

УДК 553.21/24

ГЕОХИМИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В УЛЬТРАОСНОВНОМ-ЩЕЛОЧНО-КАРБОНАТИТОВОМ КОМПЛЕКСЕ КУГДА (ПОЛЯРНАЯ СИБИРЬ)

© 2021 г. Академик РАН Л. Н. Когарко^{1,*}

Поступило 24.08.2021 г.

После доработки 24.08.2021 г.

Принято к публикации 31.08.2021 г.

Целью исследования была оценка закономерностей распределения редкоземельных металлов (РЗМ) в породах массива Кугда (Полярная Сибирь). Содержание редких земель падает от ранних пород оливинитов, содержащих в среднем 1938 г/т к конечным продуктам дифференциации сиенитам и снова возрастает в карбонатитах. Разница в коэффициентах распределения легких и тяжелых РЗМ является причиной заметного фракционирования этих элементов в процессе эволюции магматической системы массива Кугда. В более поздних продуктах дифференциации отношение легких РЗМ к тяжелым Ce/Yb падает почти на порядок. Главным процессом формирования массива Кугда была непрерывная кристаллизационная дифференциация, характеризующаяся широким полем кристаллизации перовскита, причем интересной особенностью является очень ранняя кристаллизация перовскита, связанная с высоким потенциалом углекислоты.

Ключевые слова: Комплекс Кугда, редкометальные месторождения, Полярная Сибирь, редкие земли

DOI: 10.31857/S2686739721120057

ВВЕДЕНИЕ

Редкоземельные металлы относятся к группе стратегических, их потребление непрерывно растет в индустрии высоких технологий. Суперкрупные редкоземельные месторождения России, Бразилии и Китая связаны с ультраосновными-щелочно-карбонатитовыми формациями. В связи с резким расширением использования редких земель в промышленности, цены на РЗМ в последние десятилетия значительно возросли. В этой связи проведение экспертных работ по выявлению закономерностей концентрирования этих металлов в комплексах щелочных пород важно для роста рудного потенциала России.

Целью настоящей работы было исследование закономерностей концентрирования и рассеяния редкоземельных металлов в ультраосновном щелочно-карбонатитовом комплексе Кугда (Полярная Сибирь) (табл. 1).

Особенностью массива Кугда является резко недосыщенный в отношении кремнезема и высококальциевый состав исходной магмы. Это при-

вело к широкому развитию оливинитов и ларнит-нормативных мелилитовых разностей. Завершает процесс глубоко дифференцированного комплекса внедрение карбонатитов, представленных, главным образом, форстерититами. Несмотря на то что в развитии комплекса Кугда отмечается классическая магматическая эволюция ультра-основных щелочно-карбонатитовых массивов, первичная магма этого комплекса была значительно обогащена магнием, кальцием и обеднена кремнием. Второй особенностью является очень ранняя кристаллизация перовскита, который становится ликвидусной фазой в процессе формирования наиболее ранних пород оливинитов.

ГЕОЛОГИЯ МАССИВА КУГДА

Крупнейшая в мире ультраосновная-щелочная Маймечя-Котуйская провинция занимает площадь около 74300 км² и располагается к северо-востоку от Сибирских платобазальтов. Она включает 32 ультраосновных щелочных интрузий, крупный объем щелочных лав и даек, а также несколько карбонатитовых тел [1].

Массив Кугда представляет собой изометричное воронкообразное тело площадью 16 км². Вмещающие породы представлены горизонтально залегающими доломитами среднего кембрия. Цен-

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: kogarko@geokhi.ru

Таблица 1. Среднее содержание РЗМ в породах массива Кугда (ppm)

Элементы	Оливинит	Мелилитолит	Мельтейгит	Ийолит	Нефелиновый сиенит	Сиенит	Форстеритит	Дайка
La	704	250	123	77	126	13.43	467	189
Ce	1589	388	261	131	204	23.17	1104	312
Pr	233	40.62	44.22	17.60	23.00	2.70	51.93	34.61
Nd	669	108	118	58.40	69.70	9.10	134	119
Sm	78.51	15.16	18.62	8.90	6.40	1.12	19.85	15.12
Eu	14.04	3.38	4.02	2.20	1.47	0.21	4.40	3.75
Gd	33.84	9.14	10.58	5.20	4.15	0.75	12.71	10.19
Tb	3.09	1.00	1.22	0.68	0.49	0.10	1.24	1.09
Dy	9.75	4.13	5.39	3.10	2.12	0.49	5.06	5.44
Ho	1.24	0.62	0.85	0.51	0.37	0.09	0.72	0.86
Er	2.29	1.31	1.95	1.20	0.93	0.28	1.49	2.11
Tm	0.19	0.13	0.23	0.12	0.14	0.05	0.15	0.25
Yb	0.93	0.67	1.37	0.81	0.99	0.40	0.69	1.59
Lu	0.10	0.08	0.19	0.12	0.17	0.08	0.07	0.21
Ce/Yb	1101	579	190	162	206	57.92	1592	196
Сумма	1938	822	591	307	441	51.96	1803	696

тральный тип строения массива подчеркивается грубо-концентрическим расположением интрузивных фаз массива. В развитии комплекса Кугда выделяется шесть интрузивных фаз [1]:

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

2) кольцевая интрузия мелилитолитов, также с проявлением магматической расслоенности — чередованием турьитов, 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 нашему мнению, являются кумулятами оливины фоскоритовой интрузии, так как в определенных зонах этой фазы преобладают фоскориты. К этому комплексу относятся маломощные кальцитовые жилы, пересекающие форстерититы.

Методом ICP–MS было исследовано 45 образцов всех разновидностей пород массива Кугда на содержания РЗМ (табл. 1). Средние содержания

исследованных элементов заметно превышают концентрации этих элементов других формаций (табл. 1, рис. 1). Отмечается падение содержаний суммы РЗМ от ранних пород (оливиниты, мелилитолиты) к более поздним продуктам дифференциации за исключением пород карбонатитового комплекса (табл. 1). Эта закономерность не обычна, и геохимия редких земель комплекса Кугда отличается от других массивов Полярной Сибири и многих щелочно-карбонатитовых комплексов Кольского полуострова. Однако дифференциация ряда девонских щелочно-карбонатитовых интрузий Кольского полуострова (Лесная Варакка, Африканда) также связана с редкометальной минерализацией именно ранних пород — оливинитов и пироксенитов, содержащих перовскит, который является главным минералом-концентратором редких земель. Содержание суммы РЗМ в некоторых рудных оливинитах комплекса Кугда достигает 9479 г/т. Таким образом, рудные оливиниты представляют собой очень ценное сырье на редкие земли. Концентрация РЗМ в рудных оливинитах несколько выше содержаний в карбонатитовом комплексе (табл. 1), в котором максимальное содержание РЗМ составляет 6846 г/т. Наши исследования показали, что перовскит массива Кугда значительно обогащен редкими землями (табл. 2), отдельные кристаллы в оливинитах содержат до 23778 г/т суммы РЗМ.

Во всех породах комплекса Кугда отношение Ce/Yb повышено в десятки раз (табл. 1) по сравнению с хондритовым (Ce/Yb около 4.2). Это связано с преимущественным концентрированием

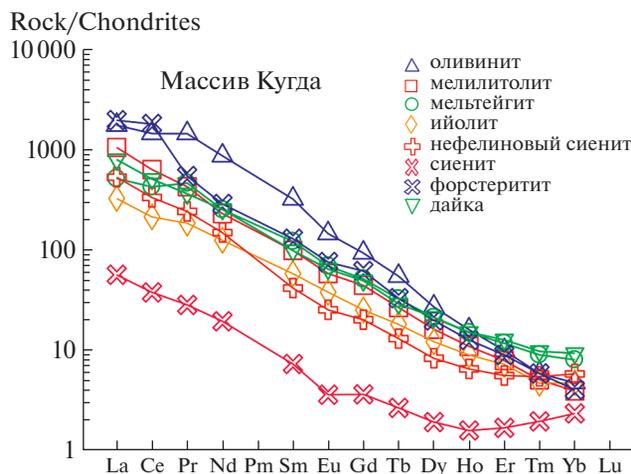


Рис. 1. Спайдер-диаграмма по распределению РЗМ в породах массива Кугда.

редких земель в перовските. В некоторых выделениях перовскита из оливинитов отношение Ce/Yb достигает 2320 (табл. 2). Согласно экспериментальным данным, перовскиты обладают повышенным коэффициентом распределения редких земель в равновесиях с расплавами, близкими по составу к мелилитовым нефелинитам [3, 4], причем для легких РЗМ эта величина (около 20) значительно выше по сравнению с тяжелыми редкими землями (Kd первые единицы).

Эта разница является причиной заметного фракционирования РЗМ в процессе эволюции магматической системы массива Кугда. В более поздних продуктах дифференциации отношение легких РЗМ к тяжелым Ce/Yb падает почти на порядок (табл. 1). Однако в карбонатитовом комплексе Кугда это отношение опять резко возрастает, так как содержания перовскита в карбонатитовом комплексе довольно высокое, кроме того, согласно нашим петрографическим исследованиям, в форстерититах отмечается пироксид, кальцитрит, апатит, которые также обогащены легкими редкими землями.

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.

Таблица 2. Содержание РМЗ в перовскитах оливинитов массива Кугда

Элементы	A08	A09	A13	A16	A17	Среднее
ΣREE	23497	20724	20743	18497	14834	19659
Ce/Yb	1990	1765	1846	2320	1793	1943

скопление отдельных минералов, что может повлиять на установленные закономерности.

Таким образом, проведенные исследования убедительно показали, что главным процессом формирования массива Кугда была непрерывная кристаллизационная дифференциация, характеризующаяся широким полем кристаллизации перовскита, причем интересной особенностью является очень ранняя кристаллизация перовскита, связанная с высоким потенциалом углекислоты. Согласно нашим экспериментальным данным [5], оливин и перовскит являются ранними ликвидусными фазами при кристаллизации мелилит-содержащего нефелинита в условиях повышенного давления углекислоты. В процессе эволюции магматической системы Кугда установлено значительное фракционирование тяжелых и легких редких земель. Благодаря более высокому коэффициенту распределения легких редких земель в перовскитах, в конечных продуктах дифференциации значительно падает отношение Ce/Yb .

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров Л.С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм (на примере Маймеча-Котуйского комплекса Полярной Сибири). Л.: Недра. 1991. 260 с.
2. Palme H., O'Neil H. Cosmochemical Estimation of Mantle Composition // Treatise on geochemistry. 2014. V. 3. P. 1–39.
3. Beyer C., Berndt J., Tappe S., Klemme S. Trace Element Partitioning Between Perovskite and Kimberlite to Carbonatite Melt: New Experimental Constraints // Chemical Geology. 2013. V. 353. P. 132–139.

4. *Corgne A., Wood B.* Trace Element Partitioning and Substitution Mechanisms in Calcium Perovskites // *Contrib Mineral Petrol.* 2005. V. 149. P. 85–97.
5. *Когарко Л.Н., Грин Д.* Фазовые равновесия в ходе плавления мелилитового нефелинита при давлении до 60 кбар // *ДАН.* 1998. Т. 359. № 4. С. 522–524.

GEOCHEMISTRY OF RARE EARTH METALS IN THE ULTRABASIC-ALKALINE-CARBONATITE COMPLEX OF KUGDA (POLAR SIBERIA)

Academician of the RAS **L. N. Kogarko**^{a, #}

^a *Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: kogarko@geokhi.ru*

Rare earth elements belong to the category of strategic metals. The aim of the study was to assess the distribution patterns of REE in the rocks of the Kugda massif (Polar Siberia). The content of rare earths decreases from early olivinite rocks, containing on average 1938 ppm, to the end products of differentiation, syenites, and increases again in carbonatites. The difference in the distribution coefficients of light and heavy rare earth metals in perovskite is the reason for the noticeable fractionation of these elements during the evolution of the magmatic system of the Kugda massif. In later differentiation products, the ratio of light to heavy REE (Ce/Yb) drops by almost an order of magnitude. The main process of the formation of the Kugda massif was continuous crystallization differentiation, characterized by a wide crystallization field of perovskite, and an interesting feature is the very early crystallization of perovskite, associated with a high potential of carbon dioxide.

Keywords: Kugda complex, rare metal deposits, polar Siberia, rare earths