

**ТИПЫ ДЕПЛЕТИРОВАНИЯ АЛЬПИНОТИПНЫХ УЛЬТРАМАФИТОВ:  
СЛЕДСТВИЯ ИЗ ДАННЫХ ОКСИТЕРМОБАРОМЕТРИИ**

**И.С. Чашухин, С.Л. Вотяков**

В настоящее время в западной литературе доминирует мнение, что формирование всего разнообразия альпинотипных ультрамафитов континентов и океанов есть результат не столько частичного плавления пиrolита мантии, сколько последующей реакции продуктов этого плавления с проникающими снизу расплавами преимущественно базальтового состава [Kelemen et al., 1992; Van der Wai, Bodinier, 1996; Barth et al., 2003; Witt-Eickschen et al., 2003, и др.]. По мнению этих исследователей, некоторые мантийные образцы слишком обогащены ортопироксеном ( $\text{SiO}_2$ ), бедны клинопироксеном ( $\text{CaO}$ ) и имеют слишком высокое отношение легких к тяжелым РЗЭ, чтобы быть остатками от частичного плавления примитивной мантии. Было сделано заключение, что, если по этим параметрам состава природа абиссальных перидотитов не противоречит реститовой, то офиолитовые и подконтинентальные ультрамафиты есть результат магмо-мантийного взаимодействия; более того, при образовании последних реакционно-мантийный процесс может быть не только главным, но и единственным [Kelemen et al., 1992].

Для подтверждения возможной двустадийной природы альпинотипных ультрамафитов авторы на примере Урала изучили окислительно-восстановительное состояние альпинотипных ультрамафитов как функции степени деплетирования. Как известно, редокс-состояние верхней мантии – важный параметр в определении геохимической эволюции Земли, соотношений магматических и метасоматических процессов, наличия и природы летучих, распределения редких элементов и геофизических свойств [Кадик, Луканин, 1986; Ballhaus, 1993; Чашухин и др., 1996; Parkinson, Arculus, 1999]. Были изучены ультрамафиты двух типов: гарцбургиты из офиолитовых массивов (Войкаро-Сыньинский, Алапаевский, Восточнотагильский, западный блок Кемпирсайского массива) и гарцбургит-лерцолитовые серии, которые по ряду параметров состава можно отождествлять с подконтинентальными ультрамафитами корневых зон (массивы Крака и Нурали, юго-восточный блок Кемпирсайского массива). В итоговую выборку включены только шпинелевые фации ультрамафитов и исклю-

чены плагиоклазовые лерцолиты и гарцбургиты, а также апогарцбургитовые дуниты. Всего изучено 65 образцов.

Температура оливин-хромшпинелевого равновесия и величина летучести кислорода  $f\text{O}_2$  были оценены по модернизированным геотермометру и фугометру Большауза-Берри-Грина [Ballhaus, 1991] с учетом прямого (мессбауэровского) определения степени окисления железа в хромшпинели, а также эмпирически рассчитанного влияния степени вхождения титана в структуру хромшпинели на коэффициент распределения железа и магния между оливином и хромшпинелью [Вотяков и др., 1998]; дополнительно для лерцолитов величина  $f\text{O}_2$  была рассчитана по уравнению Нелла-Вуда [Wood et al., 1990]; разница между результатами расчета двумя фугометрами оказалась постоянной и равной 0,4 ед.  $\log f\text{O}_2$ . Степень деплетирования ультрамафитов оценивалась по хромистости хромшпинели  $\text{Cr}\# = \text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ .

Анализ полученных и литературных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Несомненно существуют два тренда зависимости величины летучести кислорода от степени истощения в шпинелевых фациях ультрамафитов – обратный в подконтинентальных гарцбургит-лерцолитовых сериях и прямой – в гарцбургитах из офиолитов (рис. 1).

2. Обратная зависимость указывает на то, что частичное плавление происходило в условиях водно-метанового состава флюида [Кадик, Луканин, 1986] и стабильности графита [Bryndzia, Wood, 1990], при этом в закрытой системе кислород перераспределялся в базальтовые выплавки. Трудно полагать, что такие условия могли быть реализованы при адиабатической декомпрессии – процессе, ответственном, по мнению большинства исследователей, за формирование ультрамафитовых реститов. Более вероятно предположить, что образование гарцбургит-лерцолитовых серий проходило под действием астеносферных высокотемпературных восстановленных (водородно-метановых) флюидов. В итоге возникла псевдостратификация ультрамафитов, обусловленная увеличением с глубиной степени истощения ультрамафитов.

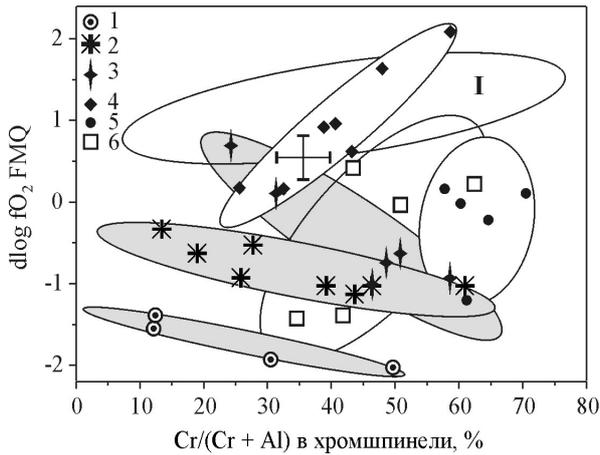


Рис. 1. Зависимость редокс-состояния ультрамафитов шпинелевой фации от степени деплетирования.

1-2 – Гарцбургит-лерцолитовые серии – продукты магматического деплетирования, массивы: 1 – Северный Крака, 2 – Южный Крака; 3 – дунит-гарцбургит-лерцолитовая серия юго-восточного блока Кемпирсайского массива; гарцбургиты офиолитовых массивов: 4 – Войкаро-Сыньинского, 5 – Алапаевского, 6 – Восточнотагильского. I – перидотиты зон субдукции [Parkinson, Arculus, 1998].

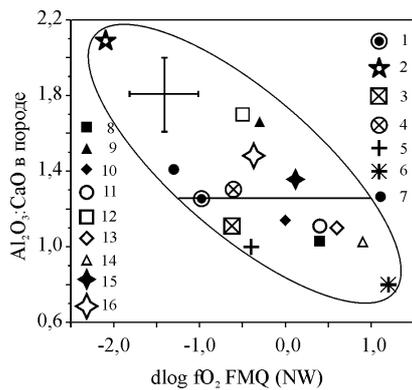


Рис. 2. Зависимость величин отношения  $Al_2O_3:CaO$  в шпинелевых лерцолитах и гарцбургитах разных геодинамических обстановок формирования от летучести кислорода.

1- подконтинентальные ультрамафиты массива Ронда, Испания [Frey et al., 1985; Woodland et al., 1992]; 2-5 – субокеанические перидотиты разломных зон Индийского и Американско-Атлантического хребтов [Bryndzia, Wood, 1990; Snow, Dick, 1995]: 2 – горячая точка о. Буеве, 3-4 – вдали от горячей точки, 5 – фрагмент субокеанических перидотитов г. Конической в Марианском преддужье [Parkinson, Pearce, 1998]; 6 – надсубдукционные гарцбургиты преддужья Идзу-Бонин, г. Торисима (там же); 7-16 – Урал, массивы: 7-10 – Крака: 7 – Северный, 8 – Средний, 9 – Узянский, 10 – Южный, 11 – Нуралинский, 12-13 – Кемпирсайский: 12 – юго-восточный блок, 13 – западный, 14 – Войкаро-Сыньинский, 15 – Алапаевский, 16 – Восточнотагильский. Горизонтальная линия – отношение  $Al_2O_3:CaO$  в хондритах [Palme, Nickel, 1985].

3. Деплетирование офиолитовых гарцбургитов изученных массивов сопровождалось увеличением летучести кислорода при значениях  $fO_2$ , существенно превышающих FMQ – рубеж, отделяющий сублитосферные редокс-условия от надсубдукционных [Wood et al., 1990]. В составе флюида преобладали вода и углекислота. По-видимому, субстратом надсубдукционных ультрамафитов могли служить гарцбургит-лерцолитовые серии, реликты которых (предельные гарцбургиты с ранним клинопироксеном и реже лерцолиты) сохранились в Войкаро-Сыньинском и Алапаевском массивах. Истощение ультрамафитов проходило в условиях адиабатической декомпрессии с постепенным увеличением степени деплетирования снизу вверх.

4. Флюидный режим определял химический состав ультрамафитов, прежде всего наиболее консервативный параметр – отношение  $Al_2O_3:CaO$ , величина которого в хондритах проявляет удивительное постоянство (1,22-1,25), а в углистых хондритах  $C1$  постоянна – 1,25 [Palme, Nickel, 1985]. В альпинотипных ультрамафитах величина отношения варьирует от 2,1 до 0,8 и связана с величиной летучести кислорода обратной зависимостью (рис. 2). Установленная эмпирическая зависимость находит подтверждение в результатах экспериментов по частичному плавлению модельных составов пиролита мантии [Gaetani, Grove, 1998]: анализ приведенных авторами данных показывает, что величина отношения  $Al_2O_3:CaO$  в респите находится в обратной связи с содержанием воды в ходе эксперимента, которое и определяет редокс-состояние системы. Как известно, вода является преобладающей составляющей флюидов при формировании надсубдукционных ультрамафитов, для которых характерна наименьшая величина отношения  $Al_2O_3:CaO$ . Возможно, что только для них может быть приложима предложенная Келеменом модель магма-мантийного взаимодействия ультраосновных респитов с гипотетическими базитовыми расплавами.

Что касается индикаторной роли некогерентных редких элементов в петрогенезе альпинотипных ультрамафитов, то она требует отдельного рассмотрения и здесь не обсуждается.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты 04-05-64436, 04-05-*

64346, а также Программы ОНЗ «Экспериментальные исследования эндогенных процессов», гранта Президента РФ «Поддержка ведущих научных школ» НШ-4210.2006.5 и гранта Минобразования РНП.2.1.1840.

Список литературы

- Вотяков С.Л., Чацухин И.С., Уймин С.Г., Быков В.Н. Окситермобарометрия хромитоносных ультрамафитов (на примере Урала). I. ЯГР-спектроскопия хромшпинелидов и проблемы оливин-хромшпинелевой геотермометрии // Геохимия. 1998. № 8. С. 791-802.
- Кадик А.А., Луканин О.А. Дегазация верхней мантии при плавлении. М.: Наука, 1986. 97 с.
- Чацухин И.С., Вотяков С.Л., Уймин С.Г. и др. ЯГР-спектроскопия хромшпинелидов и проблемы окситермобарометрии хромитоносных ультрамафитов Урала. Екатеринбург: Наука. 1996. 136 с.
- Ballhaus C., Berry R., Green D. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle // Contrib. Mineral. Petrol. 1991. V. 107. № 1. P. 27-40.
- Ballhaus C. Redox states of lithospheric and asthenospheric upper mantle // Contrib. Mineral. Petrol. 1993. V. 114. P. 331-348.
- Barth M.G., Mason P.R.D., Davies G.R., Dijkstra A.H., Drury M.R. Geochemistry of the Othris Ophiolite, Greece: Evidence for Refertilization? // J. Petrol. 2003. V. 44. N 10. P. 1759-1785
- Bryndzia L.B., Wood B. Oxygen thermobarometry of abyssal spinel peridotites: the redox state and C-O-H volatile composition of the earth's suboceanic upper mantle // Amer. J. Sci. 1990. V. 290. N 10. P. 1093-1116.
- Frey F.A., Suen C.J., Stockman H.W. The Ronda high temperature peridotite: geochemistry and petrogenesis // Geochim. et Cosmoch. Acta. 1985. V. 49. № 11. P. 2469-2491.
- Gaetani G.A., Grove T.L. The influence of water on melting of mantle peridotite // Contrib. Mineral. Petrol. 1998. V. 131. P. 323-346.
- Kelemen P.B., Dick H.J.B., Quick J.E. Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction on the upper mantle // Nature. 1992. V. 358. P. 635-641.
- Palme H., Nickel K.G. Ca:Al ratio and composition of the Earth, upper mantle // Geochim. Cosmochim. Acta. 1985. V. 49. N 10. P. 2123-2132.
- Parkinson I.J., Pearce J.A. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting. // J. Petrol. 1998. V. 39. P. 1577-1618.
- Parkinson I. J., Arculus R. J. The redox state of subduction zones: insights from arc-peridotites // Chemical Geology. 1999. V. 160. P. 409-423.
- Snow J.E., Dick H.J.B. Pervasive magnesium loss by marine weathering of peridotite // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. P. 4219-4236.
- Van der Wai D., Bodinier J-L. Origin of the recrystallisation front in the Ronda peridotite by km-scale pervasive porous melt flow // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. V. 122. P. 387-405.
- Witt-Eickchen G., Seck H.A., Mezger K., Eggins S.M., Altherr R. Lithospheric Mantle Evolution beneath the Eifel (Germany): Constraints from Sr-Nd-Pb Isotopes and Trace Element Abundances in Spinel Peridotite and Pyroxenite Xenoliths // J. Petrol. 2003. V. 44. N 6. P. 1077-1095.
- Wood B., Bryndzia L., Johnson K. Mantle oxidation state and its relationship to tectonic environment and fluid speciation // Science. 1990. V. 248. N 4953. P. 337-345.
- Woodland A., Kornprobst J., Wood B. Oxygen thermobarometry of orogenic lherzolite massifs // J. Petrol. 1992. V. 33. Part 1. P. 203-230.