

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ЖИЛАХ КАК ИНДИКАТОР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДА-ПОРОДА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РУДОНОСНЫХ РАСТВОРОВ

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

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

АННОТАЦИЯ: Для гидротермальных жильных полиметаллических месторождений Северной Осетии выполнена оценка источников вещества жил по характеру распределения редкоземельных элементов в рудах и вмещающих породах. Для месторождения Джими, сформированного в среднеюрское время, установлено, что источником РЗЭ и, вероятно, Pb-Zn руд являлись два типа рудовмещающих пород Садонского района: докембрийские метаморфиты (типичные рудовмещающие только для Джими) и палеозойские граниты (главные - на большинстве месторождений района). Соотношение пород субстрата в таких комбинированных источниках можно установить по спектрам РЗЭ в рудах. Для месторождения Верхний Згид, где граниты являются основным типом рудовмещающих пород, установлен эффект фракционирования РЗЭ за счет мобилизации компонентов гидротермальными растворами при их реакции с палеозойскими гранитами.

1. ВВЕДЕНИЕ

Цель исследований – реконструкция условий и механизмов жильного гидротермального рудообразования. Важнейшей задачей этих исследований является установление источников компонентов флюидов, формирующих месторождения. Одним из источников вещества, который может полностью обеспечить образование рудных тел многих типов гидротермальных месторождений, являются породы района. В наших геохимических исследованиях разрабатываются подходы для оценки источников через установление закономерностей распределения рудных, сопутствующих и редкоземельных элементов (РЗЭ) в рудных жилах, околожильных и вмещающих породах. Эти данные являются необходимым элементом для создания генетической модели процесса для последующего термодинамического моделирования. Эталонными объектами для изучения гидротермального рудообразования являются жильные полиметаллические месторождения Садонского рудного района (Северная Осетия, Россия), по которым нами накоплена представительная база данных (около 2000 проб, сотни образцов, шлифов и аншлифов) и регулярно проводятся полевые работы.

Рудообразование на месторождениях района происходило в предкембрийское время (J_2), а вероятным источником рудных компонентов являлись палеозойские граниты (PZ_3), которые вмещают основную часть рудных жил главных месторождений (Садон, Архон, Згид и др.). Впервые такой вывод был сделан на основании данных по изотопному составу свинца в галенитах руд и в калиевых полевых шпатах вмещающих пород района [1]. Этот вывод подтвержден нашими

данными о закономерностях распределения рудных элементов в первичных ореолах, а также термодинамическим моделированием процессов мобилизации и рудообразования [2, 3]. При моделировании именно граниты рассматривались как основной рудогенерирующий субстрат.

Для этих месторождений нами предложена геологическая модель гидротермальной системы [2, 3]. 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 и др.) и интенсивные тектонические подвижки инициировали гидротермальный процесс: интрузивные тела создали необходимый источник тепла, закладывались рудоконтролирующие трещины скола и отрыва, образовались зоны разуплотнения пород. Нагретые растворы из глубинного сброса фильтровались через зоны разуплотнения в палеозойских гранитах и вступали в реакцию с ними. Формировались области мобилизации различных компонентов из вмещающих пород, в том числе рудных металлов и сульфидной серы. Рудоносные растворы из областей мобилизации двигались вверх по рудоконтролирующим трещинам. Постепенное охлаждение рудоносных растворов за счет обмена теплом 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 [2, 3].

В настоящей работе представлены данные о закономерностях распределения РЗЭ в рудах и породах месторождения Джими, уникальной особенностью которого является то, что основной рудовмещающей средой являются метаморфические породы буронской свиты (PR₃–PZ₁). Мощный блок докембрийских пород был надвинут на палеозойские граниты, контактируя с ними по серии пологих тектонических нарушений. Для сопоставления с данными по Джими также проведено исследование распределения элементов по жиле Гацировской (В.Згид), вмещающими породами для которой являются только палеозойские граниты.

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Месторождение Джими располагается в восточной части Садоно-Унальского рудного поля в пределах одноименного поднятия и включает в себя три рудных зоны СВ простираения (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 пройдены давно и 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 простираению более чем на 500 метров. Руды сложены пиритом, сфалеритом, галенитом, халькопиритом, пирротинном, арсенипиритом. Из жильных минералов развиты кварц, карбонаты, хлорит.

На месторождении Джими нами изучены закономерности распределения рудных элементов по сплошным разрезам по жиле Центральная (основная жила рудной зоны Бозанг) и её апофизам (шт. № 3 –1680 м абс. и № 47 – 1640 м абс.), рудным телам Цагарсар и Основное (шт. № 49 – 1520 м абс.). На этих горизонтах рудовмещающей средой являются только метаморфические породы буронской свиты. Большинство исследованных жил представлены массивными сульфидными рудными телами, сложенными пиритом, сфалеритом, галенитом, халькопиритом, кварцем и кальцитом. В рудных пробах содержание Fe составляет 6–29 мас.%, Zn 5–42 мас.%, Pb 0.3–22 мас.%, Cu 0.2–2 мас.%.

Породы района охарактеризованы данными по РЗЭ для 15 проб: 3 пробы палеозойских гранитов (PZ₃), 8 проб кристаллических сланцев буронской свиты (PR₃–PZ₁), 2 пробы гранит-

порфиоров (предположительно J₂), 2 пробы вулканитов андезитового состава и пород дайки андезито-дацитового состава (J₁-J₂). По месторождению Джими из 164 рудных проб выполнен анализ на РЗЭ для 34: шт. № 47 – 17 проб (апофизы жил Центральной и Основной – 12 проб из 5 разрезов, жила Центральная – 5 проб из 2 разрезов); шт. № 49 – 7 проб (рудное тело Цагарсар – 5 проб из 3 разрезов, рудное тело Основное – 2 пробы из одного разреза); шт. 3 – 10 проб (жила Центральная – все пробы по 2 разрезам). Эти данные дополнены пробами по околосильным породам.

Для месторождения В. Згид (6 горизонт) исследованы пробы, представляющие полный разрез по жиле Гацировская (5 проб, шаг 3 см, масса до 1.2 кг). В месте пробоотбора рудное тело представлено молочно-белым кварцем с небольшим количеством пирита и рудных сульфидов в центральной части жилы. По околосильным породам выбраны 2 пробы. Неизмененные вмещающие палеозойские граниты отобраны на расстоянии 50 и 100 м от жилы.

Для подготовки проб к анализам использовалась стандартная методика кислотного разложения [3]. Все аналитические определения получены авторами в лабораториях кафедры геохимии МГУ. Анализы на РЗЭ выполнены из растворов после кислотного разложения и разведения методом ИСП-МС на приборе «Element 2». 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 методом атомно-абсорбционной спектроскопии высокого разрешения с непрерывным источником спектра на спектрометре ContAA 700. Правильность определения рудных элементов в стандартном образце состава полиметаллической руды СО-33 составила около 6%.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для горизонтов штолен 47 и 49 месторождения Джими получены данные для 24 рудных проб из 11 разрезов по рудным телам Центральное, Основное, Цагарсар. Суммарное содержание РЗЭ в полиметаллических жилах изменяется от 2 до 52 г/т. В палеозойских гранитах сумма РЗЭ изменяется в различных пробах от 54 до 213 г/т, в докембрийских метаморфи-

ческих породах максимальное суммарное содержание РЗЭ зафиксировано в хлорит-мусковитовом сланце – 198 г/т, а в эпидот-альбит-акинолитовом, эпидот-альбит-хлоритовом и хлорит-альбитовом эпидотсодержащем сланцах от 127 до 56 г/т. 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 шт 47 и 49 вмещающими породами являются только докембрийские кристаллические сланцы, для главных представителей которых характерно отсутствие минимума по европию и низкие отношения La/Yb. Ми-

нимум по европию и высокие отношения La/Yb характерная черта гранитов.

По значению Eu/Eu* и отношению La/Yb рудные пробы можно разделить на три группы: первая - пробы с Eu/Eu* близкими к 1 и низким La/Yb (рис. 1а); вторая – пробы со средними значениями Eu/Eu* и La/Yb (рис. 1б) третья - рудная проба с максимальным проявлением европиевого минимума и высоким La/Yb (рис. 1в). Некоторые спектры руд полностью тождественны спектрам палеозойских гранитов или докембрийских метаморфитов (рис. 1а, 1в), а спектры большей части проб указывают на комбинированный источник вещества.

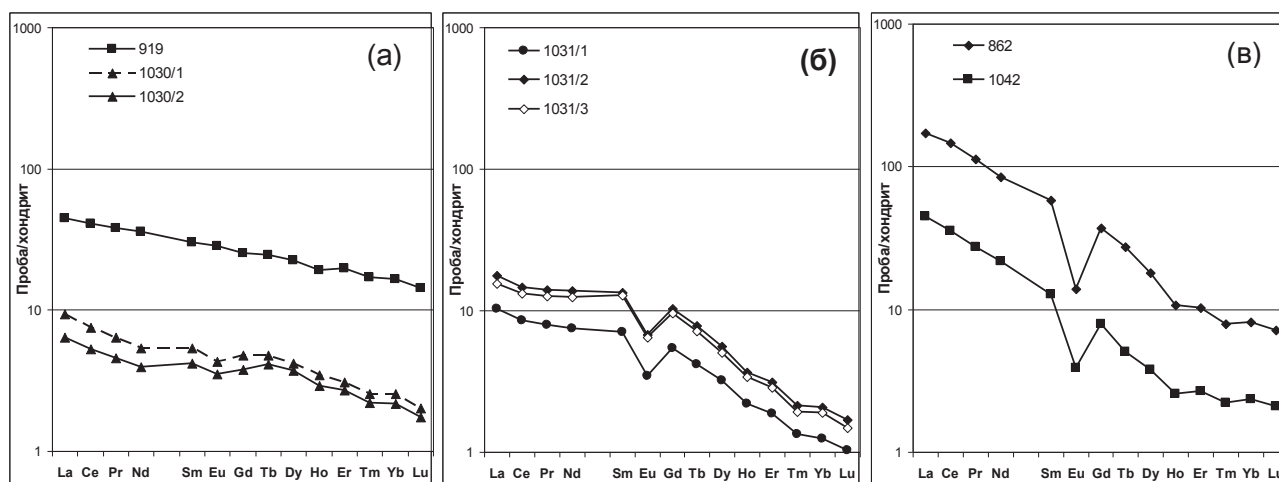


Рис. 1. Примеры нормированных на хондрит спектров РЗЭ в рудных пробах (на уровне горизонтов шт. 49 и 47) и вмещающих породах месторождения Джими (указаны номера проб): (а) – рудные пробы с Eu/Eu* близкими к 1 и низким La/Yb (№1030/1, 1030/2) по сравнению с кварц-хлорит-эпидотовым сланцем (№919, PR₃-PZ₁); (б) – рудные пробы со средними значениями Eu/Eu* и La/Yb (№1031/1-1031/3); (в) – рудная проба с максимальным проявлением европиевого минимума и высоким La/Yb (№1042) по сравнению с гранитом садонского типа (№862, PZ₃).

Внести определенную 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» проведено с шагом 10% и для каждой такой смеси рассчитаны Eu/Eu* и La/Yb, которые нанесены на диаграмму. Видно, что 17 рудных проб в этих координатах хорошо соответствуют общему тренду от кристаллического сланца к палеозойскому граниту или юрскому гранит-порфиру (стрелка А).

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.

Данные по распределению РЗЭ в сульфидных рудах месторождения Джими и вмещающих породах показали, что источник рудных компонентов являлся комбинированным с различными пропорциями участия докембрийских метаморфитов и палеозойских гранитов [4].

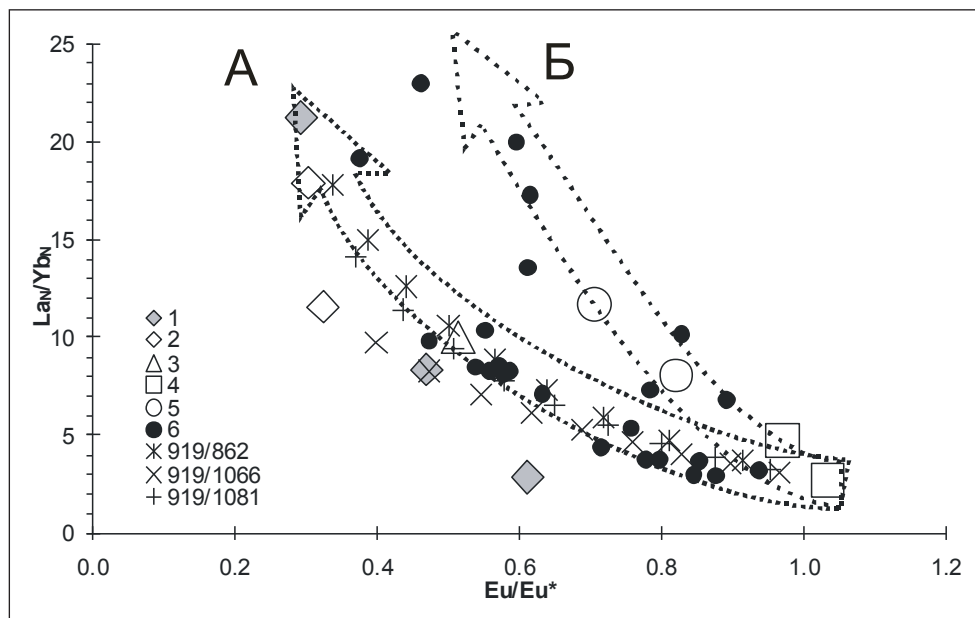


Рис. 2. Характеристики спектров РЗЭ для рудных проб, вмещающих пород и спектров смешения «гранит – кристаллический сланец».

Обозначения: 1 – гранит (PZ₃); 2 – гранит-порфир (J₂); 3 – слюдяной сланец (PR₃–PZ₁); 4 – кристаллический сланец (PR₃–PZ₁); 5 – андезито-дацитовая дайка (J₂) и вулканит андезитового состава (J₁); 6 – рудные пробы. Спектры смешения (значки идут через 10% от одной породы до другой): 919/862 – смешение палео-зойского гранита и кристаллического сланца (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.

Пропорции участия пород субстрата в формировании рудоносных растворов, из которых образовались жилы, можно установить по La/Yb и Eu/Eu* в рудах. Так в рудных пробах La/Yb изменяется от 3-5.4 до 19.2 и Eu/Eu* от 0.7-1 до 0.37, а во вмещающих породах: La/Yb=2.7-4.8 в метаморфитах, до 21.2 в гранитах (Eu/Eu*=1 и 0.29-0.32, соответственно).

Были проведены новые исследования разреза по жиле Центральной рудной зоны Бозанг на горизонте шт. 3 (абс. 1680 м) и получены дополнительные данные по распределению РЗЭ в породах буронской свиты. В рудных пробах сумма РЗЭ изменяется от 5 до 79 г/т. Спектры РЗЭ рудных проб можно разделить на три группы. *Первая группа* (рис. 3 а) – отчетливый европиевый минимум 0.48–0.62 и высокие значения La/Yb=14-18 и Gd/No=3.8. Высокие значения La/Yb и Gd/No характерны для палеозойских гранитов (La/Yb=21, Gd/No=3.5 – для пробы №862). Можно предположить, что формирование данных интервалов жилы происходит при участии гидротермальных растворов, получивших нагрузку РЗЭ при взаимодействии с палеозойскими гранитами. *Вторая группа* (рис. 3б) – «размытый» Eu-минимум (термин введен для обозначения общего минимума по Eu

и Gd). Для спектров этой группы характерны низкие La/Yb=1.7-3.4 и рост доли тяжелых РЗЭ (LREE/HREE=2.7-4.3, а в первой группе до 20). Подобные спектры для руд Джими ранее не отмечались [4]. Сопоставление спектров проб этой группы с метаморфитами показывает их корреляцию по наличию минимума по Gd, а также по низким значениям La/Yb=2-5. Вероятно, что вещественный состав проб этой группы образован из растворов, прошедших через взаимодействие с метаморфитами основного состава и палеозойским гранитом, а для последнего характерен яркий минимум по Eu. Доля пород основного состава, вероятно, была достаточно велика. *Третья группа* (рис. 3в) – спецификой этих проб является максимум по европию – Eu/Eu*=1.1-1.6. Eu-максимум отмечен и в новых пробах пород буронской свиты (Eu/Eu*=1.6). Однако по La/Yb рудные пробы значительно отличны от метаморфитов основного состава (8-13 в рудах и 2-5 в метаморфитах). Вероятно, что источником РЗЭ для этих рудных интервалов могут быть метаморфиты основного (обеспечивают максимум по Eu) и кислого состава (задают основной вид спектра, но не подавляют максимум по Eu; например № 917 на рис. 3а).

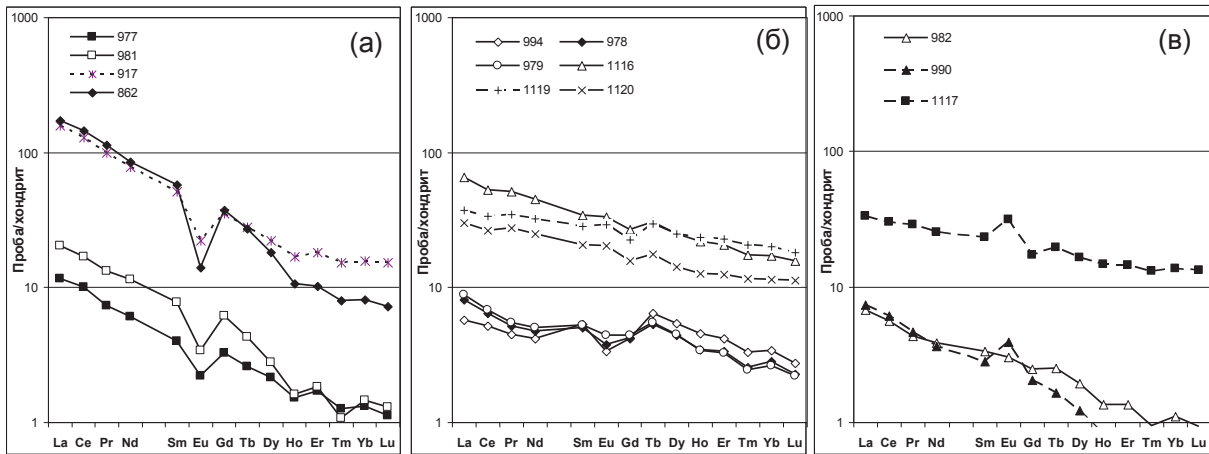


Рис. 3. Примеры нормированных на хондрит спектров РЗЭ в рудных пробах жилы Центральная (на уровне горизонта шт. 3) и вмещающих породах месторождения Джими (указаны номера проб): (а) – рудные пробы с отчетливым минимумом Eu/Eu^* (№977, 981) по сравнению с хлорит-мусковитовым сланцем (№ 917, PR₃–PZ₁) и гранитом садонского типа (№862, PZ₃); (б) – пробы с «размытым» минимумом Eu (№ 978, 979, 994) по сравнению с эпидот-альбит-актинолитовым и эпидот-альбит-хлоритовым сланцами (№ 1116, 1119, 1120, PR₃–PZ₁); (в) – рудные пробы с отчетливым максимумом Eu (№ 982, 990) по сравнению с хлорит-альбитовым эпидотсодержащим сланцем (№ 1117, PR₃–PZ₁).

В околожильных породах сумма РЗЭ изменяется от 151 до 200 г/т (5 проб на удалении от жилы 20-180 см). Спектры РЗЭ этих пород идентичны спектрам метаморфитов кислого состава и отличны от рудных проб. Полученные данные показывают, что источник рудного вещества на Джими эволюционирует и является комбинированным, включая породы субстрата различного состава, а их соотношение можно установить по специфическим характеристикам спектров РЗЭ в рудных жилах. Вероятно, что на ранних этапах развития гидротермальной системы основным источником РЗЭ и рудных компонентов являлись палеозойские граниты, а на последующих – большую роль играют докембрийские метаморфиты. Эти данные послужили основой построения и исследования новых термодинамических моделей жильного рудообразования [5].

Для сопоставления с данными по Джими исследовано распределение элементов по жиле Гацировская (В.Згид), для которой вмещающими породами являются только палеозойские граниты. Для рудных проб и вмещающих пород (2 пробы околожильных пород на расстоянии 1.5 и 2.4 м от рудного тела, 2 пробы гранитов на удалении 50 и 100 м) получены данные о распределении РЗЭ. Средние содержания элементов по жиле Гацировская составляют (в скобках указаны минимальные и максимальные содержания по интервалам опробования): Fe – 2.9 (1.1-3.9 мас.%), Zn – 0.7 (0.1-1.3%), Pb – 2.7 (0.1-8.7%), Cu – 0.3 (0.02-0.6%), Σ РЗЭ – 32 г/т (14-57 г/т). Максимальные содержания Fe, Zn и

Pb относятся к центральной части жилы (6–12 см), причем на интервале 9–12 см резко преобладает Pb (до 8.7%).

Суммарные содержания РЗЭ и характеристики нормированных на хондрит спектров лантаноидов значительно различаются в последовательности центральная часть жилы, приконтактные пробы жилы, околожильные породы, неизменные граниты (рис. 4).

Центральная часть жилы (рис. 4г) – Σ РЗЭ 30-33 г/т, $La/Yb=23-26.6$, $Eu/Eu^*=0.30-0.34$, $La/Nd=2.8-2.9$, $Gd/Ho=2.9-3.6$. Приконтактные пробы жилы (рис. 4в) – Σ РЗЭ 26-57.5 г/т, $La/Yb=7.2-9.5$, $Eu/Eu^*=0.29-0.36$, $La/Nd=2.2-2.3$, $Gd/Ho=1.6-2.1$. Околожильные породы (рис. 4б, первая цифра удаление 1.5 м от жилы, вторая – 2.4 м) – Σ РЗЭ 118–93 г/т, $La/Yb=10.9-8.7$, $Eu/Eu^*=0.36-0.34$, $La/Nd=2.24-2.25$, $Gd/Ho=2.4-2.0$. Неизменные граниты (рис. 4а, первая цифра удаление 50 м, вторая – 100 м) – Σ РЗЭ 99–68 г/т, $La/Yb=13.6-11.8$, $Eu/Eu^*=0.4-0.53$, $La/Nd=2.0-2.1$, $Gd/Ho=3.5-3.1$.

В пробах по рудному телу установлено, что высокие значения La/Yb , La/Nd , Gd/Ho отношений приурочены к центральной части жилы и совпадают с максимумами отложения рудных сульфидов (рис. 5). Эти спектры значительно отличаются от спектров проб жилы в приконтактной области, околожильных и неизменных гранитов (особенно по $La/Yb=23-26$ против 7.2–13.6 и $La/Nd=2.8-2.9$ против 2–2.3).

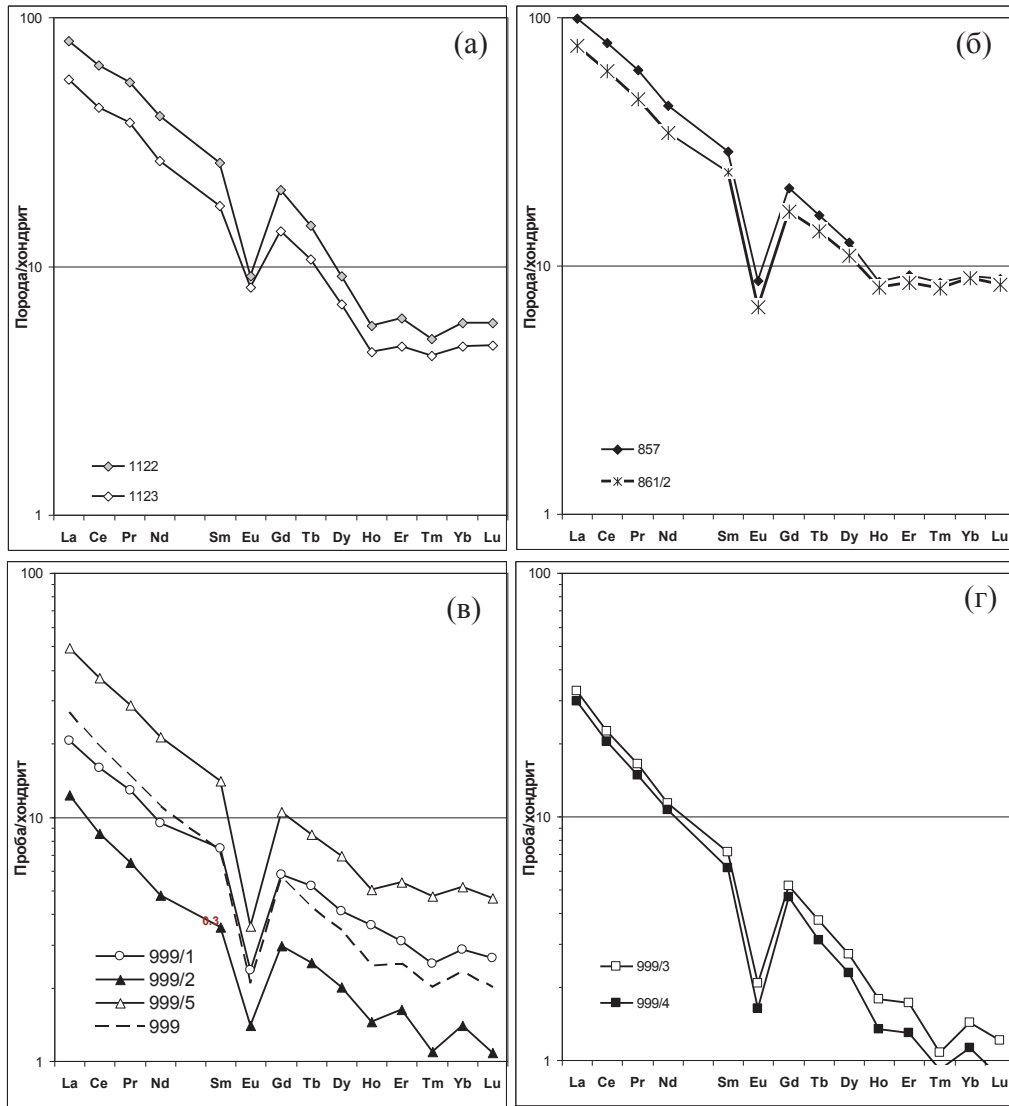


Рис. 4. Нормированные на хондрит содержания РЗЭ во вмещающих породах и в рудных пробах по разрезу через жилу Гацировская: **(а)** – спектры палеозойских гранитов на расстоянии от жилы 50 и 100 м (№1122, 1123); **(б)** – спектры околожильных пород на расстоянии от жилы 150 и 240 см (№857, 861/2); **(в)** – спектры проб приконтактных частей жилы (№999/1, 999/2, 999/5) и сборной пробы (№999); **(г)** – спектры проб цен-тральных частей жилы (№999/3, 999/4).

Спектры околожильных пород на разном удалении от жилы почти идентичны, но имеются и отличия (рис. 4б). В пробе на удалении 1.5 м выше, чем в пробе на 2.4 м, сумма РЗЭ (118 против 93 г/т) и Gd/Ho (2.38 против 2.03). Сопоставление данных проб с пробами неизмененных гранитов позволяет предположить привнос гидротермальными растворами РЗЭ на уровне 30-50 г/т (как в жиле), и эти растворы обогащены тяжелыми лантаноидами (в околожильных породах LREE/HREE=12-14, а в гранитах 15-17). Спектры проб приконтактных частей жилы близки к спектрам околожильных пород (отличия в глубине европиевого минимума: в жиле $Eu/Eu^*=0.29$, в околожильных породах $Eu/Eu^*=0.35$), но сильно отличаются от неизмененных гранитов (в жиле

$La/Yb=7.2-9.5$, $Eu/Eu^*=0.29$, $Gd/Ho=1.6-2.1$, в гранитах $La/Yb=13.6-11.8$, $Eu/Eu^*=0.4-0.53$, $Gd/Ho=3.5-3.1$).

Сопоставление спектров РЗЭ в жиле и вмещающих породах позволяет предложить два варианта привноса лантаноидов и рудных компонентов гидротермальными растворами в процессе формирования рудного тела.

Первый вариант – изменение источника, т.е. на ранних этапах развития системы элементы мобилизуются из гранитов со спектром лантаноидов идентичным тому, который мы видим в приконтактных частях жилы и околожильных породах. Позже подключаются граниты с другим спектром РЗЭ и формируется центральная часть жилы. Имеющийся фактический материал (около 20 проб палеозойских гранитов, ото-

бренных в разных точках Садонского района) не подтверждает возможности такой смены источника, поскольку отсутствуют граниты со спектрами РЗЭ полностью аналогичным спектрам в центральной части жилы (особенно ярко по La/Nd).

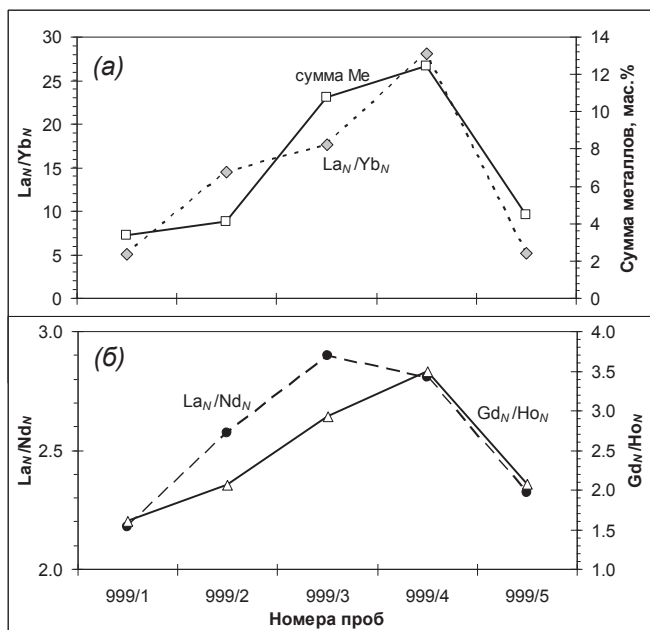


Рис. 5. Сопоставление распределения рудных элементов с характеристиками спектров РЗЭ в пробах по разрезу через жилу Гацировская: (а) – изменение суммарных содержаний металлов (сумма $Me=Fe+Zn+Pb+Cu$) и отношений La/Yb ; (б) – изменение отношений La/Nd и Gd/Ho по разрезу.

Второй вариант – фракционирование РЗЭ в процессе рудообразования. На ранних этапах развития гидротермальной системы из гранитов (со спектром РЗЭ подобным, определенным нами для пород на удалении 50-100 м от жилы) происходит мобилизация лантаноидов с относительно большей долей тяжелых элементов. Образованные таким путем растворы формируют приконтактные части жилы и околожильные породы. Центральная часть жилы образуется на завершающем этапе из растворов, которые поступают из того же источника, но при этом привносится основная часть рудных компонентов и спектр РЗЭ становится иным (отвечает спектру зафиксированному для рудных интервалов жилы).

Второй вариант находит частичное подтверждение по результатам равновесно-динамического моделирования жильного рудообразования [3]. Было показано, что состав рудоносного раствора, формирующегося в высокотемпературных областях мобилизации при реакции углекисло-хлоридных безрудных рас-

творов с гранитом, значительно эволюционирует. Из таких растворов при постепенном понижении температуры образуются полиметаллические жилы, состав и структура которых может изменяться в зависимости от условий. Характерно, что практически при любых условиях наиболее высокие содержания сфалерита и галенита фиксируются в центральных частях модельных жил. При температурах 100-150°C образуются модельные жилы выполнения, сложенные на 90-98% кварцем в приконтактных частях. Жила Гацировская относится, вероятно, к образованиям подобного типа. Таким образом, с нашей точки зрения второй вариант наиболее реалистичен.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные геохимические исследования 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.

Данные о закономерностях распределения РЗЭ по разрезу через жилу Гацировская, околожильным породам и неизменным гранитам показали, что резкий рост La/Yb , La/Nd , Gd/Ho и Gd/Yb отношений приурочен к интервалам жилы, где отлагается максимальное количество рудных компонентов. Сопоставление спектров РЗЭ рудного тела, околожильных и вмещающих пород позволяет предположить, что отложение вещества жилы происходило из растворов, составы которых по РЗЭ изменялись во времени. Фракционирование РЗЭ связано с процессом мобилизации компонентов гидротермальными растворами при их реакции с вмещающими палеозойскими гранитами. На ранних этапах эволюции гидротермальной системы из гранитов происходила мобилизация лантаноидов с относительно большей долей тяжелых элементов.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ, грант №17-05-00244.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

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

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. Оценка источника вещества полиметаллических жил Джимидон-

ского месторождения (Северная Осетия, Россия) на основе распределения редкоземельных элементов в рудах и вмещающих породах // Геохимия – № 4. – 2016. – С. 371-388.

4. 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: Дальнаука, 2015. – С. 10-16.

RARE-EARTH ELEMENTS IN HYDROTHERMAL VEINS AS AN INDICATOR OF WATER-ROCK INTERACTION IN THE FORMATION OF ORE-BEARING SOLUTIONS

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

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

E-mail: borisov@geol.msu.ru

ABSTRACT: For hydrothermal vein polymetallic deposits in North Ossetia, the sources of the vein material were evaluated according to the character of the distribution of rare-earth elements (REE) in ores and host rocks. For the Dzhimi deposit, formed in the Middle Jurassic time, it was established that two types of ore-bearing rocks of the Sadon region were the source of REE and, probably, Pb-Zn ores: Precambrian metamorphites (typical ore-hosting for Dzhimi only) and Paleozoic granites (the main ones at most deposits in the region). The ratio of substrate rocks in such combined sources can be determined from REE spectra in ores. For the Upper Zgid deposit, where granites are the main type of ore-hosting rocks, the effect of REE fractionation is established due to the mobilization of components by hydrothermal solutions during their reaction with Paleozoic granites.