УДК 552.21

ОПЫТЫ ПО ПЛАВЛЕНИЮ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АНДЕЗИТА ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ, КАМЧАТКА

Л.Я. Кабанова^{1,2}, В.М. Рыжков¹, В.Н. Анфилогов^{1,2}

¹Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс; kablar@mineralogy.ru ²Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе,

EXPERIMENTAL MELTING AND CRYSTALLIZATION OF ANDESITE OF BEZYMYANNY VOLCANO, KAMCHATKA

L.Y. Kabanova^{1,2}, V.M. Ryzhkov¹, V.N. Anfilogov^{1,2}

¹Institute of Mineralogy UB RAS, Miass ²South Ural State University, Miass; kablar@mineralogy.ru

Приведены результаты опытов по плавлению и кристаллизации андезита вулкана Безымянный при температурах 1200–1300 °С и нормальном давлении. Установлено, что структура продуктов кристаллизации андезитового расплава отличается от природного андезита. Полученный расплав отличается от природного андезита составом вкрапленников (отсутствием амфибола и зонального плагиоклаза).

Илл. 7. Библ. 9.

Ключевые слова: вулкан Безымянный, андезит, плавление, кристаллизация, структура.

Results of melting and crystallization of andesite from Bezymyanny volcano in Kamchatka at temperature of 1200–1300 °C and normal pressure are given. It is found that the structure of crystallization products of an andesite melt is distinct from natural andesite. The melted products contain no amphibole and zonal plagioclase.

Figures 7. References 9.

Key words: Bezymyanny volcano, andesite, melting, crystallization, structure.

Введение

Одним из наиболее активных вулканов Камчатки, извергающим андезитовый материал, является вулкан Безымянный. В продуктах вулкана по минеральному составу выделяются три главных типа андезитов: двупироксеновые, роговообманково-пироксеновые и роговообманковые. Роговообманковые андезиты формируют как наиболее древние, так и самые молодые вулканические купола. На основании геохимических данных и экспериментальных исследований кристаллизации андезитов, А.А. Кадик [7] с соавторами проанализировали возможные пути образования андезитов вулкана Безымянный, связанные с дифференциацией базальтовых магм. Кристаллизация двупироксеновых андезитовых магм сопровождается локальной эволюцией их физико-химических условий, выражающейся в охлаждении расплавов, сопряжённом с увеличением в них концентраций воды и относительным повышением летучести кислорода. В результате такой эволюции в кровле вулканического очага образуются роговообманково-пироксеновые и роговообманковые андезиты [7]. Бо́льшая часть роговых обманок в андезитах представлена магнезиогастингситом [8], но встречаются и бурые роговые обманки, вторично окисленные в приповерхностных условиях [1].

Ортопироксен во вкрапленниках представлен гиперстеном в виде субидиоморфных зёрен иди-

оморфной изометричной или слегка удлинённой формы. Клинопироксен в продуктах извержения 1956 года редок и преимущественно встречается в гломеропорфировых сростках вместе с гиперстеном, плагиоклазом и магнетитом [8].

Плагиоклазы в андезитах вулкана Безымянного отвечают составу An₄₅₋₇₀ [4, 6]. Наиболее основные плагиоклазы слагают внутренние части зональных кристаллов, наиболее кислыми являются микролиты и краевые зоны вкрапленников; встречаются кристаллы с прямой и обратной зональностью [5]. Между контрастными по составу зонами наблюдаются коррозионные границы. В зональных кристаллах корродированные ядра окружены зонами более натрового плагиоклаза, образующего и включения в ядрах кристаллов. Образование таких включений нельзя объяснить изменением Р-Т-условий процесса кристаллизации плагиоклаза. Они могут возникнуть только в результате замещения более основного плагиоклаза кислым при увеличении содержания натрия в системе. Важную информацию даёт вариации составов плагиоклаза в породах ряда базальтриолит. В вулканических породах Ключевской группы вулканов встречается до пяти генераций плагиоклаза, отличающихся по содержанию анортитовой молекулы An₆₅₋₇₇. В андезите вулкана Безымянный есть плагиоклаз состава An₄₅. Максимум в области высоких содержаний анортитовой молекулы сохранился, но его положение сместилось до состава Ап₇₀. Такое распределение генераций плагиоклаза однозначно свидетельствует о том, что исходным расплавом при формировании комплементарных серий базальт-риолит был расплав базальтового состава и что именно этот расплав трансформировался в составы андезита и риолита [2].

Характерной особенностью пород ряда андезит—риолит является частое совмещение их в одном вулканическом аппарате, из которого периодически происходит излияние базальта. В связи с этим в андезитах, дацитах и риолитах часто наблюдаются структуры, образованные при смешении кислых расплавов с расплавом базальта [9], что говорит о том, что в определённые моменты времени все эти расплавы присутствовали в вулканическом аппарате одновременно [2].

Приведённые выше данные по петрографии андезитов позволяют сделать три вывода: 1) андезит является гибридной породой, минеральный и химический состав которой формировался в магматической камере в течение длительного времени; 2) в процессе образования андезита не достигалась температура полного плавления; 3) андезит извергался на поверхность в виде магматической «каши», состоящей из протокристаллов и расплава.

Нами были выполнены эксперименты по плавлению андезита вулкана Безымянный и последующей кристаллизации расплава. Целью экспериментов было сравнение минерального состава вкрапленников, особенностей их морфологии и структуры природного образца с аналогичными характеристиками образцов, полученных при охлаждении андезитового расплава. Эксперименты проведены при температурах 1200–1300 °C в контейнерах высотой 3 см и диаметром 1.5 см, изготовленных из природного дунита. Охлаждение расплава производилось с разной скоростью при нормальном давлении; техника опытов описана ранее [3].

Характеристика исследованного образца роговообманкового андезита вулкана Безымянный

Образец андезита величиной ~ 10 см из вулкана Безымянный извержения 1956 г. любезно предоставлен для исследования А.И. Малышевым. Макроскопически образец андезита представляет собой породу с вкрапленниками удлинённых призматических зёрен роговой обманки размером от 0.n мм до 2.5–3.0 мм и таблитчатых зёрен плагиоклаза до 2 мм. Пироксен встречается значительно реже в виде короткопризматических зёрен величиной 0.1–0.5 мм. Общее количество вкрапленников достигает 55 % объёма породы с абсолютным преобладанием плагиоклаза. Основная масса состоит из стекла, микролитов амфибола, пироксена и лейст плагиоклаза. Порода имеет микропорфировую, местами гломеропорфировую структуру.

Роговая обманка (магнезиогастингсит) составляет около 10 % общего объёма вкрапленников и образует зёрна удлинённо-призматической формы величиной до 3 мм, красновато-коричневые (в шлифе), резко плеохроирующими до бледнооранжевого (палевого) цвета (рис. 1а–г). В разных сечениях отчётливо проявлена спайность в одном или двух направлениях. Многие зёрна корродированны. Места коррозии заполнены раскристаллизованной основной массой. Большая часть зёрен окружена опацитовыми каймами разных цвета и ширины. Чёрная кайма (см. рис. 1в) сложена преимущественно рудными минералами (магнетитом и титаномагнетитом), более светлая симплектитовая состоит из мелких призматических зёрен орто-



Рис. 1. Структура природного андезита вулкана Безымянный.

а-б-вкрапленники магнезиогастингсита (Hbl) в андезите микропорфировой структуры; в-магнезиогастингсит с каймой магнетита; г – кайма гиперстена вокруг зерна магнезиогастингсита; д-е – включения гиперстена (Px) и андезина (Pl) в магнезиогастингсите. Шлиф без анализатора (а, в, г, д), с анализатором (б, е).

Fig. 1. Structure of natural andesite of the Bezymyanny volcano.

 $a-6-magnesiogastingsite phenocrysts (Hbl) in microphyritic rock; B-magnesiogastingsite with magnetite rim; r-hypersthene rim around magnesiogastingsite grain; <math>\mu-e-hypersthene (Px)$ and andesine (Pl) inclusions in magnesiogastingsite.

пироксена (гиперстена) с магнетитом (см. рис. 1г). Состав и особенности строения опацитовых кайм детально описаны в работе П.Ю. Плечова с соавторами [8]. Встречаются зёрна амфибола с включениями пироксена и плагиоклаза.

Пироксен (гиперстен) составляет около 4 % общего объёма вкрапленников и представлен мелкими бледноокрашенными зёрнами, плеохроирующего в зеленовато-розоватых тонах. Часто встречается в виде включений в зёрнах роговой обманки, где находится в ассоциации с мелкими зёрнами плагиоклаза и магнетита (см. рис. 1д). Некоторые зёрна амфибола окружены каймой, в которой наряду с пироксеном и магнетитом отмечаются микролейсты плагиоклаза (см. рис. 1е). В основной массе встречаются микролиты пироксена размером не более 0.03 мм. Плагиоклаз составляет около 40 % от общего числа вкрапленников и наблюдается в двух генерациях. Первая генерация представлена мелкими таблитчатыми или короткопризматическими зональными кристаллами (рис. 2а) величиной до 1.0 мм с большим количеством тонких зон, отвечающих по составу лабрадору (от An_{62-64} до An_{55-58}). В некоторых зёрнах наблюдаются включения стекла в центре (см. рис. 2б). В зональных зёрнах краевая часть обычно более широкая, состава An_{45-48} в некоторых зёрнах. В основной массе плагиоклаза преобладает, составляя до 70 % объёма. Состав плагиоклаза в основной массе соответствует An_{40-45} .

Вторая генерация плагиоклаза представлена удлинённо-призматическими и таблитчатыми кристаллами до 1.5–2.0 мм. Полисинтетически сдвойникованные кристаллы второй генерации имеют состав An₄₅₋₅₀ и часто содержат каплевидные включения стекла, приуроченные к трещинкам спайности или к границам двойниковых швов. Встречаются заметно деформированные зёрна плагиоклаза (см. рис. 2в), образующие сростки из нескольких кристаллов (см. рис. 2г).

Петрографическая характеристика плавленого андезита

При нагревании до 1200 °С образовался расплав, из которого в процессе охлаждения со скоростью 10 °/ч в разных участках контейнера формировалась порода с разными структурно-текстурными особенностями. В нижней части контейнера образовалась неоднородная по структуре масса, состоящая из оптически изотропной среды, одиночных зёрен и скоплений кристаллических зёрен разного состава (рис. 3а). Изотропная масса представлена буровато-коричневым стеклом, пористой текстуры и гиалиновой структурой основной массы. Поры составляют около 15 % объёма зоны, размеры их не превышают 0.1 мм. Местами встречаются единичные скелетные зёрна пироксена и плагиоклаза и редкие срастания перистых зёрен пироксена (см. рис. 3б, в). В других участках контейнера среди стекловатой массы выделяются буроватые скопления дендритовых и перистых зёрен пироксена, местами серые глобулы в ассоциации со скелетными микролитами и кристаллитами пироксена (см. рис. 3г).

При нагревании андезитового порошка до 1200 °С и охлаждении андезитового расплава со скоростью 600 °/ч в образовавшейся породе отчётливо проявляется зональность. Краевая зона мощностью около 1.0 мм сложена стекловатым базисом, составляющим около 60 % объёма зоны. В стекловатом базисе находятся игольчатые и дендритовые зёрна пироксена длиной до 0.2–0.5 мм, формирующие структуру спинифекс (рис. 4а, б). Центральная и промежуточная зоны сложены дендритовыми зёрнами пироксена и их сростками (см. рис. 4в), среди которых встречаются сферолитовые и перистые зёрна (см. рис. 4г). Стекловатая масса в разных частях контейнера составляет от 5 до 15 % объёма.

При нагревании андезитового порошка до 1250 °С и охлаждении расплава со скоростью 10 °/ч отчётливо проявляется зональность, представленная



Рис. 2. Вкрапленники лабрадора в природном андезите.

а – гломеропорфировый сросток зёрен лабрадора с полисинтетическими двойниками; б – зональный плагиоклаз с включениями стекла в ядре; в – деформированное зерно лабрадора; г – гломеропорфировый сросток зональных зёрен плагиоклаза. Шлиф с анализатором.

Fig. 2. Labradorite phenocrysts in andesite.

a – glomeorophyric intergrowth of labradorite grains with twins; δ – zonal plagioclase with glass inclusions in core; B – deformed plagioclase grain; Γ – glomeorophyric intergrowth of zonal plagioclase grains. This section, with analyzer.



Рис. 3. Гиалиновая структура и пористая текстура плавленого андезита (а) (T = 1200 °C, скорость охлаждения 10 °/ч); б, в – скелетные зёрна пироксена и плагиоклаза; г – глобулы и кристаллиты плагиоклаза и пироксена. Шлиф, без анализатора (а–г) и с анализатором (в).

Fig. 3. Glassy and porous structure of melted andesite (T = 1200 °C, cooling rate 10 °C/h). (a), 6-B – skeletal grains of pyroxene and plagioclase; Γ – globules and crystallites of plagioclase and pyroxene.

Рис. 4. Структура спинифекс (а, б) в плавленом андезите (T = 1200 °C, скорость охлаждения 600 °/ч), в – дендритовые и перистые зёрна пироксена; Γ – сферолитовые сростки пироксена. Шлиф, без анализатора (а, в, Γ) и с анализатором (б).

Fig. 4. Spinifex texture of melted andesite (T = 1200 °C, cooling rate 600 °C/h), a and 6; B – dendrite grains of pyroxene; Γ – spherulitic intergrowths of pyroxene. Thin section, without (a, B, Γ) and with (6) analyzer.

Рис. 5. Структура спинифекс в плавленом андезите (T = 1250 °C, скорость охлаждения 625 °/ч).

 а – игольчатые и цепочечные зёрна пироксена; б – веерообразные и дендритовые зёрна пироксена. Шлиф, с анализатором.

Fig. 5. Spinifex texture of melted andesite (T = 1250 °C, cooling rate 625 °C/h).

a – chains of pyroxene grains; $\boldsymbol{\delta}$ – dendritic grains of pyroxene.



Рис. 6. Структура спинифекс в плавленом андезите (T = 1300 °C, скорость охлаждения 10 °/ч). а – игольчатые зёрна пироксена; б – скелетные зёрна плагиоклаза со сферолитами на окончаниях зёрен. Шлиф,

без анализатора (a), с анализатором (б).

Fig. 6. Spinifex texture of melted andesite (T = 1300 °C, cooling rate 10 °C/h). a – chains of pyroxene grains; δ – skeletal grains of plagioclase. Thin section, without (a) and with (δ) analyzer.

двумя зонами. Нижняя зона стекловатая шириной до 0.5–0.75 мм. Нераскристаллизованное стекло постепенно сменяется зоной с мелкими игольчатыми зёрнами пироксена и призматическими зёрнами плагиоклаза, иногда с отчётливыми полисинтетическими двойниками. Гиалиновая структура переходит в гиалопилитовую. Ближе к центру контейнера появляются более крупные зёрна пироксена (до 0.2 мм) с полисинтетическими двойниками. В этих участках встречаются перистые зёрна пироксена и сферолитовые сростки, сложенные игольчатыми зёрнами пироксена. Местами пироксен нарастает на удлинённые зёрна плагиоклаза, формируя сферолитоподобные радиально-лучистые образования.

При нагревании порошка до 1250 °С и быстром охлаждении (со скоростью 625 °/ч) весь объём контейнера представлен стекловатым базисом с элементами структуры спинифекс (рис. 5а). В краевых частях зёрна пироксена игольчатые, размером 0.01–0.2 мм, в центре более крупные до 0.5–1.0 мм в длину с характерной для пироксена формой сечений. Стекловатая масса в краевых частях составляет около 50 % объёма, в центре уменьшается до 15–20 %. В центре между игольчатыми и цепочечными зёрнами пироксена находятся дендритовые и веерообразные образования (см. рис. 5б).

При нагревании до 1300 °С и последующем охлаждении со скоростью 10 °/ч также отчётливо проявлены две зоны: первая стекловатая зона с пористой текстурой и редкими игольчатыми зёрнами пироксена длиной 0.2–1.0 мм (рис. 6а), местами пересекающимися; вторая зона состоит на 60–70 %

МИНЕРАЛОГИЯ № 1 2017

из стекла, содержит хорошо оформленные, почти изометричные зёрна пироксена, иногда с элементами скелетного строения, реже с полисинтетическими двойниками. Форма зёрен пироксена зависит от скорости охлаждения. При скорости охлаждения 10°/ч образуются удлинённые скелетные и цепочечные зёрна пироксена, при меньшей – формируются изометричные зёрна. Плагиоклаз при скорости охлаждения 10 °/ч имеет скелетную форму зёрен, на окончаниях кристаллов при закалке вырастают сферолиты (см. рис. 6б). При охлаждении расплава со скоростью 650 °/ч пироксен кристаллизуется в виде зёрен разнообразной формы. Образуются как мелкие индивиды (рис. 7а), так и хорошо оформленные сферолитовые сростки игольчатых или перистых зёрен. Местами сферолиты формируются вокруг кристаллита или глобулы, встречаются сноповидные сростки или веерообразные обособления. Иногда в центре сноповидных обособлений встречаются скелетные зёрна пироксена каркасной формы (см. рис. 7б).

В краевой части при быстром охлаждении наблюдается структура спинифекс в зоне шириной до 0.5 мм. Здесь встречаются сферолитоподобные и веерообразные сростки пироксена и обособления необычной формы (см рис. 7в, г).

Заключение

Выполненные эксперименты показали, что при кристаллизации расплавленного андезита соблюдается нормальная последовательность кристаллизации минералов.



Рис. 7. Сферолитовые и метельчатые обособления в плавленом андезите (T = 1300 °C, скорость охлаждения 650 °/ч) (а); б – сноповидные зёрна пироксена; в, г – ассоциация комбинированных зёрен пироксена в зоне со структурой спинифекс. Шлиф, без анализатора (а, в, г) и с анализатором (б).

Fig. 7. Spherolitic fragments in melted andesite (T = 1300 °C, cooling speed 625 °C/h) (a); 6 - 1 like-sheaf grain of pyroxene; B, r - d ifferent form of pyroxene grains.

Первым из расплава выделялся плагиоклаз. При скорости охлаждения 10 °/ч кристаллы плагиоклаза имеют форму от таблитчатой до скелетной и сферолитовой. Зональные кристаллы плагиоклаза в плавленых андезитах не встречены.

Пироксен при скорости охлаждения 10°/ч образует формы от таблитчатой (иногда с полисинтетическими двойниками) до игольчатой, цепочечной, перистой, сферолитовой. При быстром охлаждении (600-650 °/ч), наряду с вышеуказанными формами, появляются дендритовые, веерообразные и сферолитовые. При всех температурах плавления в новообразованной породе возникает зональность, которая также зависит от скорости охлаждения. При скорости охлаждения 10 °/ч возникают стекловатые зоны с гиалиновой структурой основной массы, различающиеся количеством стекла: краевая зона содержит 80-95 % стекла, 5-20 % микролитов плагиоклаза и пироксена; текстура пористая. Центральная зона неоднородная по содержанию стекла (от 40-50 до 5-15 %) и микролитов. При скорости охлаждения 600-650 °/ч также отчётливо проявлена зональность, и в зонах развита структура спинифекс.

Таким образом, полученный из порошка андезита вулкана Безымянный расплав после охлаждения и кристаллизации образовал породу андезитового состава, отличающуюся от исходного андезита составом вкрапленников (отсутствием амфибола и зонального плагиоклаза) и структурой. Роговая обманка в раскристаллизованном плавленом андезите не образуется, так как наши опыты проведены при нормальном давлении. Максимальный температурный предел устойчивости роговой обманки в водонасыщенных условиях составляет 950 °C, а давление по данным разных авторов колеблется от 500 до 1500 бар [7].

Литература

1. Альмеев Р.Р., Арискин А.А., Озеров А.А., Кононкова Н.Н. (2002) Проблемы стехиометрии и термобарометрии магматических амфиболов (на примере роговых обманок из андезитов вулкана Безымянный, Восточная Камчатка). Геохимия, (8), 803–819.

2. *Анфилогов В.Н.* (2010). Происхождение андезитов и риолитов комплементарных магматических серий. *Литосфера*, (1). 37–46.

3. Анфилогов В.Н, Краснобаев А.А., Рыжков В.М., Кабанова Л.Я., Вализер П.М., Блинов И.А. (2015) Устойчивость циркона в дунитах при температурах 1400–1500 °С. Доклады АН, 464(3), 323–327.

4. Богоявленская Г.Е., Дубик Ю.М., Кирсанов И.Т. (1971) Кристаллизация андезитов в верхних частях вулканического канала. *Вулканизм и глубины Земли*. М.: Наука, 161–162.

5. Волынец О.Н., Колосков А.В. (1976) Плагиоклазы четвертичных эффузивов и малоглубинных интрузивов Камчатки. Новосибирск: Наука, 135 с.

6. Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. (1965) Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения (1955–1963 гг.). М.: Наука, 170 с.

7. Кадик А.А., Максимов А.П., Иванов А.П. (1986) Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов. М.: Наука, 158 с. 8. Плечов П.Ю., Цай А.Е., Щербаков В.Д., Дирксен О.В. (2008) Роговые обманки в андезитах извержения 30 марта 1956 г. вулкана Безымянный и условия их опацитизации. Петрология. 16(1). 21–37.

9. Sigurdsson H., Sparks R.S.J. (1961) Petrology of rhiolitic and mixed magma ejecta from the 1875 eruption of Askja Island. Journal of Petrology. 22(1), 41–84.

Поступила в редакцию 2 марта 2017 г.

89