

## О ПОВЕДЕНИИ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РАННЕЙ СЕРПЕНТИНИЗАЦИИ УЛЬТРАМАФИТОВ

© 2012 г. И. С. Чашухин, Н. В. Чередниченко, Н. Н. Адамович

Ранее на примере гарцбургитов Кемпирсайского массива было изучено поведение редкоземельных элементов в ходе регрессивной петельчатой серпентинизации альпинотипных ультрамафитов [4]. Показано, что при степени серпентинизации (DS) 70–80 мас. % концентрация РЗЭ снижается примерно на порядок по сравнению с несерпентинизированными породами, исчезает Eu-минимум, спектр приобретает U-образную форму, близкую к форме спектра океанической воды, ответственной за серпентинизацию ультрамафитов Кемпирсайского массива [7]. Тем не менее, до сих пор окончательных выводов о степени подвижности редких элементов в ходе серпентинизации либо нет [8], либо утверждается их инертность [9], либо вопрос вообще не обсуждается [например, 2, 10].

В связи с этим мы продолжили изучение поведения редких элементов при ранней серпентинизации ультрамафитов. С целью оценки влияния собственно ранней серпентинизации на концентрацию и соотношение редких элементов было необходимо учесть воздействие степени частичного плавления исходного верхнемантийного вещества (состава пород), формационной принадлежности ультрамафитов и соотношения литостатического и водного давлений в ходе серпентинизации, то есть фаций серпентинизации.

**Образцы.** Для решения поставленной цели были продолжено изучение керна скв. 766 в западном блоке Кемпирсайского массива. Выбор скважины обусловлен двумя обстоятельствами. Во-первых, её керн позволил изучить геохимию редких элементов как в продуктах океанической серпентинизации (в интервале 910–1170 м), так и метеорной (выше 910 м), во-вторых, постоянство рассчитанного на сухой остаток химического состава океанических гарцбургитов (в 116 образцах содержание  $Al_2O_3$  равно 0.7–1.2, CaO равно 0.6–1.1 мас. %) позволило исключить влияние первичного состава на поведение редких элементов. Помимо ранее изученных 4-х образцов [4] дополнительно проанализировано 10 образцов, характеризующих разные фации ранней серпентинизации альпинотипных гарцбургитов Урала в интервале от 12 до 100 мас. % [3, рис. 5–7].

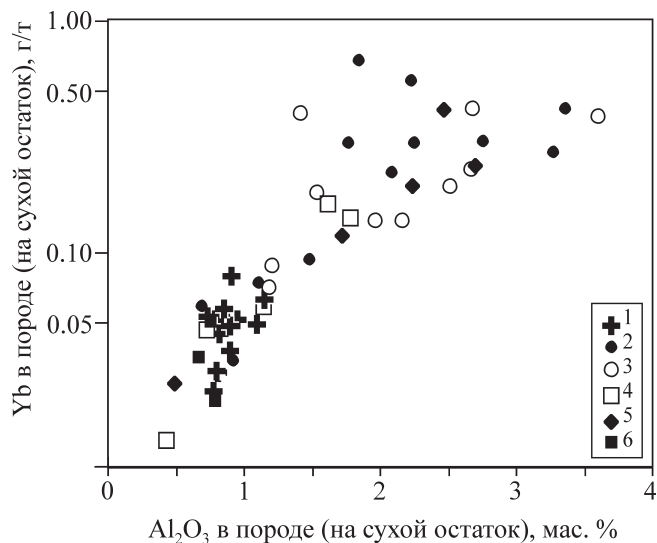
Для выяснения влияния формационной принадлежности на поведение редких элементов в ходе ранней серпентинизации изучены 4 образца из керна скважины 7529, вскрывшей непрерывный переход от в сильной степени серпентинизирован-

ных до свежих дунитов Нижнетагильского массива Платиноносного пояса Урала [3, рис. 3]. С учетом образца нацело серпентинизированного дунита из керна скв. 7528 того же массива, данная выборка характеризует все фации ранней серпентинизации дунитов Платиноносного пояса Урала в интервале от 17 до 100 мас. % [6] (в расчете на железистость оливина 8%).

Поведение РЗЭ в пределах одной фации серпентинизации изучено на примере гарцбургит-лерцолитовых серий (ГЛС) массивов Северный, Средний, Узянский Крака и Нурали, а также гарцбургитов Алапаевского массива. Здесь изучено 38 образцов.

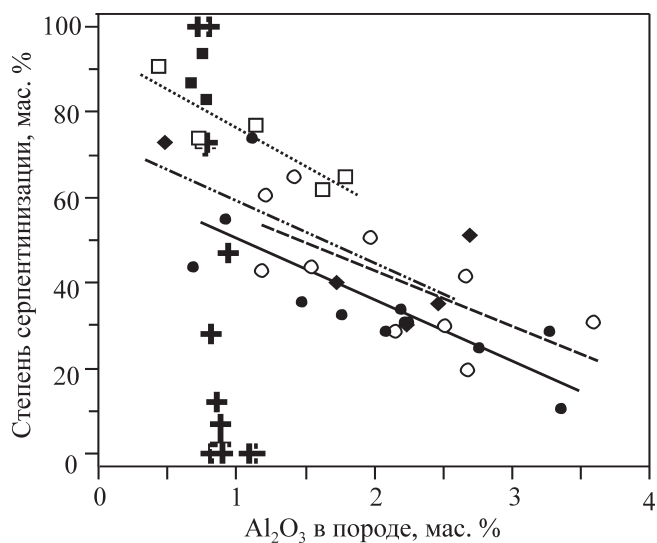
**Методы исследования.** Анализы выполнены в лаборатории физико-химических методов исследования Института геологии и геохимии УрО РАН. Лаборатория аккредитована в системе СААЛ на техническую компетентность при проведении количественного химического анализа горных пород и минералов различного состава (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.516761). Анализы выполнены с использованием разных ICP-MS масс-спектрометров – Elan 6100 DRC и Elan 9000 – и различных способов разложения. Сопоставление результатов анализа одних и тех же образцов свидетельствуют о хорошей воспроизводимости и точности выполненных анализов: коэффициент корреляции между аналитическими данными в большинстве случаев варьирует от 0.8 до 0.9; анализы, как правило, концентрируются в поле 10% (отн.) отклонений от линии равных содержаний.

**Результаты и обсуждение.** Влияние частичного плавления на состав РЗЭ в альпинотипных ультрамафитах в мировой литературе изучено давно и используется для количественно оценки степени процесса. На рис. 1 приведено сопоставление концентрации наиболее инертного редкоземельного элемента – иттербия – с массовой долей глинозема в породе, которая, как известно, хорошо коррелирует со степенью частичного плавления. Прямая корреляция Yb с Al (глиноземом) свидетельствует об их геохимическом сродстве и подтверждает некогерентное поведение обоих элементов в ходе частичного плавления. С другой стороны, содержания глинозема и степень ранней серпентинизации ГЛС из уральских массивов тесно связаны: в координатах “ $Al_2O_3$ –степень серпентинизации” эти серии образуют субпараллельные линии; увеличение содержания глинозема в породе на 1 мас. % снижает



**Рис. 1.** Соотношения массовых долей иттербия и глинозема в ультрамафитах Урала.

1 – гарцбургиты Кемпирсайского массива, западный блок, скв. 766; 2–5 – гарцбургит-лерцолитовые серии: 2–4 – массивов Крака (2 – Северного, 3 – Среднего, 4 – Узянского), 5 – Нурали; 6 – гарцбургиты Алапаевского массива.



**Рис. 2.** Соотношения степени серпентинизации и содержанием глинозема в породе в расчете на сухой остаток в ультрамафитах Урала.

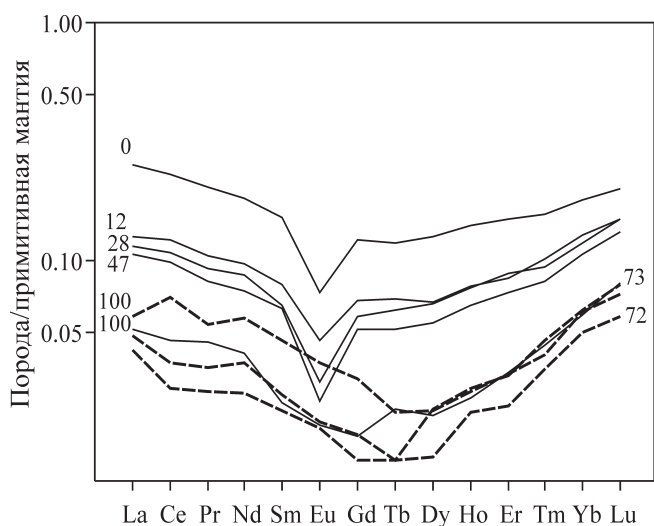
Условные обозначения как на рис. 1. Линии соответствуют среднearифметическим значениям. Серое поле – состав гарцбургитов западного блока Кемпирсайского массива.

степень серпентинизации на 15 мас. % (рис. 2). Эти данные хорошо согласуются с ранее установленными соотношениями извести и степени серпентинизации в тех же массивах – рост содержания извести в породе на 1 мас. % уменьшает степень серпентинизации на 20 мас. % [3, рис. 8]. Каждая линия зависимости характеризует одну фацию серпентинизации,

то есть соотношение давлений общего и водного. Таким образом, в уральских ГЛС зафиксированы фации серпентинизации от относительно сухой в Северном Крака до более мокрой – в Узянском Крака, фации Нуралинского и Среднекракинского массивов занимают промежуточное положение. Процесс ранней серпентинизации проходит в значительном температурном диапазоне – от первых сотен градусов до комнатных. Можно предполагать, что фация отражает температуру процесса серпентинизации – чем маловоднее фация, тем ниже температура. Как правило, на поверхности массивов обнажается одна, реже две фации. Полный набор фаций можно видеть только в керне глубоких скважин, например, скв. 766 Кемпирсайского массива, вскрывшей весь диапазон степени ранней океанической серпентинизации от полной до нулевой (рис. 2).

Сочетание, с одной стороны, обратной зависимости степени серпентинизации от содержания глинозема в гарцбургит-лерцолитовых сериях и прямой – между концентрациями в них глинозема и иттербия, с другой, может привести к ложному выводу о том, что при ранней серпентинизации ГЛС происходит вынос РЗЭ. На самом деле, здесь зафиксировано поведение иттрия в пределах одной фации серпентинизации, степень которой контролируется первичным составом ультрамафитов, т. е. масштабами частичного плавления исходного вещества верхней мантии.

Влияние собственно ранней серпентинизации на поведение редких элементов в альпинотипных ультрамафитах во всем диапазоне фаций можно



**Рис. 4.** Нормированные на примитивную мантию (Sun, McDonough, 1989) спектры РЗЭ в гарцбургитах Кемпирсайского массива.

Тонкие сплошные линии – продукты океанической серпентинизации, жирные штриховые – то же, но подверженные последующему воздействию метеорных вод. Цифры – степень ранней петельчатой серпентинизации

видеть на примере гарцбургитов из керна той же скв. 766 (рис. 3). В предыдущей работе были использованы данные по гарцбургитам, испытавшим постсерпентиновое воздействие метеорных вод [4]. В настоящей работе основной упор сделан на изучении поведения РЗЭ в незатронутых метеорными водами серпентинизированных океанических гарцбургитах. Воздействие океанической воды на спектры и концентрации РЗЭ очень неравномерно. В группе относительно маловодных фаций ( $DS = 12-47\%$ ) концентрация РЗЭ в 1.5–2 раза ниже, чем в свежих гарцбургитах, но мало зависит от степени серпентинизации внутри группы; форма спектра остается подобной спектру свежего гарцбургита. Скачок происходит при серпентинизации более 70 мас. %: помимо дальнейшего снижения концентраций РЗЭ резко меняется форма спектров (Eu-минимум смещается вправо, в область Gd-Dy) и становится подобной спектру океанической воды [11]. Здесь прослеживается некоторая аналогия поведения РЗЭ с поведением петрогенных элементов – начиная с 70–80 мас. % серпентинизации статистически наблюдается нарушение первичных соотношений породообразующих компонентов [5]. По-видимому для достижения этих значений серпентинизации необходимо выравнивание литостатического и водного давлений, при котором возрастает подвижность химических элементов. Последующее увеличение степени серпентинизации на форму спектров и концентрацию РЗЭ влияния не оказывает.

На рис. 4 показаны главные тренды, контролирующие поведение иттербия в ультрамафитах – степень частичного плавления и степень ранней серпентинизации альпинотипных ультрамафитов.

Поведение РЗЭ в полифациальных дунитах Нижнетагильского массива показано на рис. 5. Характер изменения формы спектров и концентраций РЗЭ близок гарцбургитам Кемпирсайского массива. Отличия: существенно больший диапазон концентраций РЗЭ в интервале степени серпентинизации от 0 до 100 мас. % и подобные спектры РЗЭ вплоть до 70-% серпентинизации.

Ранняя серпентинизация существенно влияет на поведение других редких элементов. Оно выражено в привносе Ba в гарцбургитах Кемпирсайского массива, Nb и Ta – в дунитах Нижнетагильского массива. Остальные редкие элементы (за исключением Li и Sr в гарцбургитах) в разной степени выносятся (рис. 6).

**Выводы.** Полученные данные позволяют существенно скорректировать ранее сформулированные выводы [4].

1. Поведение РЗЭ в альпинотипных ультрамафитах есть результат сочетания двух процессов – частичного плавления вещества верхней мантии и последующей ранней петельчатой серпентинизации. Поэтому при геологической интерпретации дан-

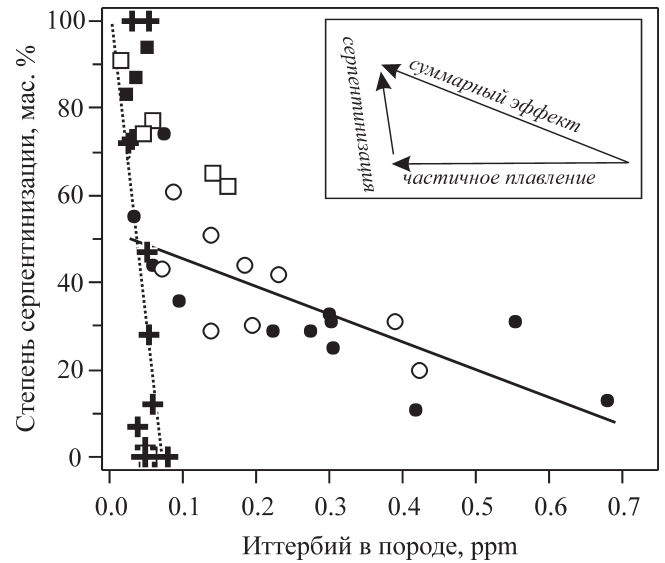


Рис. 3. Соотношения степени серпентинизации и концентрации иттербия в ультрамафитах Урала.

Условные обозначения как на рис. 1. Проведена линия среднеарифметических значений для всей выборки.

ных по геохимии редких элементов в ультрамафитах следует иметь в виду, что они характеризуют не только первичную историю ультрамафитов, но также соотношение общего и водного давлений в ходе серпентинизации [1].

2. Влияние каждого из этих процессов неоднозначно. При низкой степени частичного плавления роль серпентинизации практически сведена к нулю. Однако, ранняя серпентинизация существенно деплетированных гарцбургитов офиолитовых комплексов при достижении степени более 70 мас. % существенно – в 6–7 раз – снижает сумму РЗЭ и меняет форму спектров, т. е. соотношения элементов, используемые для оценки степени частичного

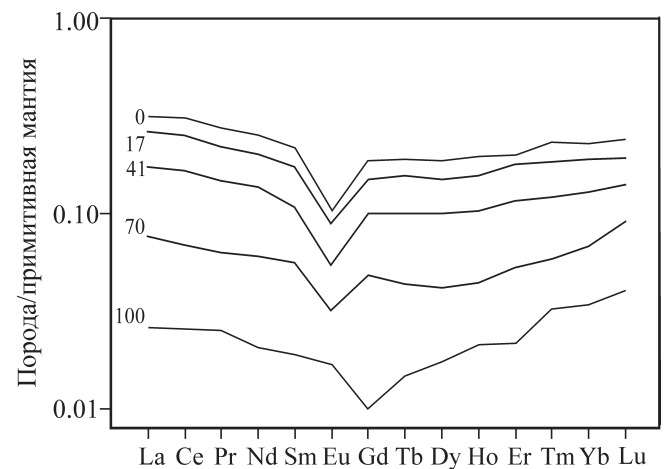
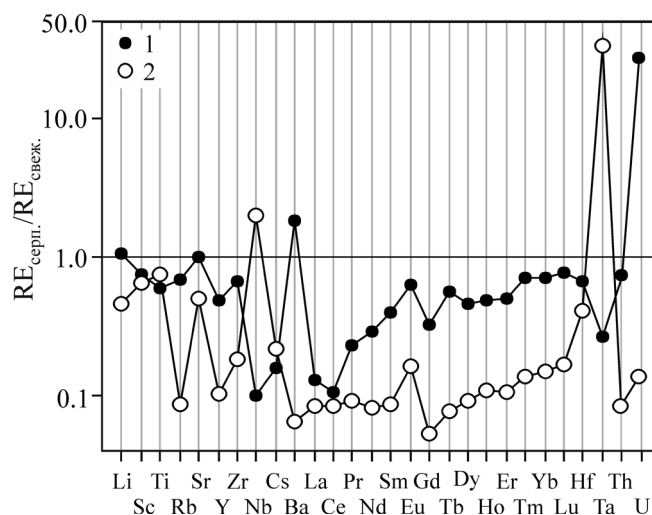


Рис. 6. Нормированные на примитивную мантию спектры РЗЭ в дунитах Нижнетагильского массива.

Цифры – степень ранней петельчатой серпентинизации.



**Рис. 6.** Величины отношений концентраций редких элементов в нацело серпентинизированных и в несерпентинизированных ультрамафитах.

1 – гарцбургиты западного блока Кемпирсайского массива, скв. 766; 2 – дуниты Нижнетагильского массива, скв. 7529

плавления и роли последующих метасоматических преобразований.

3. Существенных различий в поведении редких элементов при ранней серпентинизации ультрамафитов альпинотипных и зональных комплексов не выявлено.

4. Масштаб влияния метеорной серпентинизации на содержания РЗЭ в ультрамафитах в 3–4 раза больше океанической.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН, программа № 21 “Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология”, проект “Изотопно-геохимическая эволюция вещества мантии при формировании палеоокеанических структур Земли” и Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 12-05-00586 “Кристаллохимия и содержание воды в номинально безводных силикатах альпинотипных ультрамафитов складчатых обла-

стей в связи с их хромитонностью (на примере Урала)”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вотяков С.Л., Чащухин И.С., Быков, В.Н. Мионов А.Б. Поведение ионов железа в минералах ультрабазитов в процессе серпентинизации // Геохимия. 1992. № 11. С. 1452–1462.
2. Горнова М. А., Кузьмин М. И., Гордиенко И. В. и др. Геохимия и петрология Эгингольского перидотитового массива: реставрация условий плавления и взаимодействия с бонинитовым расплавом // Литосфера. 2010. № 5. С. 20–36.
3. Чащухин И.С., Вотяков С.Л. Кристаллохимия минералов серпентиновой группы как индикатор процесса ранней серпентинизации ультрамафитов. II. Фацция и источник серпентинизирующих вод // Геохимия. 2005. № 10. С. 1047–1061.
4. Чащухин И.С., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П. О влиянии ранней серпентинизации на геохимию редкоземельных элементов в гарцбургитах Кемпирсайского массива // Екатеринбург: ИГГ УрО РАН., 2003. С. 246–249.
5. Штейнберг Д.С., Чащухин И.С. Серпентинизация ультрабазитов. М.: Наука, 1977. 312 с.
6. Штейнберг Д.С., Чащухин И.С. О режиме флюидов при ранней серпентинизации дунитов // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238, № 2. С. 437–440.
7. Штейнберг Д.С., Чащухин И.С., Ковальчук А.И. Океанические воды – агент серпентинизации в альпинотипных ультрамафитах континентов // Докл. АН СССР. 1991. Т. 320, № 3. С. 713–715.
8. Mevel K. Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges // Geoscience. 2003. № 335. P. 825–852.
9. Niu Y. Bulk-rock major and trace element compositions of abyssal peridotites: Implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath mid-ocean ridges // J. Petrology. 2004. V. 45, № 12. P. 2423–2458.
10. Spadea P., Zanetti A., Vannucci R. Mineral chemistry of ultramafic massifs in the Southern Uralides orogenic belt (Russia) and the petrogenesis of the Lower Paleozoic ophiolites of the Uralian Ocean / Ophiolites in the Earth History. Geological Society, London, Special Publications. 2003. V. 218. P. 567–596.
11. Taylor S.R., McLennan S.M. The Continental Crust: Ist Composition and Evolution / Oxford: Blackwell. 1985. 312 p.