

УДК 550.42+553.493.6

РЕГУЛЯРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭНДОГЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СОДЕРЖАНИЯ ЕВРОПИЯ В РУДАХ

© 2004 г. Э. А. Петров

Представлено академиком О.А. Богатиковым 30.12.2003 г.

Поступило 05.01.2004 г.

Известно большое значение информации о содержании редкоземельных элементов (РЗЭ) как геохимических индикаторов [1], а также информации о европиевых аномалиях как геохимических критериях рудообразующих систем [2]. Вместе с тем сущностная, неформальная природа этих аномалий очень сложная, а попытки понять эту природу позволяют лишь качественно выделить обособленные поля распределения РЗЭ как функцию их европиевых аномалий [2].

В настоящей работе предпринята попытка, во-первых, представить содержание европия как сумму двух составляющих: эндогенной (космической) части и экзогенной (химической) части, а во-вторых, дать регулярный метод расчета эндогенной составляющей. Указанные попытки основаны на двух положениях. Первое – сосредоточения РЗЭ в рудах и породах являются лишь результатом концентрирования элементов, содержащихся в исходном, праматеринском материале – в космической пыли Солнечной системы. Второе – известная качественная формулировка правила Гаркинса может быть представлена в алгебраической формулировке.

В соответствии с первым положением принято равенство содержаний элементов в космической пыли содержаниям их в хондритах [3]. Второе положение использовано переходом от координат атомный номер лантанида (p)–содержание $A(\text{Ln})$ в г/т (или в нормированном виде) к предлагаемым нами координатам $m^{1/3} - \ln A$, где m – массовое число лантанида, а размерность A – г-ат/т. Такой выбор координат обусловлен тем, что применительно к хондритам для РЗЭ постоянной валентности и с нечетным значением p искомая функция является линейной.

Поскольку искомая функция для p -четных РЗЭ постоянной валентности имеет тот же вид,

то для лантанидов ${}^m_p\text{Ln}$ дадим общий вид предлагаемой функции:

$$\ln A = a_0 + a_1 m^{1/3}, \quad (1)$$

где

$$a_0 = \begin{cases} a_{00} & \text{для } p = 2k, \quad k = 30, 32, 33, 34; \\ a_{01} & \text{для } p = 2k - 1, \quad k = 29, 34, 35, 36. \end{cases}$$

$$a_1 = \begin{cases} a_{10} & \text{для } p = 2k, \quad k = 30, 32, 33, 34; \\ a_{11} & \text{для } p = 2k - 1, \quad k = 29, 34, 35, 36. \end{cases}$$

$$\sigma^2(\ln A) = \begin{cases} \sigma_0^2 & \text{для } p = 2k, \quad k = 30, 32, 33, 34; \\ \sigma_1^2 & \text{для } p = 2k - 1, \quad k = 29, 34, 35, 36. \end{cases}$$

Обработка по методу наименьших квадратов экспериментальных данных по содержаниям упомянутых РЗЭ в хондритах [3] дала в соответствии с (1) следующие результаты:

$$a_{00} = 11.8687,$$

$$a_{01} = -4.2945,$$

$$a_{10} = 18.9717,$$

$$a_{11} = -5.8649,$$

$$\sigma_0^2(\ln A) = 0.0137,$$

$$\sigma_1^2 = 0.0847.$$

Аналогичная обработка экспериментальных данных [4–10] по содержаниям РЗЭ постоянной валентности в рудах и породах подтвердила общность формулы (1) (см. табл. 1). Из малости приведенных в табл. 1 среднеквадратичных отклонений следует, что формула (1) имеет широкие рамки общности, и, следовательно, поставленная частная задача перехода от качественной формулировки правила Гаркинса к ее алгебраической формулировке решена не только для хондритов, но и для руд применительно к РЗЭ постоянной валентности. Указанная точность предлагаемого описания (1) также указывает на допустимость

Таблица 1. Коэффициенты уравнения (1), расчетные и экспериментальные значения логарифма распространенности (A), среднеквадратичная ошибка $\sigma^2(\ln A)$ и относительная ошибка $\Delta = \sigma/|\ln A|_{\max}$

Район, порода, коэффициенты уравнения (1)	Ln	$\frac{\ln A_{\text{exp}}}{\ln A_{\text{calc}}}$	σ^2	Δ	Район, порода, коэффициенты уравнения (1)	Ln	$\frac{\ln A_{\text{exp}}}{\ln A_{\text{calc}}}$	σ^2	Δ
Железистые кварциты КМА [4]; обр. X-1//1; $a_0 = 56.4077$; $a_1 = -11.6611$	La	$\frac{-3.8352}{-3.985}$	0.275	0.06	Граниты Их-Хайрханского вольфраморудного района [6]; обр. Их-145; $a_0 = 57.8877$; $a_1 = -11.9029$	La	$\frac{-3.6983}{-3.577}$	0.071	0.03
	Ho	$\frac{-7.7648}{7.542}$				Ho	$\frac{-7.4081}{-7.388}$		
	Tm	$\frac{-8.6361}{-8.051}$				Tm	$\frac{-8.2531}{-7.911}$		
	Lu	$\frac{-8.1603}{8.810}$				Lu	$\frac{-8.3881}{-8.681}$		
Железистые кварциты КМА [4]; обр. X-1//1; $a_0 = 45.2837$; $a_1 = -9.3837$	Nd	$\frac{-3.9067}{-3.928}$	0.003	0.01	Граниты Их-Хайрханского вольфраморудного района [6]; обр. Их-145; $a_0 = 31.8409$; $a_1 = -6.9492$	Nd	$\frac{-4.5333}{-4.603}$	0.027	0.02
	Gd	$\frac{-5.3863}{-5.364}$				Gd	$\frac{-5.9018}{-5.667}$		
	Dy	$\frac{-5.9863}{-5.923}$				Dy	$\frac{-5.9346}{-6.081}$		
	Er	$\frac{-6.3571}{-6.417}$				Er	$\frac{-6.4289}{-6.442}$		
Зазинские лейкограниты [5]; $a_0 = 70.7380$, $a_1 = -13.8329$	La	$\frac{-0.7893}{-0.9020}$	0.142	0.06	Океанские фосфаты [7]; обр. 2046/1; $a_0 = 50.9301$, $a_1 = -10.4381$	La	$\frac{-3.0874}{-3.129}$	0.056	0.03
	Ho	$\frac{-5.5513}{-5.122}$				Ho	$\frac{-6.2767}{-3.311}$		
	Lu	$\frac{-6.3142}{-6.631}$				Tm	$\frac{-7.0956}{-6.442}$		
Зазинские лейкограниты [5]; $a_0 = 55.9071$, $a_1 = -10.9151$	Nd	$\frac{-1.4031}{-1.336}$	0.023	0.04	Океанские фосфаты [7]; обр. 2046/1; $a_0 = 42.3015$, $a_1 = -8.6539$	Lu	$\frac{-7.2048}{-7.451}$	0.015	0.02
	Gd	$\frac{-2.7885}{-3.008}$				Nd	$\frac{-3.0255}{-3.081}$		
	Dy	$\frac{-3.7491}{-3.657}$				Gd	$\frac{-4.5875}{-4.408}$		
	Er	$\frac{-4.2533}{-4.232}$				Dy	$\frac{-4.8283}{-4.923}$		
Порфиновые гранодиориты баргузинского комплекса [5]; $a_0 = 58.0931$, $a_1 = -11.4709$	La	$\frac{-1.1892}{-1.315}$	0.178	0.07	Джидинские граниты; обр. П-2 (табл. 3) [8]; $a_0 = 90.4792$, $a_1 = -17.4639$	Er	$\frac{-5.3505}{-5.374}$	0.115	0.05
	Ho	$\frac{-5.2891}{-4.813}$				La	$\frac{0.1255}{-0.033}$		
Порфиновые гранодиориты баргузинского комплекса [5]; $a_0 = 59.4595$, $a_1 = -11.5693$	Lu	$\frac{-5.7141}{-6.095}$	0.031	0.05		Ho	$\frac{-5.3932}{-5.293}$		
	Nd	$\frac{-1.2695}{-1.214}$				Tm	$\frac{-6.4765}{-6.061}$		
	Gd	$\frac{-2.7885}{-2.986}$				Lu	$\frac{-6.7741}{-7.198}$		
	Dy	$\frac{-3.8159}{-3.674}$							

Таблица 1. Окончание

Район, порода, коэффициенты уравнения (1)	Ln	$\frac{\ln A_{\text{exp}}}{\ln A_{\text{calc}}}$	σ^2	Δ	Район, порода, коэффициенты уравнения (1)	Ln	$\frac{\ln A_{\text{exp}}}{\ln A_{\text{calc}}}$	σ^2	Δ		
Джидинские граниты; обр. П-2 (табл. 3) [8]; $a_0 = 61.9275$, $a_1 = -12.0599$	Nd	$\frac{-1.2173}{-1.321}$	0.039	0.05	Субщелочная серия подводной горы Афанасия Никитина [9]; обр. М1-36/1; $a_0 = 66.5089$, $a_1 = -13.0189$	La	$\frac{-0.8376}{-0.916}$	0.139	0.06		
	Gd	$\frac{-3.4686}{-3.166}$				Ho	$\frac{-4.9067}{-4.887}$				
	Dy	$\frac{-3.7558}{-3.884}$				Tm	$\frac{-5.9286}{-5.461}$				
	Er	$\frac{-4.4473}{-4.519}$				Lu	$\frac{-5.8986}{-6.307}$				
Кимберлиты Алакинского поля, трубка Айхал [10]; $a_0 = 82.0165$, $a_1 = -16.9361$	La	$\frac{-5.6771}{-5.696}$	0.101	0.01		Nd	$\frac{-1.0858}{-1.193}$			0.043	0.05
	Ho	$\frac{-10.6606}{-10.860}$				Gd	$\frac{-3.1105}{-2.803}$				
	Tm	$\frac{-12.0614}{-11.610}$				Dy	$\frac{-3.3141}{-3.421}$				
	Lu	$\frac{-12.4734}{-12.710}$				Er	$\frac{-3.8958}{-3.981}$				
Кимберлиты Алакинского поля, трубка Айхал [10]; $a_0 = 70.5371$, $a_1 = -14.5762$	Nd	$\frac{-5.9713}{-5.906}$	0.013	0.01							
	Gd	$\frac{-8.0213}{-8.135}$									
	Dy	$\frac{-8.9259}{-9.005}$									
	Er	$\frac{-9.9041}{-9.773}$									

дальнейшего использования принятого выше положения о концентрировании РЗЭ от содержаний в хондритах до содержаний их в рудах.

Переходя к решению задачи о формализованном предсказании аномального содержания европия, обратим внимание на то, что единый, общий вид формулы (1) позволяет осуществить регулярный переход от описания известных содержаний РЗЭ постоянной валентности в хондритах [3] к описанию их содержаний в рудах. На плоскости $m^{1/3} - \ln A$ такой переход состоит в том, что прямая линия, отображающая содержания в хондритах, смещается вверх, отображая содержания в руде. Назовем такой переход регулярным и используем его как основу формализованного предсказания содержания европия в рудах.

В дальнейшем анализе примем, что содержание европия в руде есть сумма двух составляющих: первая, эндогенная – это содержание, которое определяется указанным выше регулярным

переходом, и вторая, экзогенная, – обусловленная геохимической спецификой данного месторождения (очевидно, что в хондритах экзогенная составляющая равна нулю). Общий вид расчета эндогенной составляющей основан на том, что содержание европия в хондритах “аномально”, т.е. на плоскости $m^{1/3} - \ln A$ точка с абсциссой $m_{\text{Eu}}^{1/3}$ и ординатой $\ln A_{\text{Eu}}$ лежит ниже графика функции (1) для La, Ho, Tm, Lu, содержащихся в хондритах. Для того чтобы применить к европию регулярный переход содержания в хондритах → содержание в руде, введем переменную $\mu^{1/3}$ таким образом, что для европия в хондритах выполнялась общая формула (1) в виде

$$\ln A_{\text{Eu}}^{\text{Chon}} = a_{10}^{\text{Chon}} + a_{11}^{\text{Chon}} \mu_{\text{Eu}}^{1/3}, \quad (2)$$

что с учетом численных значений a_{ij} , приведенных выше, и с учетом экспериментального содер-

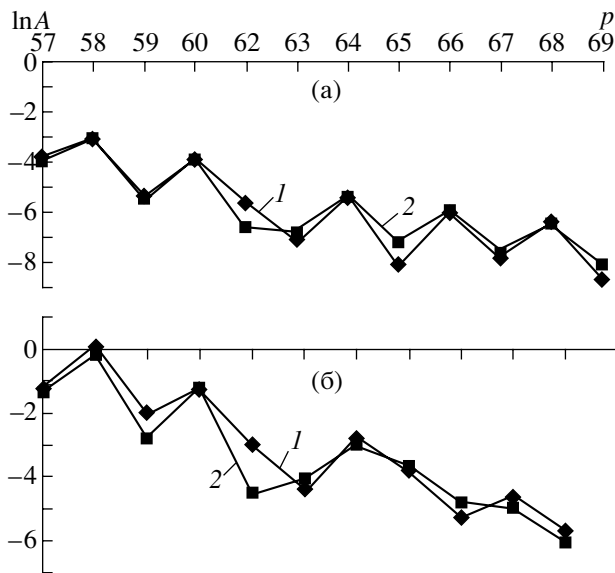


Рис. 1. Диаграмма заряд ядра (p) лантанида–логарифм его содержания (A) в железистых кварцитах КМА, обр. X-1/1 [4] (а) и в порфириновых гранодиоритах главного этапа баргузинского комплекса [5] (б). Размерность A – г-ат/г. 1 – $\ln A_{\text{exp}}$, 2 – $\ln A_{\text{calc}}$.

жания европия [3], представляемого в этой формуле в размерности г-ат/г, приводит к равенству

$$\mu_{\text{Eu}}^{1/3} = -5.4192.$$

Это равенство справедливо как для космической, так и для любой земной породы.

Окончательный результат, т.е. априорное и формализованное предсказание содержания европия в руде, заключается в использовании экспериментальных данных по содержаниям La, Ho, Tm, Lu в руде и вычислению по этим содержаниям коэффициентов a_{10}^{Ore} , a_{11}^{Ore} , а также к последующему вычислению эндогенной (регулярной) составляющей по формуле

$$\ln A_{\text{Eu}}^{\text{Ore}} = a_{10}^{\text{Ore}} + a_{11}^{\text{Ore}} \mu_{\text{Eu}}^{1/3}. \quad (3)$$

Так, например, в образце X-1/1 [4] расчетное и экспериментальное значения $\ln A_{\text{Eu}}^{\text{Ore}}$ равны -6.7861 и -7.1438 соответственно, а нормированное значение европиевой аномалии в форме $(A_{\text{exp}} - A_{\text{calc}})/A_{\text{exp}}$ составляет -0.60 . Иными словами, 40% являются

фоном, скрывающим геохимические особенности рудообразования. Аналогичный расчет для порфириновых гранодиоритов баргузинского комплекса [5] дает значение $\ln A_{\text{Eu}}^{\text{Ore}} = -4.0700$, а так как экспериментальное значение равно -4.3873 , то фон (эндогенная часть общего содержания) составляет 60%.

Подчеркнем, что априорное формализованное предсказание содержаний других лантанидов переменной валентности проводится по той же схеме, что и приведенное выше предсказание эндогенной составляющей для европия. Так, для Ce, Pr, Sm, Tb, Yb значения констант $\mu^{1/3}$ составляют -5.1536 , -5.3085 , -5.5283 , -5.4555 , -5.5711 соответственно. Эти константы позволяют предсказать содержание Ce, Pr, Sm, Tb, Yb в рудах, т.е. восстановить весь расчетный спектр содержаний лантанидов. Примеры таких расчетов даны на рис. 1 в виде диаграмм заряд ядра (p)–логарифм распространенности (A).

Достигнутая точность совпадения расчетного спектра содержаний с экспериментальным спектром позволяет утверждать, что поставленная задача построения регулярного метода расчета эндогенной составляющей содержания европия в рудах и породах решена. Решена также более общая задача – задача построения регулярного метода расчета эндогенной составляющей содержаний всех лантанидов переменной валентности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеева С.С. // ДАН. 1996. Т. 351. № 2. С. 249–252.
2. Винокуров С.Ф. // ДАН. 1996. Т. 346. № 6. С. 792–795.
3. Cameron A.G.W. In: Essays in Nuclear Astrophysics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1982.
4. Шатров В.А., Сиротин В.И., Войцеховский Г.В. // ДАН. 2002. Т. 386. № 5. С. 668–671.
5. Антипин В.С., Горегляд А.В., Коваленко В.И. и др. // ДАН. 1994. Т. 357. № 5. С. 667–670.
6. Иванова Г.Ф., Колесов Г.Н., Наумов В. Б. и др. // Геохимия. 2001. № 11. С. 1152–1161.
7. Батурин Г.Н., Люка Ж., Прево-Люка Л. // ДАН. 2001. Т. 379. № 5. С. 647–650.
8. Иванова Г.Ф., Чернышов И.В., Колесов Г.М. // Геохимия. 1998. № 11. С. 1099–1114.
9. Борисова А.Ю. // Геохимия. 2001. № 2. С. 148–159.
10. Голубева Ю.Ю., Илупин И.П., Журавлев Д.З. // ДАН. 2003. Т. 390. № 5. С. 669–674.