

УДК 552.11

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СУБЛИМИРОВАНИЯ ПОРОД ЛИТОСФЕРЫ НАД ОЧАГАМИ БАЗИТОВЫХ РАСПЛАВОВ

© 2002 г. В. Н. Шарапов, А. Н. Черепанов, В. А. Акимцев, В. К. Черепанова

Представлено академиком Н.Л. Добрецовым 31.01.2002 г.

Поступило 22.02.2002 г.

Явления сублимирования (растворения в газовую фазу), “метасоматоза” мантийных и коровых базитовых и ультрабазитовых пород с образованием открытых полостей, проявлениями частичного плавления и отложения минералов из газовой фазы в ксенолитах описаны достаточно давно [1, 2 и др.]. В последнее время наиболее активно такого рода процессы исследуются в толще литосферы над магматическими очагами, питающими четвертичные вулканы и алмазонасные диатремы [3–5 и др.].

Нами обобщены материалы многолетнего изучения такого рода явлений в базитовых и ультрабазитовых породах из ксенолитов в базальтах Курило-Камчатских вулканов, субмаринных лав хребта Хуан-де-Фука [1, 6], а также коллекции ультрабазитовых ксенолитов из Забайкальских четвертичных вулканов, любезно переданной нам И.В. Ащепковым. Качественные результаты их изучения сводятся к следующему [7]. Процессы сублимации в мантийных гипербазитовых породах структурно выражаются в формировании сетки “открытых” трещин в оливине и пироксенах, а также пор на стыках кристаллов. “Шаг” между трещинками может быть порядка 0.15 мкм, ширина трещин от сотых до десятых долей микрона. Их поверхность “шероховата” – наличие выступов и впадин, соизмеримых с шириной трещины. Вдоль поверхности трещинок в кристаллах наблюдаются цепочки “пузырьков” размером 0.015–0.1 мкм с промежутками между ними в 0.07–0.01 мкм. Оптических изменений кристаллов у стенок трещин не обнаружено. Травление поверхности кристаллов оливина и пироксенов проявляется в образовании ямок и борозд, мегакристаллы амфибола по спайности имеют полости в поперечнике до миллиметра и длиной 1–3 мм.

Физико-химический анализ указанного процесса выполнен с помощью ПК Селектор-С в “реакторной” модификации расчета минимизации энергии Гиббса [8]. Рассмотрена последовательность из 10 сопряженных резервуаров (“реакторов”): P_0 – источник газовой смеси (состав независимых компонентов в мольных количествах С 10; Н 15; Cl 0.0005–5.5; N 0.0001–0.1; S 0.0001–0.5; F 0.00001–5.5; O 0–10; $T = 1100^\circ\text{C}$; $P = 20$ кбар); P_1 – щелочной базальт, щелочной пикрит, толеит ($T = 1100^\circ\text{C}$; $P = 20$ кбар); P_2 – P_8 – однородная по составу толща мантийных пород до границы Мохо (гранатовые и шпинеливые вебстериты, пироксениты или эклогиты) с последовательно уменьшающимися температурой (от 1100 до 750°C) и давлением (от 20 до 10 кбар); P_9 – толеитовые базиты нижней коры над границей Мохо ($T = 750^\circ\text{C}$, $P = 7$ кбар); P_{10} – “конденсатор” или резервуар, в котором “собирались” конденсат (твердая фаза) и газовая смесь на выходе из данного многоступенчатого реактора ($T = 750^\circ\text{C}$, $P = 7$ –10 кбар). Расчет сделан для соотношения 1 кг газа (в резервуаре 1) на 1 кг породы в каждом (№ 2–9) реакторе, полное условное время протекания взаимодействия газа и породы в каждом реакторе 100, весовая доля газа в породе на каждом временном шаге (1–100) не более 1 мас. %. Исследовано более 30 вариантов, в которых менялась комбинация составов пород, начальных и граничных условий, в каждом из них получено 1000 точек равновесных составов минералов и газовой фазы. Обнаружено, что по потоку газа фиксируется сложная волновая картина сублимирования и отложения петрогенных компонентов в соответствующей равновесной минеральной ассоциации с относительной масштабной последовательностью в их выносе из зоны сублимирования: $\text{Fe} > \text{K} > \text{Si} > \text{Na} > \text{Ti} > \text{Mg} > \text{Al} > \text{Ca}$.

Конечное (относительное время взаимодействия 100) распределение относительных интегральных количеств петрогенных компонентов для разных типов магматогенных флюидов показано на рис. 1. Равновесный состав минералов аналогичен описанным в “метасоматизированных” мантийных шпинелевых и гранатовых ги-

*Объединенный институт геологии, геофизики
и минералогии Сибирского отделения
Российской Академии наук, Новосибирск
Институт теоретической и прикладной механики
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск*

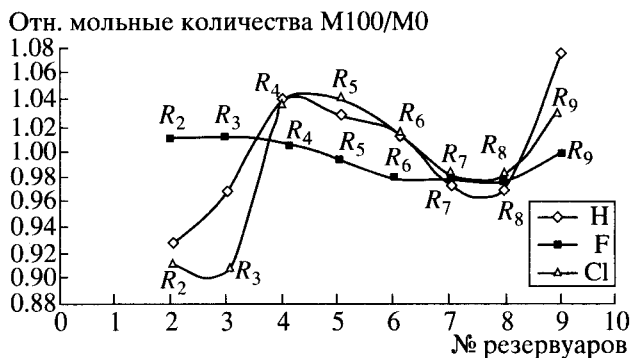


Рис. 1. Изменение относительных интегральных мольных количеств петрогенных компонентов в колонке "реакторов" магматических пород при воздействии на них разных составов газовой смеси для относительного времени 100: P_2 – P_8 – породы верхней мантии (вебстериты), P_9 – базиты выше границы Мохо (состав средневзвешенного толеита сибирских траппов). Термодинамические условия в резервуарах пород верхней мантии: $P_2 - T = 1100^\circ\text{C}$, $P = 20$ кбар; $P_3 - T = 1050^\circ\text{C}$, $P = 19$ кбар; $P_4 - T = 1000^\circ\text{C}$, $P = 17$ кбар; $P_5 - T = 950^\circ\text{C}$, $P = 15$ кбар; $P_6 - T = 900^\circ\text{C}$, $P = 13$ кбар; $P_7 - T = 850^\circ\text{C}$, $P = 11$ кбар; $P_8 - T = 800^\circ\text{C}$, $P = 9$ кбар; $P_{10} - T = 750^\circ\text{C}$, $P = 7$ кбар. Состав газовой смеси в "источнике" (мольные количества): 1) "хлоридный флюид" – С 10; Н 15; Cl 5.5; N 0.1; S 0.5; F 1.1; O 0; $T = 1100^\circ\text{C}$; $P = 20$ кбар; 2) "фторидный флюид" – С 10; Н 15; Cl 1.1; N 0.1; S 0.5; F 5.5; O 0; $T = 1100^\circ\text{C}$; $P = 20$ кбар; 3) "водородный флюид" – С 10; Н 15; Cl 0.5; N 0.01; S 0.05; F 0.1; O 0; $T = 1100^\circ\text{C}$; $P = 20$ кбар.

пербазитах [4] при составах газовой смеси, определявшейся в минералах ксенолитов [9, 10]. Как следует из результатов численного физико-химического моделирования над областью кипения в охлаждающихся магматических очагах, магматические породы подвергаются сублимированию в некотором интервале температур и давлений.

В качестве первого шага для описания динамики неизотермической сублимации магматических пород магматическими газами предложена следующая модель. Рассмотрим процесс сублимации летучего соединения из пленки газового конденсата на стенках плоских трещин во вмещающей базитовой магматической очаг мантийной породе в поток фильтрующегося магматического флюида. Считаем, что трещины имеют форму плоских параллельных щелевых каналов, распределенных однородно в породе. Ширина канала много больше толщины пленки соединения, так что ее изменением в процессе испарения летучего соединения можно пренебречь. Движущийся вдоль трещин флюид имеет постоянные средние по сечению канала значения скорости v и температуры T_f .

Выберем систему координат (x, z) с осью z , проходящей через середину щели, и осью x , перпендикулярной ее стенкам. В силу принятого до-

пущения об однородности распределения трещин и пленок рассмотрим процесс сублимации в ячейке канала, образованной плоскостью, проходящей через ось z и через середину слоя вмещающей породы, разделяющего соседние каналы.

Учитывая принятые допущения, систему уравнений и краевые условия, определяющие процесс сублимации, запишем в безразмерном виде, выбрав в качестве характерных параметров T_f ; $\delta_0 = X_k - X_{s0}$; $t_0 = \delta_0^2/a_s$, где $a_s = \lambda_s/(\rho_s c_s)$; X_k – координата поверхности контакта летучего вещества с породой; X_{s0} – полуширина канала; δ_0 , a_s – начальная толщина и температуропроводность летучего вещества. После соответствующих преобразований получим

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2}, \quad H_s(\tau) \leq \xi \leq H_k; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \bar{a}_r \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2}, \quad H_k \leq \xi \leq H_0; \quad (2)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{H_s(\tau)} = \text{Bi}(\theta_f - \theta_s) - \text{St} \dot{H}_s; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{H_k-0} = \bar{\lambda}_r \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{H_k+0}, \quad \theta|_{H_k-0} = \theta|_{H_k+0}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{H_0} = 0, \quad \theta|_{\tau=0} = 0; \quad (5)$$

$$\dot{H}_s = A \theta_s^{-1} e^{-\bar{\kappa}_s(1/\theta_s - 1/\theta_f)}, \quad (6)$$

где $\text{Bi} = \alpha \delta_0 / \lambda_s$; $\bar{a}_r = a_r / a_s$; $a_i = \lambda_i / [\rho_i c_i]$; $\bar{\kappa}_s = \kappa_s / (RT_f)$; $A = \text{Sh} \text{Le} \bar{\delta}_0 \bar{\mu}_s \bar{\rho}_f \bar{a}_f \bar{P}_T$, $\text{St} = \kappa_s / (c_s T_f)$ – число Стефана, $\text{Sh} = 4X_{s0} \beta / D$ – число Шервуда; $\text{Le} = D / a_f$ – число Льюиса; $\bar{\delta}_0 = \delta_0 / (4X_{s0})$; $\bar{\mu}_s = \mu_s / \mu_f$; $\bar{\rho}_f = \rho_f / \rho_s$; $\bar{P}_T = P_T / P_f$; $H_s = X_s / \delta_0$; $H_k = X_k / \delta_0$; $H_0 = X_{s0} / \delta_0$; $\bar{a}_f = a_f / a_s$; $\xi = x / \delta_0$; $\tau = t v / a_s$; $\theta = T / T_f$; $\theta_T = T_T / T_f$; P_T , T_T – давление и температура в тройной точке; T_s – температура на поверхности сублимации; c_i , ρ_i , λ_i – теплоемкость, плотность и теплопроводность соответственно; $i = (s, r, f)$; индексами s , r и f обозначены параметры сублимирующегося вещества, породы и флюида соответственно; α – коэффициент теплоотдачи от флюида к сублимирующей поверхности; κ_s – теплота сублимации.

При решении задачи (1)–(6) воспользуемся методом интегрального баланса. Для этого проинтегрируем уравнения (1), (2) по ξ от $H_s(\tau)$ до H_k и от H_k до H_0 соответственно с учетом условия (3) и первого – в (5). В результате с учетом (6) получим

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{H_s(\tau)}^{H_k} \theta dy + \theta_s \dot{H}_s = \bar{\lambda}_r \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{H_k+0} +$$

$$+ \text{Bi}(\theta_f - \theta_s) - \text{StA} \frac{e^{-\bar{\kappa}_s(1/\theta_s - 1/\theta_\tau)}}{\theta_s};$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{H_k}^{H_0} \theta dy = \bar{\lambda}_r \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{H_k+0}.$$

Введем следующие аппроксимирующие функции для температур в сублимирующей пленке и во вмещающей породе:

$$\theta = \theta_k + b_1 \left(\frac{\xi - H_0}{H_0 - H_k} \right) + b_2 \left(\frac{\xi - H_0}{H_0 - H_k} \right)^2,$$

$$H_k \leq \xi \leq H_0,$$

где a_1, a_2, b_1, b_2 – искомые коэффициенты, зависящие от τ ; $\theta_k = T_k/T_f$ – безразмерная температура на контакте летучего вещества с породой.

После соответствующих выкладок получим систему уравнений для определения $\theta_s, \theta_k, Y = (H_k - H_s)/(H_k - H_{s0})$:

$$\begin{cases} \dot{Y} = f_1, & f_1 = -\frac{A_1}{\theta_s} e^{-\bar{\kappa}_s(1/\theta_s - 1/\theta_\tau)}; \\ \dot{\theta}_s = \frac{1}{Y \left(1 + \frac{B_1}{3} Y \right)} \left\{ \frac{\bar{\lambda}_r}{Y_k} \left(1 - \frac{\bar{a}_r}{2Y_k^2} Y^2 \right) b_1 + B_2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} [2(\theta_s - \theta_k) + B_2 Y] f_1 \right\} = f_2; \\ \dot{\theta}_k = -\frac{\theta_s - \theta_k}{Y} f_1 + \left(1 + \frac{B_1}{2} \right) f_2 - \frac{3\bar{a}_r \bar{\lambda}_r}{2Y_k^3} Y b_1. \end{cases}$$

Начальные условия:

$$Y(\tau = 0) = Y_0; \quad \theta_s(\tau = 0) = \theta_{s0};$$

$$\theta_k(\tau = 0) = \theta_{k0}.$$

Обозначения:

$$\bar{\kappa}_s = \kappa_s / (RT_f);$$

$$B_1 = \text{Bi} - \text{StA} \frac{\theta_s - \bar{\kappa}_s}{\theta_s^3} e^{-\bar{\kappa}_s(1/\theta_s - 1/\theta_\tau)};$$

$$B_2 = \text{Bi}(\theta_f - \theta_s) - \frac{\text{StA}}{\theta_s} e^{-\bar{\kappa}_s/\theta_s};$$

$$a_1 = -B_2 Y; \quad a_2 = \theta_k - \theta_s + B_2 Y;$$

$$b_1 = \frac{2Y_k}{\bar{\lambda}_r} \left(\theta_k - \theta_s - \frac{a_1}{2} \right) / Y.$$

Исходя из аналогии процессов теплообмена и массообмена и считая поток флюида гидродинамически полностью стабилизированным, а значения комплекса $\text{Re}\delta_0/L \ll 1$, где $\text{Re} = 4X_{s0}v/a_f, L$ – характерная длина канала, коэффициенты, характеризующие тепло- и массообмен (Nu, Sh), можно определить, согласно [11], $\text{Nu} = \text{Sh} = 0, \dots$ Однако в связи с весьма слабой исследованностью меха-

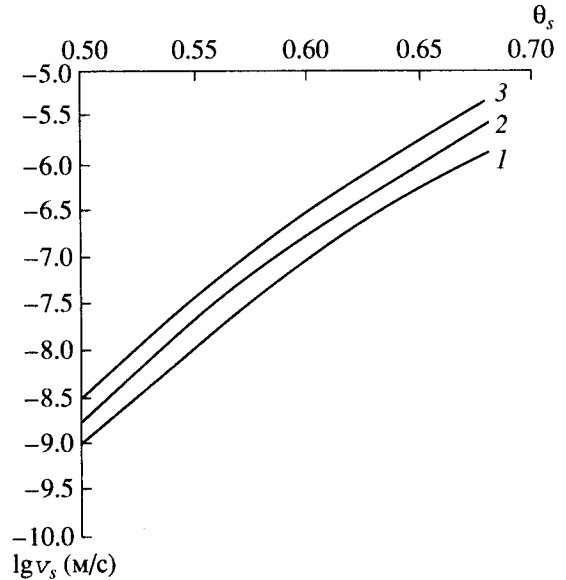


Рис. 2. Изменение скорости сублимации в зависимости от безразмерной температуры при различных значениях числа Nu_D : 1 – 1.5; 2 – 3; 3 – 5.

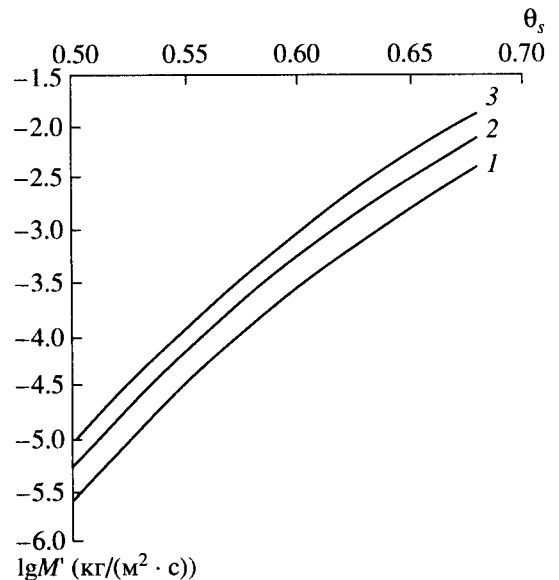


Рис. 3. Значения массовой скорости сублимации в зависимости от безразмерной температуры испарения летучего из диффузионной пленки на границе твердой фазы при различных значениях числа Nu_D : 1 – 1.5; 2 – 3; 3 – 5.

низма растворения кристаллов базитовых и ультрабазитовых мантийных пород под воздействием магматических флюидов наши попытки получить количественную характеристику динамики массообмена при сублимировании свелись к критериальному описанию зависимости скорости сублимирования и массовой скорости процесса от безразмерной температуры и числа Шервуда. Результаты расчетов для некоторых основных динамических параметров (использованных из учета сублимирования дикетонатов Sr и Ce [12, 13]) приведены на рис. 2, 3. Как следует из анализа “разумного” спектра сублимирования мантийных пород для указанного выше диапазона температур, “геологические” времена протекания процесса их растворения, по-видимому, весьма непродолжительны, а масштабы развития открытой пористости сопоставимы с наблюдаемыми в ксенолитах мантийных ультрабазитов.

Краткие выводы: 1) наблюдаемые в мантийных и коровых породах явления растворения петрогенных компонентов могут вызываться широким спектром магматогенных газов в интервале температур 850–1200°C и давлениях от десятков до 15–20 кбар; 2) анализ неизотермической динамики сублимирования показывает, что “геологические” времена растворения могут быть непродолжительными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 01–05–64721) и Интеграционного проекта Президиума СО РАН (№ 30).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кутыев Ф.Ш., Шарапов В.Н.* Петрогенезис под вулканами. М.: Недра, 1979. 105 с.
2. *Mantle Metasomatism / M.A. Menzies, C.J. Hawkeswoth. Eds. L.: Acad. Press, 1987. P. 422.*
3. *VI Intern. Kimberlite Conf. Extended Adstr. Novosibirsk, 1995. 707 p.*
4. *Ащепков И.В.* Глубинные ксенолиты Байкальско-го рифта. Новосибирск: Наука, 1991. 157 с.
5. *Добрецов Н.Л., Ащепков И.В., Симонов В.А., Жмодик С.М.* // Геология и геофизика. 1992. № 1. С. 3–22.
6. *Шарапов В.Н., Акимцев В.А., Доровский В.Н. и др.* Динамика развития рудно-магматических систем зон спрединга. Новосибирск, 2000. 407 с.
7. *Sharapov V.N., Akimtsev V.A., Cherepanov A.N.* // *Experim. in Geosci.* 2001. V. 10. № 1.
8. *Карпов И.К., Чудненко К.В., Бычинский В.А. и др.* // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 4. С. 3–21.
9. *Симонов В.А., Кашинцев Г.Л., Исох А.И.* В сб.: Структурно-вещественные комплексы Юго-Восточной Тувы. Новосибирск, 1989. С. 45–56.
10. *Симонов В.А., Кебезинская В.В., Кебезинская К.Б. и др.* В сб.: Термобарогеохимия минералообразующих процессов. Новосибирск, 1992. С. 77–94.
11. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970. 649 с.
12. *Kan-Sen Chou, Wen-Min Wang* // *Thermochim. acta.* 1996. № 286. P. 75–82.
13. *Fedotova N.E., Gelfond I.K., Igumenov I.K. et al.* // *Intern. J. Therm. Sci.* 2001. № 40. P. 469–477.