УДК 553.25

Распределение редкоземельных элементов в минералах из пород щелочного карбонатитового комплекса Белая Зима (Восточный Саян, Россия)

© *Е. А. Хромова* [1], *А. Г. Дорошкевич* [1,2], *И. А. Избродин* [1]
[1] Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия. E-mail: lena.khromova.00@mail.ru
[2] Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

Большинство минералов, которые слагают породы комплекса Белая Зима, в том, или ином количестве содержат в своем составе РЗЭ. В данной работе рассмотрены особенности распределения и поведения РЗЭ в минералах и основных типах пород комплекса.

Ключевые слова: Белая Зима; карбонатиты; силикатные породы; редкоземельные элементы.

Distribution of rare-earth elements in the minerals from the rocks of the Belaya Zima alkaline carbonatite complex (East Sayan, Russia)

E. A. Khromova, A. G. Doroshkevich, I. A. Izbrodin
[1] Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia
[2] V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia

The most of minerals, which compose the rocks of the Belaya Zima plutonic complex, contain the REEs in one or another amount. In this study we consider the specificity of distribution and behavior of REE in minerals and rocks of the Belaya Zima complex.

Keywords: Belaya Zima; carbonatites; silicate rocks; rare earth elements.

Щелочной карбонатитовый комплекс Белая Зима расположен в Восточном Саяне, Иркутской области. Несмотря на сравнительно не большую площадь, порядка 10 км^2, является весьма продуктивным на редкоземельную минерализацию вплоть до промышленных масштабов. Центральная часть комплекса, представляет собой карбонатитовый шток, по периферии он обрамляется щелочными силикатными породами. Комплекс Белая Зима прорывает породы песчано-сланцевой толщи верхнего протерозоя с пластами кварцитов и согласными дайками диабазов [1]. Возраст пород комплекса составляет 645–643 млн лет [2, 3].

В пределах щелочного карбонатитового комплекса Белая Зима исследователями [1, 2, 4, 5] установлено три основных типа карбонатитов: кальцитовые, кальцит-доломитовые и анкеритовые. Наиболее распространенными силикатными породами являются мельтейгиты, ийолиты и нефелиновые сиениты.

Мельтейгиты — меланократовые средне — крупнозернистые породы, состоящие из клинопироксена (80%) и нефелина (до 15–20 %). **Ийолиты** — массивные породы, сложены приблизительно равными количествами нефелина и клинопироксена. Второстепенные минералы мельтейгитов и ийолитов представлены магнетитом, титанитом, перовскитом, ильменитом, реже встречаются щелочной амфибол, апатит, флогопит, кальцит, гранат. Акцессорные — бадделеит, касит, вторичные — либнерит, канкринит. Главными породообразующими минералами массивных крупнозернистых **нефелиновых сиенитов** являются калиевый полевой шпат (до 70% породы), клинопироксен и нефелин, последний часто замещен канкринитом. К числу второстепенных относятся щелочной амфибол, флогопит, кальцит, апатит. Из акцессорных наиболее распространены циркон, титанит, ильменит, рутил, пирохлор. **Кальцитовые карбонатиты** представлены крупнозернистыми, массивными разновидностями. Породы на 80% сложены кальцитом. Второстепенные минералы представлены клинопироксеном, флюоркальциопирохлором, флогопитом, апатитом, магнетитом, оливином (частично серпентинизирован), щелочным амфиболом. Акцессорные — анкилит, минералы группы бербанкита, монацит-Ce, карбоцернаит, лаашит (в виде мелкой вкрапленности в кальците) ильменит, стронцианит, цирконолит, баритокальцит, Nb — рутил, торит, бадделеит. **Кальцит-доломитовые** карбонатиты — среднезернистые, порфировидные, часто полосчатые разновидности. Основными минералами являются доломит, кальцит, минералы группы биотита, щелочной амфибол. Второстепенные представлены апатитом, кенопирохлором, магнетитом, сульфидами (пирит, сфалерит). Акцессорные — анкилит, бербанкит, цирконолит, монацит-Ce, катаплеит, ильменит, циркон, бадделеит. **Анкеритовые** карбонатиты — мелко– среднезернистые, пятнистые, реже полосчатые породы. Они состоят из анкерита, доломита и кальцита, с подчиненным количеством апатита, барита, сульфидов (в основном, пирита),

гидропирохлора. В породах широко распространены фторкарбонаты РЗЭ (бастнезит-Ce, паризит-Ce и синхизит-Ce) и монацит-Ce. Их количество в отдельных участках занимает 10–15% породы. Фторкарбонаты РЗЭ формируют тесные срастания друг с другом, встречаются в виде вкрапленности, и образует скопления кристаллов размером 0,1–0,8 мм. Монацит-Ce образует пластинчатые, шестоватые зерна и их скопления. Акцессорные минералы анкеритовых карбонатитов — бадделеит, баотит (в виде включений в гидропирохлоре), карбоцернаит, анкилит, циркон.

Карбонаты слагают основную массу карбонатитов, так же встречаются в щелочных силикатных породах комплекса. РЗЭ в них распределяются следующим образом: наибольшая концентрация характерна для кальцита из кальцитовых карбонатитов (500–1000 ppm); доломит и анкерит характеризуются более низким уровнем РЗЭ (90–140 и 70–90 ppm, соответственно); в кальците из щелочных силикатных пород содержание суммы РЗЭ составляет 20-50 ppm. Во всех разновидностях пород в составе карбонатов легкие лантаноиды преобладают над тяжелыми. Минимальное La/Yb_{CN} отношение зафиксировано в анкерите из карбонатитов (14), максимум отмечен в кальците из ийолитов (40).

Фторапатит, согласно представленному выше описанию, присутствует во всех разновидностях пород комплекса. Сумма РЗЭ в апатите из кальцитовых и кальцит-доломитовых карбонатитов достигает 6000 ppm, тогда как в щелочных силикатных — 2000 ppm. Наблюдается преобладание легких лантаноидов над тяжелыми; La/Yb_{CN} отношение в карбонатитах в среднем равно 45, в силикатных породах — 200.

Пирохлор из щелочных силикатных пород характеризуется суммарным содержанием РЗЭ в среднем 2300–2800 ppm. Минерал кальцитовых и кальцит — доломитовых карбонатитов содержит РЗЭ до 24000 ppm. В анкеритовых карбонатитах он несет незначительный вклад РЗЭ — 200–1000 ppm. В пирохлоре всех разновидностей пород комплекса наблюдается преобладание легких лантаноидов над тяжелыми, с минимальным La/Yb_{CN} отношением от 30–40 в минерале из анкеритовых карбонатитов, достигает максимума 130–135 — из кальцитовых карбонатитов и щелочных силикатных пород. На графике нормированных к хондриту содержаний РЗЭ довольно часто отмечена Ce положительная аномалия (Ce/Ce* — от 4 до 10 в среднем) [6].

Фторкарбонаты РЗЭ и **монацит-Ce** концентрируются в анкеритовых карбонатитах, в числе акцессорных отмечены в кальцитовых и кальцит-доломитовых карбонатитах, в щелочных силикатных породах не обнаружены. В минералах легкие лантаноиды преобладают над тяжелыми. La/Yb_{CN} отношение в среднем: 15^3, 21^3, 46^3 в бастнезите, монаците и синхизите, соответственно.

Концентраторами РЗЭ в породах комплекса являются также такие акцессорные минералы как **анкилит**, **лаашит, бурбанкит**, несмотря на то, что процентное содержание этих минералов в породах не достигает 0,5 %. **Цирконолит** имеет пологий график распределения РЗЭ, нормированных к хондриту, с примерно равным соотношением легких и тяжелых РЗЭ (La/Yb_{CN} отношение -4–6 в среднем). Для **баотита** характерно преобладание легких лантаноидов над тяжелыми (La/Yb_{CN} – 41). При этом уровень концентрации лантаноидов в цирконолите намного выше, чем в баотите (7–9 ppm и 18000–30000 ppm, соответственно). Баотит имеет положительную аномалию европия Eu/Eu*=8–9. Для **перовскита** характерна слегка выраженная Ce положительная аномалия (Ce/Ce* — 2). Содержание суммы РЗЭ в нем составляет порядка 7000 ppm в среднем, при этом легкие лантаноиды преобладают над тяжёлыми (La/Yb_{CN} 50). Суммарное содержание РЗЭ в **клинопироксене** из пород комплекса варьирует от 16 до 36 ppm. Максимальное содержание отмечено в мельтейгитах (36 ppm), а минимальное в ийолитах (16 ppm), в карбонатитах и щелочных сиенитах концентрации РЗЭ на уровне 20–24 ppm. При этом $La/Yb_{CN,}$ отношение в щелочных сиенитах равно 0,7, для карбонатитов и мельтейгитов — 2,1–2,4, соответственно и достигает максимума в ийолитах — 12,7. В **гранате** сумма РЗЭ не превышает 500 ppm, с преобладанием тяжелых РЗЭ и La/Yb_{CN} отношением, в среднем, 0,3. Незначительные концентрации РЗЭ присутствуют в **нефелине** (40 ppm в среднем), а**мфиболе** и **флогопите,** где суммарное количество РЗЭ не превышает 2,5 ppm и 0,34, соответственно. Амфибол характеризуется примерно равными количествами легких и тяжелых лантаноидов (La/Yb_{CN} 0,1), тогда как в флогопите La/Yb_{CN} 0,2–0,3 в среднем. Для **оливина** с содержанием суммы РЗЭ 10 ppm, характерно более высокое содержание тяжелых лантаноидов (La/Yb_{CN} 0,01) . Стоит отметить, что количество РЗЭ в этих минералах часто ниже предела обнаружения.

Среднее суммарное содержание РЗЭ в породах комплекса увеличивается от ийолитов и мельтейгитов (0,07 мас %) к кальцитовым (0,13 мас %), кальцит — доломитовым (0,25 мас %) и анкеритовым карбонатитам (4,9 мас %). Исключением являются щелочные сиениты, в которых средние содержания РЗЭ равны 0,02 мас %. Концентрация РЗЭ в мельтейгитах и ийолитах определяется, в основном, перовскитом, гранатом, клинопироксеном, апатитом, кальцитом, в то время как в щелочных сиенитах РЗЭ концентрируются преимущественно в апатите, титаните, пирохлоре, в меньшей степе-

ни, в клинопироксене. В кальцитовых и кальцит-доломитовых карбонатитах РЗЭ концентрируются в пирохлоре, акцессорных анкилите и бербанките, в меньшей степени кальците, апатите. Высокие содержания лантаноидов в анкеритовых карбонатитах объясняется наличием карбонатов редкоземельных элементов и монацита. В меньшей степени, РЗЭ концентрируются в анкерите и доломите.

Для всех пород комплекса Белая Зима характерно преобладание легких лантаноидов над тяжелыми, и увеличение количества лантаноидов от ранних пород к поздним. La/Yb_{CN} отношение в среднем увеличивается в следующем порядке: 5–30 в силикатных породах, 20–40 в кальцитовых, 25–50 в кальцит-доломитовых, 2500–3500 в анкеритовых карбонатитах. Такое поведение РЗЭ, объясняется процессом фракционной кристаллизации первичного расплава. Тяжелые редкие земли на ранних этапах входили в структуру минералов, таких как оливин, гранат, амфибол и флогопит. За время кристаллизации легкие РЗЭ занимают более устойчивое положение, и их концентрация значительно увеличивается, достигая максимума в анкеритовых карбонатитах.

Литература

1. Фролов А. А., Толстов А. В., Белов С. В. Карбонатитовые месторождения России. М.: НИА — Природа, 2003. 287 с.

2. Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: Implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids / A. G. Doroshkevich [et al.] // J. Asian Earth Sci. 2016. V. 26. P. 81–96.

3. Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов южного обрамления Сибирской платформы / В. В. Ярмолюк [и др.] // ДАН. 2005. Т. 404. № 3. С. 400–406.

4. Гайдукова В. С., Здорик Т. Б. Минералы редких элементов в карбонатитах / Геология месторождений редких элементов. М.: Госгеолтехитздат,1962. С. 86–117.

5. Пожарицкая Л. К., Самойлов В. С. Петрология, минералогия и геохимия карбонатитов Восточной Сибири. М.: Наука, 1972. 268 с.

6. Compositional Evolution of Pyrochlore-Group Minerals in Carbonatites of the Belaya Zima Pluton, Eastern Sayan / Khromova E. A. [et al.] // Geology of Ore Deposit. 2017. №. 8. P. 752–764.

Хромова Елена Александровна, младший научный сотрудник Геологического института, г. Улан-Удэ.