

О КОНВЕКТИВНОМ ПЛАВЛЕНИИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПОРОД ШПИНЕЛИВОЙ ФАЦИИ НАД СЕЙСМОФОКАЛЬНОЙ ЗОНОЙ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА

В.Н. Шарапов, А.А. Томиленко, Г.В. Кузнецов, С.В. Ковязин

Институт геологии и минералогии СО РАН, пр. Коптюга 3а, г. Новосибирск, 90, 630090,
e-mail: vik@uiggm.nsc.ru

Исследование структурных и вещественных продуктов воздействия потоков восстановленных магматических флюидов на терциноватые базитовые породы литосферного клина над сейсмофокальной зоной под вулканами Камчатки показало проявление, по крайней мере, двух сопряженных или последовательных гетерофазных процессов, - локального подплавления и сублимирования (растворения) минералов породной матрицы с последующим ростом из гетерофазной флюидной среды, по-видимому, по схеме «пар-жидкость-кристалл» (ПЖК) крупно- иногда гигантозернистых высокопористых анортит-клинопироксен-форстеритовых пород с переменным соотношением указанных минералов [Кутыев, Шарапов, 1979; Стенина и др., 1980]. При последующем воздействии на эти породные новообразования более окисленных потоков флюидов, привнесших Mn, Ti, Fe, Cl, S, H₂O, проходило локальное травление поверхности кристаллов с отложением вискозов магнетита и подплавление зерен по трещинам с образованием характерных «пустых» или заполненных вспененным расплавом округлых отверстий. Применение метода электронной просвечивающей микроскопии (ПЭМ) обнаружило, что в кристаллах анортита около трещин происходило частичное превращение микровключений клинопироксена в амфибол, формирование жидких вспененных пленок расплава, в которых присутствуют микрокристаллы клинопироксена и амфибола, а также участки распада (ликвации) [Стенина и др., 1982]. Изучение аналогичных процессов в ультрабазитах выявило значительно более сложный комплекс структурных и минеральных преобразований [Колосков, 1999; Ishimaru et al., 2007; Ishimaru, Arai, 2007; 2008; 2009]. Из выделяемых трех породных ассоциаций ультрамафитовых включений [Колосков, 1999; Колосков и др., 2001] далее мы остановимся только на дунит-гарцбургитовой, которую имели возможность изучать на вполне представительной коллекции, в которую входят практически все описанные в литературе ее новообразования [Ishimaru et al., 2007], а также породные ассоциации и структурные формы проявления вторичных преобразований в них, выделенных в [Колосков, 1999; Колосков и др., 2001]. Японские исследователи полагают, что Авачинские гарцбургиты подвергнуты глубокой метасоматической переработке обогащенными кремнекислотой флюидами с превращением первичного высокомагнезиального оливина во вторичные ортопироксены. Последние имеют две структурных формы, - радиально призматически кристаллические и плотнозернистые образования, ассоциирующие с интерстициальным стеклом и другими метасоматическими минералами. По геохимическим меткам предполагается метасоматизирующее воздействие трех типов флюидных «агентов»: 1) водных обогащенных SiO₂ флюидов, которые отделяются от субдуцируемого слеба и формируют обедненный HREE орх-II-1, а также вызывают парциальное плавление; 2) водного флюида, отделяющегося от расплавов адакитового типа, возникающих при плавлении слеба (они определяют высокие содержания LILE (Th, U, Sr) и LREE относительно HREE и MREE в метасоматитах); 3) флюидов, поступающих из магматических очагов, питающих современные вулканы (на их воздействие указывают содержания геохимических меток в стеклах, ассоциирующие с орх-II-2). Однако такой сложный метасоматоз не меняет существенно петрохимические характеристики пород, при этом содержание хрома в шпинели не коррелируется с увеличением Fo компонента в оливине. Характерно, что в метасоматизированных ультрабазитах обнаружены самородные Fe, Ti, Ni; карбиды Fe, Ti, Ni; MMS обогащенные Ni, ассоциирующие с высоко хромистой шпинелью. Самое удивительное в этих построениях состоит в том, что, как считают авторы, такие явления восстановления элементов переменной валентности протекают при окислительных условиях, - $\Delta FMQ = -0,2 \text{ —} +1,9$.

В работах [Колосков, 1999; Колосков и др., 2001] просматривается иная точка зрения на петрогенезис ультрамафитовых включений в базальтах Камчатских вулканических дуг, - эти породы, похоже, следует относить к плутоническим аналогам вынесших их вулканитов из области существования первичных очагов, питающих вулканы. Следовательно, это продукты

магматических процессов в гетерофазных очагах, где расплавы обогащены флюидами (наличие кортландитовых и амфиболитовых ассоциаций, а также кислых пузыристых стекол). При каких термодинамических условиях на глубинах 20-40 км от уровня извержений лав могут протекать процессы плавления не обсуждается. Никакие разумные предложения, кроме конвективного прогрева и плавления литосферных пород потоками магматических флюидов, не могут объяснить как первую, так и вторую концепцию. Существование этой модели с количественным моделированием элементов динамики таких процессов было изложено в [Кутыев, Шарапов, 1979]. Ее развитие возможно при уточнении физико-химических параметров, выявлении реального валового состава флюидов и исследования равновесной неизотермической физико-химической динамики взаимодействия потоков флюидов с ультрабазитовыми породами. В этом сообщении зафиксированы предварительные результаты изучения возможного состава магматогенных флюидов и типов фазовых переходов, существовавших в рассматриваемой системе, на основе изучения структурно-минералогических характеристик ксенолитов ультрабазитов из лав Авачинского вулкана. Нами изучается коллекция из 91 образцов, размеры которых варьируют от 3 см до 20 см. Крупные обломки представляют собой высоко трещиноватые гарцбургиты с пироксенитовыми жилами или их пятнами, а также прожилками пироксен (Py) – амфиболового (Amph) или амфиболового состава с интерстициальным пузыристым стеклом (Gl) или без такового. По краям обломков имеются простые или многозональные оторочки, - пузыристые Gl оторочки (ширина от 1 см до нескольких мм) с большим количеством ксенокристаллов плагиоклаза (Pl), оливина (Ol), Py и Amph с зонами шестоватых кристаллов Amph+Gl, Amph+Pl+Gl, Amph+Ol+Gl. Между гарцбургитом и такими зонами может быть зона клинопироксенового состава или «вторичного» медово-желтого Ol. Мелкие ксенолиты представляют собой фрагменты пироксенитовых жил и вмещающих «матричных» ультрабазитов, обломков последних с пятнами и мелкими прожилками «наложенных» пироксенитов с Amph+ Gl, а также фрагментами контактовых оторочек. Формально в зависимости от соотношения минералов в отдельных обломках породы могут быть отнесены к ассоциациям от амфиболовых габбро до пироксенитов, верлитов или кортландитов. При определении генезиса такого рода образований существенно то, что есть два структурных типа «вторичных» минеральных ассоциаций, выделенных в [Колосков, 1999; Ishimaru et al., 2007], - грубозернистые с формированием друзовых сростаний кристаллов с хорошо ограненными головками и иногда вискорами, которые росли в «газовые пустоты», а также мелкозернистые плотные («сахаровидные») обособления с плосчатой текстурой. Микроскопическое изучение всех перечисленных как первичных, так и «вторичных» минералов ультрамафитовых ксенолитов Авачинского вулкана обнаруживает присутствие в них расплавных, преимущественно газовых и газовой-жидких включений. Наиболее многообразны и многочисленны они в «матричных» Ol и Орх, тогда как в Amph и Pl относительно обеднены вторичными включениями. Для Amph характерно присутствие округлых «пустых» или содержащих пузыристое Gl отверстий.

Содержания и состав летучих в отмеченных минералах характерны. С использованием методики [Осоргин, 1990] декрепептирования минералогических фракций хроматографически были определены валовые составы газов в первичных и вторичных Ol, Орх, а также Срх и Amph. Параллельно методами ISP-MS и РФА-СИ в тех же минералах получены содержания более 50 петрогенных и элементов – примесей, что позволило сопоставить коррелятивные связи содержания петрогенных компонентов, вариации которых определяются флюидным воздействием, и примесных элементов, которые интересны с точки зрения металлоносности возникающих расплавов или оценки источников флюидов. Статистическая обработка и сравнение литературных и оригинальных данных позволяют ввести некоторые количественные оценки известных в литературе петрогенетических и геохимических комментариев вариационных диаграмм. При проведении аналитических исследований мы обращали внимание на прослеживание трендов в зональных последовательностях Ol-I→Ol-II→Орх-II→Срх→Amph. Поэтому полученная выборка данных отличается от таковых [Ishimaru et al., 2007], которые сосредоточены в основном на связке Ol+Орх-I→Орх-II+Gl. Полученные данные по валовому составу газов в указанной последовательности прослеживают вполне очевидный тренд увеличения «обводненности» магматических флюидов и увеличения их относительной «окисленности» от начальных преобразований исходной дунит-гарцбургитовой матрицы к формированию кортландитовой и габброидной ассоциаций: Ol-I - $H_2O/\Sigma(CO_2+CO+H_2+CH_4) = 0,373$; $CO_2/\Sigma(CO+H_2+CH_4) = 0,092 \rightarrow$ Ol-II - $H_2O/\Sigma(CO_2+CO+H_2+CH_4) = 0,948$; $CO_2/$

$\Sigma(\text{CO}+\text{H}_2+\text{CH}_4) = 0,262 \rightarrow \text{Opx} - \text{H}_2\text{O} / \Sigma(\text{CO}_2+\text{CO}+\text{H}_2+\text{CH}_4) = 1,29$; $\text{CO}_2 / \Sigma(\text{CO}+\text{H}_2+\text{CH}_4) = 0,23 \rightarrow \text{Cpx} - \text{H}_2\text{O} / \Sigma(\text{CO}_2+\text{CO}+\text{H}_2+\text{CH}_4) = 0,735$; $\text{CO}_2 / \Sigma(\text{CO}+\text{H}_2+\text{CH}_4) = 0,167 \rightarrow \text{Amph} - \text{H}_2\text{O} / \Sigma(\text{CO}_2+\text{CO}+\text{H}_2+\text{CH}_4) = 2,675$, $\text{CO}_2 / \Sigma(\text{CO}+\text{H}_2+\text{CH}_4) = 0,626$. Данная направленность изменения модуля «окисленности» флюидов коррелируется с установленным в [Колосков, 1999; Колосков и др., 2001] трендом изменения состава шпинелей в породных ассоциациях ксенолитов, а также наличием в высоко «метасоматизированных» гипербазитах Авачинского вулкан самородных металлов и карбидов [Ishimaru, Arai, 2008]. Нами присутствие магнетита зафиксировано только в ассоциации Amph+Gl и Amph+Pl+Gl. Поэтому цитированная оценка [Ishimaru et al., 2007] всего процесса «метасоматизирования» гарбургитов в отношении $p\text{O}_2$, как вариации около буфера QFM, представляется сомнительной. Более точная оценка эволюции величин $p\text{O}_2$ потребует решения соответствующей задачи равновесной неизотермической динамики взаимодействия «флюид-ультрабазит», специфика которой, в отличие от уже полученных реализаций [Шарапов и др., 2007], состоит в относительно низких давлениях в системе и субсолидусных температурах взаимодействия. Весьма проблематично также одновременное или совместное воздействие на ультрабазиты магматических флюидов их трех различных источников, как с точки зрения гидродинамической реализации такого процесса, так и имеющихся геохимических свидетельств, фиксируемых в ксенолитах. Статистическая обработка таких данных из [Ishimaru et al., 2007] показывает, что HREE имеют положительные корреляции с Ti (Yr, Yb), для LREE имеющаяся статистическая выборка из 12 добротных в отношении полноты данных анализов не позволяет найти значимые корреляции с петрогенными компонентами. Полученная нами выборка в 24 РФА-СИ анализа позволяет несколько дальше продвинуться в таком анализе в отношении оценки характера линейных коррелятивных связей перераспределяемых в системе петрогенных и примесных элементов: K(+r) – Ca, Ti, Cu, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Sn; K(-r) – Ni (никель не имеет положительных корреляций ни с одним из 40 определявшихся элементов); значения близкие к $r = +1$ Cu, Sr, Y, Zr. Для Ca(+r) – Ti, Ga, Sr, Y, Zr, Sn; Ca(-r) – Fe, Ni. Характерно, что для Ti обнаруживаются аналогичные значения r , за исключением Fe, для которого нет значимых линейных корреляций. Весьма интересны линейные корреляции Mn(+r) – Cr, Zn, Ga, Mo, Pb. Показательно то, что Fe(+r) – Rb, Gd; Fe(-r) – Ca, Ge. Вызывают некоторые размышления связи Cr(+r) – Mn, Zn, Ga, Mo, Pb, как и для Cu(+r) – K, Ti, Rb, Sr, Y, Zr, Sn. При этом Cr не имеет отрицательных линейных корреляций. Полученная выборка данных ISP-MS лишь частично перекрывается с линейкой данных РФА-СИ в отношении примесных компонентов с удовлетворительным согласованием численных значений. По полученной статистике ($n = 12$) в отношении ЭРЗ, U, Th, Au, Ag и ряда других элементов в указанном ряду преобразований гарбургитов можно указать только тренды и их соотношения с оценками (для аналогичной по объему выборке) в [Ishimaru et al., 2007]. По нашим данным в рассматриваемом ряду преобразований исходной матрицы фиксируется нелинейное возрастание содержаний всех ЭРЗ. Никаких явных отклонений в «поведении» LREE, MR EE и HREE, отмеченные в [Ishimaru et al., 2007], не обнаружены. Направленного изменения содержания Au, Ag не просматривается, есть возрастание содержаний Cs, W, Th и неустойчивые колебания содержаний U.

Оценки динамики конвективного прогрева толщи литосферы над областью ретроградного кипения базитового очага, который по существующим моделям может находиться на глубине порядка 100 км, получены нами по схеме [Шарапов и др., 2007] для магматического флюида состава $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ в зоне высоко проницаемых пород (эффективная пористость у поверхности Земли порядка 0,1 и проницаемостях $10^{-14} - 10^{-13} \text{ м}^2$). Они показывают, что при конвективном прогреве температуры плавления метасоматизированных ультрабазитовых пород на рассматриваемых глубинах 30-40 км могут быть достигнуты примерно за 100-120 тыс. лет. Далее со временем система в отношении вида профиля температур будет характеризоваться квазистационарным состоянием. Решение задачи неизотермической равновесной физико-химической динамики метасоматического взаимодействия восстановленного флюида указанного выше валового состава макрогазовой смеси в приближении многорезервуарного проточного реактора для многослойной литосферы [Шарапов и др., 2007] показывает, что на границе слоев разного состава фиксируются максимумы привноса таких петрогенных компонентов как Si, Fe, Na, K. Поэтому наблюдаемые эффекты «гранитизации» ультрабазитов могут быть объяснены уже в рамках такого приближения. Однако существующие базы данных для летучих соединений не позволяют получить схему метасоматического обогащения ультрабазитов Al, поступающего из

глубинного магматического очага. К сожалению, существующие модели плавления пока не позволяют корректно описывать частичное конвективное плавление и последующую кристаллизацию выплавов в системах рассматриваемого типа.

Из полученных структурно-минералогических и аналитических данных можно сделать следующие предварительные выводы: 1) подтверждается гипотеза [Колосков, 1999] о магматической природе выделенной породной ассоциации базит-ультрабазитовых ксенолитов под Авачинским вулканом, формирующейся в результате конвективного плавления деплетированных дунит-гарцбургитовых пород при их предварительном метасоматическом преобразовании в термодинамических условиях шпинеливой фации; 2) этот процесс связан с поступлением из более глубоко расположенных магматических очагов восстановленных водосодержащих флюидов; 3) эволюция составов возникающих изверженных пород связана с изменением со временем состава и температуры глубинных флюидов от высоко восстановленных относительно маловодных к высоководным относительно окисленным газовым смесям; 4) физико-химическая природа такой эволюции флюидов для нас пока не ясна; 5) их более детальная термодинамическая и физико-химическая характеристика будет установлена из комплексного изучения расплавных, газовых и газовой-жидких включений во всем спектре минералов исходной породной матрицы и новообразованных минеральных ассоциаций. Эта информация позволит построить более корректную физико-химическую модель преобразования ультрабазитов под вулканами Камчатки над сейсмофокальной зоной.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-05-00467.

Список литературы

Колосков А.В. Ультраосновные включения и вулканы как саморегулирующаяся геологическая система. М.: Научный мир, 1999. 220 с.

Колосков А.В., Пузанков М.Ю., Пирожкова Е.С. Включения в базальтоидах островных дуг: к проблеме состава и генезиса переходного слоя «коро-мантийной смеси» // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский, 2001. 428 с.

Кутыев Ф.Ш., Шарапов В.Н. Петрогенезис под вулканами. М.: Недра, 1979. 197 с.

Стенина Н.Г., Шарапов В.Н., Кутыева Г.В. Микрозональность интенсивности воздействия потоков горячих флюидов на трещиноватые базиты под вулканами Восточной Камчатки // Рудная зональность и физико-химия гидротермальных систем. Новосибирск: Наука, 1980. С. 113-120.

Стенина Н.Г., Шарапов В.Н., Кутыева Г.В. Микроструктура фено- и ксенокристаллов плагиокалаза из базальтовых лав Камчатки // Динамические модели физической геохимии. Новосибирск: Наука, 1982. С. 89-98.

Шарапов В.Н., Ионе К.Г., Мазуров М.П., Мысов В.М., Перепечко Ю.В. Геокатлиз и эволюция мантийно-коровых магматогенных флюидных систем. Новосибирск: Гео, 2007. 186 с.

Ishimaru S., Arai S., Ishida Y., Shirasaka M., Okrugin V.M. Melting and Multi-stage Metasomatism in the Mantle Wedge beneath a Frontal Arc Inferred from Highly Depleted Peridotite Xenoliths from the Avacha Volcano, Southern Kamchatka // Journal of Petrology, 2007. 48(2). P. 395-433.

Ishimaru S., Arai S. New behavior of Ni in the mantle wedge deduced from high-Ni olivine in a peridotite xenolith from Avacha volcano, the Kamchatka arc // Geophysical Research Abstracts, 2007. Vol. 9. 02112. 200. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-02112.

Ishimaru S., Arai S. Metal phases in an oxidized mantle peridotite xenolith from Avacha volcano of Kamchatka arc // Geophys. Res. Abstr., 2008. V. 10. EGU2008-A-06049. SRef-ID: 1607-962/gra/EGU2008-A-06049.

Ishimaru S., Arai S. Highly silicic glasses in peridotite xenoliths from Avacha volcano, Kamchatka arc; implications for melting and metasomatism within the sub-arc mantle // Lithos, 2009. V. 107. № 1-2. P. 93-106.