

## УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И СУЩЕСТВОВАНИЯ ВКРАПЛЕННИКОВ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ В ПЛИОЦЕН-ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ВУЛКАНИТАХ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА

Г.П. Пономарев, М.Ю. Пузанков

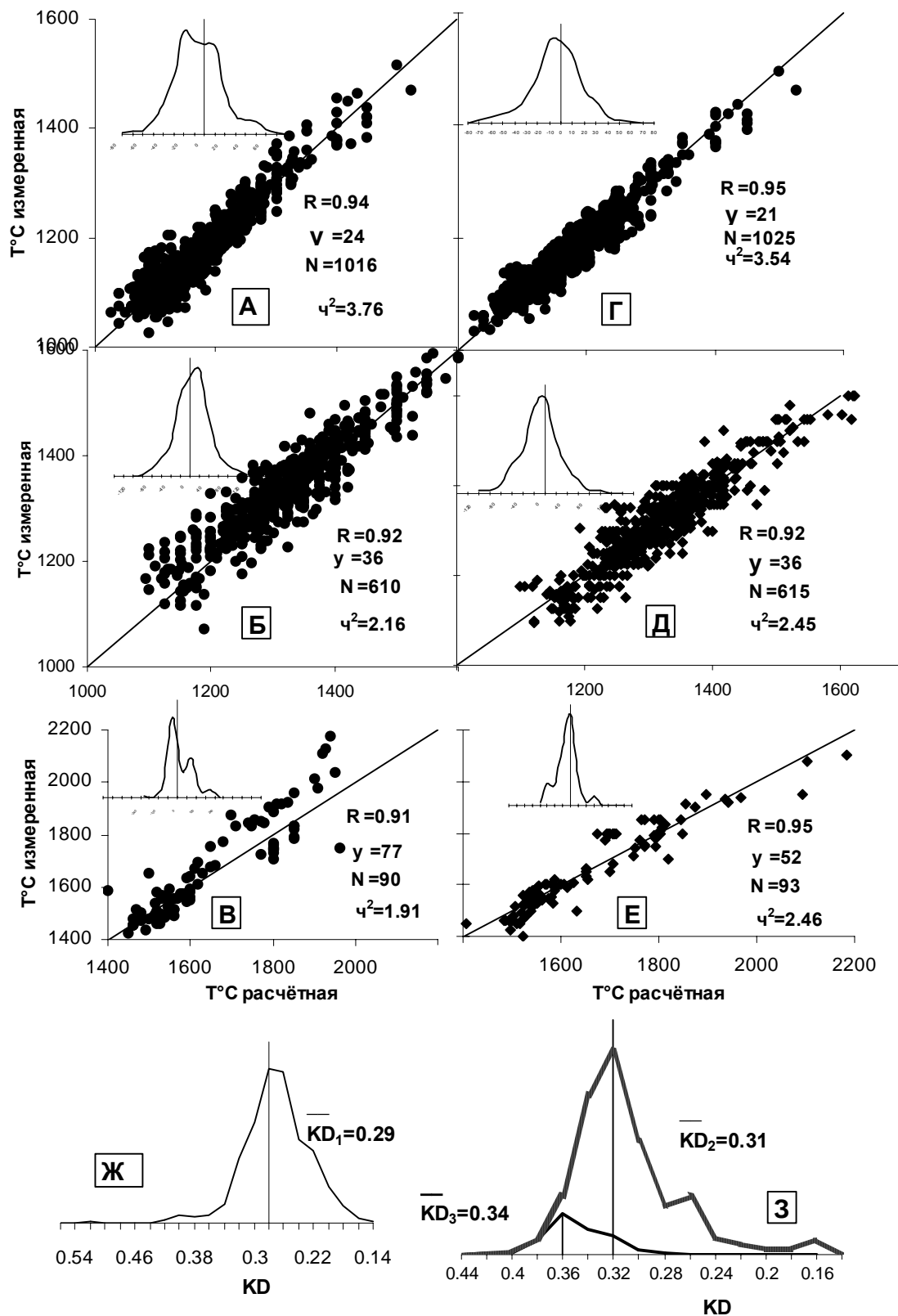
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН г. Петропавловск-Камчатский,  
e-mail: ponvol@mail.iks.ru

Определение физико-химических условий образования минералов в магматических расплавах базируется на 2-х подходах: классическом структурно-текстурном описании магматической породы, основанном на эмпирических обобщениях и с помощью различного рода физико-химических моделей. Которые в свою очередь строятся на экспериментальных данных по кристаллизации и плавлению пород и минералов в контролируемых условиях и термодинамических моделях, приложимых к магматическим системам различной сложности.

В основе всех моделей лежит равенство химических потенциалов компонентов в минералах и силикатных расплавах, находящихся в равновесии. Эти равновесные распределения позволяют оценивать температуры и давления кристаллизации тех или иных минеральных фаз, вносить коррекцию в составы расплавных включений и т. д. Однако существует ряд неясностей, связанных с областями применения тех или иных геологических барометров термометров, значениями величин  $K_D$ , что приводит к разнообразию оценок того или иного параметра при использовании различных аналитических выражений.

К настоящему времени накопился достаточный объем экспериментальных данных, позволяющих отчасти преодолеть эти проблемы. Нами была использована база экспериментальных данных «ИНФОРЕКС» (Арискин, Бармина, 2000), пополненная благодаря любезности авторов опубликованными данными включительно по 2006 г. С помощью этой базы данных были сформирован ряд выборок: расплав-1 минеральный вид (группа); расплав-2 минеральные группы; расплав-3 минеральные группы. Минералы представлены следующими группами (видами) - шпинели, оливина, ортопироксена, авгита, плагиоклаза. Составы расплавов лежат в интервале от ультраосновных до средних, с вариациями по содержанию щелочей от нормального до щелочного рядов в каждой из групп. Объемы каждой из выборок колеблются от 100 до 1000 точек. Выборки представлены двумя массивами: «сухие» условия при атмосферном давлении и «сухие» условия при повышенных давлениях вплоть до 175 кб. Экспериментальные данные с участием флюидного компонента отчасти обработаны, но пока не привлекаются из-за значительного объема данных.

По этим выборкам были рассчитаны корреляционные уравнения, связывающие составы минералов, расплавов и условий ( $P, T, f_{O_2}$ ): ~240 уравнений для атмосферного давления и ~350 для повышенного давления. Каждая из вычисленных связей может быть представлена в аналитической и графической форме, указаны границы по составам фаз, приводятся статистические характеристики (коэффициент корреляции, среднеквадратичное отклонение, вид его распределения, значение хи-квадрат). В ряде случаев весь ряд значений искомой величины не удалось описать одним аналитическим выражением и тогда использовалось деление на отрезки. На ряде выборок было выполнено параллельное тестирование наиболее применяемых термометров, барометров. На рис.1 приведены результаты сопоставления расчетных и измеренных температур: А, Б, В – по геотермометру (Ford et al., 1983), Г, Д, Е – результаты расчетов по геотермометрам (Пономарев, Пузанков, 2009) А, Г для опытов при атмосферном давлении; Б, Д - интервала 1-20 кб, В, Е - интервала 20-175 кб. На Ж и З показаны гистограммы распределения величины коэффициента распределения железо-магниевого отношения  $K_D$  (все железо в виде  $Fe^{2+}$ ) для тех же самых выборок в вышеуказанных интервалах давлений, которые демонстрируют целесообразность уточнения широко используемого численного значения этой величины.



**Рис. 1.** Сравнительные характеристики расчётов температур на выборках оливин – расплав по геотермометрам (Ford et al., 1983) и (Пономарев, Пузанков, 2009). На врезках – графики распределения ошибок геотермометров. R – коэффициент корреляции,  $y$  - среднеквадратичное отклонение, N - объём выборки,  $\chi^2$  – критерий согласия (рассчитаны для распределения ошибок с шагом равным  $y$ , т.е. на 12 бин; поэтому, согласно статистическим таблицам критические значения для уровней значимости 0.05 и 0.1 равны соответственно 3.33 и 4.17). KD – средние значения коэффициента распределения железомagneзиевого отношения в системе оливин – расплав, для выборок при различных давлениях кристаллизации. См. также пояснения в тексте.

По результатам этих исследований были построены ряд новых геотермометров, геобарометров, а также ряд уравнений связывающих состав минерала с составом равновесного расплава (мелтометры). Уравнения, позволяющие судить о равновесии внутри минеральных парагенезисов, вероятно, могут служить критериями достоверности рассчитываемых температур и давлений. Кроме того, в минералах группы шпинели и в авгите выявлен ряд, ранее неизвестных, внутренних равновесий составов (для случая равновесия с расплавом данного минерала), что является дополнительным критерием равновесия и позволяет судить о дифференциальной подвижности элементов в кристалле в различных условиях. Расплавы, равновесные с различными минеральными парагенезисами, сам являются термо- и барочувствительным и отчасти стехиометричными. Это позволяет использовать их составы в качестве термометров, барометров, и оценивать содержания в нем элементов, а также предполагать с какими минералами они могут быть в равновесии. Все полученные нами уравнения являются корреляционными, но позволяют наметить ряд функциональных связей в минералах и расплавах между элементами. Этот материал будет оформлен в виде монографии в ближайшее время и планируется создание программы с использованием итерационных методов при решении систем уравнений и учете влияния флюидной компоненты.

Созданные нами корреляционные уравнения были использованы для оценок условий кристаллизации и существования минералов-вкрапленников и включений в них из плиоцен-четвертичных лав основного и среднего составов Курило-Камчатского региона. Для расчетов были использованы опубликованные данные по составам пород, минералов и включений в них для следующих вулканов: Шивелуч (Волынец и др., 1997); Харчинский и Заречный (Волынец и др., 1999); Ключевской (Хубуная и др., 1993; Хубуная, Соболев, 1998; Миронов и др., 2001; Арискин и др., 1995; Плечев и др., 2000); БТТИ (Флеров и др., 1984); Карымский вулканический центр (Гриб, 2007); Авачинский (Портнягин и др., 2005; Ishimaru et al., 2007; Толстых и др., 2002); Мутновский, Горелый, Ксудач (Фролова и др., 2001; Плечев и др., 2008; Чашин, 2008); кальдера Медвежья, вулкан Баранского (о. Итуруп, Южные Курилы) (Биндеман, 1997; Толстых и др., 1997; Коваленко и др., 2004).

Для оценки составов расплавов, в каждом из вышеуказанных вулканов, на момент начала кристаллизации среди опубликованных данных отбирались наиболее магнезиальные разности оливинов и наиболее магнезиальные шпинели из включенных в эти кристаллы оливинов. Была проведена оценка равновесности (расхождение реальной и расчетной величины должно лежать в рамках  $3 \sigma$ ) этого парагенезиса по 5 уравнениям в 36 сформированных парах, а также с помощью двух уравнений оценивалось внутреннее равновесие в кристаллах шпинели. Равновесными оказались **ol-sp** пары в лавах прорыва Булочка (Ключевской вулкан); лавах вулкана Стена и извержения 1996 г. (Карымский вулканический центр) и лавах докальдерного комплекса вулкана Горелый. Во всех остальных случаях включенные кристаллы шпинели оказались равновесными, или с более железистыми оливинами, чем реально их включающие (большинство **ol-sp** пар), или с более магнезиальными, чем их включающие (Северный и Южный прорывы БТТИ, побочный прорыв Апохончич Ключевского вулкана). Вероятными причинами отсутствия равновесия могут быть следующие: шпинели, служащие затравками для кристаллов оливина, являются ксеногенными; наиболее магнезиальные кристаллы шпинели не были проанализированы и наиболее реальным, по нашим представлениям, является переуравновешивание **ol-sp** пар при понижении температуры расплава. Переуравновешивание идет за счет изменения состава кристаллов шпинели, имеющих многократно меньшие размеры относительно включающих их кристаллов оливина. В случаях же расчетного равновесия с более магнезиальным оливином включенные в них кристаллы шпинели росли в более магнезиальном расплаве и не успели переуравновеситься.. Эти соответствия и несоответствия составов минеральных парагенезисов равновесию, возможно, могут служить геоспидометрами. Внутренне равновесными оказались только кристаллы шпинели из лерцолитовых ксенолитов в базальтах вулкана Заречного и гарцбургитовых ксенолитов из андезитов Авачинского вулкана. Эти кристаллы шпинелей неравновесны с оливинами из этих включений, а содержание кальция в этих оливинах ( $\leq 0.08\%$ ), согласно полученных нами корреляционных уравнений, не соответствует составам оливинов образовавшихся из расплавов основного состава.

Используя равновесность **ol-sp** пары в магнезиальных лавах прорыва Булочка были рассчитаны условия существования этого парагенезиса с расплавом. Для расчетов были

использованы также данные по наиболее магнезиальным разностям авгитов, которые оказались как внутренне равновесными так и равновесными с аналогичными разностями оливинов. Были использованы различные варианты корреляционных связей и составов минералов. В итоге получены следующие диапазоны условий: температуры кристаллизации – 1320-1430<sup>0</sup>С, наиболее вероятная оценка лежит в диапазоне 1320-1370<sup>0</sup>С, рассчитанная температура по составу, приводимого авторами первичного расплава (Хубуная, Соболев, 1998) при давлении 15 кб. -1360<sup>0</sup>С; оценка величины давления лежит в интервале 14-16 кб, содержание MgO ~ 14%. Высокоглиноземистые базальты Ключевского вулкана, представленные лавами побочного прорыва Апохончич по нашим оценкам начинают кристаллизоваться при температурах ~1200<sup>0</sup>С и давлении ~9 кб (расчет для «сухих» условий). Сходные значения получаются и по составам первичных расплавов, приведенных в работе (Миронов и др., 2001). Состав первичного расплава по нашим оценкам выглядит следующим: SiO<sub>2</sub>-50.6%, TiO<sub>2</sub>-1.2%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-16.7%, FeO-12.9%, MgO-6.8%, CaO-10.2%, Na<sub>2</sub>O-2.8%. Кристаллизация плагиоклаза начинается при температуре - 1170-1100<sup>0</sup>С и давлении - 6 кб, кристаллизация двупироксеновой ассоциации, приведенной в работе (Арискин и др., 1995) по нашим оценкам происходит при температуре - 1230<sup>0</sup>С и давлении-8 кб. Кристаллизация высокоглиноземистых базальтов извержения 1996г. в Карымском вулканическом центре начинается при температурах ~ 1200<sup>0</sup>С и давлении 7-9 кб., содержание MgO в расплаве на этот момент составляет ~7,5%. Кристаллизация двухфазных расплавных включений в оливине предположительно начиналась при температурах 1100-1150<sup>0</sup>С и давлениях (?) ~4 кб. Постоянный интерес вызывают экзотические породы Авачинского вулкана-авачиты. По нашим оценкам их кристаллизация (с использованием составов клинопироксенов) начинается при температурах ~ 1300<sup>0</sup>С и давлениях 11-12 кб., расплав содержит SiO<sub>2</sub>-53%? MgO-11%. Стекла в гарцбургитовых включениях из лав вулкана квазиравновесны при температуре - 1100<sup>0</sup>С и давлении 1 кб. Оливин – анортитовая ассоциация, слагающая алливалиты из пирокластических отложений вулкана Ксудач по нашим оценкам неравновесна, расчеты по расплавным включениям (сухие условия) дают температуру ~1160<sup>0</sup>С и давление 4-6 кб. Начало кристаллизации расплавов, породивших лавы вулканических построек кальдеры Медвежья, по нашим оценкам, соответствует температуре 1350-1390<sup>0</sup>С и давлениям 10-12 кб.

Оценки условий кристаллизации магм в Курило – Камчатском регионе показывает, что существует, как минимум два этапа образования породообразующих минералов – вкрапленников в разноглубинных очагах. Кристаллы оливина, имеющие состав Fo<sub>91</sub> присутствуют, вероятно, в лавах многих вулканов, но условия их образования могут отличаться как по давлению, так и по температуре. Наличие равновесных - неравновесных **ol-sp** ассоциаций в вулканиках свидетельствует, что подъем магм с глубины ~ 50 км, в некоторых случаях, может ограничиваться сроком ~ в 1 месяц.

### Список литературы

- Арискин А.А., Бармина Г.С.** Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм М.: Наука, 2000. 362с.
- Арискин А.А., Бармина Г.С., Озеров А.Ю., Нильсен Р.Л.** Генезис высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана // Петрология, 1995. Т. 3. № 5. С. 496-521.
- Биндеман И.Н.** Периодическое смешение магм с кумулятами как механизм циклической эволюции вулкана Баранского (о. Итуруп, Курильские острова) // Геохимия, 1997. № 4. С. 380-390.
- Волынец О.Н., Пономарева В.В., Бабанский А.Д.** Магнезиальные базальты андезитового вулкана Шивелуч, Камчатка // Петрология, 1997. Т. 5. № 2. С. 206-221.
- Волынец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Дз.М.** Харчинский и Заречный вулканы- уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке: вещественный состав вулканических пород // Вулканология и сейсмология, 1999. № 1. С.31-45.
- Гриб Е.Н.** Минералогические особенности оливин содержащих базальтов Карымского вулканического центра. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 2. Вып. №10. С. 17-33.
- Коваленко В.И., Наумов В.Б., Толстых М.Л., Царева Г.М., Кононкова Н.Н.** Состав и источники магм кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) по данным изучения расплавных включений. // Геохимия, 2004. № 5. С.467-487.

**Миронов Н.Л., Портнягин М.В., Плечев П.Ю., Хубуная С.А.** Заключительные этапы эволюции магм Ключевского вулкана (Камчатка) по данным изучения расплавных включений в минералах высокоглиноземистых базальтов // Петрология, 2001. Т. 9. № 1. С.51-69.

**Плечев П.Ю., Миронов Н.Л., Плечева А.А., Хубуная С.А.** Особенности химического состава и образования расплавных включений в плагиоклазах потока Апохончич, влк. Ключевской (Камчатка) // Геохимия, 2000. № 1. С. 39-47.

**Плечев П.Ю., Шишкина Т.А., Ермаков В.А., Портнягин М.В.** Условия формирования алливалитов – оливин-анортитовых кристаллических включений - в вулканитах Курило-Камчатской дуги. // Петрология, 2008. Т.16. № 3. С. 248-276.

**Портнягин М.В., Плечев П.Ю., Матвеев С.В., Осипенко А.Б., Миронов Н.Л.** Петрология «авачитов»- высокомагнезиальных базальтов Авачинского вулкана(Камчатка). 1. Общая характеристика, состав пород и минералов. // Петрология, 2005. Т. 13, № 2. С.115-138.

**Толстых М.Л., Наумов В.Б., Кононкова Н.Н.** Три типа расплавов , участвовавших в формировании андезитобазальтов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) // Геохимия, 1997. № 4. С. 391-297.

**Толстых М.Л., Бабанский А.Д., Наумов В.Б., Базанова Л.И., Кононкова Н.Н.** Химический состав, элементы примеси и летучие компоненты в расплавных включениях в минералах андезитов вулкана Авачинский, Камчатка. // Геохимия, 2002. № 11. С.1229-1237.

**Флеров Г.Б., Андреев В.Н., Будников В.А., Цюрупа А.И.** Петрология продуктов извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. С. 223-284.

**Фролова Т.И., Плечев П.Ю., Тихомиров П.Л., Чураков С.В.** Расплавные включения в минералах алливалитов Курило-Камчатской островной дуги. // Геохимия, 2001. № 4. С 382-393.

**Хубуная С.А., Соболев А.В.** Первичные расплавы известково-щелочных магнезиальных базальтов Ключевского вулкана(Камчатка) // ДАН, 1998. Т. 300. №1. С.100-102.

**Хубуная С.А., Богоявленский С.О., Новгородцева Т.Ю., Округина А.М.** Минералогические особенности магнезиальных базальтов как отражение фракционирования в магматической камере Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология, 1993. № 3. С. 46-68.

**Чащин А.А.** Петрология пород вулканов Горелый и Мутновский (южная Камчатка). Дисс. на соискание к.г.- м.н. Владивосток, 2008. 306 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 Avacha volcano, southern Kamchatka // Journ. of Petrol., 2007. V. 48, № 2. P.395-433.

**Ford C. E., Russel D.G., Craven J.A., Fisk M.R.** Olivine-liquid equilibria: temperature, pressure and composition dependence of the crystal/ liquid cation partition coefficients for  $Mg^{2+}$ , Ca and Mn // Journ. of Petrol., 1983. V. 24. P. 3, p. 256-265.