

УДК 552.11

Распределение породообразующих элементов в системе расплав - кальциевый амфибол по экспериментальным данным.

Пономарев Г.П., Пузанков М.Ю.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006
Петропавловск-Камчатский; e-mail: ponomarev@kscnet.ru*

Ключевые слова: парагенезис, амфибол, расплав, равновесие

Первично магматические амфиболы входят в состав минеральных ассоциаций большинства, наиболее распространенных видов, магматических пород. В вулканитах они представлены вкрапленниками и относительно редко встречаются среди микролитов в основной массе. В амфиболах, являющихся многокомпонентными твердыми растворами, практически все породообразующие элементы являются и минералообразующими, включая и флюидную составляющую магм, в отличие от главных магматических породообразующих минералов, состоящих, как правило, всего из нескольких породообразующих оксидов. Это делает привлекательным использования их составов для создания широкого круга уравнений, на основе экспериментальных данных, связующих составы фаз в системе расплав + амфибол с составом расплава, температурой, давлением, содержанием летучих, в частности воды, фугитивности кислорода и т. д. В настоящем в петрологической практике для расчетов условий магматической кристаллизации амфиболов используются в основном такого рода уравнения из работ (Ridolfi, Renzulli, 2012; Molina et al., 2015; Putirka, 2016). Но приводимые в каждой из работ наборы уравнений имеет те, или иные ограничения: или созданы на небольшом числе экспериментальных результатов (менее 100 точек), или используются только составы одной из фаз парагенезиса, или отсутствуют уравнения, позволяющие судить о равновесности системы расплав-амфибол, что крайне важно для различения природных ассоциаций от парагенезисов. Для дополнения и расширения возможностей подобного рода систем уравнений для парагенезиса расплав-амфибол нами был использован массив экспериментальных данных, созданный на основе базы экспериментальных данных по фазовым равновесиям изверженных горных пород (система ИНФОРЭКС) (Арискин,

Бармина, 2000). Сложностью для последующих расчетов является то, что в экспериментах, из этой базы данных, не указаны содержания летучих, в частности воды, а указано только насыщенными, или недосыщенными водой являются расплавы этой системы. Это не позволяет учесть влияние содержаний воды на особенности межфазного распределения элементов, что, вероятно, ухудшило информативность полученных уравнений. Характеристики этого собранного массива экспериментальных данных, объединяющим эксперименты с насыщенным и недосыщенным флюидом расплавами, представлены ниже в таблице.

Таблица – Интервалы содержаний компонентов в расплавах и амфиболах.

1	2	3
	LQw%	LQ ат. %
SiO ₂	38,54 - 79,84	37,28 - 76,06
TiO ₂	0,03 - 4,4	0,02 - 3,14
Al ₂ O ₃	7,59 - 25,5	8,61 - 27,38
FeO	0,54 - 19,12	0,42 - 15,31
MnO	0,01 - 0,68	0 - 0,53
MgO	0,02 - 6,20	0,01 - 8,29
CaO	0,74 - 16,50	0,69 - 16,13
Na ₂ O	0,3 - 11,94	0,55 - 21,23
K ₂ O	0,07 - 5,94	0,08 - 7,06
P ₂ O ₅	0,01 - 2,47	0,01 - 1,96
Cr ₂ O ₃	0,01 - 0,07	0,01 - 0,05
H ₂ O	3,3 - 16,20	

1	4	5
	HBw%	HB ат. %
SiO ₂	37,78 - 53,68	36,06 - 51,76
TiO ₂	0,11 - 6,44	0,07 - 4,74
Al ₂ O ₃	1,84 - 19,33	2,08 - 22,27
FeO	2,86 - 24,37	2,16 - 19,97
MnO	0,04 - 1,92	0,03 - 1,61
MgO	4,98 - 19,33	7,25 - 26,40
CaO	5,14 - 15,4	5,39 - 14,95
Na ₂ O	0,59 - 4,51	1,10 - 8,09
K ₂ O	0,01 - 2,31	0,01 - 2,71
P ₂ O ₅	0,02 - 0,4	0,02 - 0,32
Cr ₂ O ₃	0,01 - 0,27	0,01 - 0,19
H ₂ O	1,06 - 3,25	

Примечание. 1 компоненты. 2, 4 интервалы содержаний компонентов в весовых процентах 2 - в расплаве, 4 - в амфиболах. 3,5 интервалы содержаний компонентов в атомных процентах 3 - в расплаве, 5 - в амфиболах. Интервалы значений в опытах давления 0.5 - 27.0 килобар, температуры 675 - 1130 °С, фугитивности кислорода (-4,13) - (-16,52). В 111 опытах фугитивность кислорода не регистрировалась, в большинстве опытов фугитивность кислорода соответствовала буферам QFM±, NNO± и их

окрестностям, соответственно в 114 и 229 опытах. Единичные эксперименты проводились проводились при соответствии буферам CCO, COC, IW, NH, MMO, WM.

С использованием этого массива экспериментальных данных была создана система уравнений, позволяющая вычислять значения следующих величин в равновесной системе расплав-амфибол: содержания Si, Ti, Al, Fe (все в виде Fe²⁺), Mg, Ca, Na в расплаве; значения T и P; равновесие расплав-амфиболового парагенезиса по содержаниям ряда элементов в этих фазах. Ниже представлены некоторые из этих уравнений.

Расчет содержания кремния в расплаве

$$Si_m = 0,78 * Z1 + 52,19$$

$$\text{где } Z1 = Si_{Amf} - 5 * Ti_m - Ti_{Amf} - Fe_m + Fe_{Amf} / 3 - Al_m - Na_m / 1,5 - 2 * K_{Amf}$$

диапазон значений 37,3–76,1 атом.%; N1 — 493; R — 0,95; σ — 2,25 атом.%; χ^2 — 1,9

Расчет температуры (с учетом давления)

$$T = - 1,14 * Z1 + 1060,8$$

$$\text{где } Z1 = Si_{Amf} + 2 * Si_m - 10 * (Ti_{Amf} + Na_{Amf}) + 2 * Fe_{Amf} + 3 * (Fe_{Amf} + 9) / Fe_m - 4 * Mg_m - 3 * Ca_m - 2 * P$$

диапазон значений 675–1130°C ; N1–491; R–(0,87); σ – 43,5°C; χ^2 –3,46.

Среди полученных уравнений некоторые имеют невысокие значения коэффициентов корреляции (R) – (~ 0,75–0,86) и значениями χ^2 – 3,5 и выше (что указывает на неполное соответствие распределения ошибок закону нормального распределения). К их числу относятся уравнения для расчета содержаний титана, магния, натрия в расплаве и давления (R–0,75; χ^2 =7,13), а также одно из уравнений для расчета температуры. Результаты расчетов по этим уравнениям можно относить к разряду оценочных на данном этапе исследований.

На этом, использованном для расчетов уравнений, массиве данных были протестированы уравнения для расчетов значений температуры и давления и содержаний кремния в расплаве из работ (Ridolfi, Renzulli, 2012; Molina et al., 2015; Putirka, 2016). Результаты тестирования показали следующее. Уравнения для расчетов температуры имеют значения R в интервале 0,5–0,84 и значения χ^2

=3,88–7,99 и могут быть использованы, как оценочные. Уравнения для расчета давления показали следующие результаты: R имеет значения 0,48–0,7; χ^2 =9,66–19,09 и отличаются в худшую сторону от полученного нами (R–0,75; χ^2 =7,13) результата. Эти характеристики однозначно указывают на низкую информативность получаемых значений температуры и давления по тестируемым уравнениям. Приемлемыми для расчетов, с некоторой долей осторожности, можно считать уравнения для расчета содержания SiO₂ в расплаве из (Putirka, 2016), имеющие следующие характеристиками по результатам тестирования: R=0,73–0,76; χ^2 =2,92–1,62. К сожалению, нам не удалось протестировать амфиболовый геобарометр из работы (Симакин, Шапошникова, 2017) из-за графической обработки данных. В целом мы полагаем, что учет содержаний воды в экспериментальных результатах и использование данных по системам расплав + амфибол + магнетит, расплав + амфибол + клинопироксен, расплав + амфибол + плагиоклаз и различные варианты комбинаций из этих систем позволят получить уравнения, дающие более высокоточные расчеты искомых величин.

Список литературы

- Арискин, А.А., Бармина, Г. С. (2000) Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука. 363с.
- Симакин, А.Г., Шапошникова, О.Ю. (2017) Новый амфиболовый геобарометр для высокомагнезиальных хандезитовых и базальтовых магм. Петрология. 25 (2). С.215–230.
- Molina, J.F., Moreno, J.A., Castro, A., et al. (2015) Calcic amphibole thermobarometry in metamorphic and igneous rocks: new calibrations based on plagioclase/amphibole Al-Si partitioning and amphibole/liquid Mg partitioning. Lithos. Vol. 232. P. 286–305.
- Putirka, K. (2016) Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes. Amer. Mineralogist. Vol. 101. P. 841–858.
- Ridolfi, F., Renzulli, A. (2012) Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and thermometric empirical equations valid up to 1,1300C and 2.2 GPa. Contrib. Mineral. Petrol. 163. P. 877–895.