

Зональность кристаллов амфибола в продуктах катастрофического извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г.: к проблеме механизма и динамики извержения

Н.В. Горбач, Т.М. Философова

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: n_gorbach@mail.ru

Представлены результаты изучения состава и зональности фено- и субфенокристаллов амфибола в пемзах, изверженных в ходе плинианской фазы извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. Показано, что зональность субфенокристаллов могла быть сформирована в результате резкой декомпрессии магмы при ее подъеме из предполагаемой области накопления и кристаллизации, расположенной на нижнекоровых глубинах (~15-20 км) в малоглубинную магматическую камеру (~5 км) непосредственно перед извержением.

Введение

Извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. было одним из крупнейших эксплозивных событий Камчатки в XX веке [3, 6]. В ходе этого извержения было разрушено несколько куполов, существовавших в кратере вулкана и образована гигантская обломочная лавина площадью около 100 км². Во время плинианской стадии извержения было извержено 0.6-0.8 км³ ювенильного материала в виде тефры и пемзовых пирокластических потоков [3]. Зона интенсивного пеплопада, где пепла выпало более 1 кг/м², составила около 10 тыс. км², а площадь, на которой отмечались пеплопады, достигла 100-150 тыс. км² [3, 7]. В настоящее время пепел данного извержения залегает на большой территории Восточной Камчатки и широко используется как маркер для определения времени и последовательности различных геологических событий.

Изучение литологических особенностей и последовательности отложений обломочной лавины, тефры и пирокластических потоков позволило А.Б. и М.Г. Белоусовым сделать заключение о том, что извержение было вызвано декомпрессией магматической системы в результате снятия литостатической нагрузки за счет разрушения экструзивных куполов [1]. Как полагают авторы работ [1, 9], крупномасштабное обрушение было спровоцировано потерей устойчивости вулканической постройки при воздействии серии землетрясений, предшествующей извержению. При объяснении механизма извержения И.В. Мелекесцев [5] также уделяет большое значение потере устойчивости постройки, однако считает, что ее обрушение сопровождалось субсинхронным фреато-магматическим эксплозивным событием.

Петрологические сведения о поступивших на поверхность ювенильных андезитах, которые позволяют оценить предэруптивные физико-химические характеристики магмы и уточнить механизм извержения, до настоящего времени немногочисленны. Химический, минеральный и изотопный состав продуктов извержения охарактеризован в работах Б.В. Иванова [например, 4], состав расплавных включений в плагиоклазах изучен М.Л. Толстых [8], а работы В.В. Пономаревой [11, 12] содержат сведения о валовом химическом составе и геохимических особенностях интерстициальных стекол изверженной тефры.

В докладе представлены данные о составе и зональности кристаллов амфибола в пемзах, изверженных 12 ноября 1964 г. Определения состава были выполнены при помощи электронного зонда JEOL JXA-8200 в Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (GEOMAR, г. Киль, ФРГ). Дополнительные определения минеральных фаз и изображения кристаллов в режиме отраженных электронов были получены также на сканирующем электронном микроскопе SEM Vega 3 Tescan, оборудованном

энергетическим спектрометром Oxford X-max в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Химический состав и петрографические особенности ювенильных андезитов, изверженных 12 ноября 1964 г.

Для характеристики валового химического состава и петрографических особенностей были использованы образцы пемзы из отложений пирокластического потока, отобранные нами на подножии вулкана, а также данные из работ [11, 12] о составе лапилли, изверженных во время плинианской стадии извержения. По химическому составу продукты пирокластических потоков и лапилли относятся к известково-щелочным умереннокалиевым андезитам ($\text{SiO}_2=61,04-62,62$ мас.%; $\text{FeO}^*/\text{MgO}=1,15-1,35$; $\text{K}_2\text{O}=1,25-1,54$ мас.%). Породы имеют повышенную магнезиальность ($\text{Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}^{\text{tot}}=0,57-0,60$) и высокие содержания хрома ($\text{Cr}\geq 100$ г/т), что типично для андезитов, изверженных вулканом в голоцене [2, 11].

Обломки пемзы и лапилли содержат около 15-20 об. % вкрапленников плагиоклаза и амфибола, которые погружены в сильно пористое вулканическое стекло. Характерной особенностью вкрапленников является их раздробленность и фрагментация. Стекло практически полностью лишено микролитов и имеет риолитовый состав ($\text{SiO}_2=74-76$ мас. %).

Состав и зональность вкрапленников амфибола в пемзах плинианской фазы извержения

В пемзах плинианской фазы извержения выделено два основных типа вкрапленников амфибола: крупные (до 3 мм) фенокристаллы, переполненные включениями расплава, плагиоклаза и Fe-Ti оксидов и субфенокристаллы (≥ 300 мкм), лишенные кристаллических и расплавных включений. Оба типа кристаллов обладают хорошо проявленной зональностью. Фенокристаллы имеют гетерогенное пятнистое ядро и широкую внешнюю зону (рис. а), а субфенокристаллы обладают резкой композиционной каймой шириной около 15-20 мкм (рис. б). Несмотря на различия в текстуре и размерности, два типа кристаллов имеют близкий химический состав и показывают сходный характер изменения содержаний основных компонентов от ядра к кайме. Согласно классификации [10] ядра пятнистых фенокристаллов и представлены магнезиогастнигститом, внешние зоны фенокристаллов и кайма субфенокристаллов отвечают по составу магнезиальной роговой обманке.

На рисунке показаны изменения химического состава двух типов кристаллов от ядра к кайме. Ядра обоих типов кристаллов обогащены алюминием ($\text{Al}_2\text{O}_3=11,18-13,55$ мас. %) и относительно обеднены магнием ($\text{MgO}=11,63-13,91$ мас. %). Широкая внешняя зона фенокристаллов и тонкая композиционная кайма субфенокристаллов характеризуются инверсией распределения содержаний этих компонентов - содержание Al_2O_3 снижается до 9,03-6,76 мас. %, а концентрация MgO возрастает до 15,18-16,54 мас. %. Содержания Al^{IV} , Al^{VI} и $(\text{Na}+\text{K})^{\text{A}}$ (содержание катионов на формульную единицу) показывают положительную корреляцию и резко снижаются в направлении краевых зон обоих типов кристаллов (рисунок). Подобное распределение основных компонентов состава обоих типов кристаллов отвечает Al-чермакитовому ($2\text{Si}^{\text{IV}}+\text{Mg}^{\text{VI}}=2\text{Al}^{\text{IV}}+\text{Al}^{\text{VI}}$) и эденитовому ($\text{Si}^{\text{IV}}+\text{O}^{\text{A}}=\text{Al}^{\text{IV}}+(\text{Na}+\text{K})^{\text{A}}$) механизмам катионных обменов амфиболов, что предполагает значительные изменения как температуры, так и давления в ходе кристаллизации. Применение ряда термобарометрических моделей [13, 14, 17], а также сопоставление составов изученных амфиболов с экспериментальными данными [17] показывает, что ядра обоих типов кристаллов могли кристаллизоваться при температуре $T\sim 932-990$ °C и давлении $P\geq 400$ МПа. Для внешних зон фенокристаллов и тонких кайм субфенокристаллов рассчитаны более низкие значения ($T\sim 814-842$ °C и $P\leq 150$ МПа).

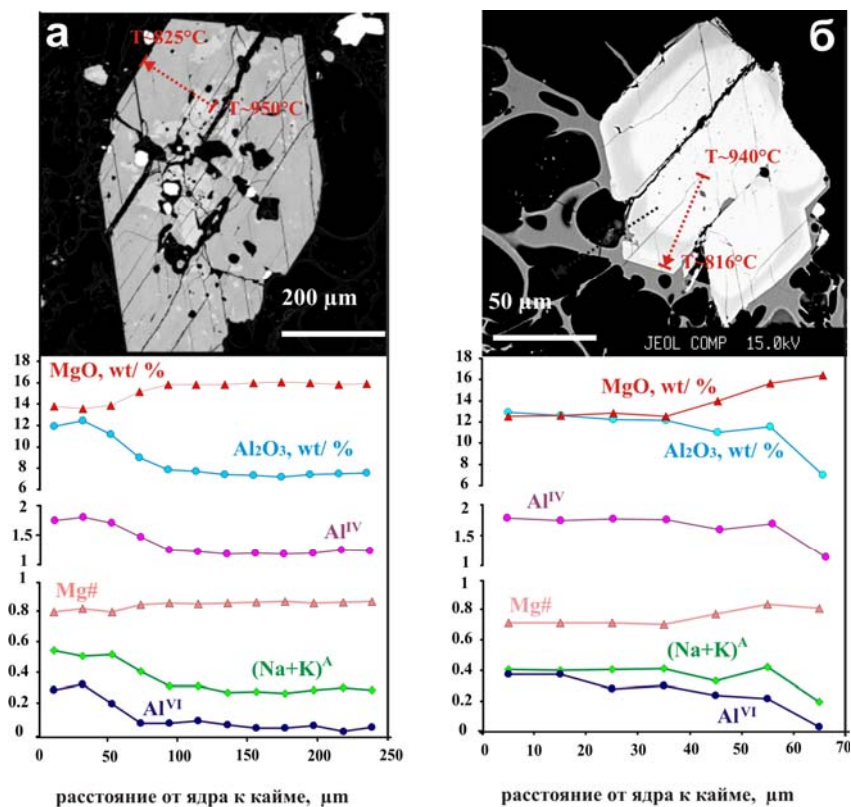


Рисунок. Основные типы вкрапленников амфибола в пемзах плинианской фазы извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г.: а – вкрапленник с пятнистой зональностью; б – субфенокристалл с резкой композиционной каймой. На графиках показано изменение основных компонентов по направлению от ядер к каймам кристаллов. Для ядер и кайм показаны расчетные температуры кристаллизации, полученные при помощи термобарометрических уравнений [13, 14]. Микрофотографии кристаллов приведены в режиме отраженных электронов.

Анализ катионных обменов амфиболов, термобарометрические данные и сопоставление с результатами экспериментальных работ позволяют рассматривать зональность, проявленную в амфиболах ювенильных продуктов извержения 1964 г. *простой* зональностью сформированной при понижении температуры и давления при подъеме и кристаллизации андезитовой магмы. Полученные барометрические оценки для ядер обоих типов кристаллов отвечают условиям области накопления и кристаллизации магмы на нижнекоровых глубинах (~15-20 км), а рассчитанные аналогичные параметры для внешних зон фенокристаллов и тонкой каймы субфенокристаллов соответствуют условиям близповерхностной магматической камеры на глубинах около 5 км. Немногочисленные экспериментальные данные о скорости роста кристаллов амфибола (10^{-6} mm/s согласно [15] или $5-10 \times 10^{-8}$ cm/s по [16]) позволяют оценить время формирования 15-20 мкм каймы субфенокристаллов от 4 до 6 часов. Это может означать, что поступление порции магмы из глубинных уровней питающей системы в близповерхностную магматическую камеру произошло за несколько часов до начала извержения.

Полученные нами петрологические оценки сопоставимы с данными о времени и масштабе сейсмических событий, сопровождавших извержение. Так, в работе [18] отмечено, что извержение предварялось и сопровождалось тремя крупными событиями с магнитудами 5-5.5. Первое из этих событий произошло за ~6 часов до начала извержения. Хорошая временная сходимости петрологических оценок и сейсмического сигнала, сопровождающего извержение, позволяет с достаточной уверенностью рассматривать поступление порции более глубинной магмы в близповерхностную

магматическую камеру в качестве одного из ключевых звеньев механизма данного извержения.

Аналитические исследования были выполнены при поддержке гранта РФФИ 15-05-06440_а. Авторы благодарны М.В. Портнягину за предоставленную возможность выполнения электронно-зондового анализа в исследовательском центре GEOMAR.

Список литературы

1. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) – плинианское извержение, предварявшееся крупномасштабным обрушением постройки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 116-126.
2. Горбач Н.В., Портнягин М.В. Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч // Петрология. 2011. Т. 19. № 2. С. 140-172.
3. Горшков Г.С., Дубик Ю.М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3-37.
4. Иванов Б.В. Андезиты Камчатки. Справочник химических анализов вулканитов и основных породообразующих минералов. М.: Наука, 2008. 364 с.
5. Мелекесцев И.В. Новейшие гигантские эксплозивно-обвальные лавины катастрофических извержений вулкана Шивелуч на Камчатке // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 215-234.
6. Пийп Б.И., Мархинин Е.К. Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. (предварительное сообщение) // Бюл. вулканол. станций. 1965. № 39. С. 3-28.
7. Токарев П.И. Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. и его предвестники // Физика Земли. 1967. № 9. С. 84-92.
8. Толстых М. Л., Наумов Б.В., Бабанский А.Д., и др. Состав расплава и условия кристаллизации андезитов вулкана Шивелуч Камчатка. (по данным изучения расплавов в минералах) // Доклады Академии Наук. 1998. Т. 359. № 5. С. 676-679.
9. Фирстов П.П. Реконструкция динамики катастрофического извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. на основании данных о волновых возмущениях в атмосфере и вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 48-63.
10. Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S. et al. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the Mineralogical Association // Mineralogical Magazine. 1997. V. 61 № 3. P. 295- 321.
11. Ponomareva V.V., Kyle P., Pevzner M. M. et al. Holocene Eruptive History of Shiveluch Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia. In: Volcanism and Subduction: The Kamchatka region // (Eichelberger J., Gordeev E., Izbekov P., Lees J. Eds), AGU Geophysical Monograph. 2007. V. 172. p. 263-282.
12. Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M. et al. Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: Chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // International Journal of Earth Sciences. 2015. V.104. P. 1459-1482.
13. Putirka K., Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes // American Mineralogist. 2016. V.101. № 4. P.841-858.
14. Ridolfi F, Renzulli A, Puerini M. 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. 2010. V. 160. P. 45-66.
15. Shea T., & Hammer J. E. Kinetics of cooling-and decompression-induced crystallization in hydrous mafic-intermediate magmas // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 260. P. 127-145.
16. Simakin, A. G., Salova, T. P., Babansky A. D. Amphibole crystallization from a water-saturated andesite melt: Experimental data at P= 2 kbar. Petrology. 2009. V. 17. № 6. P. 591.
17. Simakin A.G., Shaposhnikova O. Yu. Novel amphibole geobarometer for high-magnesium andesite and basalt magmas // Petrology. 2017. V. 25 № 2. P. 226–240.
18. Zobin V.M. Mechanism of volcanic earthquakes at Sheveluch Volcano, Kamchatka // Bulletin of Volcanology. 1971 V.35. № 1. P. 225-242