

Геохимия и фракционирование Zr и Hf в щелочно-карбонатитовой магматической системе массива Кугда (Полярная Сибирь)

Когарко Л.Н., Глазатова И.А.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, kogarko@geokhi.ru

Аннотация. Установлены закономерности распределения и фракционирования стратегических металлов (Zr, Hf) в интрузии Кугда (Полярная Сибирь). Содержания исследованных элементов заметно превышают концентрации этих элементов других формаций (Zr-246 ppm, Hf-7.4 ppm). Отмечается значительный рост Zr и Hf от ранних пород (оливиниты, мелелитовые породы) к более поздним продуктам дифференциации-сиенитам до 570 ppm Zr и 16 ppm Hf. В процессе эволюции магматической системы Кугда отмечается заметное фракционирование Zr и Hf. Отношение Zr/Hf в дайковой породе, приближающейся по составу к первичной магме массива Кугда и ранних интрузиях довольно близко к хондритовому (Zr/Hf=37) (McDonough and Sun, 1995), в то время как в самых поздних фазах это отношение резко возрастает-почти в 5 раз. Наши исследования показали, что коэффициент распределения Hf ($K_d=0.58$) в щелочных пироксенах заметно выше по сравнению с Zr ($K_d=0.40$). Отсюда следует, что фракционирование этого минерала приводит к росту Zr/Hf отношения в остаточных жидкостях.

Другим минералом, концентрирующим цирконий до 400 ppm и Hf до 15-20 ppm является перовскит, который имеет очень широкое поле кристаллизации в породах массива Кугда-в особенности в наиболее ранних породах-оливинитах. Наши данные показали, что отношение Zr/Hf в перовскитах оливинитов колеблется в пределах 23-27-то есть заметно ниже хондритового и этой величины в первичной магме. Ранняя кристаллизация перовскита является главной причиной повышения Zr/Hf отношения в мелелитолитах (до 54). Таким образом главным процессом формирования массива Кугда была непрерывная кристаллизационная дифференциация, сопровождавшаяся заметным фракционированием породообразующих и акцессорных минералов (пироксен и перовскит)..

Ключевые слова: Массив Кугда, Zr, Hf, перовскит.

Geochemistry and Fractionation of Zr and Hf in the alkaline-carbonatite Magmatic System of the Kugda Massif (Polar Siberia)

Academician L.N. Kogarko and I.A. Glazatova

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, kogarko@geokhi.ru

Abstract. The patterns of the distribution and fractionation of strategic metals (Zr, Hf) in the Kugda intrusion (Polar Siberia) have been studied. The contents of these elements significantly exceed their concentrations in other rocks (Zr 246 ppm, Hf 7.4 ppm). A significant increase in Zr and Hf from early rocks (olivinite and melilite rocks) to later differentiation products, syenites with up to 570 ppm of Zr and 16 ppm of Hf, has been revealed. During the evolution of the Kuga magmatic system, notable fractionation of Zr and Hf occurred. The Zr/Hf ratios in the dyke rock, similar in composition to the primary Kugda Massif magma, and the early intrusions are fairly close to that of chondrite (Zr/Hf = 37 [1]), while in the latest phases this ratio increases by almost 5-fold. Our study showed that the distribution coefficient of Hf ($K_d = 0.58$) in alkaline pyroxenes is noticeably higher than that of Zr ($K_d = 0.40$). Consequently, fractionation of this mineral leads to an increase in the Zr/Hf ratio in the residual liquids. Another mineral concentrating up to 400 ppm of Zr and up to 15–20 ppm of Hf is perovskite, which has a very wide crystallization field in the rocks of the Kugda Massif, especially in the earliest olivinite. The data obtained showed that the Zr/Hf ratio in the perovskite of olivinite varies between 23–27, that is, noticeably below both the chondritic and the primary magma values. Early crystallization of perovskite is the main reason for increasing the Zr/Hf ratio in melilitolites (up to 54). Thus, the main process of forming the Kugda Massif was continuous crystallization differentiation, accompanied by a noticeable fractionation of rock-forming and accessory minerals (pyroxene and perovskite).

Key words: Kugda Polar Siberia, Zr, Hf, pyroovskite.

Введение

Цирконий и гафний являются ценными металлами и относятся к группе стратегических, их потребление непрерывно растет в индустрии. Концентрации этих элементов наиболее высокие в щелочных породах. В этой связи проведение экспертизы по запасам этих металлов в комплексах щелочных пород важно для роста рудного потенциала России.

Были проведены исследования геохимии циркония и гафния в ультраосновном щелочно-карбонатитовом массиве Кугда (Полярная Сибирь).

Массив Кугда представляет собой изометричное воронкообразное тело площадью 16 км².

Вмещающие породы представлены горизонтально залегающими доломитами среднего кембрия. Центральный тип строения массива подчеркивается концентрическим расположением интрузивных фаз массива. В развитии комплекса Кугда выделяется шесть интрузивных фаз, в результате которых последовательно возникли: (Егоров, 1991)

1) шток оливинитов (оливиниты, рудные оливиниты, перовскитовые и магнетитовые слои). Эта интрузия характеризуется магматической расслоенностью местами переходящей в ритмичную расслоенность.

2) кольцевая интрузия мелилитолитов, также с проявлением магматической расслоенности-чередованием турьяитов, ункомпагритов и окаитов.

3) мощное кольцевое тело меланократовых фойдолитов и фойдитов (мельтейгиты, якупирангиты, меланефелиниты, оливиновые меланефелиниты, нефелиновые пикриты);

4) небольшие штокообразные тела ийолитов; главная масса этих пород, вероятно, консолидирована ниже уровня современного среза.

5) мелкие штоки и жилы щелочных и редко нефелиновых сиенитов.

6) мощное полукольцевое тело форстерититов, которые по мнению авторов статьи являются кумулятами фоскоритовой интрузии так как в определенных зонах этой фазы преобладают фоскориты. К этому комплексу относятся маломощные кальцитовые жилы, пересекающие форстерититы.

Геохимия Zr и Hf

Методом ICPMS было исследовано 45 образцов всех разновидностей пород массива Кугда на содержания Zr и Hf. (табл. 1).

Средние содержания исследованных элементов заметно превышают концентрации этих элементов других формаций. (табл. 1, 2). Отмечается рост концентраций Zr и Hf от ранних пород (оливиниты, мелелитовые породы) к остаточным продуктам дифференциации-сиенитам. (рис. 1 а, б, в). Самые высокие концентрации циркония и гафния отмечаются в сиенитах и фоскоритах. В одном образце сиенита было обнаружено очень высокое содержание циркония -3750 ppm., что связано с кумуляцией в этой породе эвдиалита. Для вычисления среднего содержания циркония эта величина не учитывалась.

В процессе эволюции магматической системы Кугда отмечается заметное фракционирование Zr и Hf-отношение в более поздних продуктах дифференциации возрастает почти в пять раз.

Эволюция ультраосновной-щелочной магматической системы комплекса Кугда определялась процессами кристаллизационной дифференциации, сопряженной с явлениями магматической расслоенности.

Необходимо отметить, что некоторые разновидности пород массива Кугда не являются расплавами, а носят кумулятивный характер т.е. скопление отдельных минералов, что несомненно влияет на распределения Zr и Hf и может несколько изменить установленные закономерности.

Отношение Zr/Hf в дайковой породе, приближающейся по составу к первичной магме массива Кугда довольно близко к хондритовому отношению =37 (McDonough and Sun, 1995). Интересно отметить, что более ранние интрузивные фазы Кугды – оливиниты, мелилитолиты, мельтейгиты и ийолиты имеют близкие к хондритовому отношению Zr/Hf (табл. 1), в то время как в самых поздних фазах отношение возрастает. Наши исследования (Когарко, 2016) показали, что коэффициент распределения Hf в щелочных пироксенах заметно выше по сравнению с Zr. Отсюда следует, что

фракционирование этого минерала приводит к росту Zr/Hf отношения в остаточных жидкостях. Малые вариации Zr/Hf отношения в более ранних интрузивных фазах и их близость к хондритовой величине свидетельствует о близости коэффициентов распределения Zr и Hf главных минералов этих пород-оливинов и мелелитов.

Таблица 1. Примеры распределения циркония и гафния в ряде пород массива Кугда, (ppm).

№ п/п	№ образцов	Минерал	Zr	Hf	Zr/Hf
1	Кх-86	Мельтейгит	301.00	9.00	33.44
2	Кх-47	Мельтейгит	215.00	4.90	43.88
3	Кх-135	Мельтейгит	330.00	6.80	48.53
4	Кх-80	Мельтейгит	30.00	3.60	8.33
5	Кх-27	Мельтейгит	135.00	3.70	36.49
6	Кх-85	Сиенит	263.00	7.20	36.53
7	Кх-29	Сиенит	500.00	10.00	50.00
8	Кх-30	Сиенит	310.00	5.00	62.00
9	Кх-85	Сиенит	260.00	6.10	42.62
10	Кх-125	Сиенит	145.00	3.10	46.77
11	Кх-35	Оливинит	19.90	0.89	22.36
12	Кх-12	Оливинит	83.60	4.70	17.79
13	Кх-9	Оливинит	26.70	1.20	22.25
14	Кх-0	Оливинит	34.80	1.70	20.47
15	Кх-35	Оливинит	23.60	1.80	13.11
16	Кх-14	Оливинит	94.00	4.90	19.18
17	Кх-97	Мелилитолит	400.00	7.20	55.56
18	Кх-52	Мелилитолит	95.00	4.10	23.17
19	Кх-21	Мелилитолит	13.90	0.51	27.25
20	Кх-61	Мелилитолит	13.10	0.54	24.26
21	Кх-84	Ийолит	550.00	7.70	71.43
22	Кх-28	Ийолит	80.00	9.90	8.08
23	Кх-32	Ийолит	240.00	3.60	66.67
24	Кх-34	Уртит	147.00	4.00	36.75
25	Кх-88	Фоскорит	98.00	1.90	51.58
29	Кх-99-10	дайка	399.17	8.98	44.44
30	Кх-110-15	дайка	421.38	9.23	45.66
31	Кх-87	Якупирангит	234.00	6.90	33.91

Таблица 2. Средние значения распределения циркония и гафния в породах массива Кугда, ppm

Элементы	Мельтейгит	Сиенит	Оливинит	Мелилитолит	Ийолит	Фоскорит	Дайка
Zr	202.20	295.60	47.10	130.50	254.25	204.75	410.27
Hf	5.60	6.28	2.53	3.09	6.30	2.33	9.11
Zr/Hf	36.11	47.07	18.62	42.23	40.36	87.88	45.04

В третьей и четвертой фазах массива Кугда роль пироксенов резко возрастает-например в мельтейгитах, якупирангитах и ийолитах пироксен является важным породообразующим минералом. В качестве геохимического следствия активного фракционирования пироксена в более поздних продуктах дифференциации-сиенитах и форстерититах резко возрастает отношение Zr/Hf (табл. 1).

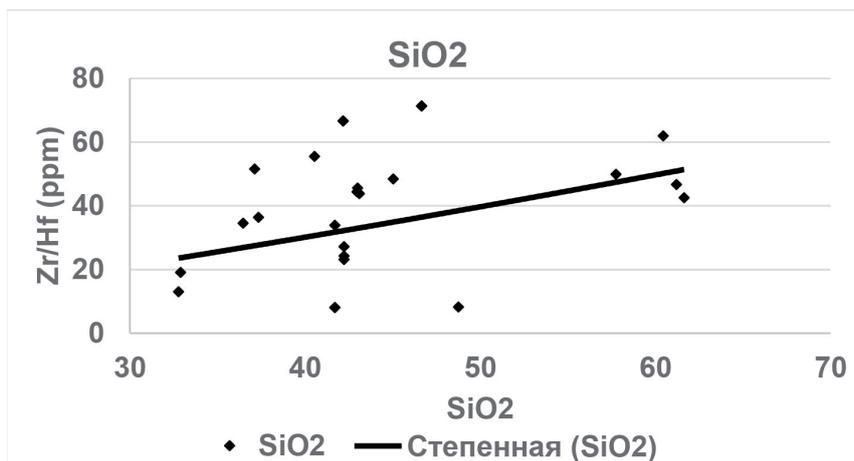


Рис. 1 а. График распределения Zr/Hf от SiO₂ массива Кугда.
Fig. 1 a. Graph of the Zr/Hf distribution from the SiO₂ array of Kugda.

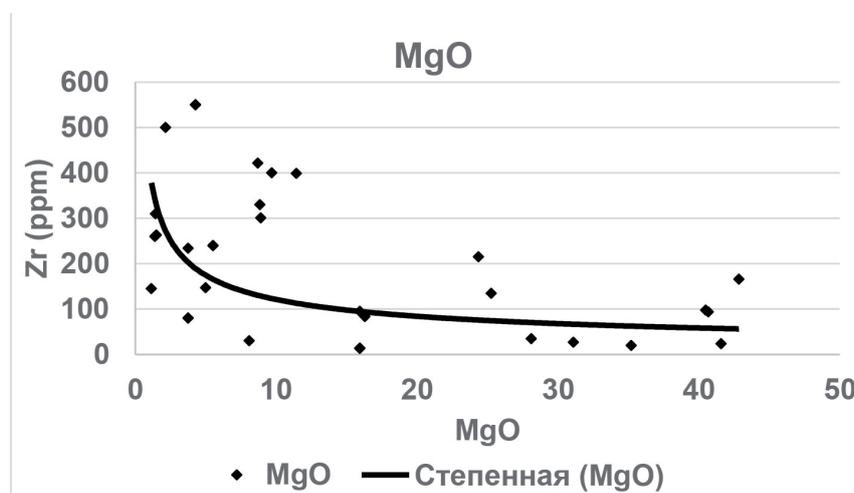


Рис. 1 б. График распределения Zr от MgO массива Кугда.
Fig. 1 b. Plot of Zr distribution from MgO of the Kugda massif.

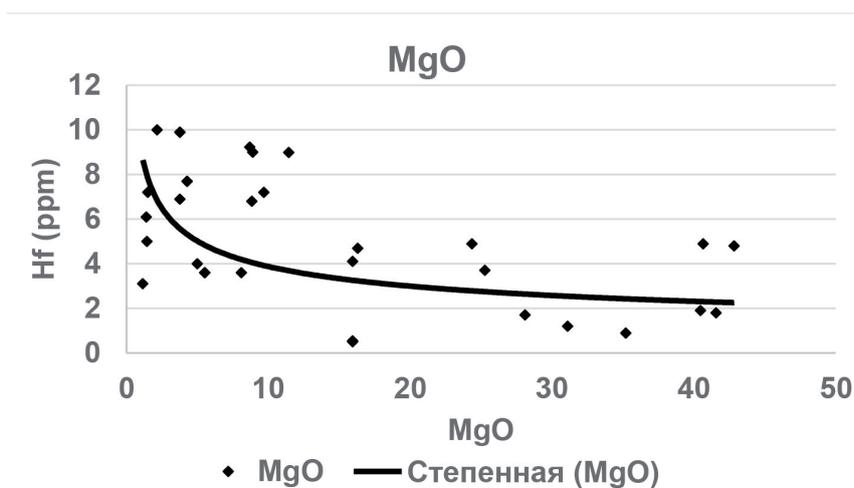


Рис. 1 в. График распределения Hf от MgO массива Кугда.
Fig. 1 c. Plot of Hf distribution from MgO of the Kugda massif.

Другим минералом, концентрирующем цирконий до 400 ppm и Hf до 15-20 ppm является перовскит, который имеет очень широкое поле кристаллизации в породах массива Кугда-в особенности в наиболее ранних породах-оливинитах. Наши данные показали, что отношение Zr/Hf в перовскитах оливинитов колеблется в пределах 23-27-то есть заметно ниже хондритового и этой величины в первичной магме. Учитывая, что перовскит в оливинитах является породообразующим минералом, достигая рудных концентраций, можно заключить, что именно кристаллизация этого минерала привела к заметному фракционированию Zr и Hf и является главной причиной некоторого повышения Zr/Hf отношения в 2 фазе интрузии-мелелитолитах (до 54).

Таким образом проведенные исследования убедительно показали, что главным процессом формирования массива Кугда была непрерывная кристаллизационная дифференциация, сопровождавшаяся заметным фракционированием породообразующих и акцессорных минералов (пироксен, перовскит).

В процессе эволюции магматической системы Кугды установлено значительное фракционирование Zr и Hf. Благодаря более высокому коэффициенту распределения гафния в пироксенах и перовскитах в конечных продуктах дифференциации значительно возрастает отношение Zr/Hf.

Работа выполнена в рамках темы по государственному заданию № 0137-2019-0014.

Литература

1. McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. V. 120. P. 223–253.
2. Егоров Л.С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм (на примере Маймеча-Котуйского комплекса Полярной Сибири). Л. Изд-во: Недра 1991. 260 с.
3. Когарко Л.Н. Геохимия процессов разделения когерентных элементов (Zr, Hf) при глубокой дифференциации высокощелочных магматических систем (Ловозерский комплекс) // *Геохимия.* 2016. № 1. С. 4–10.