

ПОВЕДЕНИЕ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В УЛЬТРАМАФИТАХ УРАЛА: I. РЕГРЕССИВНЫЙ ДОСЕРПЕНТИНОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ

© 2013 г. И. С. Чашухин, Н. В. Чередниченко, Н. Н. Адамович

Статья продолжает изучение геохимии редких элементов в дунит-гарцбургит-лерцолитовых комплексах Урала [10] и посвящена их поведению при трансформации шпинелевой фации в плагиоклазовую и в ходе метаморфической дифференциации продуктов частичного плавления.

Природа плагиоклазовых лерцолитов. В мировой литературе обсуждаются два вероятных механизма образования плагиоклазовых лерцолитов. Первый, основанный на экспериментальных данных [11, 14], предполагает, что плагиоклазовые лерцолиты есть продукт декомпрессии шпинелевых лерцолитов, без участия процессов частичного плавления. В общем виде процесс описывается реакцией: клинопироксен + ортопироксен + шпинель → анортит + форстерит [8, 9, 13, 17, 18]. Второй возможный механизм допускает двухэтапное формирование плагиоклазовых лерцолитов. На первом этапе в ходе частичного плавления верхнемантийного пиролита образуются гарцбургиты, на втором происходит их рефертилизация под действием захороненных, либо проникающих гипотетических базитовых расплавов [12, 16, 19, 20]. В противоположность декомпрессионной модели, этот процесс существенно искажает первичные соотношения химических компонентов, в том числе редких.

На Урале плагиоклазовые лерцолиты наиболее развиты в Нуралинском массиве, где они занимают около 40% площади выходов ультрамафитов. Детальное изучение петрохимии ультрамафитов массива (более 110 полных силикатных анализов образцов, равномерно отобранных по хребту Большой Нуралы) показало, что соотношения главных петрогенных компонентов – Al_2O_3 , CaO, MgO, FeO* – в шпинелевых и плагиоклазовых разностях ультрамафитов одинаковы; они нарушаются только в узкой приконтактной зоне мощностью около 100 м и имеют, по-видимому, метасоматическую природу [8].

Для выяснения поведения редких элементов были проанализированы 24 образца лерцолитов из массивов Нуралы и Средний Крака (14 – шпинелевых и 10 – плагиоклазовых) и один образец плагиоклаза ($An = 77\%$) из лерцолита Нуралинского массива (табл. 1). Как и ожидалось, спектр плагиоклаза характеризуется мощной положительной аномалией Eu (+3.1; нормирование на примитивную мантию по [15], рис. 1а), обусловленной высокой совместимостью этого элемента с плагиоклазом.

В породах, как правило, наблюдается отрицательная аномалия Eu. Расчеты её величины по всей выборке лерцолитов показали, что она не зависит от присутствия плагиоклаза в ультрамафитах, а коррелирует со степенью частичного плавления (например, с содержанием Al_2O_3 в породе), варьируя от 0.9 в слабо истощенных лерцолитах до 0.3–0.4 в наиболее деплетированных (рис. 1б). Из приведенных данных следует: а) появление Eu-аномалии в лерцолитах предшествовало появлению плагиоклаза; б) в ходе частичного плавления Eu становится менее когерентным по отношению к реститу и постепенно перераспределяется в выплавки.

Для сопоставления концентраций редких элементов в шпинелевых и плагиоклазовых лерцолитах изучены два образца. Шпинелевый лерцолит 7166, судя по составу хромшпинели и сосуществующих пироксенов (концентрация Al_2O_3 в хромшпинели 48.0, в клинопироксене 5.0, в ортопироксене – 3.8 мас. %, содержание CaO в породе 1.91 мас. %), представлен продуктом частичного плавления. Лерцолит 7235 (концентрация Al_2O_3 в хромшпинели 31, в клинопироксене 3.8%, в ортопироксене – 3.4 мас. %, содержание CaO в породе 2.64 мас. %) испытал полную трансформацию в условиях плагиоклазовой фации и слагающие его минералы достигли окончательного равновесия [7]. Концентрации редких элементов, прежде всего, Eu, а также несовместимых высокозарядных и крупных литофильных элементов в обоих образцах оказались практически идентичны (рис. 1в). Некоторое увеличение содержания тяжелых РЗЭ (Tb–Yb) в плагиоклазовом лерцолите по сравнению со шпинелевым отражает разницу в степени частичного плавления – нулевую в плагиоклазовом лерцолите и 10-% – в шпинелевом.

Е. Рампоне с соавторами на примере лерцолитов Внешних Лигурид (Италия) провела расчет балансов Sr, Zr, Y, V, Sc, Ti между минералами и показала, что их перераспределение при трансформации шпинелевых лерцолитов в плагиоклазовые происходит в закрытой системе, без участия внешнего источника [18]. Таким образом, итальянские и уральские данные исключают явления рефертилизации при образовании плагиоклазовых лерцолитов.

Метаморфическая дифференциация продуктов частичного плавления верхнемантийного вещества. Многолетнее изучение хорошо обнаженных полярноуральских массивов показало

Таблица 1. Концентрации редких и некоторых петрогенных элементов в ультрамафитах массивов Войкаро-Сыньинского и Нурали

№ обр.	6012	6013	7166	7203	7235	
порода	лерцолит шпинелевый	дунит	лерцолит шпинелевый	гарцбургит	лерцолит плаггиоклазовый	плаггиоклаз
Редкие элементы, г/т						
Li	0.006	0.005	0.913	0.000	1.831	1.981
Sc	18.183	15.373	10.153	8.517	12.194	2.377
Ti	32.358	21.446	211.481	10.078	234.764	189.953
Rb	1.869	2.187	0.232	0.556	0.735	2.965
Sr	1.558	0.680	1.995	0.629	2.713	25.206
Y	1.534	0.457	1.152	0.163	1.674	0.701
Zr	5.379	3.445	0.977	1.307	1.258	1.847
Nb	0.127	0.075	0.112	0.024	0.086	0.116
Cs	0.017	0.006	0.005	0.032	0.038	0.066
Ba	11.005	4.420	4.258	0.824	9.749	29.170
La	0.320	0.158	0.061	0.010	0.079	0.238
Ce	0.679	0.342	0.166	0.027	0.195	0.516
Pr	0.092	0.037	0.024	0.004	0.025	0.051
Nd	0.369	0.151	0.144	0.017	0.160	0.272
Sm	0.104	0.038	0.064	0.005	0.078	0.086
Eu	0.038	0.014	0.023	0.002	0.036	0.104
Gd	0.145	0.052	0.134	0.007	0.164	0.122
Tb	0.030	0.010	0.027	0.001	0.038	0.019
Dy	0.231	0.067	0.204	0.009	0.300	0.139
Ho	0.054	0.014	0.048	0.002	0.071	0.028
Er	0.173	0.048	0.138	0.007	0.237	0.087
Tm	0.027	0.008	0.024	0.001	0.039	0.013
Yb	0.200	0.045	0.169	0.009	0.266	0.107
Lu	0.035	0.007	0.030	0.001	0.046	0.014
Hf	0.677	0.483	0.040	0.105	0.062	0.062
Ta	0.006	0.004	0.014	0.001	0.009	0.008
W	0.034	0.010	0.550	0.049	0.299	0.065
Pb	6.934	3.496	1.044	0.018	0.949	2.052
Th	0.029	0.006	0.013	0.000	0.032	0.047
U	0.087	0.117	0.010	0.150	0.020	0.039
Компоненты, мас. %						
Al ₂ O ₃	1.48	0.79	1.99	0.49	2.78	33.26
CaO	1.27	0.10	1.91	0.32	2.64	16.02
Na ₂ O	0.091	0.332	–	0.027	–	2.63
ппп	1.01	2.08	6.34	9.96	3.52	–
σ, г/см ³	3.20	3.25	2.83	2.67	3.08	–
DS	9	5	45	68	20	–
Mt	0.05	0.03	0.11	0.18	0.19	–

Примечание. Массивы: обр. 6012–6013 – Войкаро-Сыньинский, 7166–7235 – Нуралинский. Привязка: 6012, 6013 – левый борт долины р. Правая Пайера; 7166–7235 – хребет Б. Нурали; 7166 – южный отрог, 7203 – подножье хребта, 7235 – гребень хребта, в 400 м к югу от высоты 752.4 м. σ – плотность, г/см³; DS – степень серпентинизации; Mt – содержание ферромагнитного компонента в расчете на магнетит.

обилие дискордантных к структуре гарцбургитов жил, шлиров и тел метасоматических дунитов, как правило, сопровождаемых жилами ортопироксенитов, вебстеритов, реже хромититов [1, 2]. Данные структурного картирования, тесная пространственная связь дунитов и пироксенитов, близость их количественных соотношений к пропорции оливина и ортопироксена во вмещающем гарцбургите позволили высказать предположение о том, что эти породы являются продуктом синкинематической

метаморфической дифференциации гарцбургитов [3, 4, 5, 6].

Геологические наблюдения подтверждаются результатами изучения состава сосуществующих минералов в гарцбургитах и в постгарцбургитовых дунитах. Если в продуктах частичного плавления прослеживаются закономерные изменения состава хромшпинели, пироксенов и оливина в ряду лерцолит-гарцбургит-дунит, обусловленные удалением легкоплавких компонентов из пиролита ман-

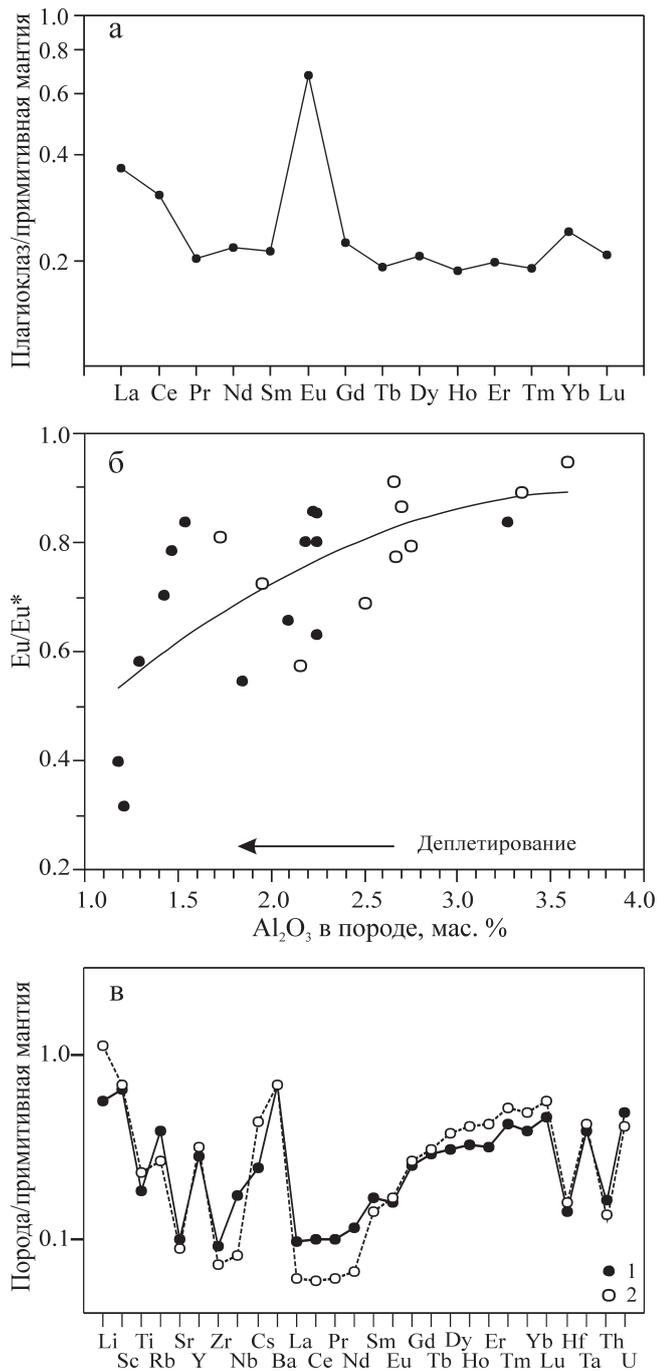


Рис. 1. Поведение редких элементов при трансформации шпинелевых лерцолитов в плагиоклазовые.

а – нормированный на примитивную мантию [15] спектр РЗЭ плагиоклазового лерцолита Нуралинского массива, обр. 7235; б – зависимость величины Eu-аномалии от степени частичного плавления в шпинелевых и плагиоклазовых лерцолитах массивов Нуралы и Средний Крак; в – Спайдер-диаграммы шпинелевого (1) и плагиоклазового (2) лерцолитов Нуралинского массива.

тии с увеличением степени плавления и подтвержденные экспериментами в системе MgO-SiO₂-Al₂O₃-Cr₂O₃-CaO, то в постгарцбургитовых дунитах эти закономерности нарушаются и, как правило,

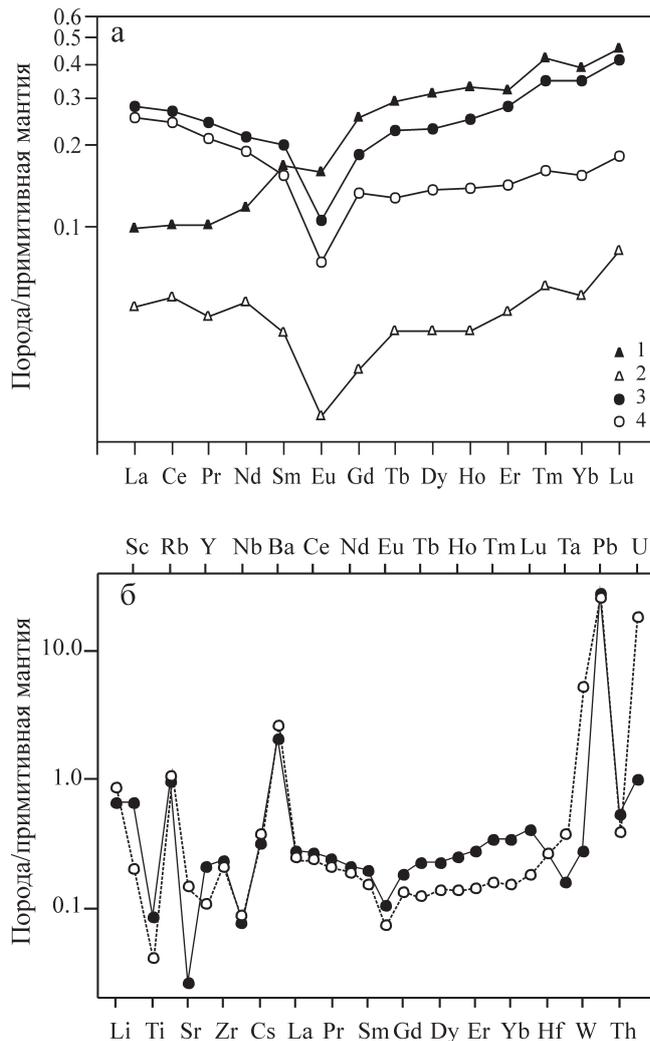


Рис. 2. Поведение редких элементов при метаморфической дифференциации ультрамафитов.

а – нормированный на примитивную мантию спектры РЗЭ шпинелевого лерцолита (1) и гарцбургита (2) Нуралинского и несерпентинизированных шпинелевого лерцолита (3) и аполерцолитового дунита (4) Войкаро-Сыньинского массива; б – спайдер-диаграммы лерцолита и аполерцолитового дунита Войкаро-Сыньинского массива. Условные обозначения на рис 2а.

состав аксессуарной хромшпинели и оливина наследует состав этих фаз в исходном гарцбургите [7].

Геохимия редких элементов в целом подтверждает поведение петрогенных элементов. Для исключения влияния ранней серпентинизации [10] были проанализированы два практически свежих образца Войкаро-Сыньинского массива – лерцолит 6012 и дунит 6013 из секущей полосчатость лерцолита жилы (табл. 1). Несмотря на разительную разницу в этих образцах содержаний главных концентраторов некогерентных элементов – клино- и ортопироксенов (соответственно, 5 и 27 мас. % в обр. 6012 и 1 и 0 мас. % – в обр. 6013) – их содержания различают-

ся незначительно (как правило, не более 2–3 раз – рис. 2) и, вероятно, компенсируются повышенными содержаниями редких элементов в ортопироксенидах и вебстеритах, постоянно сопровождающих тела и жилы дунитов. В то же время, в продуктах частичного плавления различия концентраций большинства редких элементов, прежде всего РЗЭ, при близкой степени серпентинизации могут достигать 20 раз (Нуралинский массив, лерцолит 7166 и гарцбургит 7203 – рис. 2а). Приведенные данные свидетельствуют о том, что формирование апогарцбургитовых дунитов и пространственно связанных с ними пироксенитов Войкаро-Сыньинского массива произошло в закрытой системе, без привлечения гипотетических базитовых расплавов.

Вывод. Трансформация шпинелевых лерцолитов в плагиоклазовые и метаморфическая дифференциация продуктов частичного плавления сопровождается сохранением соотношений редких элементов, что исключает участие внешнего источника вещества в этих процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградская Г.М.* Дунит-пегматиты ультраосновной формации на Урале // Докл. АН СССР. 1954. Т. 96, № 5. С. 899–902.
2. *Заварицкий А.Н.* Перидотитовый массив Рай-Из в Полярном Урале // М: ОНТИ, 1932. 220 с.
3. *Лазько Е.Е.* Петрология, формационная принадлежность и критерии рудоносности ультрамафитов офиолитов (на примере Войкаро-Сыньинского массива на Полярном Урале) // Роль магматизма в эволюции литосферы. М: Наука, 1984. С. 3–80.
4. *Савельев А.А., Савельева Г.Н.* Войкаро-Сыньинский массив / Петрология и метаморфизм древних офиолитов (на примере Полярного Урала и Западного Саяна). Новосибирск: Наука, 1977. С. 60–91.
5. *Савельева Г.Н.* Альпинотипные гипербазиты Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал). Генезис ультрабазитов и связанного с ними оруденения // Труды ИГГ УНЦ АН СССР. Вып. 127. Свердловск, 1977. С. 3–17.
6. *Чащухин И.С., Вотяков С.Л., Уймин С.Г. и др.* ЯГР-спектроскопия хромшпинелидов и проблемы окситермобарометрии хромитоносных ультрамафитов Урала. Екатеринбург: Наука, 1996. 136 с.
7. *Чащухин И.С., Вотяков С.Л., Шапова Ю.В.* Кристаллохимия хромшпинели и окситермобарометрия ультрамафитов складчатых областей. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. 310 с.
8. *Чащухин И.С., Штейнберг Д.С.* Сопоставление химического состава лерцолитов массива Нурали (Южный Урал) в шпинелевой и плагиоклазовой фациях // Ежегодник-1987. Свердловск: ИГГ УрО РАН, 1988. С. 43–47.
9. *Чащухин И.С., Уймин С.Г., Гмыра В.Г.* О природе плагиоклазовых лерцолитов // Магматические и метаморфические образования Урала и их металлогения. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 38–53.
10. *Чащухин И.С., Чередниченко Н.В., Адамович Н.Н.* О поведении редких элементов при ранней серпентинизации ультрамафитов // Ежегодник-2011. Тр. Ин-та геол. им. акад. А.Н. Заварицкого. Вып. 159. 2012. С. 125–128.
11. *Borghini G., Fumagalli P., Rampone E.* The Stability of Plagioclase in the Upper Mantle: Subsolvus Experiments on Fertile and Depleted Lherzolite // J. Petrol. 2010. V. 51, № 1-2. P. 229–254.
12. *Dijkstra A.H., Drury M.R., Vissers L.M.* Structural Petrology of Plagioclase Peridotites in the West Othris Mountains (Greece): Melt Impregnation in Mantle Lithosphere // J Petrol. 2001. V. 42, № 1. P. 337–362.
13. *Hamlyn P., Bonatti E.* Petrology of mantle-derived ultramafites from the Owen fracture zone, Northwest Indian ocean: implications for the nature of the oceanic upper mantle // Earth and Planet. Sci. Letter. 1980. V. 48, № 1. P. 65–79.
14. *Kushiro I., Yoder H.S.* Anorthite-forsterite and anorthite-enstatite reactions and their bearing on the basalt-eclogite transformation // J. Petrol. 1966. V. 7. P. 337–362.
15. *McDonough W.F., Sun S.-s.* The composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. V. 120. P. 223–253.
16. *Muntener O., Manatschal G., Desmurs L., Pettko T.* Plagioclase Peridotites in Ocean-Continent Transitions: Refertilized Mantle Domains Generated by Melt Stagnation in the Shallow Mantle Lithosphere // J. Petrol. 2010. V. 51, № 1-2. P. 337–362.
17. *Obata M.* The Ronda peridotite: garnet-, spinel-, and plagioclase-lherzolite facies and the P-T trajectories of a high-temperature mantle intrusion // J. Petrol. 1980. V. 21, № 3. P. 533–572.
18. *Rampone E., Piccardo G.B., Vannucci R. et al.* Subsolvus reactions monitored by trace element partitioning: the spinel- to plagioclase-facies transition in mantle peridotites // Contrib. Mineral. Petrol. 1993. V. 115. P. 1–17.
19. *Rampone E., Piccardo G.B., Hofmann A.W.* Multi-stage melt-rock interaction in the Mt. Maggiore (Corsica, France) ophiolitic peridotites: microstructural and geochemical evidence // Contrib. Mineral. Petrol. 2008. V. 156. P. 453–175.
20. *Takahashi N.* Origin of Plagioclase Lherzolite from the Nikanbetsu Peridotite Complex, Hokkaido, Northern Japan: Implications for Incipient Melt Migration and Segregation in the Partially Molten Upper Mantle // J. Petrol. 2001. V. 42, № 1. P. 39–54.