

## КРАТКИЕ НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 550.4 : 549.621.9 : 552.4

С. Г. Скублов, Г. М. Другова

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В МЕТАМОРФИЧЕСКИХ МИНЕРАЛАХ**

**Введение.** Цель данной статьи – выделить главные геохимические особенности редкоземельных элементов (РЗЭ) в метаморфических минералах, установленные в результате серии работ авторов последних лет. Как показал опыт изучения РЗЭ, значительная их часть в метаморфических породах сосредоточена в породообразующих минералах [1], что делает возможным их использование при решении различных задач метаморфической петрологии (при определении *P-T*-условий метаморфизма, выявлении последовательности метаморфогенного минералообразования и др.). Проведенное к настоящему времени исследование РЗЭ в минералах позволяет утверждать, что наиболее информативными минералами, отражающими влияние характера метаморфизма на содержание и распределение РЗЭ, являются гранаты, клинопироксены, амфиболы и биотиты. Определения РЗЭ в минералах были выполнены методом ИНАА (ИГГД РАН, аналитик А. А. Кольцов) и на ионном микрозонде (ИМИ РАН, аналитики С. Г. Симакин и Е. В. Потапов).

**Гранаты.** Общей закономерностью в поведении РЗЭ в метаморфических гранатах является понижение в содержании тяжелых РЗЭ с повышением степени метаморфизма (рис. 1). Гранаты из кислых пород обладают отрицательной *Eu*-аномалией, степень которой возрастает с увеличением температуры их образования. Гранаты из высокотемпературных фаций, как правило, не зональны по РЗЭ, за исключением краевых частей зерен, измененных в породах, испытавших регрессивный метаморфизм. Хорошо выражена зональность в гранатах метасоматических пород, сформировавшихся на завершающей стадии метаморфического цикла. Она свидетельствует не только об отсутствии равновесия, но и о большей скорости протекания реакций в регрессивную стадию по сравнению с главной прогрессивной стадией. Кроме того, метасоматические гранаты обеднены РЗЭ и характеризуются отсутствием *Eu*-аномалии. Последнее отмечается в основном и во всех метаморфических гранатах с повышенной кальциево-стью. Общая картина спектров распределения РЗЭ в гранатах состоит в увеличении количества РЗЭ от легких к тяжелым.

**Клинопироксены.** Исследование геохимии клинопироксенов показало сильную зависимость распределения РЗЭ от состава и генезиса исходных пород, а также отличие метаморфических клинопироксенов от клинопироксенов магматического происхождения. В эклогитах и эклогитоподобных породах спектр распределения РЗЭ в клинопироксене имеет крутой отрицательный наклон в области тяжелых РЗЭ (рис. 2), что является основным отличием от клинопироксенов из других метаморфических пород (гранатовых амфиболитов и амфиболитов). В породах двупироксен-амфибол-плаггиоклазового состава из нюрндуханского комплекса в Северо-Западном Прибайкалье распределение РЗЭ имеет необычную форму: наблюдается понижение в содержании как легких, так и тяжелых РЗЭ наряду с отрицательной *Eu*-аномалией (рис. 3). Эта аномалия может быть объяснена совместной равновесной кристаллизацией клинопироксена и плаггиоклаза.

**Амфиболы.** Геохимия РЗЭ в амфиболах зависит в первую очередь от степени метаморфизма, что было продемонстрировано на примере нюрндуханского комплекса: чем выше температура метаморфизма, тем больше РЗЭ в амфиболах [2]. Амфиболы из метасоматитов характеризуются пониженными содержаниями РЗЭ. Высокотемпературные амфиболы сохраняют, как правило, форму распределения РЗЭ во вмещающих породах с общим уменьшением от легких к тяжелым.

Важной особенностью метаморфических минералов является их способность в некоторых случаях наследовать спектры распределения от минералов, по которым они развиваются. Это лучше всего видно на примере граната и амфибола – спектры распределения РЗЭ в гранатах обычно имеют положительный наклон, в амфиболах – отрицательный. Однако в метасоматических породах нередко можно наблюдать полное совпадение спектров амфибола и граната и наоборот, что позволяет установить порядок минералообразования в каждом конкретном случае [2].

Гранат/Хондрит

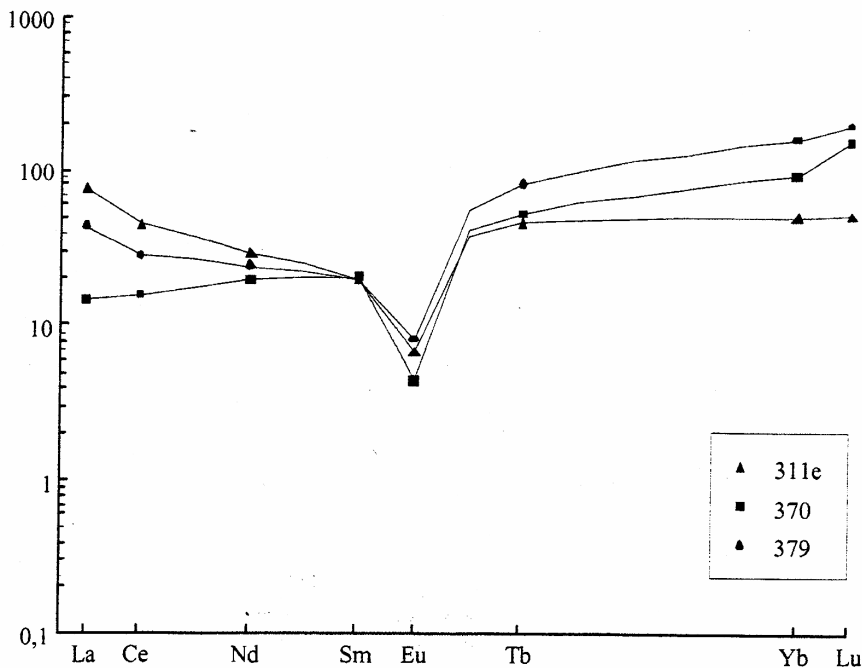


Рис. 1. Распределение РЗЭ в гранатах из гнейсов беломорского комплекса (по данным ИНАА).  
Температура метаморфизма повышается от образца 379 к образцам 370 и 311е.

**Биотиты.** Изучение геохимии биотитов является наиболее трудным не только из-за малого содержания в них РЗЭ, но и благодаря быстрому приспособлению состава биотитов к новым  $P-T$ -условиям и флюидному режиму [3]. На распределение РЗЭ, помимо температуры метаморфизма, влияет щелочность среды, при повышении которой биотиты обогащаются Eu [4].

**Обсуждение результатов.** Закономерное распределение редких и РЗЭ между сосуществующими минералами свидетельствует о достижении равновесия между ними или позволяет оценить степень приближения к равновесию при использовании минералов для определения  $P-T$ -условий метаморфизма и геохронологических построений [1 и др.]. Более низкая подвижность РЗЭ по сравнению с главными элементами доказана рядом исследований [5, 6 и др.]. Были отмечены случаи, когда хорошо выраженная по главным элементам регрессивная зональность в гранате сосуществует с сохранившейся прогрессивной зональностью по РЗЭ [5]. Эта особенность позволяет изучать более ранние этапы метаморфизма, предшествующие переходу от пика метаморфизма к регрессивному этапу. Используя экспериментально определенные для некоторых РЗЭ коэффициенты диффузии, возможно оценить продолжительность этапа метаморфизма.

Минералы высокотемпературных фаций чаще достигают равновесия: в клинопироксенах и амфиболах гранулитовой фации спектры распределения РЗЭ близки к спектрам вмещающих пород, а коэффициенты распределения между сосуществующими минералами одинаковы для сходных по составу групп пород. Спектры распределения РЗЭ в минералах из низко- и умереннобарических комплексов мало зависят от давления, но сильно реагируют на температуру [6], в то время как для высокобарических комплексов влияние давления существенно.

Важное значение имеет величина ионных радиусов и зарядов при заполнении РЗЭ кристаллохимических позиций. Увеличение кальциевости гранатов ведет к постепенному снижению, а затем и исчезновению отрицательной Eu-аномалии, поскольку вхождение крупных ионов  $Ca^{2+}$  облегчает возможность заполнения позиции более крупными по сравнению с другими РЗЭ ионами  $Eu^{2+}$ .

**Заключение.** Исследование геохимии РЗЭ в метаморфических минералах позволяет сделать следующие выводы:

1. Главное влияние на распределение РЗЭ в метаморфических минералах оказывает температура метаморфизма

Минерал/ Хондрит

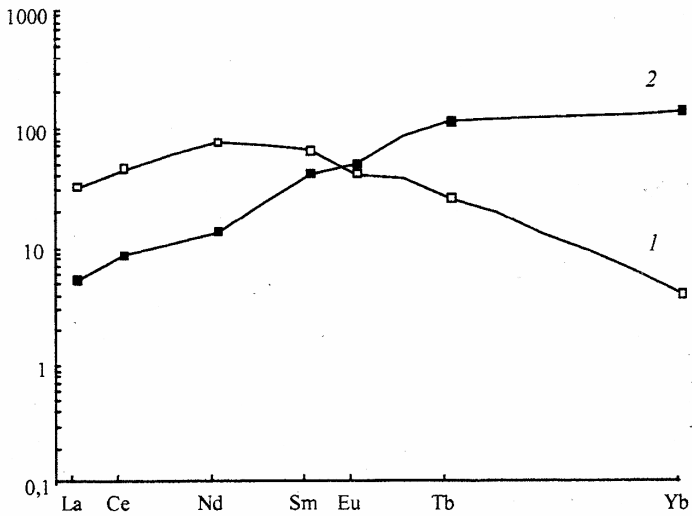


Рис. 2. Распределение РЗЭ в клинопироксене (1) и гранате (2) из эклогитоподобной породы лапландского комплекса (образец 632, по данным ИНАА).

Клинопироксен/Хондрит

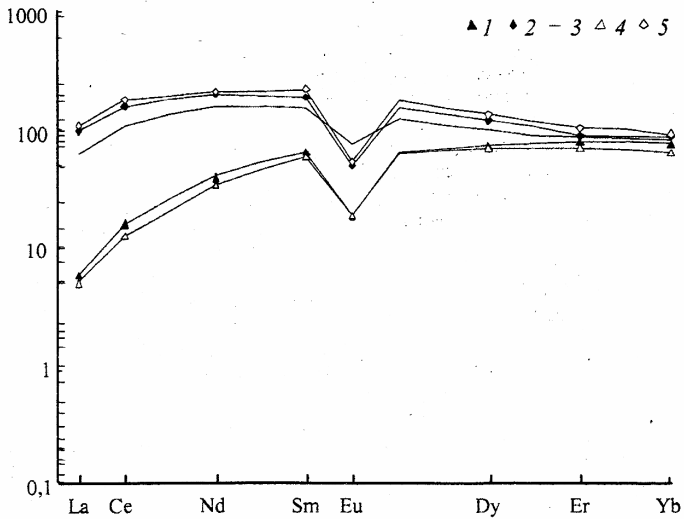


Рис. 3. Распределение РЗЭ в клинопироксенах из двупироксеновых ортосланцев нюрундуканского комплекса (по данным ионного микрозонда).

Образцы: 1 - 135 (центр), 2 - 419 (центр), 3 - 411, 4 - 135 (край), 5 - 419 (край).

2. Минералы заключительной регрессивной стадии метаморфизма отличаются от минералов прогрессивного этапа хорошо выраженной зональностью по РЗЭ, более низким общим содержанием РЗЭ и неустойчивой формой спектров распределения РЗЭ. Все эти признаки подчеркивают повышенную скорость кристаллизации минералов, большое количество флюидов и быстрое изменение их состава на регрессивном этапе метаморфизма.

3. Отрицательная Eu-аномалия характерна для гранатов из пород кислого состава и отсутствует, как правило, в гранатах из высококальциевых пород и метасоматитов.

4. Способность наследования спектров распределения РЗЭ вторичным минералом от более раннего открывает возможность определения последовательности метаморфогенного минералообразования.

## Summary

*Skublov S. G., Drugova G. M.* Rare earth elements distribution in metamorphic minerals.

It is found that the REE distribution in garnet, clinopyroxene, amphibole and biotite are mainly influenced by metamorphism temperature, host rock genesis and the character of mineral paragenesis.

## Литература

1. *Kretz R., Campbell J. L., Hoffman E. L.* et al. Approaches to equilibrium in the distribution of trace elements among the principal minerals in a high-grade metamorphic terrane // *J. Metamorphic Geol.* 1999. Vol. 17. 2. *Другова Г. М., Скублов С. Г.* Геохимия редкоземельных элементов в метаморфических амфиболах // *Геохимия.* 2003. № 2. 3. *Скублов С. Г., Другова Г. М.* Геохимия редкоземельных элементов в метаморфических биотитах // *Геохимия.* 2004. № 3.
4. *Bea F., Pereira M. D., Stroh A.* Mineral / leucosome trace-element partitioning in a peraluminous migmatite (a laser ablation-ICP-MS study) // *Chem. Geol.* 1994. Vol. 117. 5. *Ayres M., Vance D.* Constraints on the thermal evolution of the Indian Himalaya from manganese and erbium distributions in metapelitic garnets // *Mineral. Mag.* 1994. Vol. 58A.
6. *Košler J.* Laser-ablation ICPMS study of metamorphic minerals and processes // *Laser-ablation ICPMS in the Earth Sciences. Mineral. Ass. Can. Short Course* 29. 2001.

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2003 г.