

Экспериментальное изучение парциального плавления метабазитов в системе H₂O–NaCl

Л. И. Ходоревская

Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

Khodorevskaya@mail.ru

При 900°C и давлении 5 кбар изучено взаимодействие амфиболита с флюидной фазой, представленной H₂O и растворами NaCl с X_{соли}, меняющейся от 0.1 до 0.5. Основные минеральные ассоциации после опытов представлены зональным амфиболом, плагиоклазом, расплавом, магнетитом. Клинопироксен отмечался только при X_{NaCl} < 0.1. Расплавы кварц нормативные, и только введение в систему флюидной фазы с X_{NaCl} > 0.5 определяет образование нефелин нормативных составов расплавов. Содержание хлора в расплавах возрастает от 0.4 до 1.5 мас.% с увеличением X_{NaCl} во флюиде от 0.1 до 0.47. В краевых частях амфиболов с ростом X_{NaCl} от 0.1 до 0.5 наблюдается изоморфное замещение Al(IV) → Si, Fe²⁺ → Mg, (Ca+Mg+Fe²⁺) → (Na+Fe³⁺+Al(VI)). Содержание Cl в амфиболе возрастает с ростом X_{NaCl} вплоть до значений 0.2 мас.% при X_{NaCl} = 0.50.

Ключевые слова: эксперимент, амфиболит, NaCl, флюид

Ссылка: Ходоревская, Л. И. (2012), Экспериментальное изучение парциального плавления метабазитов в системе H₂O–NaCl, *Вестник ОНЗ РАН*, 4, NZ9001, doi:10.2205/2012NZ_ASEMPG.

Исследования флюидных включений, представленные в многочисленных работах, показали, что концентрации растворов солей как в магматических, так и в метаморфических флюидах, могут меняться от пренебрежимо малых до высоких, отвечающих рассолам. Высокие концентрации солей во флюиде, приводящие к падению активности воды, будут менять температуры плавления пород [Webster, 1992; Aranovich, Newton, 1996] и составы сосуществующих фаз, особенно в отношении щелочей и щелочноземельных элементов. Экспериментальные исследования влияния флюидной фазы на плавление пород основного состава проводятся давно, но ограничены, главным образом, изучением систем порода - вода [Helz, 1973, 1976; Beard, Lofgren, 1991 и др.]. Влияние солевой нагрузки флюидной фазы на плавление метабазитов почти не изучено. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования составов расплавов, в опытах, полученных при парциальном плавлении амфиболита, с исходным составом флюидной фазы, заданной растворами NaCl, в которых X_{соли} менялась от 0 до 0.5.

Техника и методика экспериментов

Опыты проводились при 900°C и давлении 5 кбар на установке высокого газового давления с внутренним нагревом по закалочной методике. Исходным материалом служил тонкоизмельченные амфиболит (Amph) из мафической дайки раннепротерозойского комплекса. Основные составляющие амфиболита представлены плагиоклазом (An₄₆) – 25–30 мас. % и амфиболом (паргаситом) ≈ 70 мас. %. Состав амфибола: SiO₂ – 40.80, TiO₂ – 2.17, Al₂O₃ – 11.47, FeO – 17.22, MnO – 0.19, MgO – 9.57, CaO – 11.25, Na₂O – 2.62, K₂O – 1.46, Cl – 0.05, H₂O – потери при прокаливании – 1.8, сумма – 98.60 мас. %.

В вертикально расположенную ампулу (5 мм диаметром и 50 мм высотой) засыпалась навеска исходного амфиболита (обычно 25–40 мг), навеска NaCl (х.ч.) и заливалась дистиллированная вода. Соотношение (навеска амфиболита)/(NaCl+H₂O) варьировало от 1/2 до 1/10. Ампулы заваривались, хорошо встряхивались для более равномерного распределения соль-вода-порода в ампуле, выдерживались в режиме опытов и закачивались. Все эксперименты проводились в золотых ампулах с тем, чтобы избежать потерь железа в стенки ампул. Фугитивность кислорода f_{O₂} не контролировалась, принималось, что в опытах f_{O₂} близка к буферу Ni–NiO [Helz, 1973]. Продолжительность экспериментов – от 4 до 7 дней. После опытов ампулы вскрывались, твердая навеска извлекалась из ампулы, помещалась в контейнер, заливалась эпоксидным клеем, полировалась и анализировалась. Составы минеральных фаз, расплавов и закалочных стекол, отмеченных в амфиболите, изучались методом локального рентгеноспектрального микроанализа с применением растрового электронного микроскопа

ХОДОРЕВСКАЯ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПАРЦИАЛЬНОГО

«CamScan MV 2300», оснащенного энергодисперсионным рентгеновским спектрометром с полупроводниковым Si(Li) детектором с программным обеспечением «INCA Energy». Изображения поверхности исследуемых образцов получены с применением детектора вторичных электронов.

Результаты экспериментов

На рис. 1 представлен общий вид образцов после опытов. В опытах по взаимодействию амфиболита с водой и с разбавленными растворами ($X_{\text{NaCl}} = 0.02$) сохраняются амфиболы с

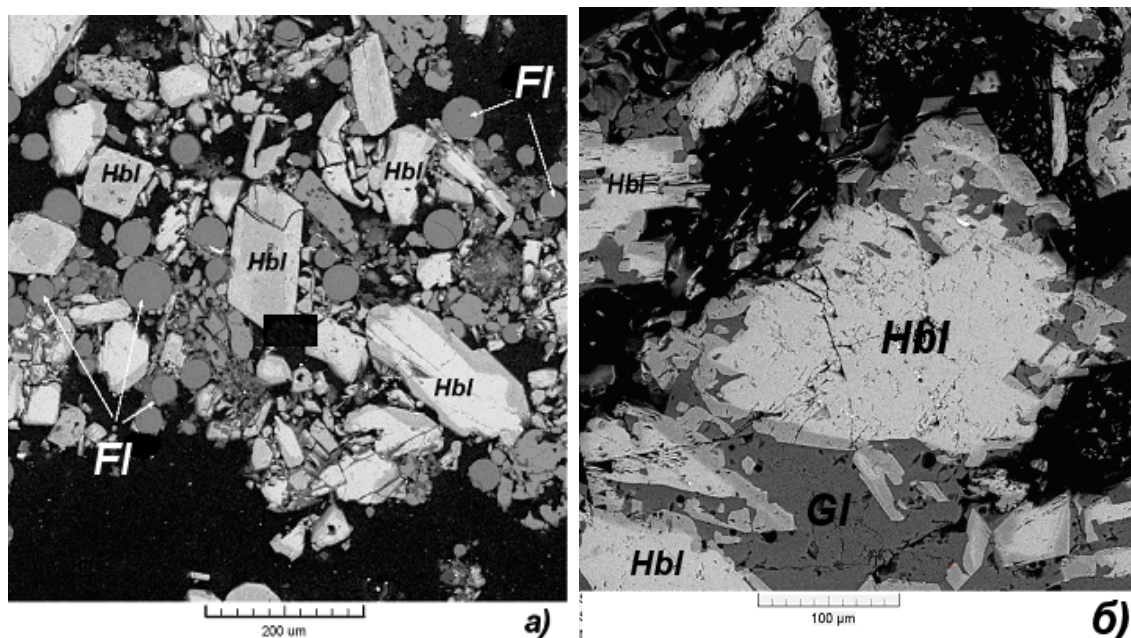


Рис. 1. Фотографии образцов после опытов. а) – общий вид образцов: зональные кристаллы амфиболов Hbl (светлое – железистая часть минерала, темное – магнизиальная), четко выраженные шарики - закалочная фаза (Fl); б) расплав Gl (темное) в интерстициях или по краям зональных амфиболов.

появившейся после опытов зональностью (рис. 1а), в небольших количествах образуется расплав (Gl), возникающий за счет плавления амфиболов (рис. 1б), резко убывает количество плагиоклаза до первых %, появляются единичные клинопироксены. Во всех образцах отмечалась железосодержащая фаза - магнетит (Mag) или титаномагнетит в виде скоплений хорошо ограненных минералов среди амфиболов, либо в форме мельчайших кристаллов в микротрещинах амфиболов, иногда фиксировались кристаллы апатита практически без хлора. При закалке из флюидной фазы фазы осаждались отдельные, хорошо выраженные шарики расплава (Fl) размером от 20 до 80–250 мкм, легко идентифицируемые под микроскопом (рис. 1а). При высокой концентрации соли в исходном флюиде ($X_{\text{NaCl}} \geq 0.5$) клинопироксен, магнетит и титаномагнетит не образуются, зональность амфибола не отмечается. Вынос Fe растворами относительно Mg, т.е., образование зональных амфиболов можно выразить реакцией $(\text{Mg,Fe})\text{Hbl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{Mg})\text{Hbl} + \text{Fe}(\text{Sol}) \rightarrow (\text{Mg})\text{Hbl} + \text{Mag}$ (1), где Fe(Sol) – комплексы Fe во флюиде. Как видно из уравнения (1) степень выноса Fe из амфиболов при заданных T – P параметрах определяется $a_{\text{H}_2\text{O}}$: при низкой $a_{\text{H}_2\text{O}}$ (растворы с высокой концентрацией NaCl) реакция (1) сдвинута влево, вынос Fe флюидом не происходит, т.е., зональность в амфиболах не проявляется. В случаях высокой $a_{\text{H}_2\text{O}}$ (растворы с низкой концентрацией NaCl) реакция (1) сдвинута вправо, Fe выносится флюидом из краев амфибола, образуется кайма магнизиального амфибола. Увеличение продолжительности экспериментов в пределах 4–7 дней не приводит к получению равновесных амфиболов в разбавленных растворах из-за крайне низких скоростей диффузии Fe-Mg в кристаллах амфибола по сравнению с со скоростями диффузии в системе амфибол-флюид. Подобное утверждение доказывается и отсутствием градиентов концентраций элементов по профилю амфибол–расплав–амфибол (рис. 2). Поэтому можно допустить, что в системе край амфибола-расплав-флюид достигается равновесие.

Расплавы. Исследования показали, что химические составы расплавов (Gl) практически полностью идентичны составам закалочных фаз и отвечают следующим средним значениям:

ХОДОРЕВСКАЯ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПАРЦИАЛЬНОГО

$\text{SiO}_2 = 60\text{--}62$ мас.%, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 23\text{--}25$ %, $\text{Na}_2\text{O} = 11\%$, $(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{FeO}) = 5$ %, $\text{K}_2\text{O} = 0.6$ %. Расплавы являются кварц нормативными, и только введение в систему флюидной фазы с $X_{\text{NaCl}} > 0.5$ определяет образование нефелин нормативных составов расплавов. Полученные расплавы в присутствии NaCl флюидной фазы, также как и при H_2O флюиде [Helz, 1973; Beard, Lofgren, 1991] отличаются несколько более низким содержанием SiO_2 по сравнению с расплавами, полученными при дегидратационном плавлении амфиболитов (без флюидной фазы).

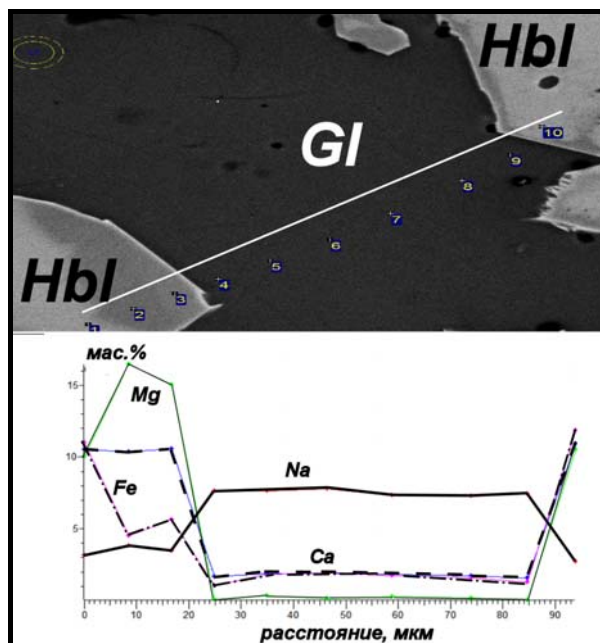


Рис. 2. Распределение элементов по профилю амфибол–расплав–амфибол

Содержание хлора в расплавах возрастает от 0.4 до 1.5 мас.% с увеличением X_{NaCl} во флюиде от 0.1 до 0.47, при этом рН закалочного флюида возрастает до 8–9, т.е., сопутствующий расплаву (Gl) флюид характеризуется повышенной щелочностью. Идентичность составов расплавов (Gl) и (Fl) свидетельствует о том, что при параметрах 5 кбар и 900°C мы находимся вблизи однофазной области, т.е., в области критической кривой расплав–флюид. В начальную стадию расслоения, связанную с закалкой опытов, происходит расслоение, возникают флюид и расплав близкие по составу.

Амфиболы

Экспериментальные данные показывают, что при дегидратационном плавлении амфиболитов (отсутствие флюидной фазы) зональность в амфиболах отсутствовала. Появление зональности в опытах с разбавленным флюидом объясняется тем, что диффузия элементов на границах амфибол–раствор происходит намного быстрее, чем диффузия элементов в самом кристалле амфибола, поэтому можно допускать, что края амфиболов находятся в равновесии с флюидом, обладающим высокой $a_{\text{H}_2\text{O}}$. С ростом X_{NaCl} от 0.1 до $X_{\text{NaCl}} = 0.50$ в краевых амфиболах возрастает содержание Si при соответствующем уменьшении изоморфного Al(IV), наблюдается изоморфное замещение $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Mg}$, $(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}) \rightarrow (\text{Na}+\text{Fe}^{3+}+\text{Al(VI)})$. Содержание Cl в амфиболе варьирует в кристаллах, однако возрастает с ростом X_{NaCl} (рис.3).

При 900°C, P=5 кбар образование расплава при дегидратационном плавлении амфиболита (Amph) может быть выражено как: $\text{Amph}_{\text{исх.}} \rightarrow \text{Hbl} + \text{Gl} \pm \text{Opx} + \text{Cpx} \pm \text{Pl} \pm \text{Ox.Fe}$ (2). При наличии NaCl-содержащего флюида уменьшение $a_{\text{H}_2\text{O}}$ приводит к расширению поля устойчивости амфибола, клинопироксен выше $X_{\text{NaCl}}=0.1$ не образуется. Учитывая, что состав флюидной фазы (Fl) и расплава (Gl) при рассматриваемых параметрах близки, реакция (2) может быть записана как: $\text{Amph}_{\text{исх.}} + \text{NaCl-флюид} \rightarrow \text{Hbl} + \text{Gl} \pm \text{OFe}$, т.е., основными фазами после опытов являются амфибол и кварц нормативный расплав, раскристаллизация которого дает кислый плагиоклаз и кварц.

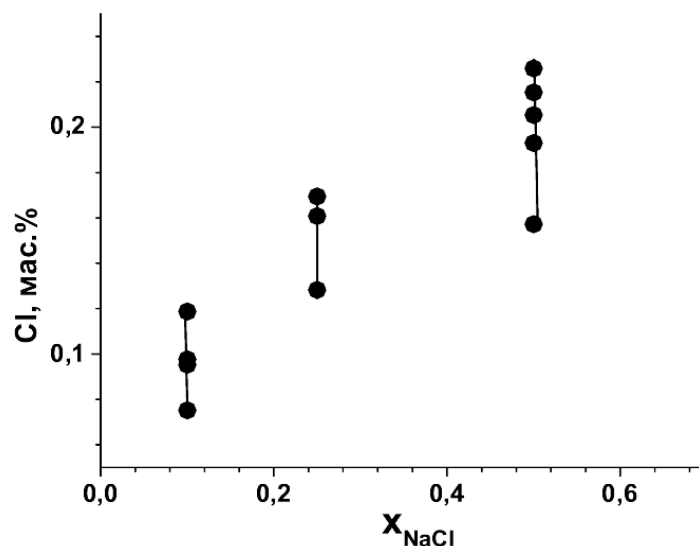


Рис. 3. Содержание Cl (масс.%) в амфиболе в зависимости от X_{NaCl} во флюиде

Литература

Aranovich, L. Ya., R. C. Newton (1996). H_2O activity in concentrated NaCl solutions at high temperatures and pressures measured by the brucite-periclase equilibrium, *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 125, pp. 200–212.

Beard, J. S, G. E. Lofgren (1991). Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3 and 6.9 kb, *J. Petrol.*, v. 32, № 2, pp. 365–402.

Helz, R. T. (1973). Phase relations of basalts in their melting ranges at $P = 5$ kb as a function of oxygen fugacity. Part I. Mafic phases, *J. Petrol.*, v. 14, pp. 249–302.

Helz, R. T. (1976). Phase relations of basalts in their melting ranges at $P = 5$ kb. Part II. Melt compositions, *J. Petrol.*, v. 17, pp. 139–193.

Webster, J. D. (1992). Fluid-melt interactions involving Cl-rich granites: experimental study from 2 to 8 kbar, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, v.56, pp. 659–678.