органических кислот в природных соотношениях, но в концентрациях, превышающих природные. Основной целью опытов являлось: изучить мобилизацию, перераспределение и вынос макро- и микрокомпанентов в процессе формирования латеритной коры выветривания.

Работа проводилась под научным руководством кандидата г.-м. наук, доцента Воробьева С.А., экспериментальная часть - под руководством кандидата г.-м. наук Алехина Ю.В. Данные и каменный материал предоставлены доктором г.-м. наук Мамедовым В.И.

<u>Литература:</u>

1. Сапожников Д.Г., Богатырев Б.А. Бокситы и коры выветривания Гвинеи//Кора выветривания, вып. 15.: «Наука» 1976.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГЕНЕРАЦИИ И ПОДЪЕМА РАСПЛАВОВ ИЗ МАГМАТИЧЕСКИХ ОЧАГОВ (НА ПРИМЕРЕ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ)

Черткова Надежда Валерьевна

Геологический ф-т МГУ, Москва, <u>nadezhda_chertko@mail.ru</u>

Введение.

В работе предпринята попытка применить комплекс теоретических методов исследования и накопленных экспериментальных данных по плавлению базальтов, растворимости воды, а также вязкости силикатных расплавов к образцам базальтов Ключевского вулкана. Данные методы позволяют решать современные задачи зарождения и эволюции магматических расплавов.

В составе газовой фазы вулканов, находящихся в зонах сочленения литосферных плит, важнейшую роль играет вода [13]. Содержание воды существенно влияет на *P*-*T* параметры плавления базальтов и транспортные характеристики их расплавов. Экспериментальные данные по растворимости воды на ликвидусе базальтового расплава [12, 14, 10, 11, 8] и зависимости *P*-*T* параметров ликвидуса и солидуса от состава породы и фазы ликвидуса [7] были взяты нами за основу термодинамических расчетов.

Основными задачами явились: 1) расчет диаграммы плавкости в P_s -T координатах для изученного образца базальта при разных содержаниях воды в системе; 2) определение *P*-T- X_{H2O} тренда эволюции расплава; 3) оценка вязкости и плотности магмы.

Петрография пород.

Для теоретического анализа термодинамического режима эволюции базальтов был выбран хорошо изученный образец из потока Апахончич Ключевского вулкана (Камчатка). Поток Апахончич сложен высокоглиноземистыми базальтами (SiO₂ ~53,26; Al₂O₃ ~17,52; MgO ~5,62; K₂O

~1,14 мас.%) с вкрапленниками оливина, клинопироксена и плагиоклаза. В среднем по потоку количество вкрапленников составляет около 10% [5].

В выбранном образце базальта (обр. Ар-60-31) по составам вкрапленников и расплавных включений в оливине было выделено три генерации [4]: (1) самые высокомагнезиальные вкрапленники оливина (~ $Ol_{Fo>82}$), т.е. продукты ранней кристаллизации, содержащие равновесные расплавные включения с ~ 49,83 мас.% SiO₂ и ~ 11,32 мас.% MgO; (2) менее магнезиальные разновидности (Ol_{82-73}) с составом расплавных включений ~ 52,68 мас.% SiO₂ и ~ 4,43 мас.% MgO; (3) более железистые по составу оливины (~ $Ol_{Fo<73}$) с включениями, близкими по составу к андезиту, что свидетельствует о заключительной стадии их захвата.

Расчет проекций ликвидуса и солидуса базальта на плоскость P_s -T.

Ликвидус. Расчет сухого ликвидуса для выбранного образца базальта производился до $P_s = 1$ ГПа на основе результатов обработки экспериментальных данных [7,8]. При P = 1 атм расчётная температура плавления равна 1208°C, а $(dP/dt)^{liq} \approx 25$ МПа/град. В работе [8] были получены экспериментальные данные по ликвидусу в системе «щелочной базальт – вода». Эти данные были использованы нами для построения линии водонасыщенного ликвидуса и изоплет растворимости воды в расплаве базальта (обр. Ар-60-31).

Равновесное плавление базальта описывается реакцией [6]:

(1-x) базальт + $xH_2O = xH_2O$ (1-x) расплав,

где *х* – мольная доля воды в расплаве.

По результатам расчетов объемный эффект плавления базальта (ΔV) составил 1,49 см³, энтропийный эффект плавления (ΔS) 8,91 э.е. Расчет проекций ликвидуса базальта на P_s -t плоскость при заданных значениях $P_{\rm H20}$ производился по методу, описанному в [6], путем совместного решения уравнений зависимости P и t от $N_{\rm H20}$ [6] и уравнения водной изобары (проекции ликвидуса), полученного путем интегрирования уравнения Клаузиса-Клапейрона, нижние пределы которого задаются в соответствии с t- $P_{\rm H20}$ ($P_{\rm H20} = P_s$) – координатами кривой плавления:

$$P_{\rm H2O} = P_{\rm S} - \frac{41,837(t_2 - t_1)[x(S_{\rm H2O}^{\rm liq} - S_{\rm H2O}) + (1 - x)\Delta S]}{xV_{\rm H2O}^{\rm liq} + (1 - x)\Delta V},$$

где x – мольная доля воды в расплаве; $S_{\rm H2O}^{\rm liq}$ – её парциальная молярная энтропия, $S_{\rm H2O}$ – молярная энтропия водяного пара; $V_{\rm H2O}^{\rm liq}$ – парциальный молярный объем воды в расплаве.

Величины $S_{\rm H2O}^{\rm liq}$ и $S_{\rm H2O}$ экстраполированы в интервале температуры 1000-1200°С, а значения при более низких температурах взяты из справочных материалов [6]. Из-за недостатка экспериментальных данных для расплавов основного состава для вычисления $V_{\rm H2O}^{\rm liq}$ при построении водных изобар использовано уравнение зависимости $V_{\rm H2O}^{\rm liq}$ от *t* и $P_{\rm H2O}$ для расплава альбита [10,11].

116

Результаты расчетов представлены на рисунке 1. Видно, что расчётные линии изобар водного давления при отсутствии другого газового компонента смещены в низкотемпературную область, что отражает зависимость $V_{\rm H2O}^{\rm liq}$ от температуры, давления и состава расплава.

Солидус. Для построения линии сухого солидуса состав исследуемого образца базальта был закристаллизован с помощью программы «КОМАГМАТ» при *P*=0,1; 0,5 и 1 ГПа [8]. Состав остаточного расплава соответствует адамеллиту. Положение сухого солидуса при максимальной степени кристаллизации расплава (78 %) в условиях буфера Ni – NiO совпадает с экспериментально определенным сухим солидусом андезита [3].

Для построения линии водонасыщенного солидуса использованы эмпирические уравнения связи $P \, u \, t$ от $N_{\rm H20}$ [6]. Мы приняли условие равенства наклона изоплет равной растворимости воды вплоть до случая $X_{\rm H20} = 0$. Объемный эффект плавления адамеллита (ΔV) равен 2,28 см³, энтропийный эффект плавления (ΔS) 8,40 э.е. Проекции солидуса при заданных значениях $P_{\rm H20}$ были рассчитаны аналогично проекциям ликвидуса по методике [6] (рис. 1).

Вывод *Р-Т-Х*_{н20} тренда.

На рисунок 1 нанесены оценки *P-T* параметров, полученные по результатам изучения расплавных включений в оливинах всех трёх генераций базальта из потока Апахончич [4,5]. Первичные высокомагнезиальные базальтовые магмы Ключевского вулкана начинали кристаллизоваться при 1250-1300°С при содержании воды ~3 мас.% и давлении 1,05-1,2 ГПа (~ 37-42 км) [4]. Эти *P-T* параметры лежат за пределами построенной диаграммы.

Содержания воды в расплавных включениях в оливинах І и ІІ генерации $(Ol_{\rm I} \, {\rm u} \, Ol_{\rm II} \, {\rm соответственно})$ в среднем составляют ~ 4 мас.%, а в оливинах III генерации (Ol_{III}) ~ 2 мас.%. Низкое содержание воды во включениях Ol_{III} может быть связано с интенсивным отделением флюидной фазы (дегазацией) из-за падения давления при подъеме магмы к поверхности. Так как для Ol_{II} и Ol_{III} точность определения Р и Т перекрывается (рис. 16), линию Р-Т тренда эволюции расплава можно провести в область их средних значений. По положению точек II (Ol_{II}) и III (Ol_{III}) можно приблизительно определить степень 1*a*). кристалличности базальта на данном этапе (рис. Полученные количественные соотношения вкрапленников и стекла неплохо согласуются с наблюдаемыми макроскопически в изученном образце базальта.

Оценка вязкости и плотности базальтового расплава потока Апахончич.

Вязкость расплава, рассчитанная по модели Э. С. Персикова [15], без учета кристаллической фазы составляет 8·10² Па·сек при температуре 1100°С, давлении 1 ГПа и содержании воды 3 мас.%. В присутствии 10% кристаллов эффективная вязкость возрастает до 1.1·10³ Па·сек.

Подъем магмы к поверхности за счет литостатического давления возможен лишь при условии, что её плотность меньше плотности окружающих

117

пород. По данным геофизических исследований [1,2] плотность пород в районе Ключевской группы вулканов сильно варьирует: в верхних горизонтах она составляет 2,3-2,6 г/см³, а средняя плотность пород достигает 2,8 г/см³. Плотность исходного базальтового безводного расплава Ключевского вулкана составляет 2,75 г/см³ (рассчитано с помощью программы KWare Magma, [16]). Содержание воды (3,3-3,4 мас.%) в расплаве снижает его плотность до 2,5 г/см³ и делает возможным его подъем к поверхности.



Рис. 1. *P-T* диаграмма плавкости высокоглиноземистого базальта из лавового потока Апахончич (вулкан Ключевской). Сплошные линии – проекции ликвидуса и солидуса базальта при заданных значениях содержаний воды (P_{H2O} , МПа); пунктиром показаны линии равных содержаний воды (мас.%) на ликвидусе расплава. Залитые кружки – средние значения *P-T* параметров, определенные по расплавным включениям [4,5]. Стрелка – *P-T* тренд эволюции расплава при его подъёме к поверхности. *a*: соотношение жидкой и кристаллической фаз при содержании воды в расплаве 4 мас.% и *P-T* параметрах кристаллизации генераций оливина II и III; *б*: погрешность определения *P-T* параметров по расплавным включениям.

Литература:

- 1. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев В.А., Пак Г., Пушкарев В.Г., Сенюков С.Л. Результаты сейсмических исследований земной коры в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С 3-18.
- 2. Иванов Б.В., Попруженко С.В., Апрелков С.Е. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петр.-Камч.: ИВГиГ ДВО РАН, 2001.
- 3. Ишбулатов Р.А. Экспериментальное исследование плавления пород щелочно-земельной серии при давлении 25-45 кбар // Оч. физ.-хим. петр. 1977. Вып.7. С.97-168.
- 4. Миронов Н.Л., Портнягин М.В. Динамика кристаллизации и транспорт магм Ключевского вулкана (Камчатка) // XIII Всероссийская Конференция по Термобарогеохимии. Москва, 22-25 сентября 2008 г.
- 5. Миронов Н.Л., Портнягин М.В., Плечов П.Ю., Хубуная С.А. Заключительные этапы эволюции магм Ключевского вулкана (Камчатка) по данным изучения расплавных включений в минералах высокоглиноземистых базальтов // Петрология. 2001. № 1. С. 51-69.
- 6. Перчук Л.Л. Термодинамический режим глубинного петрогенеза. М.: Наука, 1973.
- 7. Перчук Л.Л. Барическая зависимость ликвидусных температур базальтов в сухих системах // Доклады АН СССР. 1983. Т. 271. № 3. С. 702-705.
- 8. Перчук Л.Л. Система щелочной базальт-вода. 2. Поверхность ликвидуса в интервале давления 1 бар 20 кбар // Очерки физико-химической петрологии. 1985. Вып. 13. С. 66-80.
- 9. Ariskin A.A., Frenkel M.Ya., Barmina G.S., Nielsen R.L. Comagmat: a fortran program to model magma differentiation processes // Computers & Geosciences. 1993. Vol. 19. № 8. P. 1155-1170.
- 10.Burnham C.W., Davis N.F. Thermodynamic properties of water-bearing magmas // Phys. Earth and Planet Interiors. 1970. Vol. 3. P. 332.
- 11.Burnham C.W., Davis N.F. The role of H2O in silicate melts. I. P V T relations in the system NaAlSi3O8 H2O to 10 kilobars and 1000°C// Amer. J. Sci. 1971. Vol. 270, № 1. P. 54-79.
- 12. Hamilton D.L., Burnham C.W., Osborn E.F. The solubility of water and effects of oxygen fugacity and water content on crystallization in mafic magmas // Journal of Petrology. 1964. Vol. 5, № 1. P. 21-39.
- Mysen B.O. Volatiles in magmatic liquids // Progress in Metamorphic and Magmatic Petrology. Ed. L. L. Perchuk. Cambridge University Press. 2004. P. 435-475.
- 14.Nesbit R.W., Hamilton D.L. Crystallization of alkali-olivine basalts under controlled PO₂, PH₂O, conditions // Phys.Earth and Planet Interiors. 1970. Vol. 3. P. 309.

- 15.Persikov, E.S. Viscosities of model and magmatic melts at the pressures and temperatures of the Earth's crust and upper mantle.Rus.Geol.Geophys.1998.Vol.39, №11,P.1780–1792.
- 16. Wohletz, *K. H.* MAGMA: Calculates IUGS Volcanic Rock Classification, Densities, and Viscositie // Los Alamos National Laboratory computer code LA-CC 99-28, Los Alamos New Mexico, 1999.

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ Q-ГРУПП В РАСПЛАВАХ НА ЛИКВИДУСЕ СИСТЕМЫ NA2O-SIO2: РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ "STRUCTON"

Шильдт Артём Викторович

Геологический ф-т МГУ, Москва, <u>artem342@yandex.ru</u>

Ранее мы представили ЭВМ-программу STRUCTON, предназначенную для статистического моделирования молекулярно-массовых распределений (ММР) анионов в полимеризованных силикатных расплавах [1,2]. Входная информация для этой модели включает относительные пропорции пяти Q^n -структонов – кремнекислородных SiO₄ с разным числом мостиковых кислородных связей ($0 \le n \le 4$, Q^0 отвечает иону SiO₄⁴⁻). В результате расчётов по методу Монте-Карло программа формирует ансамбль цепочечных и кольцевые комплексов, отвечающих общей формуле (Si_iO_{3*i*+1-*j*})^{2(*i*+1-*j*)-}, где *i* – размер аниона, *j* – число замыканий внутримолекулярных связей. Расчеты с использованием идеальных стохастических распределений Q^n - структонов (приближение "равной реакционной способности" концевых атомов кислорода) для составов от орто- до метасиликатов продемонстрировали разнообразие полимерных частиц. Число разновидностей полимерных частиц увеличивается от трех (SiO₄⁴⁻, Si₂O₇⁶⁻, Si₃O₁₀⁸⁻) до 153, а средний размер – от 1 до 7.2 [1].

Следующий этап развития этой модели включает учет реакций диспропорционирования Q^n -структонов:

 $Q^{n-1} + Q^{n+1} = 2Q^n, k_n = [Q^n]^2 / \{[Q^{n-1}][Q^{n+1}]\} (1 \le n \le 3).$

Диспропорционирование приводит к повышению концентрации тетраэдров вида Q^1 , Q^2 и Q^3 за счет понижения количества "краевых" форм Q^0 и наблюдаемые O^4 . Поэтому Q^{n} -распределения, методами рамановской спектроскопии и ЯМР, никогда не совпадают со стохастическим [3]. Это влияет на реальное ММР полимеризованных анионов в расплаве. Мы разработали подпрограмму, которая использует экспериментальные зависимости k_1, k_2 и k_3 от температуры и позволяет моделировать распределения Qⁿ- структонов непосредственно на ликвидусе силикатных систем. Тестовые расчеты для расплавов системы Na₂O-SiO₂ в диапазоне 0-50 мол.% SiO₂ показывают снижение концентрации тетраэдров Q^0 (относительно систематическое идеальной стохастической) и значительное увеличение доли частиц Q^1 и Q^2