

Динамика кристаллизации и транспорт магм Ключевского вулкана (Камчатка)

Миронов Н.Л.¹, Портнягин М.В.^{1,2}

1 – ГЕОХИ РАН, Москва, Россия, nmironov@geokhi.ru

2 - IFM-GEOMAR, Киль, ФРГ

Dynamics of crystallization and magma transport beneath Klyuchevskoy volcano (Kamchatka)

Mironov N.L.¹, Portnyagin M.V.^{1,2}

1 – Vernadsky Institute, GEOKHI RAS, Moscow, Russia

2 - IFM-GEOMAR, Kiel, Germany

Summary. Here we present data on crystallization conditions of Klyuchevskoy volcano magmas (Kamchatka) based on study of melt inclusions in olivine. All calculated methods are

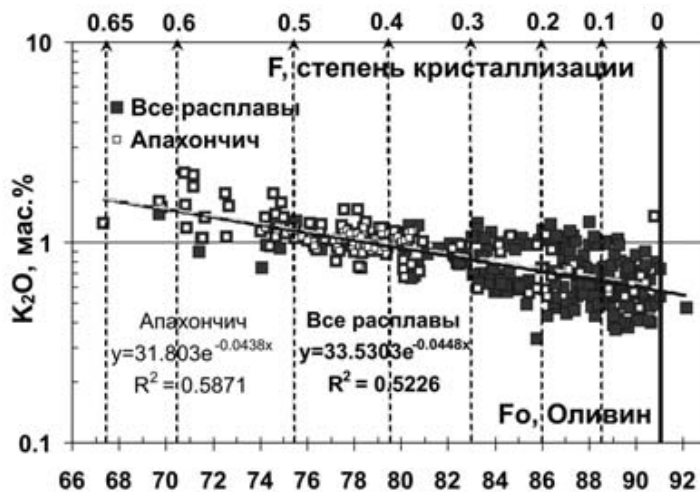


Рис.1 Оценка степени кристаллизации для расплавов Ключевского вулкана.

Оценка проведена на основе содержания K_2O во всех изученных расплавах. Данные по изменению содержания K_2O в наиболее протяженной серии расплавов, полученной для глиноземистых андезитобазальтов одного потока (Апахончич), показывают практически идентичную зависимость. Степень фракционирования рассчитана по формуле $F = [C(K_2O)F_o - C(K_2O)F_{o91}] / C(K_2O)F_o$, где $C(K_2O)F_o$ – содержание K_2O при данном F_o и может быть выражено через зависимость $C(K_2O) = 33.5303 \cdot \text{EXP}(-0.0448 \cdot F_o)$.

Fig.1 Estimation of crystallization degree for Klyuchevskoy melts.

Estimation is based on K_2O content in all studied melts. Data for melts which form the most extended compositional range from one flow (Apakhonchich) of alumina andesitic basalts show almost the same dependence. Crystallization degree is calculated with formula $F = [C(K_2O)F_o - C(K_2O)F_{o91}] / C(K_2O)F_o$, where $C(K_2O)F_o$ is K_2O content at given F_o and can be expressed as $C(K_2O) = 33.5303 \cdot \text{EXP}(-0.0448 \cdot F_o)$

based on melts composition, for which crystallization degree, water content, temperature and pressure of crystallization were estimated. Primary Klyuchevskoy magmas start to crystallize at 1250-1300 °C temperature and 37-42 km depth, corresponding to the Moho depth beneath the volcano. We recognize different scenarios of fractionation for different types of Klyuchevskoy rocks. Parental magmas of high-Al basaltic andesites crystallize at low geothermal gradient ~20 °C/kbar from 40 to 20 km depths, which results in crystallization rate ~2.5 %/kbar. At depth less than 20 km, the rates of magma cooling and crystallization increase up to ~35-50 °C/kbar and ~10-20 %/kbar, respectively, which suggest magma stalling beneath Klyuchevskoy. Magnesian basalts start to crystallize at the Moho depth and evolve along a nearly constant geothermal gradient ~20 °C/kbar and crystallization rate ~2.5 %/kbar up to shallow depths. These results are in good agreement with data on seismic tomography and suggest a complex and dynamically changeable magma-feeding system beneath Klyuchevskoy volcano.

Введение. Ключевской

вулкан является всемирно известным и возможно самым продуктивным островодужным

вулканом на Земле. Нами представлены результаты работы, направленной на оценку условий кристаллизации в питающей магматической системе вулкана. С этой целью было изучено более 400 расплавных включений в оливине Fo₉₁₋₆₇ из различного типа пород от высокомагнезиальных базальтов до высокоглиноземистых андезитобазальтов, представляющих все главные типы пород вулкана в течение голоцена.

Расплавные и флюидные включения. Около половины расплавных включений (197) были представлены раскристаллизованными разностями, с которыми проводился индивидуальный термометрический эксперимент по их гомогенизации. Вторая половина (210) была представлена природнозакаленными стекловатыми включениями. Все стекла включений были проанализированы на содержание петрогенных элементов, серы и хлора с помощью электронного микрозонда, и более четверти всех стекол - на содержание элементов-примесей, фтора и воды с помощью ионного зонда. Состав минерала-хозяина определялся на электронном микрозонде. Для получения состава расплавов составы стекол включений были скорректированы до равновесия с оливином-хозяином. Кроме расплавных включений было изучено около 20 зерен оливина и клинопироксена, содержащих флюидные включения CO₂. Изучение проводилось на криометрической установке в ГЕОХИ РАН при содействии В.Б. Наумова. Полученные данные о плотности флюидных включений позволили сделать независимую оценку давления кристаллизации.

Методы оценки условий кристаллизации. В основе методов оценки условий кристаллизации лежат составы расплавов, полученные по составу расплавных включений в оливине. Оценены степень кристаллизации расплавов, содержание воды, температура и давление кристаллизации. Степень кристаллизации (F) получена на основе общей зависимости содержания калия (K₂O) в расплавах от состава оливина-хозяина (Fo) (Рис. 1).

Содержание воды для расплавов, равновесных с оливином Fo>82, оценено на основе зависимости H₂O=188.66*EXP(-0.0448*Fo), полученной по данным о максимально измеренных концентрациях воды в расплавных включениях в оливине Fo₉₁₋₈₂ с учетом накопления воды при фракционировании. Содержание воды в расплавах, равновесных с более железистым оливином, получено расчетным методом по разнице температур кристаллизации оливина и плагиоклаза (Danyushevsky et al., 1996), показывающим хорошее соответствие с реально измеренными содержаниями воды во включениях в оливине Fo₈₂₋₆₇. Значения температуры отвечают равновесию оливин-расплав (Ford et al., 1983) с учетом влияния воды (T_{сухая}-T_{H2O}=39.69*(H₂O)^{0.73} – Almeev et al., 2007) и давления кристаллизации (5 °С/кбар). Основным методом оценки давления кристаллизации для равновесия Ol-Crx-расплав был метод изложенный в (Danyushevsky et al., 1996), который был проверен на экспериментальных составах с различным содержанием воды (по данным работ 1993-2007 гг.) Также для равновесия Crx-расплав использовался метод (Putirka et al., 2003). В качестве независимой оценки использовались значения, полученные по флюидным включениям CO₂. Глубины кристаллизации оценивались в соответствии с соотношением 1 кбар ~ 3.5 км.

Таблица 1. Средние составы и оцененные условия кристаллизации для высокомагнезиального (1) и высокоглиноземистого (2) расплавов Ключевского вулкана.

Расплав	Fo	#Mg	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма
1, N=24	90.4	70.9	48.05	0.8	14.94	8.51	0.08	11.6	12.5	2.64	0.63	0.13	99.9
<i>std</i>	0.3	1.0	1.16	0.08	0.78	0.01	0.03	0.56	0.96	0.23	0.2	0.04	
2, N=75	78.9	47.9	51.55	1.13	18.95	9.25	0.16	4.78	9.01	3.76	1.01	0.21	99.8
<i>std</i>	1.0	1.9	1.54	0.10	0.78	0.63	0.05	0.37	0.62	0.34	0.14	0.02	
Расплав	F, %	H ₂ O-1	H ₂ O-2	H ₂ O-3	T-1, C	T-2, C	P-1, кб	P-2, кб		P-3, кб			
1, N=24	0.02	3.3		2.3	1298	1270	13.4					9.3	
<i>std</i>	0.01	0.0			15	24	1.9					0.6	n=3
2, N=75	0.42	5.5	4.4	3.8	1123	1032	5.0	2.9				4.7	
<i>std</i>	0.03	0.3	0.8		13	29	1.8	0.5	n=4		0.9	n=2	

Примечание. 1 – средний состав расплавов, равновесных с наиболее магниальными оливинами (Fo₉₀₋₉₁), 2 – средний состав, отвечающий расплавам, равновесных с оливином Fo₇₇₋₈₁ и содержанием Al₂O₃>17 мас.%. H₂O-1 – значения воды в мас. %, рассчитанные с учетом фракционирования при исходном содержании воды 3.2 мас.%. H₂O-2 – содержание воды, рассчитанное по разнице температур кристаллизации Ol и Pl (Danyushevsky et al., 1996). H₂O-3 – измеренные максимальные концентрации воды методом вторично-ионной масс спектрометрии (ионный зонд). T-1 – расчетные значения температуры в °С, при сухих условиях и давлении 1 атм., T-2 – значения температуры с учетом содержания воды и давления (P-1). P-1 – расчетные значения давления в кбар для равновесия Ol-Crx-расплав. P-2 – давление, рассчитанное по плотности включений CO₂ в оливине при T 1030 °С. P-3 – давление для равновесия Crx-расплав - для расплава (1) отвечает давлению для наиболее магниального Crx (#Mg₉₁), встреченного в виде вкрапленников в равновесии с наиболее магниальными расплавами (Fo₉₁, средний Fo_{90-90.5}, средний Fo₉₀₋₉₁). Для расплава (2) отвечает давлению для кристаллических включений Crx в оливине и расплавов, равновесных с оливином Fo₇₈₋₇₉. Давление кристаллизации первичных магм получено с учетом значений, полученных для равновесий Ol-Crx-расплав и Crx-расплав, и может быть оценено как 10.5-12 кбар. Fo оливина-хозяина. FeO* - FeO общее. Std – значения стандартных отклонений от среднего.

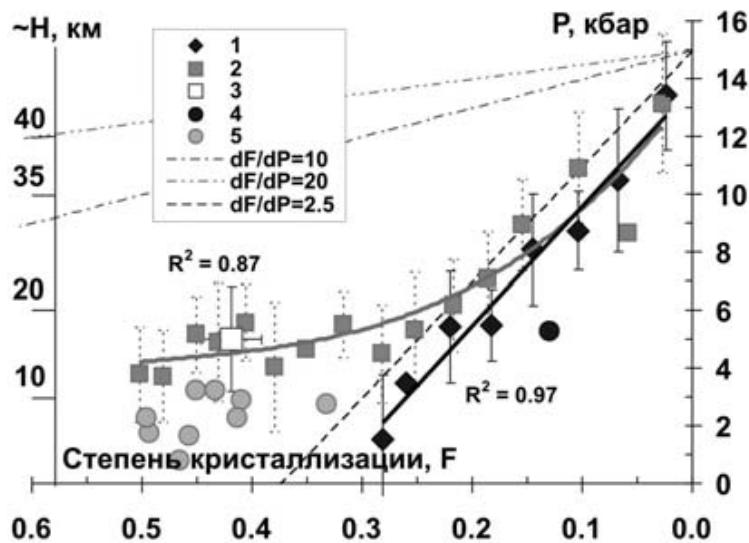


Рис.2 Различные режимы кристаллизации при образовании магниальных базальтов и глиноземистых андезитобазальтов Ключевского вулкана.

1 – средние значения давления и степени кристаллизации для расплавов магниальных базальтов, усредненных через 1 номер по Fo. 2 - средние значения для расплавов глиноземистых андезитобазальтов. 3 – средний состав высокоглиноземистых расплавов (Al₂O₃>17 мас.%, Fo₈₂₋₇₇). 4 и 5 – оценка давления по флюидным включениям CO₂ в оливине магниальных базальтов (4) и оливине и клинопироксене глиноземистых андезитобазальтов (5). Для 1 и 2 показаны данные для расплавов со степенью кристаллизации F>0.5 (Fo>75). Вертикальные линии показывают величину стандартных отклонений. Наклонными линиями показаны различные значения скорости кристаллизации при подъеме магм. Глубины в км нанесены согласно 1 кбар ~3.5 км. Оценки по давлению сделаны по методу (Danyushevsky et al., 1996). Fig.2 Different crystallization scenarios for magnesian basalts and alumina andesitic basalts of Klyuchevskoy volcano.

1 – average values of pressure and crystallization degree for parental melts of magnesian basalts, averaged by 1 number of Fo. 2 – average values for parental melts of alumina basaltic andesites. 3 – average composition of high-Al melts (Al₂O₃>17 мас.%, Fo₈₁₋₇₇). 4 and 5 – pressure estimates for CO₂ fluid inclusions in olivine from magnesian basalts (4), and in Ol and Cpx from alumina andesitic basalts (5). For 1 and 2 data for melts with F>0.5 (Fo>75) are shown. Vertical lines show standard deviations. Different crystallization rates at magma ascent are shown by inclined lines. Depths in km are according to relation: 1 kb~3.5 km. Pressure was estimated using method as in (Danyushevsky et al., 1996).

магмы Ключевского вулкана начинают кристаллизоваться при температуре 1250-1300 °С, содержании воды ~3 мас. % и давлении 10.5-12 кбар, отвечающем глубине (37-42 км)

Средние составы высокомагниального и высокоглиноземистого расплавов и усредненные значения условий их кристаллизации приведены в табл. 1.

Условия образования и режимы кристаллизации магм Ключевского вулкана. Первичные высокомагниальные базальтовые

базальтовые

границы Мохо под вулканом (Табл. 1). Последующая фракционная кристаллизация всех типов магм происходит в условиях декомпрессии, хотя скорости остывания и кристаллизации значительно варьируют для различных порций магм. Полученные данные могут свидетельствовать о двух различных сценариях подъема и эволюции магм под вулканом (Рис. 2).

Образование высокоглиноземистых андезито-базальтов, являющихся преобладающим типом лав Ключевского вулкана, происходит в 2 стадии. На первой стадии (на глубине ~ от 40 до 20 км) их родоначальные магмы кристаллизуются при геотермическом градиенте ~20 °С/кбар и скорости кристаллизации ~2.5 %/кбар. Далее на глубинах менее 20 км (давлении ~ < 6 кбар) скорости остывания и кристаллизации магм увеличиваются до ~35-50 °С/кбар и ~10-20 %/кбар соответственно, что говорит о замедлении подъема магм и их накоплении под вулканом. Высокоглиноземистые расплавы, близкие к составу изверженных магм образуются при давлении 5-3 кбар (18 - 10 км) и температуре 1030±30°С и содержании воды ~ 4.5 мас.% (Рис. 2, Таблица 1). Магнезиальные базальты, извержения которых происходили из побочных конусов на подножии вулкана, начинают кристаллизоваться на глубине границы Мохо и эволюционируют до меньших глубин с постоянными геотермическим градиентом ~20 °С/кбар и скоростью кристаллизации ~2.5 %/кбар. Незначительная статистика по составу расплавов, характеризующих заключительные стадии кристаллизации магнезиальных базальтов не позволяет уверенно говорить о глубине их кристаллизации, тем не менее, полученные данные позволяют предполагать, что высокомагнезиальные магмы могут кристаллизоваться в отдельных каналах, в обход основной питающей системы вулкана, начиная уже с глубины ~20 км.

Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с данными сейсмической томографии и предполагают комплексную питающую магматическую систему под Ключевским вулканом. Эта система по видимому чувствительна к изменению режима поступления магм из мантии, усиление которого может вызывать избыточное давление и деформации в коре, обеспечивая новые пути для подъема магм к поверхности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-05-00807а).

Литература:

- Almeev R.R., Holtz F., Koepeke J., Parat F., Botcharnikov R.E. The effect of H₂O on olivine crystallization in MORB: Experimental calibration at 200 MPa // *American Mineralogist*. 2007. V. 92. I. 4. P. 670-674.
- Danyushevsky L.V., Sobolev A.V., Dmitriev L.V. Estimation of the pressure of crystallization and H₂O content of MORB and BABB glasses: calibration of an empirical technique // *Mineralogy and Petrology*. 1996. V. 57. P. 185-204.
- Ford C.E., Russel D.G., Graven J.A., Fisk M.R. Olivine-liquid equilibria: temperature, pressure and composition dependence of the crystal/liquid cation partition coefficients for Mg, Fe²⁺, Ca and Mn // *Journal of Petrology*. 1983. V. 24. P. 256-265.
- Putirka K., Mikaelian H., Ryerson F., Shaw H. New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho // *American Mineralogist*. 2003. V. 88. P. 1542-1554.