

УДК 550.84

ВЛИЯНИЕ ВОДЫ НА ТЕМПЕРАТУРУ СТАБИЛЬНОСТИ АМФИБОЛА В РАСПЛАВАХ

© 2009 г. А. П. Максимов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 19.12.2007 г.

Проделан теоретический анализ влияния концентрации воды в расплаве на температуру кристаллизации амфибола с позиций модели идеального расплава. Получено уравнение общего вида, позволяющее объяснить наличие изобарического температурного максимума на кривой устойчивости амфибола двояким влиянием воды на его равновесие с расплавом: в соответствии с реакцией кристаллизации вода повышает стабильность амфибола, но одновременно она понижает мольные доли других компонентов расплава, участвующих в реакции кристаллизации амфибола, тем самым, понижая его устойчивость. На примере системы паргасит-вода-углекислота показано хорошее соответствие модели экспериментальным данным. На основании обработки экспериментальных данных получены коэффициенты уравнений зависимости констант равновесий паргасит-расплав и тремолит-расплав от температуры и давления.

Амфибол является наиболее обычным водным минералом-вкрапленником вулканических пород. Ему отводится важная роль в ряде моделей генезиса андезитов и более кислых представителей известково-щелочной серии островодужных вулкаников [2]. Особый интерес амфибол представляет как критический индикатор физико-химических условий кристаллизации расплавов, таких, как общее давление, давление воды, температура и концентрация воды. В связи с этим для петрологов весьма актуальным является понимание характера влияния термодинамических параметров на стабильность амфибола и количественная характеристика соответствующих зависимостей. Однако, во многом из-за сложности состава и структуры амфиболов, существует проблема адекватного термодинамического описания их поведения в расплавах и приложения этих результатов к природным магмам. Поэтому в настоящее время при моделировании равновесий с участием амфиболов приходится делать целый ряд различных допущений.

Проведенное нами ранее исследование показало, что закономерности поведения кривых плавления безводных силикатов в водных расплавах могут быть описаны идеальной моделью растворения частиц воды в расплаве [3, 21]. Приемлемость данного подхода затем была продемонстрирована применительно к кристаллизации водной фазы на примере амфибола [22].

Ранее, используя иной подход, общие принципы влияния воды на стабильность водных фаз в расплавах уже анализировались в [12]. Было показано, что идеальная модель в состоянии описать основные эффекты поведения водных фаз, т.е. определяющее значение здесь имеют концентрации компонентов, тогда как ролью коэффициентов активности в пер-

вом приближении можно пренебречь. Результаты нашего исследования были получены независимо и согласуются с данными указанной работы. Однако детально эти результаты опубликованы не были. Они отличаются от [12] подходом и приложением к экспериментальным данным. В связи с этим представляется целесообразным изложить их более подробно.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ КРИВЫХ СТАБИЛЬНОСТИ АМФИБОЛА

Поведение амфибола в расплавах, как и других водных фаз, существенно отличается от поведения безводных силикатов. Часто наличие в породах амфибола связывают с водным характером соответствующих магм, а его отсутствие приписывают низким концентрациям в них воды. В общем случае это неверно, так как устойчивость амфибола зависит не только от наличия в магматической системе достаточного количества воды, но и от целого ряда других параметров [2, 4–6, 11, 14, 25]. Прежде всего, это – общее давление, состав флюидной фазы и температура. Большое значение имеют также состав расплава и окислительно-восстановительный режим в магме. Для стабильности амфибола в эволюционированных членах островодужных серий (андезитах – риолитах) определяющее значение имеет общее давление, при котором происходит кристаллизация вкрапленников, так как в ходе эволюции в таких магмах накапливаются достаточные количества воды. Другими словами, возможность появления пород с амфиболом на конкретном вулкане зависит, прежде всего, от глубины питающего его магматического очага. Чтобы более убедительно показать это, рассмотрим основные особенности

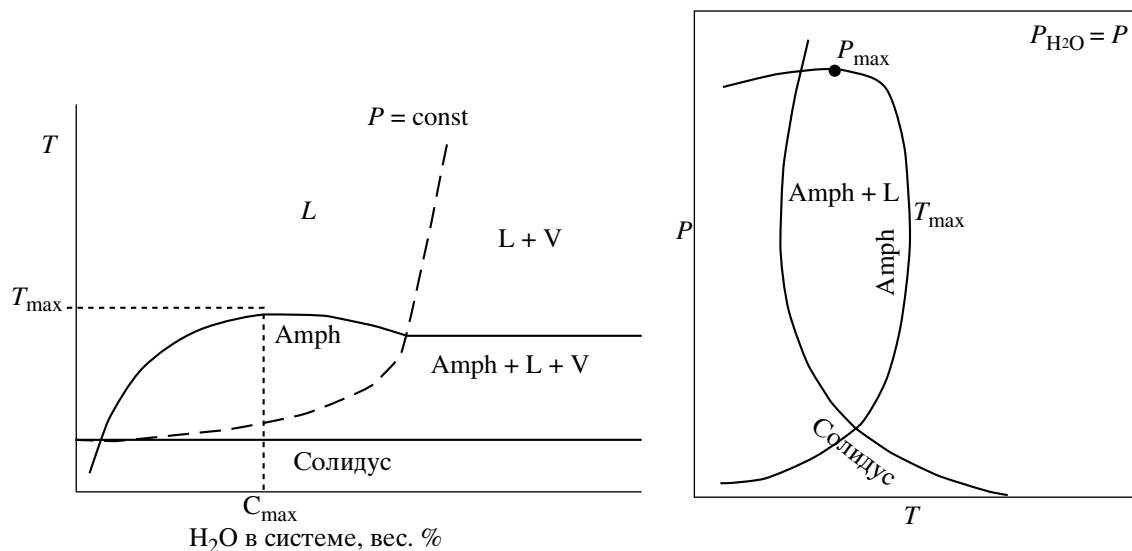


Рис. 1. Схематические кривые устойчивости амфибола (Amph): *a* – кривая стабильности амфибола в расплаве при постоянном общем давлении (P); *б* – P – T кривая стабильности Amph в водонасыщенных условиях ($P_{H_2O} = P$). L – расплав, V – пар, P_{H_2O} – давление воды, T – максимальная температура устойчивости амфибола в расплаве в изобарических (*a*) и водонасыщенных (*б*) условиях, C_{max} – концентрация воды в точке изобарического максимума стабильности амфибола, P_{min} и P_{max} – минимум и максимум стабильности амфибола в расплаве по давлению.

влияния давления, температуры и режима воды на стабильность амфибола.

Общий вид области устойчивости амфибола (Amph) показан на рис. 1*a*, *б* в P – T и T – H_2O координатах. В отличие от безводных фаз, имеющих в H_2O -недосыщенных и водонасыщенных условиях температурный минимум на P – T кривых плавления, кривая стабильности амфибола в водонасыщенных условиях имеет температурный и барический максимумы (рис. 1*a*). Так, в андезитовой магме амфибол нестабилен при температурах выше ~ 950 – 970°C [2, 11, 14, 25, 26] и давлениях, превышающих ~ 18 – 20 кбар [5]. Кроме того, существует минимальное предельное давление кристаллизации амфибола из расплава, которое определяется пересечением кривой стабильности амфибола с солидусной кривой. Для андезитовых и более кислых расплавов в условиях насыщения водой (при $P_{H_2O} = P_{общ}$) это давление находится по разным данным в интервале 0.5–1.5 кбар, т.е. на глубинах >2 – 4.5 км [2, 25–27]. При более низких давлениях амфибол нестабилен в магмах, независимо от количества воды в системе, и может иметь лишь вторичное, постмагматическое, или метаморфическое происхождение. В природных магмах кристаллизация роговой обманки протекает при температурах существенно выше солидуса, так как доля вкрапленников в вулканических породах с амфиболом, как правило, составляет не более 30–40%. Кристаллизация амфибола в таких магмах могла происходить при более высоких давлениях, чем следует из пересечения его кривой устойчивости с солидусом. Минимальное

давление, при котором могла происходить кристаллизация пород с амфиболом, увеличивается до 2–3 кбар (что соответствует глубинам ~ 6 – 9 км). Если помимо воды в магме присутствует CO_2 , то линия солидуса будет располагаться выше по температуре, чем для чисто водных (водонасыщенных) условий. Соответственно и давление, при котором солидус пересекается с кривой стабильности амфибола, будет выше.

При постоянном давлении с ростом концентрации воды в расплаве температура устойчивости Amph сначала круто возрастает, достигает максимума, а затем может наблюдаться понижение температуры, в отличие от непрерывного падения температур ликвидуса безводных фаз [11, 14] (рис. 1*a*). Особенности этого явления были детально показаны в экспериментах на системе паргасит–вода CO_2 [18]. Ранее этот эффект объяснялся по-разному. Одна из версий заключалась в возможной смене реакции, контролирующей устойчивость амфибола, с реакции гидратации на реакцию плавления по мере увеличения активности воды, так как вода производит на эти реакции противоположный эффект [11]. Согласно другому взгляду, в точке максимума содержание воды в амфиболе соответствует ее растворимости в расплаве при данных P – T условиях [18].

ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ И ЕГО АНАЛИЗ

Для описания поведения водной фазы в расплаве нами использовался подход к расплаву как к идеальному раствору, использованный ранее для описания

устойчивости безводных фаз в водных расплавах. В общем виде уравнение кристаллизации минала M , входящего в состав амфибола $Amph$, можно представить как:

$$aA^L + bB^L + \dots + kK^L + wW^L = M^{Amph}, \quad (1)$$

где A^L, B^L, \dots, K^L – окислы в расплаве (L) на однокационной основе; W – вода; a, b, \dots, k , – стехиометрические коэффициенты; w – число частиц, которые образуются при растворении воды (от 1 до 2). Для компонента i в идеальном растворе (расплаве) активность равна мольной доле (X_i). Тогда константа равновесия реакции (1) выразится как:

$$\ln K = \ln \frac{X_M^{Amph}}{(X_A)^a (X_B)^b \cdot \dots \cdot (X_K)^k (X_W)^w}. \quad (2)$$

Согласно общепринятому подходу, зависимость константы равновесия реакции от температуры (T , °К) и давления (P , бар) для конденсированных фаз (кристаллов и расплава) можно представить в виде:

$$\ln K = \frac{A}{T} + B + C \frac{P-1}{T}, \quad (3)$$

где A , B и C – константы¹. Для анализа устойчивости амфибола при постоянном давлении это уравнение можно упростить:

$$\ln K = \frac{A + C(P-1)}{T} + B = \frac{A_P}{T} + B, \quad (4)$$

где $A_P = A + C(P-1)$.

На основе уравнений (2) и (4), задавшись некоторым исходным расплавом в качестве точки отсчета, можно проанализировать влияние увеличения концентрации воды на температуру стабильности амфибола. Примем расплав с определенным количеством частиц воды h_0 за стандартный. Мольная доля компонента i в водном расплаве X_i выражается как

$$X_i = n_i / (n_s + n_w), \quad (5)$$

где n_i – число молей (катионов) компонента i в расплаве, n_s – общее число силикатных катионов в расплаве, n_w – число частиц воды в расплаве. Если к стандартному расплаву добавлено h частиц воды, то

$$X_i = n_i / (n_s + h_0 + h) = n_i / (n_0 + h), \quad (6)$$

$$X_w = (h_0 + h) / (n_s + h_0 + h) = (h_0 + h) / (n_0 + h), \quad (7)$$

где $n_0 = n_s + h_0$.

Пусть K_0 – константа равновесия реакции (1) для стандартного расплава. Для упрощения последую-

щего анализа примем допущение, что состав амфибола и силикатной части расплава не меняются с изменением концентрации воды в расплаве. Тогда из уравнений (2) и (6 и 7) получим выражение константы равновесия для расплава с другим содержанием воды:

$$\ln K = \ln K_0 + m \ln(1 + h/n_0) - w \ln(1 + h/h_0). \quad (8)$$

После подстановки этого выражения в уравнение (4) и преобразования получаем:

$$T = \frac{A_P}{\ln K_0 + m \ln(1 + h/n_0) - w \ln(1 + h/h_0) - B}, \quad (9)$$

где $m = a + b + \dots + k + w$.

Полученное уравнение предсказывает наличие максимума и позволяет оценить его положение. Обозначим

$$D = m \ln(1 + h/n_0) - w \ln(1 + h/h_0).$$

Продифференцируем уравнение (9) по h при постоянном давлении:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial h}\right)_P = -\frac{A_P}{(\ln K_0 - B + D)^2} \frac{dD}{dh}. \quad (10)$$

В точке температурного максимума на изобарической кривой стабильности амфибола эта производная должна равняться нулю. Отсюда, сравнивая уравнения (9) и (10), имеем:

$$\frac{dD}{dh} = \frac{m}{n_0 + h} - \frac{w}{h_0 + h} = \frac{m}{n_s + h^{\max}} - \frac{w}{h^{\max}} = 0, \quad (11)$$

где $h^{\max} = h_0 + h$ – число частиц воды в точке максимума:

$$h^{\max} = \frac{wn_s}{m-w}. \quad (12)$$

Соотношение (12) – это условие температурного экстремума на изобарической кривой плавления амфибола. Так как в уравнении (10) выражение

$A_P = A + C(P-1)$ всегда >0 , то $\left(\frac{\partial T}{\partial h}\right)_P > 0$ при $h < h^{\max}$

и $\left(\frac{\partial T}{\partial h}\right)_P < 0$ при $h > h^{\max}$. Следовательно, в точке

h^{\max} кривая устойчивости амфибола в расплаве проходит через температурный максимум на графике $T - H_2O$ при постоянном давлении. Можно показать, что концентрация воды C_w в точке максимума C_w^{\max} не зависит от формы ее нахождения в расплаве. Так, если в уравнении (1) вода представлена в молекулярной форме, т.е. $w = 1$, то в 100 г расплава содержится $h = C_w/18$ частиц воды и

¹ Данная зависимость подразумевает, что (1) теплоемкость реакции $\Delta C_p = 0$, так что энтальпия (ΔH_0) и энтропия (ΔS_0) реакции не зависят от температуры и (2) объемный эффект реакции ΔV_0 не зависит от температуры и давления, т.е. $A = -\Delta H_0/R$, $B = \Delta S_0/R$, $C = -\Delta V_0/R$.

$$h^{\max} = \frac{wn_s}{m-w} = \frac{n_s}{m-1} = \frac{n_s}{a+b+\dots+k},$$

$$C^{\max} = \frac{18n_s}{a+b+\dots+k},$$
(13)

где a, b, \dots, k – стехиометрические коэффициенты уравнения (1). Если вода в расплаве находится в гидроксильной форме, т.е. $w = 2$ и $h = C_w/9$, то приходим к тому же выражению для C^{\max} :

$$h^{\max} = \frac{2n_s}{m-2} = \frac{2n_s}{a+b+\dots+k},$$

$$C^{\max} = \frac{18n_s}{a+b+\dots+k}.$$

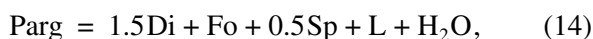
Из соотношения (13) можно примерно оценить концентрацию воды в точке T^{\max} . Так, для расплава тремолита $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, в случае его плавления по реакции типа (1), она составит ~ 2.2 вес. %.

Наличие изобарического температурного максимума устойчивости амфибола объясняется двояким влиянием воды на его равновесие с расплавом: с одной стороны, в соответствии с реакцией кристаллизации, вода повышает стабильность амфибола, с другой, растворяясь в расплаве, она понижает мольные доли других компонентов расплава, участвующих в реакции плавления-кристаллизации амфибола, тем самым понижая его устойчивость.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА УРАВНЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ ПАРГАСИТ– H_2O – CO_2

Для количественной оценки приемлемости данного подхода использованы результаты экспериментов в системе паргасит–вода– CO_2 [18]. Преимуществом этих данных является то, что они позволяют отвлечься от расчета активности твердых компонентов реакции, поскольку в ней участвуют чистые минеральные фазы, и нет необходимости учитывать фугитивность кислорода, так как система безжелезистая.

Пренебрегая растворимостью Al_2O_3 в диопсиде (Di), реакцию инконгруэнтного плавления паргасита (Parg) можно представить в виде [18]:



где Fo – форстерит, Sp – шпинель, L – расплав. Расплав без учета растворенной воды по составу соответствует смеси Ne (нефелин) + 0.5An (анортит) или $\text{NaCa}_{0.5}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. Отсюда, учитывая, что активности чистых минеральных фаз равны 1, и выражая компоненты расплава на однокатионной основе, для константы реакции (14) можно написать:

$$\ln K = \ln X_{\text{Na}} + 0.5 \ln X_{\text{Ca}} +$$

$$+ 2 \ln X_{\text{Al}} + 2 \ln X_{\text{Si}} + 2 \ln X_{\text{H}}, \quad (15)$$

где X_i – доли катионов в расплаве. Так как для данного расплава $X_{\text{Ca}} = 2X_{\text{Na}} = 4X_{\text{Si}} = 4X_{\text{Al}}$, то в итоге получим:

$$\ln K = -5.5 \ln [11 + 62.41/Z] -$$

$$- 2 \ln [62.41 + 11Z] + 2 \ln 62.41, \quad (16)$$

где $Z = (100 - C)C$, C – концентрация воды в расплаве, вес.%. Зависимость константы равновесия от температуры и давления вычислялась с учетом изменения мольного объема воды в расплаве (V_w) по уравнению:

$$\ln K = \frac{A}{T} + B + C \frac{P-1}{T} - \frac{1}{RT} \int_{P_0}^P V_w dP. \quad (17)$$

За основу для вычисления коэффициентов зависимости константы равновесия от T и P взяты экспериментальные данные при 5 и 8 кбар из [18]. Концентрации воды в расплаве рассчитывались по модели [8]. В качестве мольных объемов воды в расплаве использовались данные для системы альбит–вода [9]. Расчет коэффициентов уравнения проводился в два этапа. Сначала при давлении 5 кбар по уравнению (4) методом наименьших квадратов были найдены коэффициенты A_p и B . Затем, используя найденные значения и экспериментальные данные для давления 8 кбар, по уравнению (17) при $P_0 = 5$ кбар таким же образом вычислялись коэффициенты A и C .

Полученные коэффициенты уравнения (17) позволили рассчитать положение кривых плавления паргасита в координатах P – T для разных мольных долей воды во флюиде H_2O (рис. 2а) и T – $X_{\text{H}_2\text{O}}$ для разных давлений (рис. 3а). Результаты расчетов представлены на графиках параллельно с экспериментальными графиками из [18] (рис. 2б и 3б). Рассчитанные графики полностью воспроизводят все особенности поведения экспериментальных кривых и хорошо согласуются с ними с точки зрения абсолютного положения. Отметим, что учет изменения мольного объема воды в расплаве не повлиял заметно на результаты.

УРАВНЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТРЕМОЛИТА И ПАРГАСИТА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Соответствие расчетных и экспериментальных данных подтверждает приемлемость предложенного подхода и позволяет использовать его для получения уравнений, описывающих поведение реальных амфиболов в природных расплавах. В качестве первого шага мы применили описанный подход для вывода уравнений кристаллизации тремолита и паргасита, используя экспериментальную информацию из базы ИНФОРЭКС [1]. В первом варианте расчетов принималась гидроксильная форма рас-

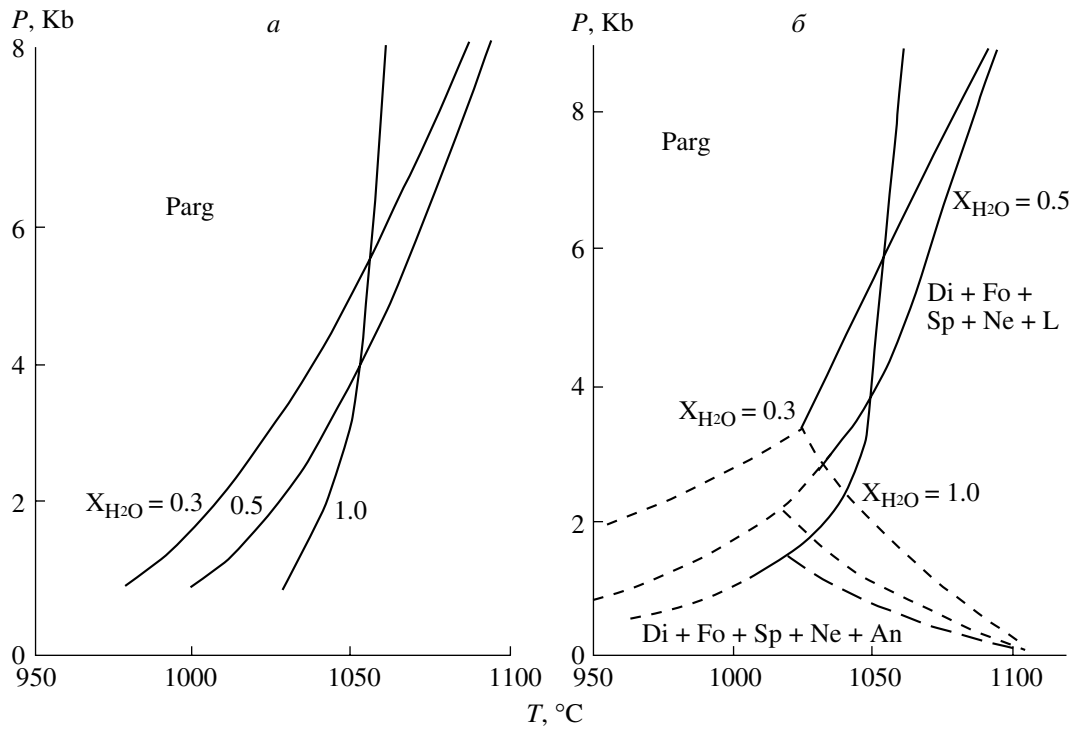


Рис. 2. P–T кривые стабильности паргасита при разных мольных долях воды во флюиде (X_{H_2O}): а – расчет; б – экспериментальные данные [18].

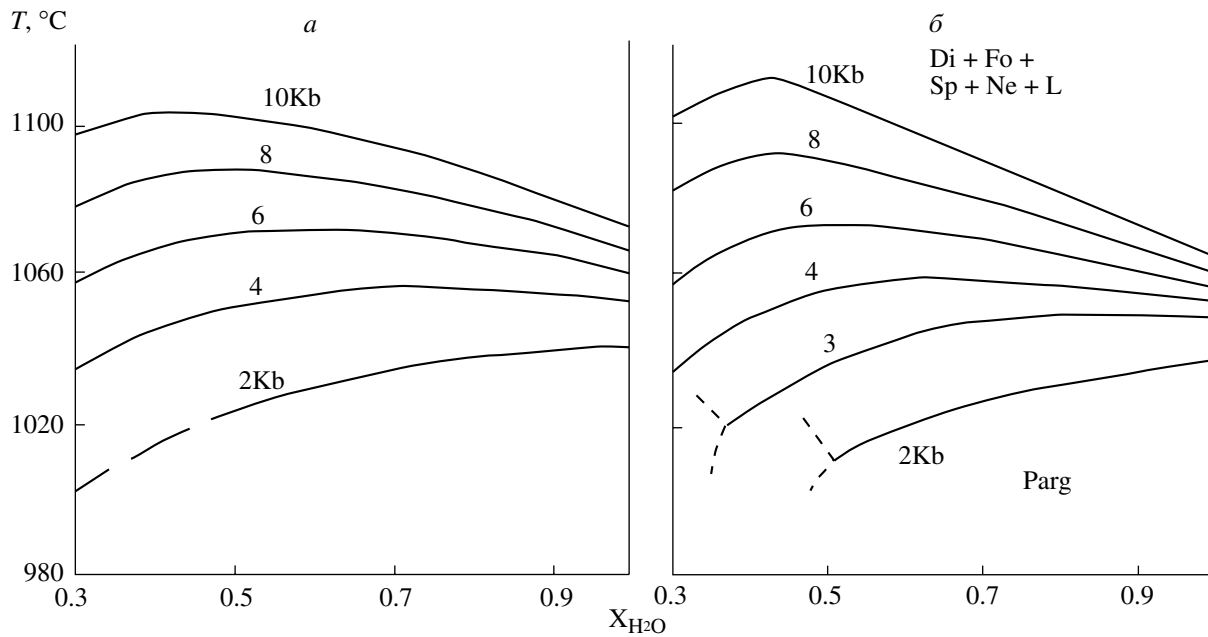
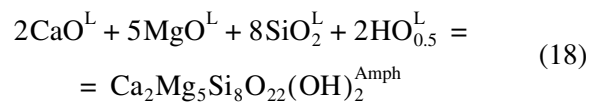
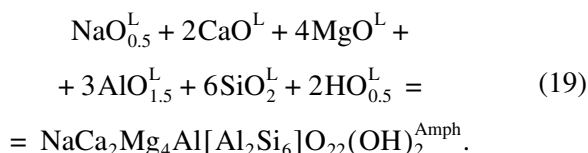


Рис. 3. Верхний предел стабильности паргасита по температуре в зависимости от мольной доли воды во флюиде при разных давлениях: а – расчет; б – экспериментальные данные [18].

творения воды в расплаве и анализировались равновесия тремолит–расплав:



и паргасит–расплав:



Основная трудность при анализе равновесий с амфиболом заключена в сложности оценки мольных долей и активностей его миналов. Ввиду отсутствия однозначности в этом приходится принимать ряд допущений и предполагать, что единая схема расчета при выводе уравнения и его последующем использовании сивелирует погрешности. Активности тремолита и паргасита в амфиболе принимались равными их мольным долям. Структурная формула амфибола рассчитывалась на 23 кислорода. Расчет доли Fe^{3+} и распределение катионов по позициям в формуле амфибола производился по схеме, предложенной в [10, 17]. Распределение Fe–Mg по позициям принималось согласно работе [23]. Необходимая для расчета этого распределения температура принималась равной экспериментальной. Мольные доли тремолита и паргасита в амфиболе выражались как:

$$X_{\text{trent}} = X_V^A \cdot (X_{\text{Mg}}^{M2})^2 \cdot (X_{\text{Mg}}^{M2})^5 \cdot (X_{\text{Si}}^{T1})^4 \cdot (X_{\text{OH}})^2, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} X_{\text{parg}} &= X_{\text{Na}}^A \cdot (X_{\text{Ca}}^{M4})^2 \cdot (X_{\text{Mg}}^{M13})^3 \\ & X_{\text{Mg}}^{M2} \cdot X_{\text{Al}}^{M2} \cdot (X_{\text{Al}}^{T1})^2 \cdot (X_{\text{Si}}^{T1})^2 \cdot (X_{\text{OH}})^2. \end{aligned} \quad (21)$$

где X_i^P – доли катионов (I) на соответствующих позициях (P) в структуре амфибола, V – вакансии. Для констант равновесий реакций (16) и (17) имеем:

$$\begin{aligned} \ln K_{\text{trent}} &= \ln X_{\text{trent}} - 2 \ln X_{\text{Ca}}^{\text{L}} - \\ & - 5 \ln X_{\text{Mg}}^{\text{L}} - 8 \ln X_{\text{Si}}^{\text{L}} - 2 \ln X_{\text{H}}^{\text{L}}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \ln K_{\text{parg}} &= \ln X_{\text{parg}} - \ln X_{\text{Na}}^{\text{L}} - 2 \ln X_{\text{Ca}}^{\text{L}} - \\ & - 4 \ln X_{\text{Mg}}^{\text{L}} - 3 \ln X_{\text{Al}}^{\text{L}} - 6 \ln X_{\text{Si}}^{\text{L}} - 2 \ln X_{\text{H}}^{\text{L}}. \end{aligned} \quad (23)$$

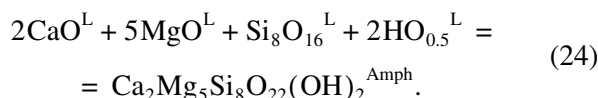
С помощью программы INFOREX для расчетов были выбраны пары составов амфибол–расплав из опытов при давлениях меньше 10 кбар, для которых были известны мольные доли воды во флюидной фазе. Из этого набора исключены опыты с низкими содержаниями MgO в расплаве (<0.5 вес. %) из-за большой погрешности, вносимой данным параметром в этих случаях. В итоге было отобрано 44 пары составов из [7, 13, 15, 16, 19, 20, 24, 28]. Из них по уравнениям (22) и (23) вычислялись логарифмы констант реакции кристаллизации тремолита и паргасита. Так как использование уравнения вида (17) не приводило к существенному улучшению результатов, но излишне усложняет расчеты, было решено использовать уравнение вида (3), для которого

методом наименьших квадратов были найдены константы A , B и C :

	A	B	C
тремолит	64888.5	–28.16	1.828
паргасит	43885.1	–8.383	1.652

Средние отклонения расчетных температур от экспериментальных составляют для обоих равновесий около 35° . Учитывая сделанные допущения и погрешности экспериментальных данных, результат можно считать приемлемым для оценочных расчетов. Однако отдельные расхождения расчетных и экспериментальных температур в 2–3 раза превышают это значение, что, вероятно, говорит о достаточно грубом приближении используемого подхода. Разница между температурами, рассчитанными по данным для тремолита и паргасита, обычно не превышает 25°C , однако в некоторых случаях достигает 45°C .

Далее подобные расчеты были проделаны для других вариантов уравнений равновесий. Расчеты по уравнениям, аналогичным (18) и (19), но для молекулярной формы нахождения воды в расплаве дали практически идентичные результаты с точки зрения рассчитанных температур и их соответствия экспериментальным. Также не привело к улучшению результатов и изменение предполагаемого числа частиц силиката в расплаве в соответствии с уравнением:



В последнем уравнении число силикатных частиц в расплаве равно 8, а в уравнении (18) оно равно 15. В соответствии с уравнением (9) влияние воды на равновесия (18) и (24) должно существенно различаться из-за различного эффекта снижения мольной доли доли компонентов расплава при растворении воды. Данный результат требует дальнейшего анализа.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенного анализа показывают, что особенности поведения амфибола в расплаве можно объяснить в рамках идеальной модели растворения воды. Влиянием коэффициентов активности компонентов расплава в первом приближении можно пренебречь. Недостаточная точность результатов для экспериментальных составов может означать влияние как сложности расчета структурной формулы амфибола, так и экспериментальных погрешностей. Несомненно, модель требует дальнейшего развития. Основную сложность представляет проблема отсутствия необходимой информации о реальных компонентах расплава

и их соотношениях. Также необходимо объяснить наличие максимумов стабильности амфибола по давлению и температуре в P - T координатах.

Автор выражает искреннюю признательность А.А. Арискину, Г.С. Барминой, Р.Р. Альмееву и Г.С. Николаеву (ГЕОХИ РАН) за помощь в работе, предоставление системы ИНФОРЭКС и обсуждение результатов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 05-05-65300.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арискин А.А., Мешалкин С.С., Альмеев Р.Р. и др.* Информационно-поисковая система ИНФОРЭКС: анализ и обработка экспериментальных данных по фазовым равновесиям изверженных пород // Петрология. 1997. Т. 5. № 1. С. 32–41.
2. *Кадик А.А., Максимов А.П., Иванов Б.В.* Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов (на примере Ключевской группы вулканов). М.: Наука, 1986. 158 с.
3. *Максимов А.П.* Влияние воды на кривые плавления минералов: равновесие оливин – расплав // Геохимия. 2003. № 10. С. 1036–1047.
4. *Allen J.C., Boettcher A.L.* Amphiboles in andesite and basalts: II. Stability as a function P - T - f_{H_2O} - f_{O_2} // Amer. Mineral. 1978. V. 63. № 11–12. P. 1074–1087.
5. *Allen J.C., Boettcher A.L.* The stability of amphibole in andesite and basalt at high pressures // Amer. Mineral. 1983. V. 68. № 3–4. P. 307–314.
6. *Allen J.C., Boettcher A.L., Marland G.* Amphiboles in andesite and basalts: I. Stability as a function of P - T - f_{O_2} // Amer. Mineral. 1975. V. 60. № 11–12. P. 1069–1085.
7. *Beard J.S., Lofgren G.E.* Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3 and 6–9 kb // J. Petrol. 1991. V. 32. Part 2. P. 365–401.
8. *Burnham C.W.* Development of the Burnham model for prediction of the H_2O solubility in magmas // Reviews in Mineralogy. 1994. V. 30. P. 123–129.
9. *Burnham C.W., Davis N.F.* The role of H_2O in silicate melts: // Thermodynamic and phase relations in the system $NaAlSi_3O_8$ - H_2O to 10 kilobars, 700° to 1100°C // Amer. J. Sci. 1974. V. 274. P. 902–940.
10. *Dale, Holland, Powell* // Contribs Mineral. and Petrol. 2000. V. 140. № 4. P. 353–362.
11. *Eggler D.H.* Amphibole stability in H_2O -undersaturated calc-alkaline melts // Earth Planet. Sci. Lett. 1972. V. 15. № 1. P. 28–34.
12. *Ghiorso M.S.* On the stability relations of hydrous minerals in water-undersaturated magmas // Amer. Miner. 1999. V. 84. P. 1505–1511.
13. *Grove T.L., Donnelly-Nolan J.M., Housh T.* Magmatic processes that generated the rhyolite of Glass Mountain, Medicine Lake volcano, N. California // Contribs Mineral. and Petrol. 1997. V. 127. №. P. 205–223.
14. *Helz R.T.* Phase relations and compositions of amphiboles produced in studies of the melting behavior of rocks // Reviews in Mineralogy. 1982. V. 9B. P. 279–347.
15. *Helz R.T.* Phase relations of basalts in their melting ranges at $P_{H_2O} = 5$ kb as a function of oxygen fugacity. Part I. Mafic phases // J. Petrol. 1973. V. 14. Part 2. P. 249–302.
16. *Helz R.T.* Phase relations of basalts in their melting ranges at $P_{H_2O} = 5$ kb as a function of oxygen fugacity. Part II. Melt compositions // J. Petrol. 1976. V. 17. Part 2. P. 139–193.
17. *Holland T., Blundy J.* Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // Contribs Mineral. and Petrol. 1994. V. 116. № 4. P. 433–447.
18. *Holloway J.R.* The system pargasite- H_2O - CO_2 : a model for melting of a hydrous mineral with a mixed-volatile fluid – I. Experimental results to 8 kbar // Geochim. Cosmochim. Acta. 1973. V. 37. P. 651–666.
19. *Holloway J.R., Burnham C.W.* Melting relations of basalt with equilibrium water pressure less than total pressure // J. Petrol. 1972. V. 13. Part 1. P. 1–29.
20. *Johnson M.C., Rutherford M.J., Hess P.C.* Chassigny pertogenesis: melt compositions, intensive parameters, and water contents of Martian magmas // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. № 1. P. 349–366.
21. *Maximov A.P.* Influence of water on the mineral-melt equilibria: effect of dilution // Experiment in Geosciences. 1996. V. 5. № 2. V. 14–15.
22. *Maximov A.P.* The water influence on the temperature of the amphibole stability in the melts // Experiment in Geosciences. 2000. V. 9. № 1. P. 41–42.
23. *Powell R.* Thermodynamics of coexisting cummingtonite-hornblende pairs // Contrib. Mineral. Petrol. 1975. V. 51. № 1. P. 29–37.
24. *Rutherford M.J.* The May 18, 1980, Eruption of Mount St. Helens 1. Melt composition and experimental phase equilibria // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. N B4. P. 2929–2947.
25. *Rutherford M.J., Devine J.D.* The May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens: 3. Stability and chemistry of amphibole in the magma chamber // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 949–959.
26. *Sato H., Nakada S., Fujii T., et al.* Groundmass pargasite in the 1991–1995 dacite of Unzen volcano: phase stability experiments and volcanological implications // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1999. V. 89. P. 197–212.
27. *Scaillet B. and Evans B.W.* The 15 June 1991 eruption of Mount Pinatubo. I. Phase equilibria and pre-eruption P - T - f_{H_2O} - f_{O_2} conditions of the dacite magma // J. Petrology. 1999. V. 40. № 3. P. 381–411.
28. *Sisson T.W., Grove T.L.* Experimental investigations of the role of H_2O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism // Contribs. Mineral. and Petrol. 1993. V. 113. N 2. P. 143–166.

The Influence of Water on the Temperature of Stability of Amphibole in Melts

A. P. Maksimov

Institute of Volcanogy and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, Russia

The influence of water concentration on the crystallization temperature of amphibole in a melt was analyzed theoretically using the model of an ideal melt. A general-type equation has been derived which can explain the presence of the isobaric temperature maximum at the amphibole stability curve invoking a double influence of water on the equilibrium between amphib-

ole and the melt: in accordance with the reaction, water increases the stability of amphibole, but at the same time it decreases the mole fractions of the other melt components that are taking part in the amphibole crystallization reaction, thereby decreasing the stability of amphibole. The pargasite–water–carbon dioxide system was used as an example to show that the model is a good fit to experimental data. Experimental data were used to obtain the coefficients in the equations that connect the constants of pargasite-melt and tremolite-melt equilibria to temperature and pressure.