

УДК 551.21+552.11

Зональность амфибола в продуктах текущего извержения вулкана Шивелуч: расшифровка динамики магматических процессов

Н.В. Горбач, Т.М. Философова

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Россия. n_gorbach@mail.ru***Ключевые слова:** амфибол, зональность, Шивелуч, питающая магматическая система.

Амфибол является одним из наиболее информативных индикаторов условий кристаллизации андезитовых магм, поскольку его состав весьма чувствителен к изменениям температуры, давления, состава расплава, летучести кислорода и содержания воды в магме. Однако, чувствительность амфибола к нескольким параметрам приводит к тому, что выделение преобладающего влияния того или иного параметра становится проблематичным (например, Streck, 2008) и делает затруднительной интерпретацию зональности кристаллов. На основе представительного массива данных по составу амфиболов в продуктах современных извержений вулкана Шивелуч была сделана попытка расшифровки особенностей зональности применительно к процессам в его питающей магматической системе. Предложена модель динамики магматических процессов в ходе катастрофического извержения в 1964 г. и последующего (1980 г. – настоящее время) роста экструзивного купола.

Исходные данные

Состав и зональность вкрапленников и микролитов амфибола были изучены в пемзах плинианского извержения 1964 г., в андезитах начальных этапов роста экструзивного купола в 1980-81 и 1993-95 гг. и в породах, отвечающих наиболее интенсивному росту купола в 2001-16 гг. Кроме того, были изучены амфиболы из меланократовых включений (SiO_2 ~54-56 мас. %), присутствующих в лавах недавних извержений (Горбач и др., 2016). Всего было получено ~800 анализов, большая часть которых представлена определениями по профилям сложно-зональных кристаллов от центра к краю зерен с высоким разрешением (от 10 до 20 мкм). Определения были выполнены при помощи электронного зонда JEOL JXA-8200 в Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (GEOMAR, г. Киль, ФРГ).

Часть данных была получена также в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН при помощи электронного зонда с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-max 80 и сканирующего электронного микроскопа SEM Vega 3 Tescan.

Результаты и их обсуждение

Современная эруптивная активность вулкана Шивелуч связана с ростом экструзивного купола в кратере, сформированном в результате катастрофического извержения в 1964 г. Породы текущего этапа активности – плагиоклаз-роговообманковые андезиты (SiO_2 ~60-64 мас. %), вкрапленники которых характеризуются значительными вариациями состава и типов зональности (Горбач и др., 2016).

Состав вкрапленников амфибола показывает значительные вариации в отношении главных компонентов: (в мас. %: SiO_2 =40,46-50,13; TiO_2 =0,56-3,54, Al_2O_3 =6,18-14,06, FeO^* =6,07-15,24, MgO =11,56-19,31, CaO =10,62-12,59, Na_2O =1,19-3,67, K_2O =0,09-0,75). Согласно классификации (Leake et al., 1997), указанные вариации отвечают магнезиальной роговой обманке (*Mg-Hbl*), магнезиогастингситу (*Mg-Hst*) и паргаситу (*Prg*). Расчеты по нескольким термобарометрическим моделям (Симакин, Шапошникова, 2017; Holland, Blundy, 1994; Ridolfi et al., 2010; Putirka, 2016) и сопоставление с экспериментальными данными (Симакин, Шапошникова, 2017; Ruthenford and Devine, 2003; Krawczynski et al., 2012) показывает, что составы изученных амфиболов отвечают широкому интервалу условий кристаллизации в отношении температуры T ~800-1015°C, давления P ~100-550 МПа и летучести кислорода f_{O_2} ~ ΔNNO =0,5-1,9.

Большинство вкрапленников обладает зональностью, которая наиболее отчетливо проявлена в вариациях содержания Si, Al, Na, Ti, $\text{Mg}\#=(\text{Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}^{\text{tot}})$, а также в распределении содержания Cl. Наиболее распространены следующие типы зональности: 1) простая (содержания Al, Na, Ti уменьшаются к краю зерен при увеличении содержания Si и Mg#), 2) пятнистая (ядро неоднородно в отношении содержаний Al и Mg#; 3) обратная (рост содержаний Al, Na, Ti по направлению к краю кристалла при уменьшении Si и Mg# и 4) осциллярная (ритмичные изменения концентраций Al и Mg#). Простая зональность формируется по мере снижения температуры и давления в процессе кристаллизации; пятнистая возникает в случае резкой декомпрессии магмы в результате резорбции ранее сформированного ядра кристалла; обратная зональность, как правило, формируется в результате взаимодействия с более горячей и основной

магмой. Тонкая ритмичная зональность в каймах кристаллов наиболее вероятно обусловлена небольшими вариациями состава расплава и летучести кислорода в условиях частых эксплозивных извержений.

Показано, что в отличие от других Fe-Mg силикатов рост магнезиальности к краю кристалла амфибола не всегда является индикатором взаимодействия с более основной магмой. В большинстве кристаллов *Mg-Hbl* рост Mg# от ядра к кайме сопровождается ростом Si и падением содержаний Al, Na и Ti. Сопоставление с экспериментальными данными (например, Ruthenford and Devine, 2003) показывает, что такая зональность отвечает падению температуры и росту fO_2 в процессе кристаллизации.

Наши данные показывают, что содержание хлора также является информативным с точки зрения интерпретации зональности амфибола и динамики магматических процессов. Наиболее вероятно, что температура магмы и состав расплава оказывают определяющее влияние на вхождение хлора в структуру амфибола. На примере контактовой зоны между меланократовым включением и вмещающим андезитом показано, что температурный эффект на состав кристаллизующегося амфибола выражен в совместном увеличении содержаний Al и Mg# и резком падении содержания хлора к краю кристаллов.

Особенности состава и зональности вкрапленников амфибола в породах современных извержений вулкана Шивелуч хорошо отражают особенности его эруптивного режима. Так, пемзы плинианского извержения 1964 г. содержат субфенокристаллы амфибола с высоко-Al ($Al_2O_3 \sim 11,5-13,5$ мас. %) ядром и тонкой (~ 10 мкм) каймой, в которой содержание Al резко снижается ($Al_2O_3 \sim 6-7$ мас. %). Согласно нашей интерпретации такая зональность могла быть сформирована в результате резкой декомпрессии магмы при ее подъеме из предполагаемой области накопления и кристаллизации, расположенной на нижнекоровых уровнях ($\sim 15-20$ км) в малоглубинную магматическую камеру (~ 5 км) непосредственно перед извержением. Немногочисленные экспериментальные данные о скорости роста кристаллов амфибола (например, $5-10 \times 10^{-8}$ см/с по (Симакин и др., 2009)) позволяют предполагать, что время формирования низко-Al каймы не превышало нескольких часов.

Состав слабозональных низко-Al вкрапленников ($Al_2O_3 \geq 10,5$ мас. %) *Mg-Hbl* из андезитов начальных этапов роста купола в 1980-81 и 1993-95 гг. фиксирует процессы

охлаждения, кристаллизации и дегазации магмы, сопровождающиеся увеличением объема и давления в малоглубинной магматической камере.

Амфиболы недавних извержений наиболее гетерогенны по составу и характеру зональности и сформированы в условиях притока горячей магмы в малоглубинную магматическую камеру. Часть субфенокристаллов и микролитов поступила во вмещающие андезиты за счет дезинтеграции меланократовых включений – фрагментов мафической магмы, поступившей в малоглубинную магматическую камеру. Отличить такие кристаллы возможно по высоким содержаниям Al ($Al_2O_3 \geq 11,5$ мас. %) и Mg# ($\geq 0,75$) и низкому содержанию хлора ($Cl \leq 0,04$ мас. %).

Благодарности

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-05-06440_a.

Список литературы

- Горбач Н.В., Портнягин М.В., Философова Т.М. (2016). Динамика роста экструзивного купола и вариации химического и минералогического составов андезитов вулкана Молодой Шивелуч в 2001-2013 гг. Вулканология и сейсмология. № 6. С. 37-61.
- Симакин А. Г., Салова Т. Бабанский А.Д. (2009). Кристаллизация амфибола из водонасыщенного по экспериментальным данным при $P=2$ кбар. Петрология. Т.17. № 6. С.1-16.
- Симакин А. Г., Шапошникова О. Ю. (2017). Новый амфиболовый геобарометр для высокмагнезиальных андезитовых и базальтовых магм. Петрология. Т.25. № 2. С. 226-240.
- Holland T. and Blundy J.D. (1994). Non-ideal interaction in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. Contributions to Mineralogy and Petrology. V. 116. P. 433-447.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S. (1997). Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the Mineralogical Association. Mineralogical Magazine. Vol. 61. № 3. P. 295 – 321.
- Ridolfe F., Renzulli A., Puerini M. (2010). Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. Contributions to Mineralogy and Petrology. V.160. P. 45-66
- Ruthenford M. J., Devine J. D. (2003). Magmatic conditions and magma phase equilibria and reactions in the 1995–2002 Soufriere Hills magma. Journal of Petrology. V. 44. № 8. P.1433–1453.
- Putirka K. (2016). Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes. American Mineralogist. Vol. 101. № 4. P. 841-858.
- Streck M. J. (2008). Mineral texture and zoning as evidence for open system processes. Reviews in mineralogy and geochemistry. V. 69 № 1. P. 595–622.