

УДК 550.41

М.В. Борисов¹, М.М. Волкова², Д.А. Бычков³, Я.В. Бычкова⁴**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РУДНЫХ ТЕЛАХ ДЖИМИДОНСКОГО ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ (СЕВЕРНАЯ ОСЕТИЯ, РОССИЯ)⁵**

Выполнена оценка источников вещественного состава жил гидротермальных месторождений по характеру распределения РЗЭ в рудах и вмещающих породах. Установлено, что в формировании состава полиметаллических руд играют роль оба типа преобладающих пород Садонского района, т.е. палеозойские граниты (главные рудовмещающие породы на большинстве месторождений) и докембрийские кристаллические сланцы (типичные рудовмещающие породы только для Джимидонского месторождения).

Ключевые слова: редкоземельные элементы, источники рудного вещества, полиметаллические жильные месторождения.

The material composition source of hydrothermal deposits veins was estimated according to the character of REE distribution in ores and host rocks. It was established that both types of predominant rocks of the Sadon district that is Paleozoic granites (the main ore-hosting rocks at the majority of deposits) and Precambrian schists (the typical ore-hosting rocks only for Dzhimi deposit) play a role in the formation of base-metal ore composition.

Key words: Rare-earth elements, ore matter source, base-metal vein deposit.

Введение. Установление источников компонентов флюидов — фундаментальная проблема теории гидротермального рудообразования. Одним из источников вещества, который может полностью обеспечить формирование рудных тел многих типов гидротермальных месторождений, являются вмещающие породы. Редкоземельные элементы (РЗЭ) относятся к числу важнейших геохимических индикаторов процессов породо- и рудообразования [Жариков, Горбачев, 2004]. Цель работы — оценка источников вещественного состава жил гидротермальных месторождений по характеру распределения РЗЭ в рудах и вмещающих породах.

В наших исследованиях компьютерных термодинамических моделей гидротермального рудообразования жильные свинцово-цинковые месторождения Садонского рудного района (Северная Осетия, Россия) выбраны в качестве эталонных объектов. Вероятный источник рудных компонентов этих месторождений — палеозойские граниты садонского типа [Тугаринов и др., 1975; Борисов, 2000; Борисов и др., 2006], которые вмещают основную часть рудных тел района, сформированных в предкелловейское время средней юры. Для этих месторождений предложена геологическая модель гидротермальной системы [Борисов, 2000; Борисов и др., 2006].

Основные ее элементы сводятся к следующему. В пределах Садоно-Унальского глубинного сброса, ограничивающего с юга область распространения месторождений, в дорудное время происходила циркуляция минерализованных углекисло-хлоридных вод (возможно, генетически связанных с юрским солеродным бассейном). Внедрение в средней юре даек и штоков субвулканических и гипабиссальных пород (диориты, гранит-порфиры и трахиандезиты) и интенсивные тектонические подвижки инициируют гидротермальный процесс: интрузии создают необходимый источник тепла, закладываются рудоконтролирующие трещины скола и отрыва северо-западного и северо-восточного простирания, образуется зона разуплотнения пород. Нагретые растворы из Садоно-Унальского сброса фильтруются через зону разуплотнения в палеозойских гранитах и вступают в реакцию с ними. Формируется область мобилизации различных компонентов, в том числе металлов и сульфидной серы. Эта область приурочена к зоне сочленения глубинного разлома и оперяющих трещин. Рудоносные растворы из области мобилизации движутся вверх по рудоконтролирующим трещинам. Постепенное охлаждение рудоносных растворов за счет обмена теплом с более холодными вмещающими породами и потери тепла при локальной гетерогени-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, зав. кафедрой, профессор, докт. геол.-минер. н., e-mail: borisov@geol.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, аспирант, e-mail: masha_wolk@inbox.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, науч. с., e-mail: krok@geol.msu.ru

⁴ Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского (ГЕОХИ РАН), ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.

⁵ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 08-05-00306, № 11-05-00033).

зации приводят к формированию полиметаллических жил выполнения и околожилных ореолов.

В последние годы мы проводим исследования на Джимидонском месторождении. В отличие от большинства месторождений района (Згидское, Садонское, Архонское, Холстинское), где вмещающие породы представлены гранитами садонского типа (PZ₂—PZ₃) и вулканогенными породами осетинской свиты (J₁), на Джимидонском месторождении рудовмещающая среда представлена кристаллическими сланцами и амфиболитами буронской свиты (PR₃—PZ₁). Предполагается, что палеозойские граниты подстилают эти породы, контактируя с ними по серии пологих тектонических нарушений, но их выходы в пределах вскрытых рудных тел отсутствуют. Нами изучены закономерности распределения элементов по сплошным разрезам по жиле Центральная (основная жила рудной зоны Бозанг) и ее апофизам (штольни 3 и 47), рудному телу Цагарсар (штольня 49). К настоящему времени накоплены данные по 17 поперечным сечениям через рудные тела на разных горизонтах (всего 135 проб). Часть сечений представлена серией последовательных проб (масса каждой до 5 кг), описывающих полный разрез жилы от контакта до контакта. Число таких последовательных проб в разрезе по рудным телам изменяется от 4 до 29 (шаг 2—5 см).

Методы исследований. Анализ РЗЭ в сульфидных рудах и алюмосиликатных породах методом масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно-связанной плазме (ICP-MS) проводили после их полного раство-

рения в кислотах. Навеску пробы 100 мг помещают в тефлоновый виал, к навеске добавляется 3 мл смеси 5:1 HF+HNO₃ (3%) и 0,5 мл концентрированной HCl. Полипропиленовые контейнеры с виалами помещают в микроволновую печь. Разложение проб происходит при мощности нагрева 50 Вт (время 1000 с). После охлаждения содержимое виалов выпаривается под инфракрасной лампой. К осадку добавляют 1,5 мл концентрированной HCl, затем раствор выпаривается до сухих солей (добавление HCl повторяется 3 раза). Перед переносом во флаконы добавлено 1,5 мл HCl. Виалы многократно споласкиваются 3% HNO₃. Масса итогового раствора при этом доводится до 50 г, раствор перемешивается и выдерживается в течение 3 сут. до полного растворения осадка. При разложении сульфидных проб после первичного высушивания к осадку добавляется 0,5 мл HClO₄, затем смесь выпаривают до влажных солей. Анализы полученных после разведения в 100 раз растворов выполнены авторами на кафедре геохимии МГУ на приборе «Element 2» и в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ГЕОХИ РАН на приборе «Element XR» («Thermo Finnigan MAT GmbH», Германия). Для проверки достоверности результатов одновременно с пробами по 3 раза измеряли образцы стандартов СГ-3 и BCR-2 (отклонение от паспортных значений для большинства РЗЭ не превышало 4%).

Результаты исследований и их обсуждение. Выполнен анализ 10 валовых проб по сульфидным жилам и 4 проб главных типов пород района (граниты, метаморфиты и вулканогенные породы). Для месторождений

Редкоземельные элементы в полиметаллических жилах и вмещающих породах, г/т

РЗЭ	Породы района				Апофизы жилы Центральной (рудная зона Бозанг, штольня 47, штрек Северный)									
					1030**				1031				1041	1042
	862*	917	918	919	1	2	3	4	1	2	3	4		
La	42	39	24	11	2,3	1,6	1,5	3,9	2,5	4,3	3,8	1,9	1	11
Ce	93	83	50	26	4,8	3,3	3,2	7,9	5,4	9,3	8,4	4,1	2	22,5
Pr	11	9,6	5,5	3,7	0,6	0,4	0,4	1,0	0,8	1,3	1,2	0,6	0,3	2,6
Nd	40	37	21	17	2,6	1,9	1,8	4,3	3,6	6,5	5,9	2,6	1,1	10,3
Sm	8,9	7,9	4,1	4,6	0,8	0,6	0,6	1,3	1,1	2,1	2,0	0,8	0,3	2
Eu	0,8	1,3	1,1	1,7	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,4	0,1	0,1	0,2
Gd	7,6	7,2	4,2	5,1	1,0	0,8	0,8	1,4	1,1	2,1	2,0	0,8	0,3	1,6
Tb	1,0	1,0	0,6	0,9	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,05	0,2
Dy	4,6	5,6	3,9	5,7	1,1	0,9	0,9	1,4	0,8	1,4	1,3	0,5	0,2	1,0
Ho	0,6	1,0	0,7	1,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,04	0,15
Er	1,7	3,0	2,2	3,3	0,5	0,4	0,4	0,6	0,3	0,5	0,5	0,2	0,1	0,4
Tm	0,2	0,4	0,3	0,4	0,06	0,06	0,05	0,08	0,03	0,05	0,05	0,02	0,01	0,06
Yb	1,3	2,6	2,0	2,7	0,4	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,3	0,1	0,08	0,4
Lu	0,2	0,4	0,3	0,4	0,05	0,04	0,04	0,06	0,03	0,04	0,04	0,02	0,01	0,05
ΣРЗЭ	213	198	120	83	15	11	10	23	16	29	26	12	6	52
Ce/Yb	69	32	25	10	11	9	9	16	26	27	27	33	26	58

* Номера проб пород: № 862 — гранит садонского типа (PZ₂—PZ₃), № 917 — слюдяной сланец (буронская свита, PR₃—PZ₁); № 918 — туфопесчаник (осетинская свита, J₁); № 919 — кристаллический сланец (буронская свита, PR₃—PZ₁); ** валовые пробы по жилам — апофиза Восточная: № 1030 (4 пробы, шаг 4 см); апофиза Западная-2 (три подсечения): № 1031 (4 пробы, шаг 3 см), № 1041, № 1042.

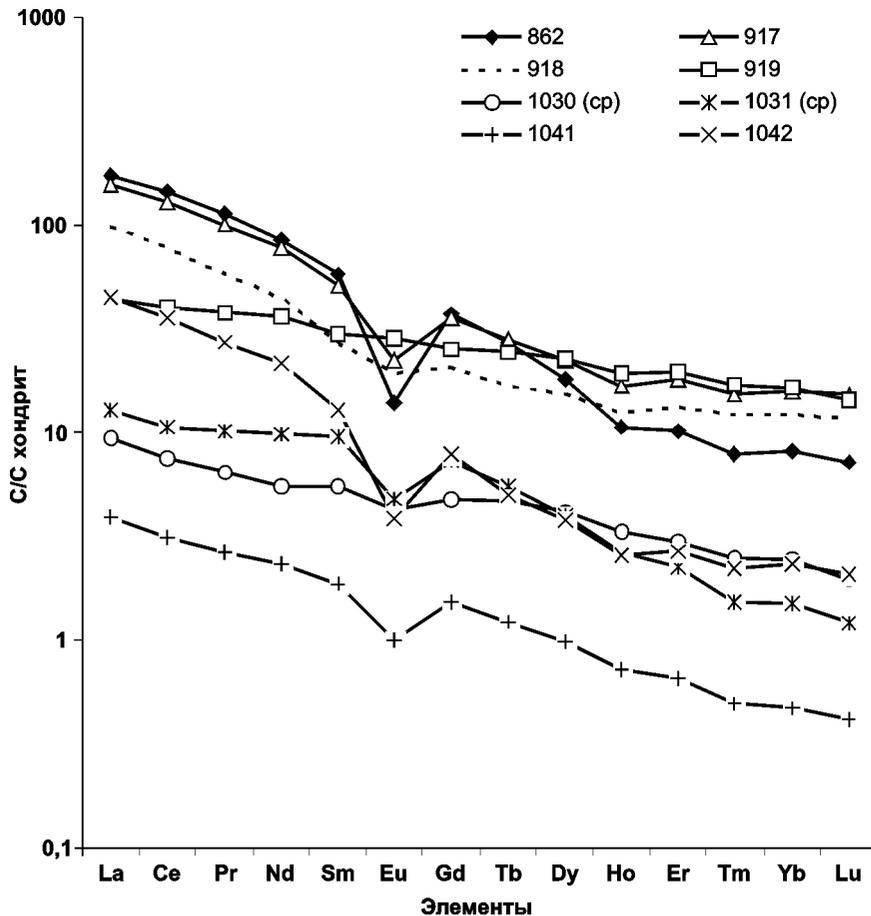


Рис. 1. Нормированный на хондрит [Palme, Jones, 2003] состав РЗЭ в рудах Джимидонского месторождения и вмещающих породах (номера проб см. в комментариях к таблице и в тексте)

садонской группы такие определения сделаны впервые. Все рудные пробы отобраны в штреке Северный по апофизам жилы Центральная (рудная зона Бозанг, штольня № 47): один разрез по апофизе Восточная (№ 1030, 4 пробы), три сечения по апофизе Западная-2 (№ 1031, 4 пробы; № 1041, № 1042). Точки пробоотбора находились на небольшом расстоянии (250 м между крайними пробами № 1030 и № 1042). По данным рудной микроскопии, эти жилы сложены пиритом (25–90%), сфалеритом (10–75%), галенитом (до 50%), халькопиритом (до 5%), кварцем и карбонатами (3–20%). Содержание Fe составляет 11–26 мас.% (до 29% в отдельных пробах по разрезам жил), Zn 6–13% (до 19% по разрезам), Pb 1–9%, Cu 0,2–0,4% (данные рентгенофлуоресцентного анализа, кафедра геохимии МГУ).

В таблице представлены данные о содержании РЗЭ в жилах и вмещающих породах. Суммарное содержание РЗЭ в полиметаллических жилах в 5–20 раз меньше, чем во вмещающих породах. Так, в граните сумма РЗЭ составляет 213 г/т, в породах буронской свиты (сланцевые и кристаллические сланцы) — 198 и 83, а в жилах — от 6 до 26 г/т в 9 пробах из 10 (только в пробе № 1042 содержание РЗЭ выше — 52 г/т). Полученные значения вполне сопоставимы с данными о рудных телах эпитермальных золото-серебряных месторождений [Кравцова, Алмаз, 2006]. Вероятные основные минералы-носители РЗЭ в сульфидных рудах — карбонаты, которые в небольшом количестве присутствуют в исследованных пробах. О высоком содержании РЗЭ в карбонатах можно судить по данным В.Ю. Прокофьева с соавторами [Прокофьев и др., 2010], где исследованы мономинеральные фракции различных карбонатов золоторудного месторождения Дарасун. Установлено, что карбонаты доломит-

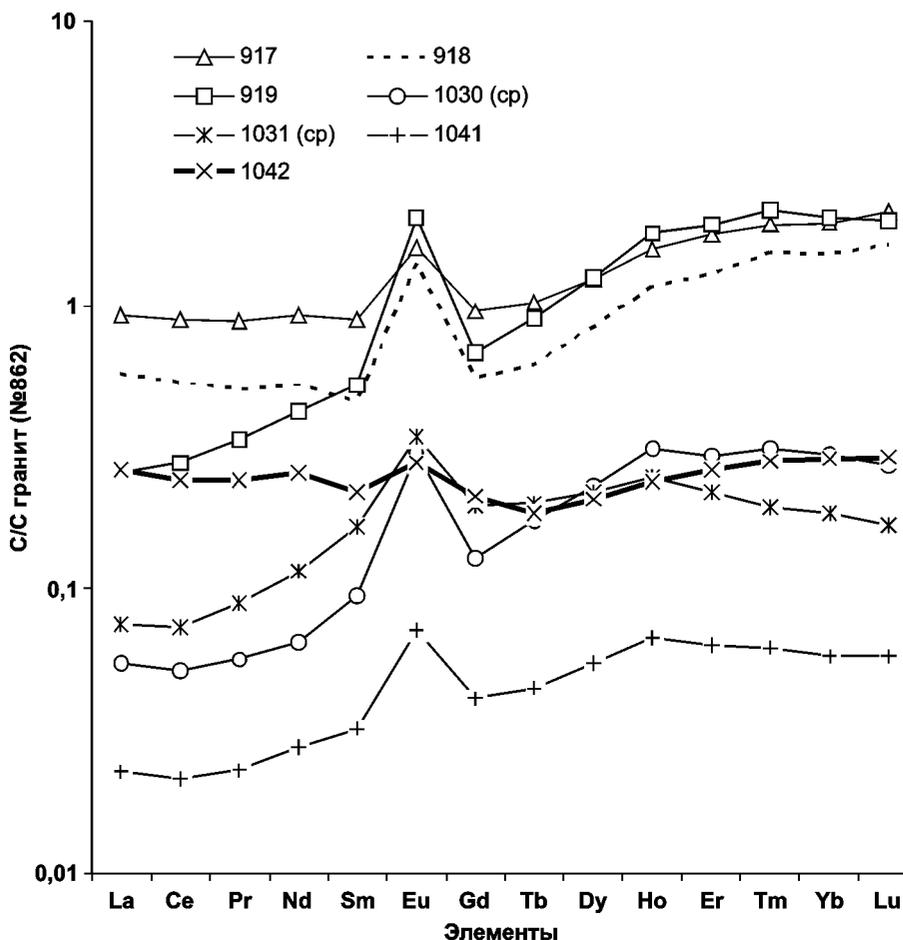


Рис. 2. Нормированный на гранит (проба № 862) состав РЗЭ в рудах Джимидонского месторождения и вмещающих породах

анкеритового ряда содержат ΣРЗЭ от 3 до 73 г/т, кальциты — от 17 до 390 г/т. В то же время в мономинеральных фракциях сульфидов современных гидротермальных полей Атлантического океана (сфалерит, халькопирит и др.) суммарное содержание РЗЭ на 1–2 порядка ниже, чем в изученных нами пробах [Римская-Корсакова, 2005].

При нормировании на хондрит можно отметить, что спектры пород и вещества жил (апофиз) одной рудной зоны различаются по соотношению легких и тяжелых элементов (Ce/Yb), наличию европиевого минимума, сумме РЗЭ (таблица, рис. 1). По наличию минимума Eu можно разделить все спектры РЗЭ на две группы.

Минимум Eu отчетливо проявлен в спектрах гранита, слюдяного сланца и в 6 пробах апофизы Западная-2. Наибольшее сходство с гранитом имеет проба № 1042 (рис. 1). При нормировании на гранит спектр пробы № 1042 выполаживается (рис. 2). Для этих же спектров установлены и близкие значения отношения Ce/Yb: для гранита — 69 и в пробе № 1042 — 58 (в остальных рудных пробах и слюдяном сланце это отношение в 2 раза меньше). Коэффициент корреляции нормированных на хондрит средних значений РЗЭ пробы № 1042 по отношению к спектру гранита приближается к 1 ($R^2 = 0,99$, рис. 3). Идентичность спектров РЗЭ в граните и в пробе № 1042 позволяет говорить о тесной генетической связи палеозойских гранитов и сульфидных руд. Этот вывод полностью

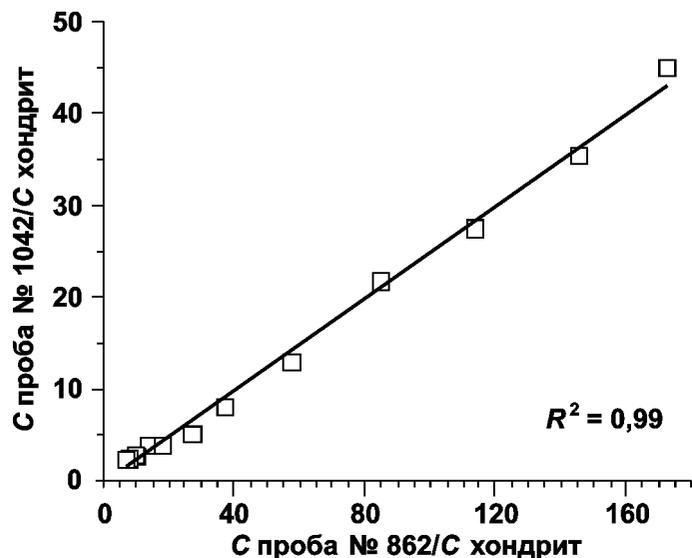


Рис. 3. Корреляция нормированных на хондрит значений РЗЭ в рудной пробе № 1042 и граните (проба № 862)

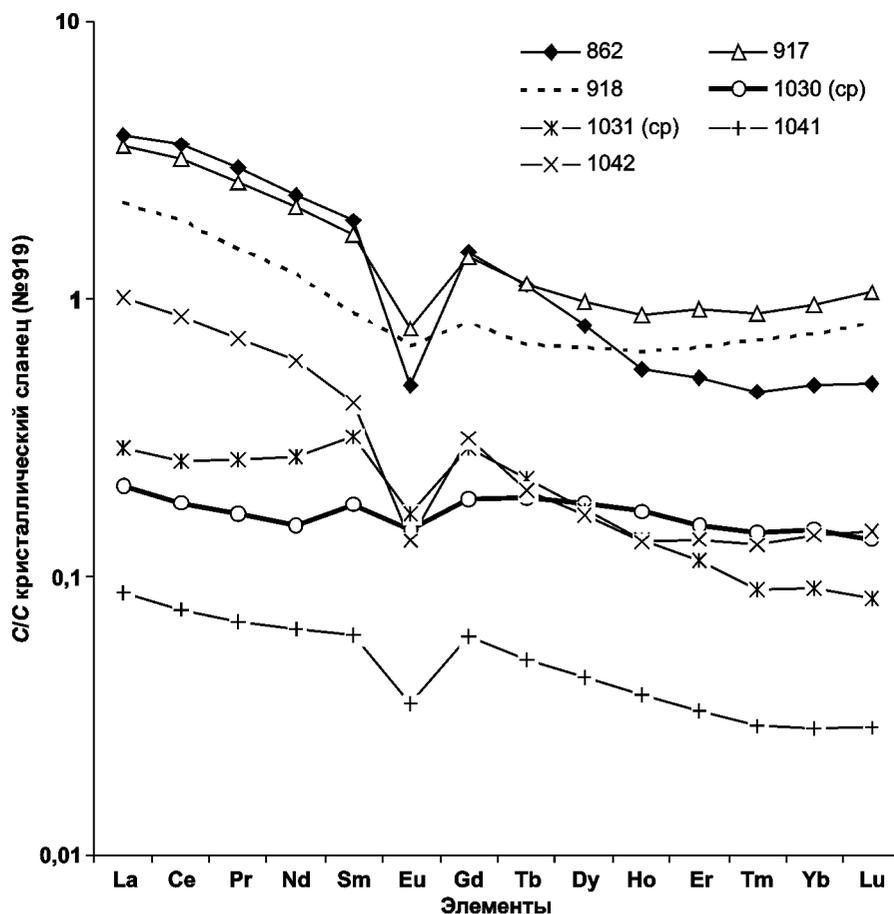


Рис. 4. Нормированный на кристаллический сланец (проба № 919) состав РЗЭ в рудах Джамидонского месторождения и вмещающих породах

согласуется с данными изотопии свинца [Тугаринов и др., 1975]. В этой работе Pb—U—Th-методом измерен возраст акцессорных цирконов из садонских гранитов, кристаллических сланцев буронской свиты, а также определен изотопный состав Pb в галените из 11 месторождений Северной Осетии и Pb из калиевых полевых шпатов магматических и метаморфических пород района. Установлено, что изотопный состав Pb в галените из жильных руд и Pb в полевом шпате тождествен и отвечает возрасту 390 ± 10 млн лет, т.е. возрасту гранитов садонского типа. Поэтому сделан вывод о том, что непосредственным источником свинца месторождений послужили палеозойские граниты, а процесс извлечения свинца связан с метасоматической переработкой полевошпатовой части гранитов около 150–160 млн лет назад [Тугаринов и др., 1975].

Европиевый минимум не проявлен в спектрах кристаллического сланца, породах осетинской свиты и в пробах из апофизы Восточная. Спектры РЗЭ проб из апофизы Восточная (№ 1030) более всего схожи со спектром кристаллического сланца. Это сходство подтверждается по соотношению легких и тяжелых РЗЭ: Ce/Yb = 10 в сланце и Ce/Yb = 9–16 в четырех пробах из № 1030 (12 — среднее значение), а также по результатам нормирования на кристаллический сланец. На рис. 4 представлен результат такого нормирования,

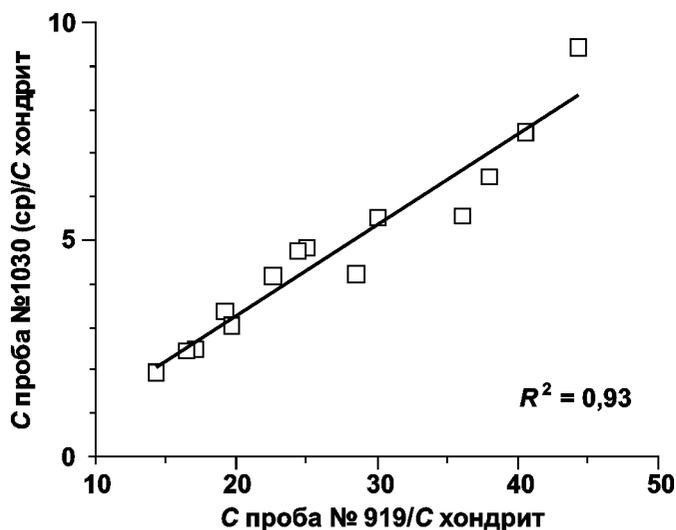


Рис. 5. Корреляция нормированных на хондрит значений РЗЭ в рудной пробе № 1030 (ср) и кристаллическом сланце (проба № 919)

отчетливо видно, что осредненный спектр проб из апофизы Восточная практически выполаживается. Коэффициент корреляции нормированных по хондриту средних значений РЗЭ из апофизы Восточная по отношению к спектру кристаллического сланца несколько меньше 1 ($R^2 = 0,93$, рис. 5), а разброс значений заметно больше, чем показанный на рис. 3. Таким образом, можно предположить, что основным источником вещества при формировании апофизы Восточная были породы буронской свиты.

Спектры остальных рудных проб (№ 1031 и № 1041) при нормировании на гранит и кристаллический сланец не выполаживаются полностью

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. 2006. № 11. С. 1218–1239.

Жариков В.А., Горбачев Н.С. Поведение редкоземельных элементов в флюидно-магматических системах (по экспериментальным данным) // Экспериментальная минералогия: некоторые итоги на рубеже веков. Т. 1. М.: Наука, 2004. С. 21–37.

Кравцова Р.Г., Алмаз Я.А. Редкоземельные элементы в рудах эпitherмальных золото-серебряных месторождений (Северо-Восток России) // Геохимия. 2006. № 12. С. 1338–1344.

Прокофьев В.Ю., Бортников Н.С., Коваленкер В.А. и др. Золоторудное месторождение Дарасун (Восточное Забай-

(ср. рис. 2 и 4). В них отличаются и значения отношения Ce/Yb , которые составляют 26–33, т.е. по сравнению с гранитом разница между легкими и тяжелыми РЗЭ уменьшается. Это проявляется в выполаживании легкой части спектров (от La до Sm) в этих пробах при нормировании на кристаллический сланец (рис. 4). В то же время отмечено выполаживание части спектров от Gd до Lu при нормировании на гранит (рис. 2). Возможно, что это указывает на комбинированное влияние пород буронской свиты и гранитов садонского типа. Корреляция спектров сульфидных руд с таковыми вулканогенных пород осетинской свиты отсутствует, хотя эти породы также являются рудовмещающими в верхних частях разрезов ряда месторождений района (например, Архонское месторождение).

Выводы. 1. В формировании вещественного состава руд играют роль оба типа преобладающих пород в Садонском районе, т.е. граниты (главные рудовмещающие породы на большинстве месторождений района) и кристаллические сланцы (типичные рудовмещающие породы только для Джимидонского месторождения).

2. Для двух поперечных сечений рудных тел выявлены спектры редких земель, коррелирующие с таковыми только гранитов или только кристаллических сланцев. Для двух других сечений вероятен смешанный источник вещества (граниты и кристаллические сланцы).

3. Пути поступления растворов, формирующих рудные жилы, вероятно, были различными: только через граниты, только через сланцы, через оба типа пород.

калье): химический состав, распределение редких земель, изучение стабильных изотопов углерода и кислорода в карбонатах рудных жил // Геология рудных месторождений. 2010. № 2. С. 91–125.

Римская-Корсакова М.Н. Геохимия редкоземельных элементов в гидротермальных сульфидных минералах: Автореф. канд. дисс. М.: ГЕОХИ РАН, 2005. 25 с.

Тугаринов А.И., Бибилова Е.В., Грачева Т.В. и др. Применение свинцово-изотопного метода исследования для решения вопросов о генезисе свинцовых месторождений Северо-Кавказской рудной провинции // Геохимия. 1975. № 8. С. 1156–1163.

Palme H., Jones A. Solar system abundances of the elements // Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2003. Vol. 1. P. 41–61.

Поступила в редакцию
29.06.2010