервалов реальных жил.

На рис. 7 представлен один из результатов рудообразования, полученных в расчетах по схеме, показанной на рис. 6. Это один из множества возможных вариантов.

На данном рисунке показан только один разрез модельной жилы на уровне по восстанию, отвечающему 200°C. Рудоносные гидротермальные растворы, формирующие жилу, поступали в трещинный канал последовательно из двух областей мобилизации. Из первой области, где преобладают амфиболиты, растворы начинают

поступать только с 10 до 20 волны (условное время открытия трещинного канала) и они создают слои с 0 по 10 в данном разрезе. Из второй области, где преобладают граниты, рас-

творы поступают с 5 до 25 волны и они продолжают минералообразование в модельной жиле в слоях с 11 по 32 (рис. 7).

Рис. 6. Схема расчетов со сменой во времени источников рудных компонентов. Обозначения: порода [1] – амфиболит-CD (PR3-PZ1); порода [3] – гранит-Y (PZ3); [2] – исходный безрудный раствор; [A], [A'], [A*], [A*'] – рудоносные растворы после взаимодействия с породами

Рис. 7. Рудообразование в модельной жиле на уровне по восстанию отвечающему 200°C, со сменой во времени зон мобилизации (показаны только рудные минералы: Py-пирит, PbS-галенит, ZnS-сфалерит, ChPy-халькопирит, остальное - кварц)

Конечно слойной механизм рудоотложения, реализуемый в наших моделях, не может передать то, что более поздний этап минералообразования развивается по новым трещинам, которые в произвольных направлениях пересекающим более ранние ассоциации минералов (например, слои 0-10 на рис. 7), а именно такое заполнение чаще всего происходит в реальных жилах. Тем не менее, данные геохимических исследований (полные пошаговые разрезы жил) и результаты термодинамического моделирования являются единственным путем, позволяющим реконструировать процессы гидротермального рудообразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные геохимические исследования показывают, что поведение рудных элементов при формировании гидротермальных жильных

рудных тел подчинены взаимодействию вода-порода. По распределению РЗЭ в детальных разрезах жил месторождения Джими установлено, что в их образовании принимали участие гидротермальные растворы из разных комбинарованных и эволюционирующих источников, сменяющихся во времени.

Разработаны новые методики и исследованы термодинамические модели, позволяющие оценить влияние смены во времени флюидных потоков из разных комбинарованных источников на процессы жильного полиметаллического рудообразования.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ, грант №20-05-00098.

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., Пчелинцева Н.Ф. Редкоземельные элементы в гидротермальных жилах как индикатор взаимодействия вода-порода при формировании рудоносных растворов // Материалы III Всероссийской конференции с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». – Чита. Улан-Удэ, БНЦ СО РАН, 2018. – С. 27-34.
3. Борисов М.В., Бычков Д.А., Шваров Ю.В. Геохимические структуры полиметаллических жил выполнения и параметры гидротермального рудообразования // Геохимия – №11. – 2006. – С. 1218-1239.
4. Борисов М.В., Волкова М.М., Бычков Д.А. Оценка источника вещества полиметаллических жил Джимидонского месторождения (Северная Осетия, Россия) на основе распределения редкозе-

мельных элементов в рудах и вмещающих породах // Геохимия – №4. – 2016. – С. 371-388.

5. Тугаринов А.И., Бибикова 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.

6. Чугаев А.В., Знаменский С.Е. Свинцово-изотопные характеристики месторождения золота Миндяк (Южный Урал): К вопросу об источниках металлов // Геология рудных месторождений – № 1. – 2018. – С. 57–67.

7. Чугаев А.В., Плотинская О.Ю., Чернышев И.В. и др. Возраст и источники вещества золоторудного месторождения Кедровское (Республика Бурятия, Северное Забайкалье): геохронологические и изотопно-геохимические ограничения // Геология рудных месторождений – № 4. – 2017. – С. 281–297.

8. Шваров Ю.В. HCh: новые возможности термодинамического моделирования геохимических процессов, предоставляемые Windows // Геохимия – № 8. – 2008. – С. 898–903.

9. Borisov M.V., Bychkov D.A., Volkova M.M., Shvarov Yu.V. Role of water/rock interaction in the formation of ore-bearing solutions and deposition of hydrothermal ore, Sadon Mining District, North Caucasus Mountains, Russia // 16th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16). - EDP Sciences (France). E3S Web of Conferences, 2019. - vol. 98, Article Number 05003.