

4. Реестр хромитовых месторождений в альпинотипных гипербазитах Урала. / под. ред. Б.В. Первозчикова. Пермь, 2000. 474 с.

5. Савельев Д.Е., Сначев В.И., Савельева Е.Н., Бажин Е.А. Геология, петрогеохимия и хромитоносность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2008. 320 с.

6. Смирнова Т.А., Смирнов Ю.В. Промышленные типы хромитовых руд // Руководство по оценке прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. М., 1982. С. 56-66.

КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ РАСПЛАВОВ В ПОДНИМАЮЩЕЙСЯ МАНТИИ: СВИДЕТЕЛЬСТВА В УРАЛЬСКИХ ОФИОЛИТАХ

Савельева Г.Н.*, Батанова В.Г., Соболев А.В.****

**Геологический институт РАН, Москва, Россия*

e-mail: savelieva@ginras.ru

***Институт геохимии и аналитической химии РАН, Москва, Россия*

e-mail: batanova@geokhi.ru, sobolev@geokhi.ru

CHANNELS OF MELT TRANSPORT IN THE UPWELLING MANTLE: EVIDENCE FROM THE URALIAN OPHIOLITES

Savelieva G.N.*, Batanova V.G., Sobolev A.V.****

**Geological Institute RAS, Moscow, Russia*

e-mail: savelieva@ginras.ru

***Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia*

e-mail: batanova@geokhi.ru, sobolev@geokhi.ru

Structural position of melt transport channels through mantle is illustrated by lherzolite (lhz) and harzburgite (hrz) types of the Uralian ophiolites. Replacive dunite bodies perceived as markers of melt migration were formed in the following positions: (a) due to stress-driven melt segregation along the margin of peridotite body during the accretion of the upwelling mantle to lithosphere (lhz and hrz), and (b) due to focused melt migration along network of weakened zones with high permeability. These zones were formed as a result of high stress concentration and their abrupt relaxation in flow-fold hinges (the central part of only harzburgite mantle sequence). Supposedly, that last stage of the creation of mantle hrz section took place under subduction environment; dunite channels within harzburgite were formed within large intervals of the depth and time.

Структурные и петролого-геохимические исследования мантийных комплексов офиолитов выявили связь между миграцией базитовых расплавов в поднимающемся мантийном диапире и образованием дунитов, а также высокотемпературными деформациями реститовых перидотитов [3, 4, 9, 12]. Было сформировано представление о том, что пути подъема расплава в мантии маркируются образованием дунитов [10, 13]. Согласно одному из предложенных механизмов процесса, химически изолированный подъем расплавов из мантийных очагов через перидотиты верхней мантии происходит при медленном поровом течении расплава по изолированным каналам с образованием дунитов замещения (например, [6, 10, 11]). Эти каналы образуются в результате растворения пироксенов и кристаллизации оливина при реакции насыщенных оливином магм с вмещающими мантийными перидотитами. П. Келеман и Г. Дик [9] показали, что миграция расплавов сквозь гарцбургиты сопровождалась образованием дунитов вдоль сдвиговых зон на глубине менее 30 км и при температурах 950-1100°C (syntectonic migration). На основе наблюдений по распределению дунитовых жил в деплетированных гарцбургитах Канадских Кордильер предположено [14], что синкинematическое и сфокусированное прохождение расплава сквозь реститы и взаимодействие расплав/порода было неоднократным и происходило на глубинах менее 70 км. Влияние стресса на отделение и перемещение расплава показано и в серии лабораторных

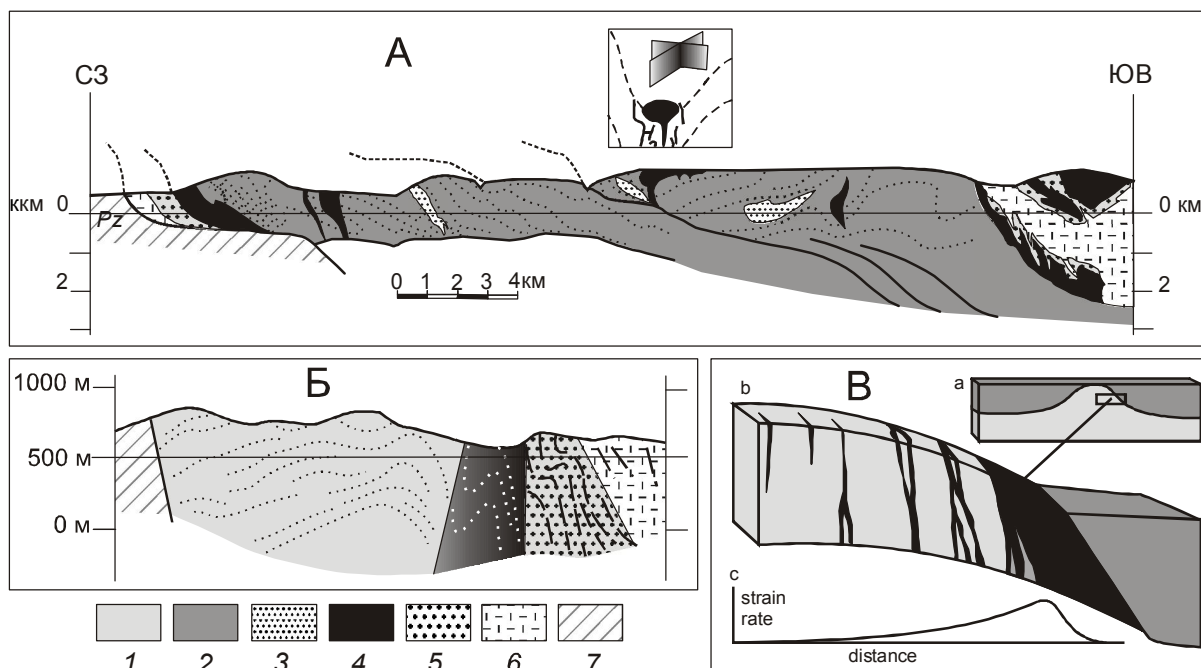


Рис. 1. Геологические разрезы через массивы Войкаро-Сыньинский (А) и Нурали (Б) в сопоставлении со схемой экспериментального моделирования по [8] (В).

Для А и Б: 1 – перцолит, 2 – гарцбургит, 3 – гарцбургит без серпентина, 4 – дунит, 5 – пироксенит, верлит, 6 – габбро, 7 – вулканогенно-осадочные и метаморфические отложения; в верхней части профиля А показано положение сетки лунитовых жил. Схема В иллюстрирует пространственное распределение сегрегаций расплава (черное) в структурах, обусловленных стрессом (stress-driven melt) под срединно-океаническим хребтом [8]: (а) срединно-океанический хребет: литосфера – темносерое, астеносфера – светлосерое; (б) градиент распределения расплава от центра плавления (слева) к литосфере (справа); степень насыщения расплавом возрастает к границе с литосферой; (с) скорость деформаций возрастает от центра области плавления к ее краю (к литосфере).

экспериментов по сегрегации расплава в частично расплавленных оливиновых породах при различных соотношениях деформации сдвига (shear strain) и уровня стресса (stress level) [8]. Установлено, что мощность и ориентировка образующихся дунитовых тел зависят от величины дифференциального стресса; сделан вывод о том, что сегрегация расплава, обусловленная стрессом, а также его последующая миграция, может происходить не только в мантии, но и в астеносфере [8].

В природных условиях формирование каналов, по которым расплавы движутся вверх, определяется множеством факторов – таких, например, как скорость и начальная глубина подъема диапира, температура и физические свойства поднимающихся мантийных реститов – перцолитов или гарцбургитов и, соответственно, тем или иным полем деформаций. Очевидно, что условия подъема мантийного диапира различаются в разных геодинамических обстановках: в центрах спрединга в срединно-океанических хребтах, при образовании рифтогенных бассейнов с корой океанического типа в пассивных континентальных окраинах или при надсубдукционном спрединге. Мы рассмотрим возможные варианты структурного контроля при формировании каналов транспортировки расплава в мантии на примере двух типов офиолитовых разрезов. Образование разрезов первого типа соотносится с подъемом мантийных пород в рифтовой зоне при зарождении океанического бассейна и, возможно, и при дальнейшем развитии центрального спрединга в срединно-океанических хребтах; образование разрезов второго типа связано со спредингом океанической коры над зоной субдукции в окраинном бассейне.

(1) Первый тип офиолитов представлен южно-уральскими массивами Крака и Нурали с четко выраженным профилем деплетирования существенно перцолитового мантийного разреза: в направлении Мохо породы сменяются в следующем порядке: высокоглиноземистый шпинелевый перцолит – плагиоклаз-шпинелевый перцолит – истощенный перцолит с линзами плагиокла-

зовых лерцолитов и гарцбургитов – гарцбургит – дунит. Жилы дунитов распространены в гарцбургитах, преимущественно, в области перехода к четко выраженной дунитовой зоне. Геологические разрезы через массивы Средний Крака и Нурали удивительно схожи с модельным профилем, иллюстрирующим конечные результаты эксперимента по сегрегации расплава в частично расплавленных породах (рис. 1). На профиле показано пространственное распределение сегрегаций расплава в структурах, обусловленных стрессом (*stress-driven melt*) под срединно-океаническим хребтом. Согласно результатам эксперимента, количество расплава в мантийных породах возрастает к границе с относительно холодной литосферой; скорость деформации минимальна в центре плавления и возрастает от центра области плавления к ее краю (к литосфере). В реальных разрезах именно в области границы кора-мантия наиболее масштабно проявлены деформации реститовых ультрамафитов, выраженные в резком изменении ориентировки структур твердопластического течения перидотитовых масс [3, 6]. Четкая аккомодация структур пластического течения мантийных пород к границе с коровыми плутоническими комплексами проявлена во многих лерцолитовых массивах: структуры пластического течения в дунитах краевой (пограничной) зоны дискордантны к ориентировке течения масс в лерцолитах. Структуры в дунитах маркируются струйчато-вкрапленными, полосчатыми хромитами, нередко содержащими циркон. Петроструктурные особенности дунитов и обилие их жил в гарцбургитах на границе зон дунит-гарцбургит мы связываем с миграцией расплава сквозь лерцолиты и последующей его сегрегацией вдоль края мантийного блока, аккретирующегося к литосфере в процессе подъема мантии в зоне спрединга или в зоне рифта в континентальной окраине. В самих лерцолитах широко распространены зоны высокотемпературных милонитов, характеризующих, как правило, медленно-спрединговые рифтовые зоны и срединно-океанические хребты. Эти зоны ориентированы, преимущественно, под углом по отношению к границе реститов и расслоенных мафит-ультрамафитов.

(2) Второй тип офиолитовых разрезов представлен Войкаро-Сыньинский массивом на Полярном Урале, где дунитовые тела различной формы и размеров широко распространены на разных уровнях мантийного разреза. а) Дуниты почти непрерывно протягиваются вдоль западного и восточного контактов массива гарцбургитов; в зоне перехода от гарцбургитов к дунитам краевых зон развиты дунитовые жилы. б) В центральной части массива присутствуют линзовидные, пластовые, трубо- и грибообразные тела, нередко окруженные сеткой дунитовых жил. Система дунитовых жил в гарцбургитах закономерно ориентирована относительно таких элементов крупномасштабной складки течения гарцбургитов, как замок, шарнир и осевая плоскость, что послужило основанием для вывода о том, что поле напряжений контролировало пути движения расплава, маркированные дунитовыми телами и в центральной (глубинной) части разреза. Сколово-сдвиговые (непроникающие, *non-penetrative*) деформации при образовании системы пересекающихся жил возникали в условиях поля проникающих (*penetrative*) деформаций, в котором формировалась микроструктура и гарцбургитов и дунитов. Диапазон глубин при образовании крупномасштабных складок течения гарцбургитов составлял не менее 90 км: предположительно, от 120 до 25 км. Этот интервал определяется, с одной стороны, начальной глубиной подъема мантийных масс и с другой – глубиной, выше которой в ассоциации с оливином становится устойчивым плагиоклаз. Подъем мантийного диапира и пластическое течение пород были неразрывны, и, очевидно, складки течения в дошедшем до нас виде формировались с начала движения вещества вверх. За время прохождения этого довольно значительного интервала снижались общее давление, температура и, соответственно, менялись параметры поля деформаций и свойства мантийных масс.

Предположено, что одни из механизмов образования каналов транспортировки расплава был обусловлен концентрацией напряжений в замках складок течения и очень быстрой их разрядкой с образованием ортогональной сетки ослабленных зон с повышенной проницаемостью. В эти зоны мгновенно мигрировал рассеянный расплав, поднимавшийся из глубинного очага плавления. Скорость пластических деформаций была относительно низкой, что определяло преимущественный механизм трансляционного скольжения оливина; в результате формировались крупнозернистые и протогранулярные структуры пород. Распределение и структура хромитовых тел отражают многостадийность формирования дунитов, нестационарную динамику транспортировки расплавов сквозь реститы и резкие вариации локальных полей напряжений на участках

распространения каналов транспортировки. Присутствие в хромитах циркона и апатита также представляет свидетельство участия базитовых расплавов в процессе формирования дунитовых тел. Сходство петроструктурных соотношений между дунитами и гарцбургитами на контакте реститовых и плутонических (габброидных) серий офиолитов и соотношений гарцбургит/дунитовые жилы в центральной (глубинной) части разреза позволяет считать, что формирование части дунитовых тел в гацбургитах по времени связано с формированием петрологической границы Мохо. Вероятность надсубдукционной обстановки при транспортировке расплава сквозь гарцбургиты Полярного Урала обосновывается как предшествующими исследованиями [2], так и новыми геохимическими данными, показавшими, что расплавы имеют характеристики магм, генерированных над зоной субдукции [1,7].

Таким образом, распределение, количество и форма дунитовых тел как маркеров транспортировки расплава сквозь перидотиты отражают два главных пути формирования каналов в мантии. Первый – миграция, сегрегация и транспорт расплава к краям блока-домена мантийных пород, аккреотирующихся к относительно холодной литосфере. Этот путь особенно четко проявлен в лерцолитовых массивах, образованных в рифтах (и зонах центрального спрединга) и также фиксируется в гарцбургитовых массивах, образованных в надсубдукционной обстановке. Второй путь – транспортировка расплавов сквозь весь мантийный разрез по системе пересекающихся жил, субвертикальных каналов вне пространственной связи с краями аккреотирующегося тела, – проявлен исключительно в существенно гарцбургитовых массивах, образованных в обстановке надсубдукционного спрединга. Подъем этих расплавов происходил в ходе деформаций, завершавших этап пластического течения мантийных реститов. Предполагается, что формирование каналов, маркированных дунитами краевых зон (первый путь) происходит на меньших глубинах и при более низких температурах относительно формирования каналов в центральной части разреза, маркированных системой дунитовых жил и тел (второй путь). В мантийных реститах, поднимающихся при надсубдукционном спрединге, вероятно присутствие дунитовых каналов, образованных не только в широком диапазоне глубин, но и в разные геологические эпохи и, возможно, в разных геодинамических обстановках.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 08-05-00151 и № 09-05-01165.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батанова В.Г., Брюгманн Г., Белоусов И.А., Савельева Г.Н., Соболев А.В. Процессы плавления и миграции расплавов в мантии на основе изучения высоко сидерофильных элементов и их изотопов // XVIII Симпозиум по геохимии изотопов им. акад. А.П. Виноградова. Тез. докл. М: ГЕОХИ РАН, 2007. С. 40-41.
2. Савельев А.А. Структура и условия образования офиолитовых ультрабазит-габбровых ассоциаций Урала // Геотектоника. № 3. 1996. С. 25-35.
3. Савельева Г.Н. Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре (Тр. ГИН АН СССР, вып. 404). М.: Наука, 1987. 243 с.
4. Савельева, Г.Н., Соболев, А.В., Батанова, В.Г., Сулов, П.В., Брюгманн Г. Структура каналов транспортировки расплавов в мантии // Геотектоника. № 6. 2008. С.2 6-46.
5. Соболев, А.В., Шимизу Н. Сверхобедненные расплавы и проницаемость океанической мантии // Доклады РАН. 1992. Т. 326. № 2. С. 354-360.
6. Aharonov E., Whitehead J.A., Kelemen P.B., Spiegelman M., Channeling instability of upwelling melt in the mantle // Journal of Geophysical Research. 1995. 100(B10). P. 20433-20450.
7. Batanova V., Bruegmann G., Savelieva G. Os Isotopic Composition and Highly Siderophile Elements: Tracers of Mantle Melting and Melt Percolation Processes (Voykar Complex, Polar Ural Ophiolites). Fall Meeting AGU Section Volcanology, Geochemistry, and Petrology Special Session V01 – Volcanology General Contributions. 2006. Reference Number 7506 PIN 1671.
8. Holtzman B.K., Koldstedt D.L. Stress-driven Melt Segregation and Strain Partitioning in Partially Molten Rocks: Effects of Stress and Strain // Jour. Petrol. 2007. V. 48. No 12. P. 2379-2406.
9. Kelemen P.B., Dick H.J.D. Focused melt flow and localized deformation in the upper mantle: Juxtaposition of replacive dunite and ductile shear zones in Josephine peridotite, SW Oregon // Jour. Geophys. Res., 1995. V. 100. No. B1. P. 475-496.
10. Kelemen P.B., Shimizu N., Salters V.J.M., Extraction of Mid-Ocean-Ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels // Nature. 1995. V 375. P. 747-753.

11. Kelemen P.B., Hirth G., Shimizu N., Spigelman M., Dick H.J.D. A review of melt migration processes in the adiabatically upwelling mantle beneath spreading ridges // *Phylos. Trans. R.S. London*, 1997. Ser. A. V. 335. P. 283-318.
12. Nicolas A. A melt extraction based on structural studies in the mantle peridotites // *J. Petrol.* 1986. V. 27. P. 999-1022.
13. Suhr G. Melt migration under oceanic spreading ridges: Inferences from reactive transport modeling of the upper mantle hosted dunites // *J. Petrol.* 1999. V. 40. P. 575-599.
14. Tommasi A., Vauchez A., Godard M., Belley F. Deformation and melt transport in a highly depleted peridotite massif from Canadian Cordillera: Implications to seismic anisotropy above subduction zones // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 252. 2006. P. 245-259.

УЛЬТРАОСНОВНЫЕ ПОРОДЫ СОВРЕМЕННЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ

Савельева Г.Н.* , Бонатти Э.**

**Геологический институт РАН, Москва, Россия*

e-mail: savelieva@ginras.ru

***Институт морских наук (ISMAR), Болонья, Италия*

e-mail: enrico.bonatti@bo.ismar.cnr.it

ULTRAMAFIC ROCKS OF THE RECENT OCEANIC BASINS

Savelieva G.N.* , Bonatti E.**

**Geological Institute RAS, Moscow, Russia*

e-mail: savelieva@ginras.ru

***Institute of Marine Sciences (ISMAR), Bologna, Italy*

e-mail: enrico.bonatti@bo.ismar.cnr.it

A fundamental tenets characterizing ultramafic rocks of the World Ocean were established at the boundary of current century. The composition of ultramafics varies in a very large diapason from the ultra depleted harzburgites of the trench to the fertile high-Al lherzolites of slow-spreading centre. Variations of different scale are found against that background. Along the mid-oceanic ridge and in different oceanic spreading centres variations are caused by a) diverse conditions of the upwelling mantle (spreading rate, temperature, initial depth of mantle diapir, thickness of the lithosphere) and b) planetary heterogeneity of the upper mantle supported by new isotopic-geochemical data. Specific features of mineral and geochemical composition of the ultramafics may also result from the rock/melt interaction process. The formation of focused melt transport channels through the mantle provides small-scale isotopic heterogeneity of the ultramafic rocks.

Ультраосновные породы вместе с габброидами и базальтами слагают кристаллический фундамент дна Мирового океана. Они составляют значительную часть драгированных пород в Атлантическом, Индийском, Тихом и Северном Ледовитом океанах, а также в желобах западной Пацифики и западной Атлантики. Исследования океанских ультрамафитов на протяжении 50-60 лет внесли огромный вклад в понимание процессов планетарной тектоники, магматизма и рождения эмбриональной мафической коры. Накопленные факты и выводы мы рассмотрим в следующих блоках: (1) петрохимический и минералогический состав ультраосновных пород; (2) деформационные структуры; (3) изотопно-геохимические характеристики; (4) метаморфизм (гидратация).

(1) Состав ультрамафитов изучен во всех четырех океанах; наиболее полно – в Атлантике, где проведен огромный объем драгировок, глубоководного бурения и опробования с подводных аппаратов как в рифтовой долине САХ, так и вдоль крупнейших трансформных разломов [1-3, 6-13, 16, 19-20]. Лерцолиты шпинелевые и плагиоклаз-шпинелевые, гарцбургиты (иногда плагиоклаз-содержащие) и небольшое количество дунитов подняты в центрах спрединга и разло-