

УДК 552.323.4

РОГОВЫЕ ОБМАНКИ В АНДЕЗИТАХ ИЗВЕРЖЕНИЯ 30 МАРТА 1956 г. ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ И УСЛОВИЯ ИХ ОПАЦИТИЗАЦИИ

© 2008 г. П. Ю. Плечов*, А. Е. Цай*, В. Д. Щербаков*, О. В. Дирксен**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет
119899 Москва, Воробьевы горы, Россия;
e-mail: pavel@web.ru

**Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, 9, Россия

Поступила в редакцию 24.05.2006 г.
Получена после доработки 11.11.2006 г.

Статья посвящена изучению условий образования кайм опациитизации вокруг роговых обманок в андезитах катастрофического извержения 30 марта 1956 г. вулкана Безымянный (Камчатка). Каймы опациитизации образовались вследствие биметасоматической реакции роговой обманки и расплава с формированием зональности: роговая обманка $\rightarrow Px + Pl + Ti-Mag \rightarrow Px + Pl \rightarrow Px \rightarrow$ расплав. Биметасоматоз проходил при активном выносе CaO из роговых обманок, привносе SiO₂ и более сложном поведении остальных компонентов. Наряду с каймами, в зернах роговой обманки наблюдаются реакции объемного распада, которые проходили в почти изохимических условиях. Образование кайм опациитизации происходило в изобарических условиях, при давлении около 6 кбар. Главной причиной нестабильности роговых обманок послужил нагрев магматического очага от 890 до 1005°C, вследствие инъекции порции более горячей магмы. По мощности кайм опациитизации было установлено, что время, прошедшее от внедрения порции горячей магмы в очаг и до начала извержения, не превышает 37 суток. Таким образом, извержение 30 марта 1956 г. не связано с возобновлением активности вулкана в сентябре–ноябре 1955 г. и вызвано новой инъекцией магмы в очаг в феврале–марте 1956 г.

Вулкан Безымянный (55.98 с.ш., 160.58 в.д., 2880 м выше у. м.) – единственный активный андезитовый вулкан Ключевской группы (рис. 1). Катастрофическое извержение 30 марта 1956 г. и последовавший за ним очередной период активизации, продолжающийся уже более 50 лет, ставят этот вулкан в один ряд с самыми активными вулканами мира. Однако катастрофическому извержению 30 марта 1956 г. предшествовало несколько эпизодов эруптивной деятельности, начавшейся 22 октября 1955 г. Динамика подъема магмы непосредственно перед катастрофическим извержением представляет безусловный интерес. Ключевыми являются следующие вопросы: 1) что могло служить непосредственной причиной катастрофического извержения, 2) есть ли прямая связь между эруптивными событиями 1955–1956 гг. на вулкане Безымянный, или это отдельные эпизоды на фоне общего возобновления вулканической деятельности?

Ключ к пониманию динамики подъема магмы дает изучение незавершенных минеральных реакций. В андезитах вулкана Безымянный распространены реакционные опациитовые каймы вокруг роговых обманок. Опациитовые каймы – непрозрачные в проходящем свете каймы вокруг темноцветных минералов в эффузивных горных

породах, представляющие собой продукты реакции этих минералов с окружающим их расплавом. Непрозрачность опациитовых кайм обусловлена значительным содержанием в них рудных минералов (титаномагнетита или магнетита и ильменита). Термин “опациит” (opacite) впервые употребил Герман Фогельзанг (Vogelsang, 1867) для обозначения неидентифицируемого минерала, встреченного им в виде “черных непрозрачных комочков”. Ф.Ю. Левинсон-Лессинг (Левинсон-Лессинг, 1933) приводит фотографии опациитовых кайм вокруг зерен роговой обманки в андезитах Центрального Кавказа и ссылается на эксперименты (Kozu, Yoshiki, 1927), которые показали возможность разложения роговой обманки при нагреве.

Причины и механизмы образования опациитовых кайм до сих пор неясны и на протяжении долгих лет активно обсуждаются в литературе (например, Левинсон-Лессинг, 1933; Лодочников, 1955; Garsia, Jacobson, 1979; Rutherford, Hill, 1993; Rutherford, Devine, 2003; Buckley et al., 2006). Нестабильность роговой обманки и ее разложение могут быть вызваны многими факторами, например дегазацией расплава при декомпрессии (Kuno, 1950; Garsia, Jacobson, 1979; Rutherford, Devine, 2003; Buckley et al., 2006), увеличением температуры (Rutherford, Devine, 2003), окислением



Рис. 1. Общий вид вулкана Безымянный в августе 2005 г.

расплава (Garcia, Jacobson, 1979; Murphy et al., 2000; Rutherford, Devine, 2003).

Многие исследователи отмечают наличие в одних и тех же образцах различных типов реакционных кайм вокруг роговых обманок наряду с абсолютно свежими роговыми обманками, что, возможно, указывает на одновременное действие различных факторов, приводящих к нестабильности роговых обманок. М. Гарсия и С. Джакобсон (Garcia, Jacobson, 1979) выделяют два типа реакционных кайм: (1) черный тип, в котором амфибол полностью или частично замещается тонкозернистым агрегатом оксидов железа и пироксена; (2) габброидный тип, в котором амфибол полностью или частично замещается тонко- и среднезернистым агрегатом ортопироксена, клинопироксена, плагиоклаза и магнетита. Эти авторы заключили, что габброидный тип каймы образуется за счет понижения f_{H_2O} в магматическом резервуаре, тогда как черный тип каймы является результатом окисления во время экструзии. М. Мерфи с соавторами (Murphy et al., 2000) выделяют три типа реакционных кайм вокруг амфиболов в продуктах извержения вулкана Суифриере Хиллс: (1) тонкозернистые (5–30 мкм) агрегаты взаимопросошедших клинопироксена, ортопироксена, пижонита, плагиоклаза и Ti-магнетита, встречающиеся в виде кайм, а также вдоль спайности кристаллов; (2) более грубозернистые срастания (30–200 мкм) тех же фаз, что и в типе 1; (3) непрозрачные замещения (собственно “опацит”), встречающиеся как в каймах, так и вдоль спайности многих кристаллов. Опацитовый агрегат, по мнению этих авторов, состоит из очень тонкозернистых прорастаний (1–10 мкм) тех же фаз, что в типе 1 и 2, но Ti-магнетит преобладает над други-

ми темноцветными минералами. М. Мерфи с соавторами (Murphy et al., 2000) считают, что тип 1 образуется при дегидратации амфибола во время подъема магмы, тип 2 отражает долгую историю перекристаллизации, а тип 3 соответствует последней стадии окисления внутри экструзивного купола. М. Рузерфорд и Дж. Девайн (Rutherford, Devine, 2003) отмечают, что в одной и той же породе могут наблюдаться несколько популяций роговых обманок с различными типами реакционных кайм. В продуктах извержений вулкана Суифриере Хиллс эти авторы выделяют (1) тонкие (1–20 мкм) каймы, образовавшиеся за счет декомпрессии при подъеме магмы; (2) мощные (200–500 мкм) крупнозернистые преимущественно клинопироксеновые каймы, образовавшиеся за счет термического разложения; (3) агрегаты рудных минералов вдоль спайности и трещин, которые образуются за счет окисления (Rutherford, Devine, 2003).

М. Рузерфорд с соавторами в серии экспериментальных работ показал возможность использования реакционных кайм для определения времени протекания реакции роговых обманок с окружающим расплавом (Rutherford, Hill, 1993) или оценки скоростей подъема магм (например, Rutherford, Devine, 2003). Реакционные каймы образуются за счет реакции с расплавом (Rutherford, Hill, 1993) и контролируются диффузионными процессами (Coombs, Gardner, 2004). Многие исследователи (Rutherford, Hill, 1993; Rutherford, Devine, 2003; Buckley et al., 2006) отмечают существование “времени покоя”, в течение которого образования реакционной каймы не происходит. В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с типизацией реакций разложения рого-

вых обманок в продуктах извержения 30 марта 1956 г. вулкана Безымьянный и обсуждаются механизмы их образования. На основе изобарических экспериментов по разложению роговых обманок (Rutherford, Hill, 1993; Rutherford, Devine, 2003) и петрографических наблюдений мы рассматриваем процесс образования кайм за счет би-метасоматической реакции с расплавом и предлагаем уравнение для оценки времени протекания реакций. Полученные оценки температур, давлений и времени образования реакционных кайм позволяют понять процессы, протекавшие в магматическом очаге непосредственно перед катастрофическим извержением 30 марта 1956 г.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Все анализы минералов и стекол выполнены с помощью микросонда Cameca SX100 (Hobart Uni, Australia) при ускоряющем напряжении 15 кэВ и токе 20 нА. Диаметр пучка 5 мкм. Фотографии были выполнены на электронном микроскопе Camscan-4DV (кафедра петрологии МГУ) в режиме отраженных электронов при ускоряющем напряжении 20 кэВ.

Мощности реакционных кайм роговых обманок измеряли в шлифах на сечениях зерен, ориентировку которых определяли при помощи универсального теодолитного столика Федорова. Для каждого зерна были определены сферические координаты, как минимум, двух выходов осей индикатрисы. Третью ось индикатрисы достаивали как перпендикуляр к первым двум. Оси индикатрисы определяли с помощью компенсатора. Далее рассчитывали ориентировку плоскости данного разреза относительно осей N_p и N_m (рис. 2), которые для роговой обманки совпадают с кристаллографическими осями X и Y соответственно (Трегер, 1958). Для каждого разреза определяли *hkl*-координаты и, с помощью программы Share, уровни среза каждого зерна и грани разреза. Для каждой грани каждого разреза выполняли 8–10 замеров видимых мощностей кайм на различных участках грани. Измерения производили на изображениях в отраженных электронах, так как при этом видны только те фазы, которые находятся на поверхности образца.

В табл. 1 приведены истинные мощности кайм по каждой серии измерений. Истинную мощность кайм рассчитывали как проекцию на перпендикуляр к данной грани. Замеры на грани (001) производили на максимально удлиненных зернах, а остальные замеры выполняли на шестиугольных сечениях различной ориентировки. Мощность кайм на торцевых гранях (001) выше, чем на всех остальных. Однако, как видно из табл. 1, разница лежит в пределах точности измерений.

Таблица 1. Замеры мощностей реакционных кайм на сечениях роговой обманки с определенной ориентировкой

Номер зерна	α , град	(010), мкм	(110), мкм	($\bar{1}$ 10), мкм	(001), мкм	Среднее по зерну, мкм
1	5	20.90	18.85	20.07		19.58
2	90		29.05		18.61	23.83
3	49	17.06	19.86	18.46		18.58
4	90		29.02		23.51	26.27
5	26	24.26	26.60	33.31		27.93
6	90		24.00		30.00	27.00
7	12	25.24	22.77	26.14		24.44
8	90		24.00		32.00	28.00
9	35	23.13	22.65	22.41		22.67
10	74				23.04	23.04
11	31	32.87	31.85	30.23		31.16
12	85		24.00		26.91	25.46
13	20	19.65	23.37	21.97		21.96
14	90		24.00		24.00	24.00
15	25	31.51	37.16	22.85		29.83
16	90				24.00	24.00
17	38	23.73	20.48	23.20		21.86
18	90				30.00	30.00
19	44	22.43	25.36	20.51		22.65
20	76		24.00		29.12	26.56
21	25	27.26	25.17	22.71		24.32
22	81				29.66	29.66
Среднее		24.37	25.12	23.80	26.44	25.13
Станд. откл.		4.75	4.42	4.45	4.09	3.40

Примечание. Номера зерен соответствуют номерам на рис. 2. α – двугранный угол между данным сечением и плоскостью (001). В каждой колонке сведены замеры по двум граням (с прямым и обратным индексом). В последней колонке приведены усредненные значения мощностей для каждого зерна.

Для определения минерального состава реакционных кайм выбирали участок каймы, представленный двумя структурными типами: гранулярным и симплектитовым. В каждом зерне было проделано два вида измерений: сначала определялся минеральный состав всей каймы, затем состав только гранулярной части каймы с учетом пустот. Фазы выделяли по контрасту на изображениях в отраженных электронах, переводили в четырехцветные изображения, где каждый цвет соответствовал определенной фазе, и их процент-

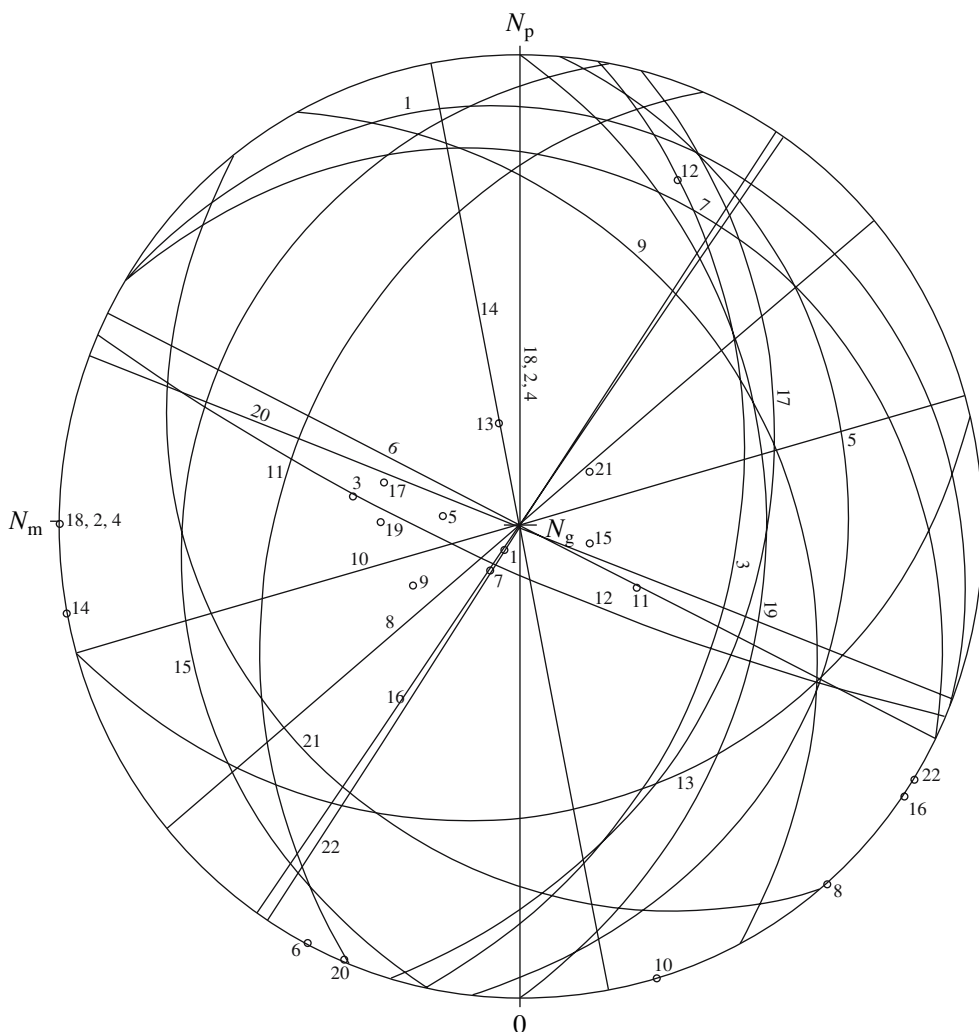


Рис. 2. Плоскости разрезв зерен роговой обманки в сферической проекции (сетка Вульфа). Точками показаны перпендикуляры к изученным разрезам с соответствующими номерами.

ное отношение определяли подсчетом пикселей изображения, соответствующих каждой фазе.

ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ 1955–1956 гг.

Формирование вулкана, начавшееся в позднем плейстоцене, проходило в несколько этапов: 11 000–7800 лет назад, 5500–3300 лет назад, 2400–1700 лет назад, 1350–1000 лет назад (углеродный метод датирования; Брайтцева и др., 1990). Извержение 1955–1956 гг. началось неожиданно, после тысячелетнего перерыва в эруптивной деятельности. Вулканические события начались за полгода до извержения 30 марта 1956 г. и происходили в следующей последовательности (Горшков, Богоявленская, 1965):

– 29 сентября 1955 г. было отмечено первое сейсмическое событие, количество толчков и их

мощность постепенно нарастали. Первоначальная глубина гипоцентров была определена в 50 км, эпицентры ложились в район вулкана Безымянный.

– 22 октября 1955 г. в 6 часов утра на фоне непрекращающихся толчков начались пепловые извержения вулканического типа. Были отмечены пеплопады в г. Ключи и в пос. Усть-Камчатск, сила которых постепенно нарастала и достигла максимума 16–17 ноября. К 21 ноября сила извержений уменьшилась. За месяц в Ключах выпало 22 мм пепла (около 15 кг/м²).

– С конца ноября 1955 г. до марта 1956 г. отмечались отдельные небольшие извержения, не сопровождавшиеся пеплопадами.

– Горшков и Богоявленская (1956) предположили рост лавового купола в феврале–марте 1956 г. Основанием для этого послужило то, что во время самолетного облета 25 января 1956 г. были от-

мечены 2–3 блока лавы, выступающие среди пирокластики.

– 28 марта 1956 г., после двухмесячного перерыва, в г. Ключи наблюдался очень слабый пеплопад, а 30 марта 1956 г. произошло катастрофическое извержение вулкана Безымянный.

Таким образом, деятельность вулкана Безымянный перед извержением 30 марта 1956 г. разделяется на два эпизода: первый происходил с 22 октября по 20 ноября 1955 г., второй начался 28 марта 1956 г., т.е. всего за три дня до катастрофического извержения.

30 марта 1956 г. на вулкане произошел направленный взрыв, уничтоживший вершину вулкана и его восточный склон (Горшков, Богоявленская, 1965). Силой взрыва на расстоянии до 25 км были сломаны, повалены и местами обожжены крупные деревья. Самые мощные отложения взрыва находились в пределах узкого сектора подножия вулкана (60 км²). На остальной площади (500 км²) мощность пирокластических отложений составляла от 1 м (вблизи вулкана) до 1 см. По долине р. Сухая Хапица поток прошел на расстояние 18 км. Эруптивное облако диаметром 50 км поднялось на высоту 35–40 км. Объем ювенильного материала превысил 1 км³, а общий объем перемещенного материала составил 2.6–2.8 км³ (Богоявленская и др., 1985).

Сразу после извержения 30 марта 1956 г. в образовавшейся кратерной воронке начал расти новый экструзивный купол.

ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из пирокластических отложений извержения 30 марта 1956 г. для дальнейшего анализа были отобраны две крупные вулканические бомбы (рис. 3). Характерная трещиноватость свидетельствует о том, что бомбы во время отложения были еще горячими и растрескались при ударе или сразу после него в результате быстрого остывания на воздухе. Кроме того, бомбы имели довольно низкую пористость (около 40%). На основании этих характеристик можно предположить, что данные бомбы представляют собой обломки криптокупола, внедрившегося в постройку вулкана непосредственно перед извержением 1956 г. и деформировавшего юго-восточный склон вулкана (Горшков, Богоявленская, 1965). В этих образцах мы исследовали структурные и морфологические особенности опалитовых кайм роговых обманок, определили минеральный состав кайм и условия их формирования.

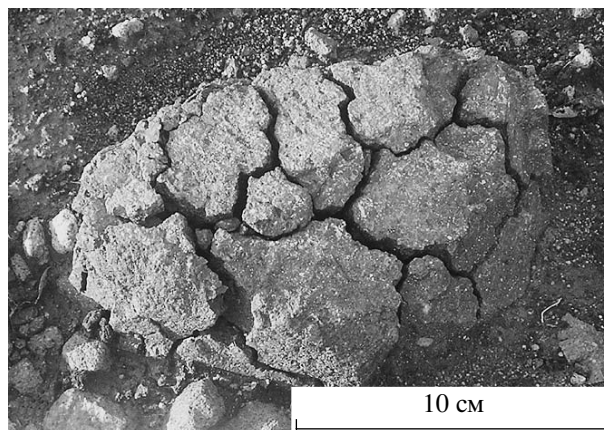


Рис. 3. Вулканическая бомба со структурой “хлебной корки” в пирокластических отложениях извержения 30 марта 1956 г.

ПЕТРОГРАФИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ИЗВЕРЖЕНИЯ 30 МАРТА 1956 г.

Продукты извержения 30 марта 1956 г. представлены роговообманковыми андезитами с плагиоклазом, ортопироксеном, роговой обманкой и титаномагнетитом во вкрапленниках и плагиоклазом, ортопироксеном, титаномагнетитом и небольшим количеством стекла в основной массе. Петрография и петрохимия продуктов извержения тщательно описаны Г.С. Горшковым и Г.Е. Богоявленской (Горшков, Богоявленская, 1965).

Макроскопически породы светло-серого цвета с хорошо заметными вкрапленниками светлого плагиоклаза и темной роговой обманки. Структура порфировая (20–25% вкрапленников). Преобладают вкрапленники плагиоклаза (60–65%) и роговой обманки (25–30%). Вкрапленники ортопироксена встречаются значительно реже, причем их значительная часть образует гломеропорфировые сростки с плагиоклазом. Отмечены отдельные фенокристы титаномагнетита.

Ювенильный материал извержения 30 марта 1956 г. выдержан по химическому составу (табл. 2; Горшков, Богоявленская, 1965) и отвечает андезитам известково-щелочной серии по (Gill, 1981). Средние составы минералов и стекла представлены в табл. 2. Плагиоклазы во вкрапленниках имеют слабозональные ядра (An_{50-55}) и четко выраженную двучленную зональность на краях вкрапленников, представленную зоной резорбции, в которой отмечается большое количество туннельных расплавных включений и состав плагиоклаза достигает An_{64-68} , и внешней каймой “чистого” плагиоклаза шириной 10–30 мкм, окружающей зону резорбции, с нормальной зональностью от An_{62-64} до An_{54-55} . Аналогичное строение вкрапленников плагиоклаза описано для многих остро-

Таблица 2. Состав (мас. %) пород и минеральных фаз в продуктах извержения 30 марта 1956 г.

Породы и минералы	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма
Породы извержения 1956 г. (5)	60.06	0.76	17.55	6.20	0.15	3.19	6.82	3.53	1.39	–	99.65
Станд. откл.	0.87	0.12	0.63	0.39	0.03	0.53	0.41	0.37	0.14	–	
Фенокристаллы											
Плагиоклаз (72)	52.21	0.03	28.13	0.36	0.00	0.03	11.53	5.22	0.19	0.00	97.70
Станд. откл.	1.48	0.02	1.00	0.08	–	0.02	0.94	0.71	0.12	–	
Магнетит (12)	0.07	7.52	1.91	79.95	0.59	1.19	0.00	0.00	0.00	0.00	91.25
Станд. откл.	0.03	0.14	0.05	1.09	0.03	0.04	–	–	–	–	
Ортопироксен (19)	52.28	0.14	0.73	20.70	1.14	23.02	0.85	0.00	0.00	0.00	98.86
Станд. откл.	0.40	0.02	0.31	0.44	0.11	0.40	0.08	–	–	–	
Роговая обманка (43)	42.56	1.89	11.05	13.49	0.29	13.16	10.76	1.90	0.40	0.03	95.53
Станд. откл.	1.06	0.34	1.52	1.19	0.08	0.65	0.82	0.24	0.07	0.01	
Основная масса											
Плагиоклаз (4)	52.41	0.00	28.68	0.60	0.02	0.05	11.72	4.47	0.31	0.03	98.29
Станд. откл.	0.57	–	0.09	0.03	0.01	0.01	0.30	0.14	0.09	0.01	
Магнетит (5)	0.18	7.03	1.61	81.09	0.53	1.12	0.11	0.00	0.00	0.00	91.67
Станд. откл.	0.03	1.21	0.50	0.99	0.05	0.10	0.04	–	–	–	
Ортопироксен (5)	52.26	0.14	1.44	19.02	1.12	22.57	1.50	0.00	0.00	0.00	98.05
Станд. откл.	0.45	0.02	0.31	1.20	0.04	1.12	0.15	–	–	–	
Стекло (2)	76.70	0.37	11.37	1.41	0.04	0.09	0.33	2.43	5.19	0.04	97.98
Станд. откл.	0.01	0.03	0.05	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.13	0.03	
Кристаллит (2)*	96.25	0.18	1.06	0.06	0.00	0.00	0.04	0.57	0.03	0.02	98.21
Станд. откл.	0.51	0.01	0.05	0.03	–	–	0.02	0.08	0.01	0.01	
Расплавные включения											
В плагиоклазе**											
Мин***	56.3	0.58	17.76	4.91	0.08	1.73	6.45	4.56	4.9	0.28	97.78
Макс****	73.9	0.44	11.54	2.08	0.03	0.52	1.69	2.89	2.99	0.06	96.26
Среднее (8)	67.41	0.39	16.03	2.12	0.06	0.91	3.59	3.97	4.17	0.12	98.87
Станд. откл.	5.56	0.11	2.99	1.25	0.05	0.77	1.81	0.99	1.35	0.08	
В ортопироксене											
Среднее (8)	74.30	0.25	12.64	2.16	0.05	0.57	1.67	3.13	3.47	0.39	98.09
Станд. откл.	2.05	0.19	1.01	0.52	0.04	0.73	1.65	1.80	1.37	0.56	

Примечание. В скобках приведено число анализов. Составы пород извержения 30 марта 1956 г. взяты из (Малышев, 2000). Суммы анализов в (Малышев, 2000) приведены к 100%. Сумма, отличная от 100%, получилась из-за приведения железа к Fe²⁺.

* Данную фазу назвали кристаллитом, следуя описанию (Горшков, Богоявленская, 1965). Рентгеноструктурные исследования не проводили.

** Использованы данные (Толстых и др., 1999).

*** Расплавные включения с минимальным содержанием SiO₂.

**** Расплавные включения с максимальным содержанием SiO₂.

воздушных вулканов и интерпретируется как свидетельство внедрения в магматический очаг более горячей, богатой CaO магмы (например, Terley et al., 1999).

Вкрапленники роговой обманки плеохроируют в бурых тонах и имеют идеальную форму (рис. 4). Все без исключения кристаллы роговых обманок окружены реакционными каймами при-

мерно одинаковой мощности (25–30 мкм). Представительные анализы роговых обманок из изученных образцов приведены в табл. 3. Несмотря на существенные вариации составов, явной зональности во вкрапленниках не выявлено. По классификации (Leake et al., 1997) большая часть роговых обманок представлена магнезиогастингситом, но несколько составов попадают в поля

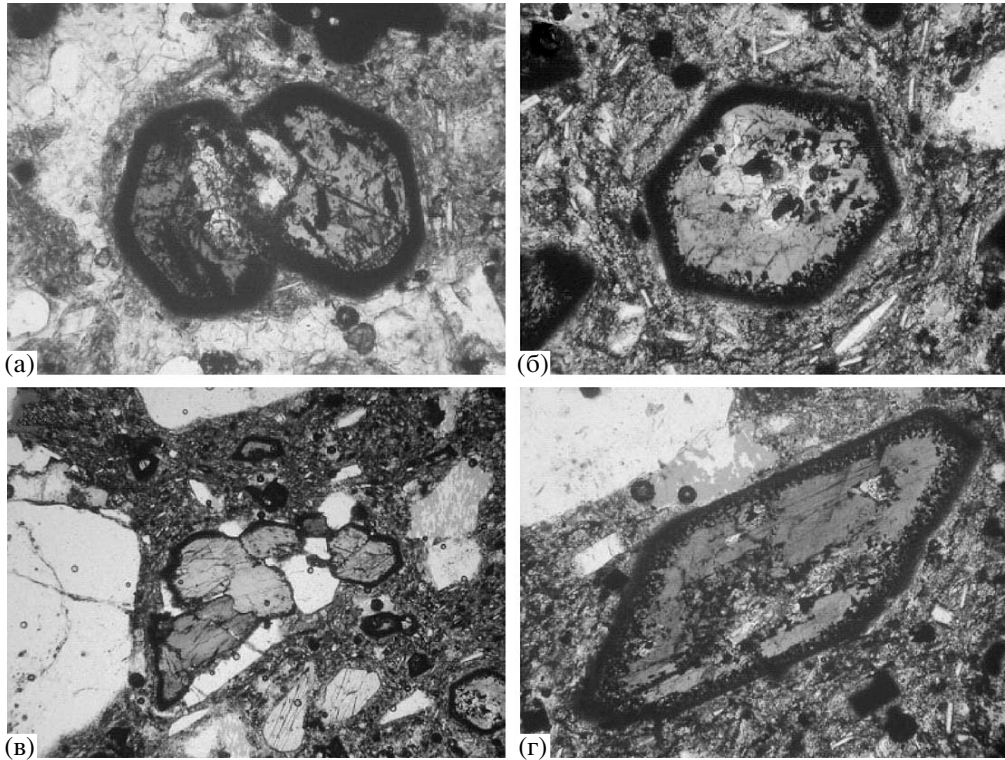


Рис. 4. Микрофотографии роговых обманок в проходящем свете:

(а) – сросток двух зерен роговой обманки с опацитовыми каймами, на гранях срастания наблюдаются вроски других минералов, но каймы опацитизации отсутствуют; (б) – идиоморфное изометричное зерно, равномерно окруженное опацитовой каймой; внутри зерна виден крупнозернистый агрегат объемного разложения роговой обманки (*Срх-Орх-Pl-Mag*); (в) – скопление зерен роговой обманки и плагиоклаза, опацитовая кайма присутствует только на контакте роговой обманки с основной массой, а на контакте с плагиоклазом отсутствует; (г) – идиоморфное удлиненное зерно с опацитовой каймой и участками объемного разложения внутри зерна. Длинная сторона каждой фотографии соответствует 0.8 мм.

эденита и паргасита. Для роговых обманок вулкана Безымянный методом мессбауэровской спектроскопии было оценено отношение Fe^{3+}/Fe^{2+} (Альмеев и др., 2002). Эти авторы считают, что расчет Fe^{3+}/Fe^{2+} по стехиометрии (тринадцатикатионный метод) занижает содержание Fe^{3+} . Однако появление бурых (базальтических) роговых обманок связывается в первую очередь с их окислением в приповерхностных условиях. Этот процесс сопровождается выделением тончайших ламелл магнетита (Murphy et al., 2000). Изученные Альмеевым и др. (2002) кристаллы представляют собой вторично окисленные бурые роговые обманки, о чем свидетельствует 18% магнетитовой фазы, обнаруженной этими авторами в роговых обманках после сепарации. Таким образом, полученные ими отношения Fe^{3+}/Fe^{2+} принципиально не могут отражать первичные содержания железа в роговых обманках вулкана Безымянный при их кристаллизации и не могут быть использованы при расчетах кристаллохимических формул роговых обманок.

Ортопироксен во вкрапленниках представлен плеохроирующими в зеленовато-розоватых то-

нах идеально оформленными изометричными или слегка удлиненными кристаллами. В них наблюдается плавная обратная зональность, с повышением магнезиальности ($Mg/(Mg + Fe)$ ат. %) от 65 в ядрах вкрапленников до 67.5 во внешних частях зерен. Магнезиальность микролитов ортопироксена в основной массе колеблется от 67.7 до 70.8. Клинопироксен в продуктах извержения 30 марта 1956 г. очень редок и преимущественно встречается в гломеропорфировых сростках вместе с ортопироксеном, плагиоклазом и магнетитом.

Фенокристы плагиоклаза содержат твердофазные включения ортопироксена и роговой обманки, а в фенокристах ортопироксена и роговой обманки присутствуют твердофазные включения плагиоклаза. Это позволяет выделить одновременно кристаллизовавшийся парагенезис вкрапленников: плагиоклаз, ортопироксен и роговая обманка.

Составы расплавных включений в плагиоклазе отражают широкие вариации составов расплавов по петрогенным компонентам. Например,

Таблица 3. Состав (мас. %) фенокристаллов роговых обманок

Номер анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Mg/(Mg + Fe)	Fe ²⁺ /Fe ³⁺	Al(IV)	Al(VI)	Сумма катионов
1	42.85	1.54	9.57	13.91	0.34	13.37	10.49	2.07	0.44	94.57	0.84	0.51	1.61	0.08	15.36
2	43.69	1.60	9.34	13.20	0.31	13.91	10.70	1.63	0.43	94.81	0.87	0.40	1.54	0.09	15.24
3	43.60	1.92	9.38	14.16	0.35	13.46	10.54	1.56	0.42	95.38	0.86	0.38	1.58	0.05	15.19
4	45.18	1.65	8.37	12.72	0.26	13.82	10.63	2.25	0.50	95.38	0.77	1.35	1.31	0.15	15.43
5	43.70	1.95	8.64	13.73	0.28	13.63	10.63	1.56	0.43	94.54	0.84	0.52	1.50	0.02	15.23
6	41.49	1.74	9.65	14.02	0.32	12.55	10.61	1.65	0.42	92.44	0.80	0.64	1.64	0.10	15.31
7	42.69	1.58	9.52	13.91	0.40	13.95	11.02	1.50	0.34	94.91	0.90	0.26	1.66	0.00	15.24
8	43.16	1.73	9.77	14.09	0.34	13.17	10.62	1.68	0.44	95.00	0.83	0.49	1.60	0.11	15.25
9	41.51	1.58	11.10	15.35	0.44	12.52	10.24	2.15	0.41	95.29	0.86	0.32	1.84	0.10	15.32
10	42.03	1.58	10.83	15.60	0.48	12.59	10.36	1.89	0.39	95.76	0.86	0.29	1.80	0.08	15.25
11	43.76	2.12	9.24	14.51	0.32	14.03	10.39	2.16	0.36	96.89	0.88	0.31	1.58	0.00	15.29
12	43.61	2.05	9.98	12.97	0.25	14.11	10.72	1.79	0.54	96.02	0.87	0.40	1.63	0.09	15.29
13	43.92	1.96	10.36	12.22	0.22	14.54	10.77	1.83	0.51	96.34	0.90	0.33	1.63	0.14	15.28
14	40.75	1.97	12.95	12.04	0.21	13.20	10.50	2.17	0.38	94.16	0.89	0.33	1.94	0.33	15.37
15	41.41	1.91	13.68	11.88	0.22	13.50	10.92	2.21	0.35	96.08	0.88	0.36	1.97	0.38	15.39
16	42.63	1.49	12.67	11.86	0.22	13.73	10.70	2.03	0.31	95.63	0.90	0.30	1.79	0.38	15.30
17	42.85	1.71	13.20	13.24	0.21	13.58	10.83	2.13	0.36	98.12	0.89	0.28	1.89	0.33	15.31
18	42.04	1.69	12.12	13.96	0.27	12.63	10.75	1.96	0.38	95.80	0.82	0.52	1.81	0.29	15.33
19	42.12	2.16	11.76	13.82	0.26	12.70	10.72	2.01	0.47	96.02	0.81	0.63	1.80	0.24	15.35
20	44.15	1.91	10.01	12.18	0.31	14.50	10.64	1.81	0.47	95.96	0.90	0.32	1.58	0.13	15.25
21	43.92	1.77	10.17	13.17	0.32	13.46	11.16	1.82	0.50	96.29	0.79	0.92	1.55	0.20	15.37
22	42.95	1.88	10.97	14.37	0.27	12.71	10.65	1.94	0.45	96.20	0.80	0.64	1.69	0.21	15.31
23	42.74	1.94	11.57	14.31	0.27	12.65	10.84	1.90	0.44	96.65	0.80	0.65	1.75	0.25	15.32
24	41.74	1.91	11.45	14.04	0.27	12.38	10.65	1.88	0.42	94.75	0.80	0.65	1.77	0.24	15.33
25	42.54	1.87	11.62	14.25	0.29	12.90	10.80	1.87	0.42	96.56	0.83	0.47	1.79	0.21	15.30
26	42.17	2.00	12.02	15.15	0.26	12.50	10.55	1.77	0.41	96.82	0.85	0.35	1.86	0.20	15.22
27	43.20	2.10	12.54	13.00	0.18	11.82	10.62	1.97	0.46	95.88	0.72	1.61	1.63	0.55	15.33
28	42.19	2.05	12.62	14.05	0.25	12.44	11.06	2.09	0.41	97.16	0.78	0.81	1.85	0.32	15.40
29	41.92	1.99	12.91	13.47	0.21	12.62	10.96	2.08	0.40	96.57	0.80	0.69	1.87	0.36	15.38
30	41.88	1.99	13.12	13.27	0.24	12.80	11.12	2.02	0.41	96.84	0.82	0.63	1.90	0.36	15.38
31	41.60	1.91	13.12	13.34	0.21	12.71	10.95	2.02	0.40	96.26	0.83	0.56	1.91	0.36	15.37
32	42.30	1.64	9.84	14.50	0.43	13.65	10.77	1.67	0.38	95.18	0.90	0.23	1.71	0.00	15.26
33	41.49	1.63	9.45	13.90	0.43	13.25	10.42	1.68	0.37	92.61	0.89	0.28	1.69	0.00	15.26
34	41.35	1.46	9.46	14.21	0.48	13.41	10.56	1.68	0.38	93.00	0.90	0.22	1.69	0.00	15.28
35	42.27	2.83	10.91	13.77	0.26	12.98	10.83	1.86	0.41	96.12	0.81	0.66	1.78	0.11	15.32
36	41.66	3.01	10.78	15.85	0.29	12.86	10.16	2.11	0.39	97.10	0.87	0.27	1.85	0.00	15.25
37	42.00	2.03	12.57	12.93	0.22	13.24	10.66	2.11	0.33	96.09	0.87	0.38	1.87	0.29	15.33
38	41.46	1.99	12.50	12.94	0.19	13.10	10.71	2.12	0.31	95.32	0.86	0.42	1.89	0.28	15.35
39	41.39	2.06	12.62	13.00	0.22	13.05	10.55	2.19	0.32	95.39	0.87	0.38	1.91	0.28	15.35
40	41.30	2.12	12.81	13.17	0.22	12.75	10.79	2.25	0.33	95.73	0.82	0.60	1.91	0.31	15.41
41	42.79	2.69	10.80	13.81	0.30	13.06	10.70	1.77	0.40	96.32	0.82	0.56	1.74	0.13	15.26
Среднее	42.49	1.92	11.12	13.66	0.29	13.17	10.69	1.92	0.41	95.66	0.84	0.51	1.74	0.19	15.31
Станд. откл.	0.98	0.33	1.48	0.94	0.08	0.61	0.22	0.21	0.05						
Макс*	45.18	3.01	13.68	15.85	0.48	14.54	11.16	2.25	0.54						
Мин**	40.75	1.46	8.37	11.86	0.18	11.82	10.16	1.50	0.31						

Примечание. Анализы 1–10, 11–31 – профили через зерна роговой обманки; 32–41 – отдельные зерна роговой обманки. Расчет роговой обманки на формулу производился по методике пересчета на “13 катионов”.

* Максимальное содержание главных петрогенных компонентов в измеренных роговых обманках.

** Минимальное содержание главных петрогенных компонентов в измеренных роговых обманках.

SiO₂ варьирует от 56.3 до 73.9 мас. %, K₂O от 2.25 до 5.77 мас. % (Толстых и др., 1999). С другой стороны, расплавные включения в ортопироксене (табл. 2) имеют гораздо более узкие вариации составов (SiO₂ 72.5–74.0 мас. %, K₂O 2.35–3.27 мас. %). Расплавные включения в роговых обманках обнаружить не удалось. Область составов расплавов, из которых могли кристаллизоваться одновременно плагиоклаз и ортопироксен, имеет интервал кремнекислотности от 72.3 до 73.9 мас. %. Возможно, большие вариации составов расплавных включений в плагиоклазе отражают его кристаллизацию из различных по составу магм на фронте смешения.

Основная масса преимущественно сложена микролитами плагиоклаза и ортопироксена. Определение точной пропорции этих минералов затруднено из-за многочисленных реликтов полностью разложившейся роговой обманки. В основной массе также отмечается значительное количество относительно крупных (до 50–60 мкм) трещиноватых бесформенных зерен (рис. 5), которые описаны Горшковым и Богоявленской (1965) как кристобалит (около 3%) и магнетит (менее 1%). Составы этих фаз приведены в табл. 2. Кристобалит кроме кремнезема содержит Al₂O₃ и Na₂O. Стекло риолитового состава находится в интерстициях между кристаллами плагиоклаза. Составы всех фаз основной массы представлены в табл. 2.

Отобранные нами образцы очень близки по минеральному составу и петрографическим особенностям. Различия в пористости могут быть объяснены локальными процессами и различной термальной историей образцов уже во время извержения. Таким образом, исследованный материал является представительным для изучения процессов, происходивших в магматическом очаге перед извержением 30 марта 1956 г.

ТИПИЗАЦИЯ КАЙМ ОПАЦИТИЗАЦИИ

В андезитах извержения 1956 г. вулкана Безымянный во всех зернах роговой обманки присутствуют реакционные каймы (рис. 4–6). При этом сохраняется идиоморфность зерен: как правило, это шестиугольные сечения с четкими гранями кристалла. На рис. 6а–6в четко выделяется два структурных типа: гранулярный и симплектитовый, которые находятся в сложных взаимоотношениях друг с другом. Гранулярная кайма (рис. 6г) имеет четкие резкие границы. Со стороны роговой обманки эта граница чаще всего проходит вдоль спайности или по трещинам. Форма рудного минерала может быть изометричной и вытянутой, размер колеблется от 3 до 8–10 мкм. Плагиоклаз представлен выделениями неправильной формы, размером от 5 до 10 мкм, а преобладающий пироксен представляет собой матрицу, в ко-

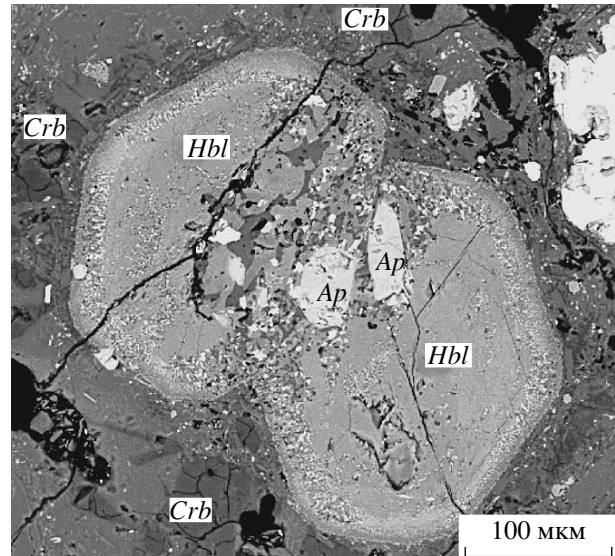


Рис. 5. Фотография сростка кристаллов роговой обманки и окружающей основной массы, выполненная в отраженных электронах.

На фотографии хорошо видны многочисленные выделения кристобалита в основной массе. Эта фотография соответствует фотографии 4а, выполненной в проходящем свете. *Hbl* – роговая обманка, *Ap* – апатит, *Crb* – кристобалит.

торую заключены рудный и плагиоклаз. Кроме того, в агрегате присутствуют пустоты размером от 1.5 до 5 мкм. Симплектитовая кайма (рис. 6д) представляет собой тонкие (<1 мкм) срастания минералов, состав которых невозможно определить даже качественно. По контрасту изображения в отраженных электронах можно выделить субмикронные кристаллики рудного минерала.

На перпендикулярных удлинению сечениях наблюдаются оба структурных типа реакционных кайм: внутренняя гранулярная и внешняя симплектитовая каймы (рис. 6а, 6б). Прослеживается зональность кайм по содержанию рудного: во внешней кайме наблюдается постепенное уменьшение содержания рудного минерала от центра к краю. На сечениях вдоль удлинения роговой обманки хорошо видно (рис. 6в), что на торцевых гранях развивается только симплектитовая реакционная кайма. Эта кайма также имеет ярко выраженную зональность по содержанию рудного минерала. На рис. 6е показан участок сочленения торцевой и боковой граней роговой обманки. Внешняя темная симплектитовая кайма присутствует как на боковых, так и на торцевых гранях. Ее мощность и состав не изменяются. Гранулярная кайма, характерная для внутренних реакционных зон боковых граней, при переходе на торцевые грани резко сменяется яркой симплектитовой. Границы каймы остаются выдержанными, сохраняя мощность. Реакционные кай-

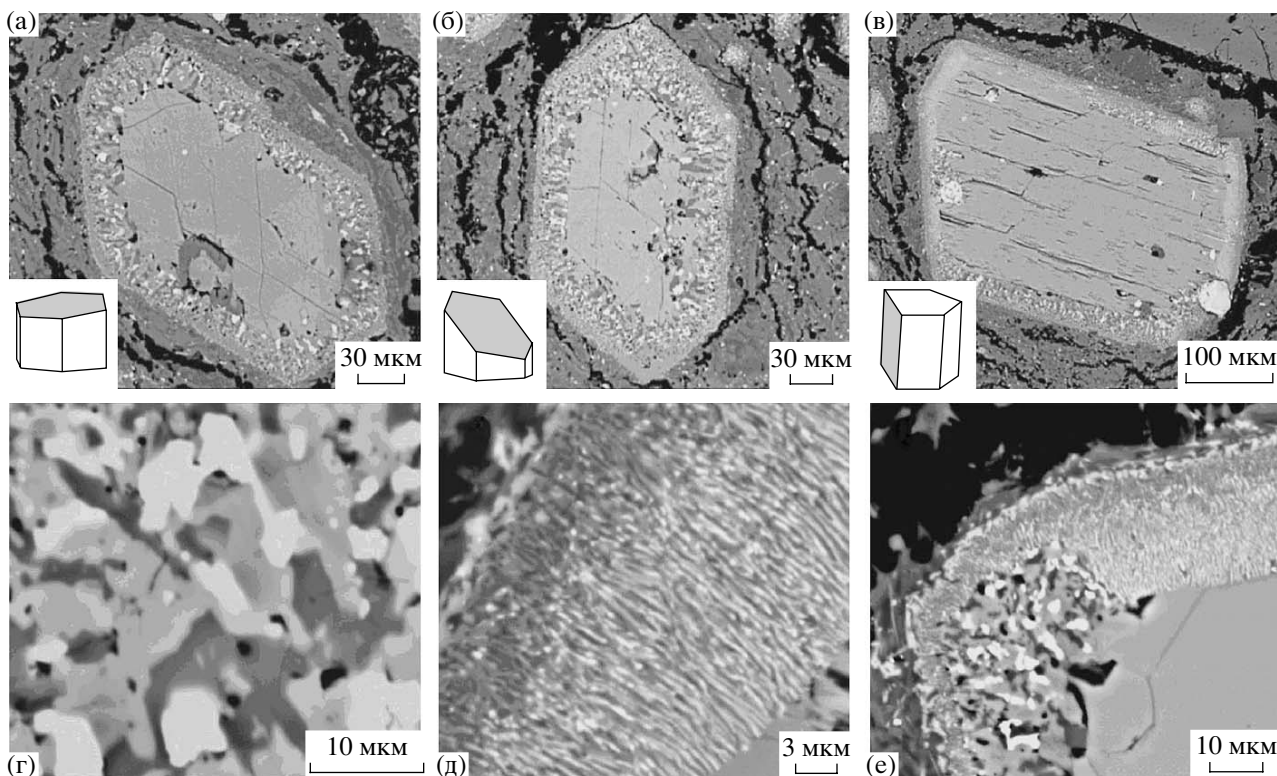


Рис. 6. (а–в) Различные сечения зерен роговой обманки и их кристаллографическая ориентировка. (г–е) Структурные типы кайм.

(а, б) – сечения, близкие к перпендикулярному удлинению кристалла роговой обманки; (в) – сечение вдоль удлинения кристалла; (г) – гранулярный и (д) – симплектитовый тип кайм; (е) – участок сочленения торцевой и боковой граней.

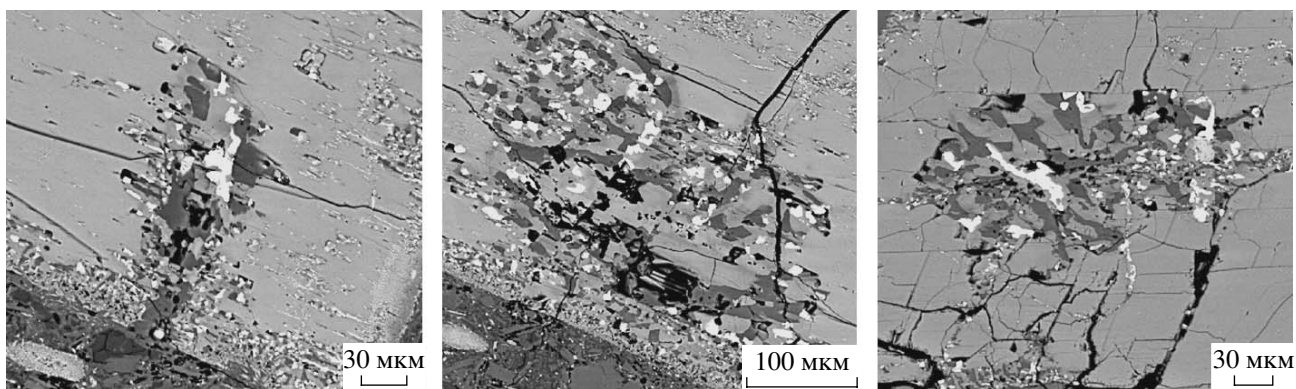


Рис. 7. Крупнозернистый агрегат разложения внутри кристалла роговой обманки.

мы на боковых и торцевых гранях имеют сходное зональное двучленное строение, но различаются по морфологии зерен, слагающих внутреннюю зону кайм.

Кроме кайм вокруг кристаллов, наблюдается крупнозернистый (размер зерен 10–20 мкм) агрегат разложения роговой обманки внутри зерен, он может примыкать непосредственно к кайме, сечь ее или находиться внутри зерна, не имея прямого контакта с каймой (рис. 7). Клинопироксен в

этих участках сохраняет ориентировку замещаемой роговой обманки. Форма таких агрегатов неправильная, может быть изометричной, вытянутой, местами ограниченной трещинами спайности. Зерна, где развиты такие агрегаты замещения, часто пронизаны тонкими (первые микроны) каналами и трещинами, в которых наблюдается рудный минерал игольчатой и пластинчатой формы.

Таким образом, мы можем выделить два основных типа разложения роговой обманки в анде-

Таблица 4. Состав (мас. %) продуктов разложения фенокристаллов роговой обманки

Минералы	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
В кайме										
Плагиоклаз (4)	49.77	0.29	25.78	1.97	0.07	1.93	12.80	3.54	0.45	0.02
Станд. откл.	1.01	0.26	2.29	1.06	0.03	1.14	0.34	0.33	0.13	0.01
Магнетит (2)	2.94	8.42	3.87	62.79	0.57	3.71	0.67	0.10	0.03	0.01
Станд. откл.	3.95	1.57	0.83	10.01	0.11	0.88	0.54	0.12	0.00	0.01
Ортопироксен (3)	52.28	0.14	0.73	20.70	1.14	23.02	0.85	0.00	0.02	0.01
Станд. откл.	0.40	0.02	0.31	0.44	0.11	0.40	0.08	0.01	0.01	0.01
Внешняя кайма (22)*	51.20	0.93	12.69	10.34	0.53	12.37	7.30	2.20	0.34	0.04
Станд. откл.	2.35	0.54	2.53	1.52	0.16	2.11	2.50	0.41	0.37	0.02
Внутренняя кайма (41)*	43.72	2.01	10.25	16.36	0.49	12.16	10.31	1.53	0.18	0.03
Станд. откл.	1.71	0.37	2.03	2.49	0.11	1.54	1.45	0.45	0.11	0.03
Из областей объемного распада										
Плагиоклаз (5)	53.61	0.09	26.50	1.25	0.03	0.24	9.71	5.22	0.74	0.03
Станд. откл.	2.20	0.05	0.89	0.30	0.02	0.15	0.56	0.10	0.15	0.01
Магнетит (4)	0.30	5.72	3.14	75.16	0.69	5.78	0.23	0.00	0.01	0.00
Станд. откл.	0.41	3.15	0.51	3.05	0.01	1.62	0.12	0.01	0.01	0.00
Ортопироксен (4)	53.00	0.37	1.68	14.92	0.69	26.19	1.88	0.03	0.01	0.01
Станд. откл.	0.21	0.05	0.56	1.32	0.02	0.78	0.20	0.01	0.01	0.01
Клинопироксен (10)	48.80	1.11	3.18	7.56	0.39	15.68	19.49	0.42	0.04	0.02
Станд. откл.	2.56	0.22	0.67	1.26	0.06	1.46	1.44	0.11	0.06	0.02
Агрегат объемного распада роговой обманки (31)**										
	44.84	1.47	11.96	11.99	0.57	13.78	9.72	1.84	0.29	0.03

* Средние составы по профилям через определенные участки каймы.

** Средние составы по профилям через полностью разложенные зерна роговой обманки.

зитах извержения 1956 г. вулкана Безымянный. Первый тип – зональные двучленные каймы опацизации вокруг зерен. В этих каймах выделяется два подтипа, с гранулярными и симплектитовыми структурами соответственно. Гранулярные каймы развиваются только вдоль боковых граней кристаллов роговой обманки. Второй тип – объемное разложение роговой обманки. Здесь также можно выделить два подтипа. Крупнозернистые участки замещения соответствуют типу 2 по (Murphy et al., 2000), “габброидному типу” по (Garcia et al., 1979) и “клинопироксеновому” типу по (Rutherford, Devine, 2003). Тонкозернистые участки более всего подходят под описание “черного типа” по (Garcia et al., 1979), типа 3 по (Murphy et al., 2000) и опацита по (Rutherford, Devine, 2003).

Несмотря на внешнее сходство агрегатов замещения роговых обманок, мы не можем отождествлять каймы опацизации и продукты объемного разложения роговой обманки по нескольким причинам. Во-первых, продукты объемного разложения практически изохимичны окружающей их роговой обманке, тогда как каймы опаци-

зации заметно отличаются по составу от роговых обманок (табл. 4). Во-вторых, они также различаются по минеральному составу: в продуктах объемного разложения присутствует высококальциевый клинопироксен, тогда как в гранулярных агрегатах опацитовых кайм отмечается только ортопироксен и пижонит. В-третьих, участки объемного разложения имеют секущие взаимоотношения с опацитовыми каймами, т.е. образовались позже опацитовых кайм (рис. 7).

РЕАКЦИИ РАЗЛОЖЕНИЯ РОГОВОЙ ОБМАНКИ

Рузерфорд и Хилл (Rutherford et al., 1993) отмечают, что для образования реакционных кайм вокруг роговых обманок в андезитах Сент-Хеленс необходимо участие расплава и аргументируют это (1) отсутствием реакционных кайм на участках, экранированных от расплава другими фазами, и (2) текстурными признаками роста кайм “внутри кристаллов”. Каймы опацизации роговых обманок в породах вулкана Безымянный

Таблица 5. Реакции разложения роговой обманки, приведенные в литературе

Реагенты, мас. %	Продукты, мас. %	Литературный источник, вулкан
73 Hbl + 27 Melt	29 Opx + 24 Cpx + 43 Pl + 3 Ilm	(Rutherford, Hill, 1993), Сент-Хеленс
100 Hbl	49.8 Cpx + 27.6 Opx + 18.2 Pl + 4.5 Ti-Mag	(Buckley et al., 2006), Монтсеррат
100 Hbl	53.9 Cpx + 24.4 Opx + 18.1 Pl + 1.9 Ilm + 1.7 Mag	(Buckley et al., 2006), Монтсеррат
100 Hbl	43.0 Cpx + 24.5 Opx + 23.7 Pl + 5.2 Ilm + 3.5 Mag	(Buckley et al., 2006), Сент-Хеленс

Таблица 6. Результаты измерений пропорций минералов в реакционных каймах и пересчета их в массовые проценты

Номер зерна	Гранулярные участки каймы, об. %				Вся кайма, об. %			Вся кайма, мас. %		
	Px	Pl	Ti-Mag	пустоты	Px	Pl	Ti-Mag	Px	Pl	Ti-Mag
1	49.24	30.43	15.09	5.25	54.86	33.23	11.91	55.36	26.43	18.21
2	55.4	32.35	10.8	1.45	58.92	28.85	12.23	58.81	22.7	18.49
3	53.31	34.19	8.98	3.52	61.53	29.02	9.45	62.33	23.17	14.5
4	47.6	35.23	14.89	2.29	51.99	34.12	13.89	52.03	26.92	21.06
5	55.79	31.17	9.28	3.76	55.88	36.11	8.02	57.91	29.5	12.59
6	64.58	23.01	10.03	2.37	61.35	29.65	9	62.38	23.76	13.86
7	58.13	32.03	7.63	2.22	61.42	31.11	7.46	63.16	25.22	11.62
8	46.84	39.51	11.67	1.97	56.38	33.52	10.1	57.47	26.93	15.59
9	50.45	33.88	13.42	2.25	54.99	35.83	9.17	56.62	29.08	14.3
10	52.99	29.74	13.5	3.77	53.91	32.18	13.91	53.72	25.28	21
11	54.35	33.56	9.72	2.37	53.96	37.8	8.24	56.07	30.96	12.97
12	53.71	33.83	8.84	3.62	57.19	35.33	7.48	59.35	28.9	11.76
Среднее	53.53	32.41	11.16	2.9	56.87	33.06	10.07	57.93	26.57	15.5
Станд. откл.	4.87	3.91	2.52	1.08	3.26	2.96	2.35	3.49	2.66	3.39

имеют те же признаки реакции с окружающим расплавом (рис. 4).

Бакли с соавторами (Buckley et al., 2006) считают, что реакция разложения роговой обманки проходит почти изохимически, но в открытой системе; при этом происходит незначительный обмен компонентами с расплавом. Масс-балансовые расчеты осложнены зональностью роговых обманок и широкими вариациями составов минералов в реакционных каймах, т.е. неопределенностью в составах фаз, участвующих в масс-балансе. Тем не менее во всех рассмотренных этими авторами случаях требуется привнос SiO_2 из расплава и вынос FeO , CaO и щелочей из роговой обманки.

Реакции разложения роговой обманки, приведенные в литературе, представлены в табл. 5. Участки объемного разложения роговой обманки в породах вулкана Безымянный хорошо согласуются с изохимической реакцией, предложенной в (Buckley et al., 2006). В этих участках пироксен явно преобладает над другими минералами, а плагиоклаз находится в подчиненном количестве (рис. 7). Количество рудного минерала в этих

участках сильно варьирует, но в целом не превышает 8 мас. %. Рудный минерал в нашем случае представлен только титаномагнетитом (табл. 4), хотя в некоторых породах вулканов Сент-Хеленс (Buckley et al., 2006) и Монтсеррат (Murphy et al., 2000) в реакционных каймах отмечается два рудных минерала: магнетит и ильменит.

Для образования опацитовых кайм роговых обманок в породах вулкана Безымянный не подходят реакции, предложенные в (Rutherford, Hill, 1993; Buckley et al., 2006) по следующим причинам:

(1) В опацитовых каймах отсутствует высококальциевый клинопироксен, который является главным минералом предлагаемых реакций. Пироксен в каймах содержит от 0.5 (ортопироксен) до 12 мас. % (пижонит) CaO (табл. 4). Высококальциевый клинопироксен содержится только в участках объемного распада роговых обманок, которые образовались позже кайм опацитизации.

(2) Пропорции минералов в реакционных каймах сильно отличаются от соотношений минералов в предложенных реакциях. Нами были измерены пропорции пироксена, рудного минерала и

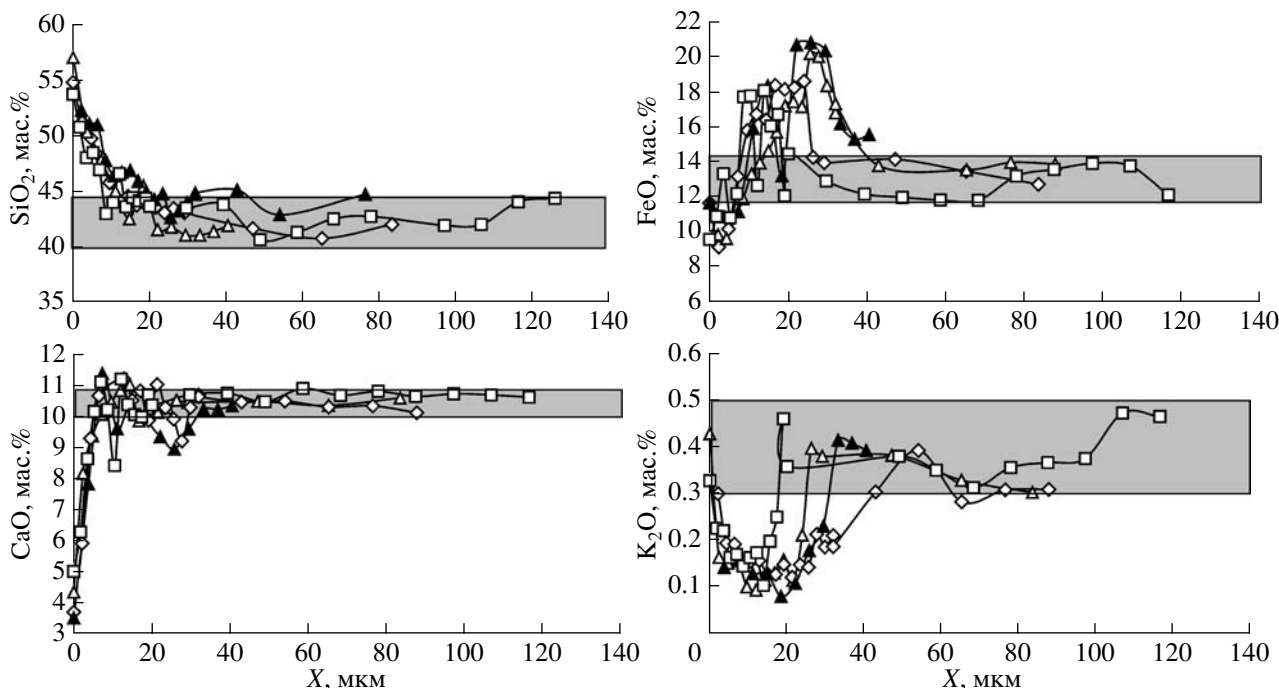


Рис. 8. Профили через участки с симплектитовым типом каймы. Залитые участки отражают вариации составов роговых обманок.

плаггиоклаза как по кайме в целом, так и только в гранулярных участках каймы.

Результаты измерений и пересчета в массовые проценты представлены в табл. 6. Видно, что гранулярная кайма обогащена рудным минералом по отношению к внешним симплектитовым участкам. По сравнению с участками объемного распада роговой обманки и с реакциями, предложенными в (Buckley et al., 2006), в опацитовых каймах вулкана Безымянный содержится гораздо больше рудного минерала и плаггиоклаза и гораздо меньше пироксенов.

(3) Каймы разложения роговых обманок в породах вулкана Безымянный имеют четко выраженную зональность, которая хорошо видна на профилях, сделанных через симплектитовые каймы торцевых граней кристаллов (рис. 8).

Подобная зональность не может быть отражением первичной зональности роговых обманок, то есть реакция разложения не может быть “почти изохимической”, как предлагается в (Buckley et al., 2006). Сложная разнонаправленная зональность не может также получиться простым сложением состава роговой обманки с определенным количеством расплава, как предлагается в (Rutherford, Hill, 1993).

Сложные двунаправленные процессы селективного привноса–выноса компонентов характерны для биметасоматических процессов. Главным признаком метасоматоза является метасоматическая зональность, которая в данном случае выражается в присутствии двух зон: внутренней,

сложенной трехфазным парагенезисом (плаггиоклаз + пироксен + титаномagnetит), и внешней, сложенной двухфазным парагенезисом (плаггиоклаз + пироксен). Часто со стороны расплава роговая обманка обрастает примерно микронной зоной с микролитами ортопироксена, которая тоже может являться частью метасоматической колонки. Выделение зон биметасоматической ко-

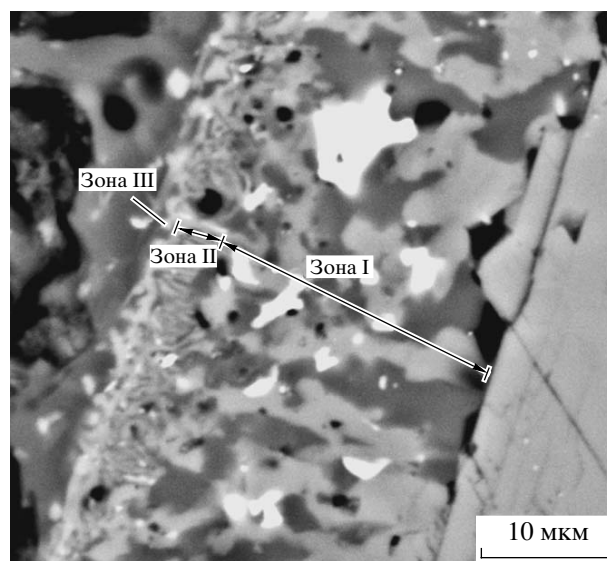


Рис. 9. Участок каймы с зонами биметасоматической колонки. Зона I – $Px + Pl + Ti-Mag$; зона II – $Px + Pl$; зона III – Px .

лонки на границе расплава и роговой обманки показано на рис. 9. Отдельные зерна рудного минерала в *Px-Pl* зоне, скорее всего, являются реликтами *Px-Pl-Mag* зоны. Таким образом, биметасоматический процесс разложения роговой обманки в андезитах вулкана Безымянный можно записать в виде следующей метасоматической колонки:

Роговая обманка	<i>Px + Pl + Ti-Mt</i>	<i>Px + Pl</i>	<i>Px</i>	Расплав
-----------------	------------------------	----------------	-----------	---------

Из расплава в сторону роговой обманки мигрирует SiO_2 , из роговой обманки выносятся CaO . Остальные компоненты ведут себя сложным образом, перераспределяясь по зонам метасоматической колонки (рис. 8).

УСЛОВИЯ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ РАСПАД РОГОВОЙ ОБМАНКИ

Роговая обманка – сложный водосодержащий ленточный силикат, имеющий ограниченное поле устойчивости в магматических горных породах. Для образования роговой обманки требуется значительное парциальное давление воды, что делает ее неустойчивой при давлениях менее 1 кбар даже в водонасыщенной системе. Как было показано экспериментально, дегазация магмы при декомпрессии может привести к нестабильности амфибола и росту реакционных кайм (Rutherford, Hill, 1993).

Верхний предел устойчивости амфибола по температуре также хорошо изучен экспериментально в различных магматических системах. А.А. Кадик с соавторами (1986) экспериментально изучили фазовые отношения для андезитов вулкана Безымянный при различных давлениях и содержаниях воды и показали, что верхний предел устойчивости роговых обманок не превышает 950°C. Следовательно, нагрев системы выше этого предела приведет к неустойчивости роговой обманки и ее распаду.

Некоторые исследователи (например, Murphy et al., 2000) считают, что реакция опацинизации может проходить за счет окисления роговых обманок в условиях роста экструзивного купола. Пределы устойчивости роговых обманок в зависимости от f_{O_2} экспериментально изучены слабо. Были проведены единичные эксперименты (Vagclay, Carmichael, 2004), которые показали возможное расширение поля устойчивости роговых обманок до 1035°C при увеличении фугитивности кислорода до уровня $\text{NNO} + 2$ в равновесии с субщелочным андезибазальтовым расплавом, что противоречит традиционным представлениям об образовании опацитовых кайм за счет окисления расплава и требует дополнительного экспериментального изучения.

ПРИЧИНЫ РАСПАДА РОГОВОЙ ОБМАНКИ В АНДЕЗИТАХ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ

Условия для парагенезиса вкрапленников в роговообманковых андезитах вулкана Безымянный были определены как 875–925°C, 3–8 кбар и более 6 мас. % H_2O (Кадик и др., 1986). Альмеев и др. (2002) приводят диапазон температур 800–920°C и давление около 6 кбар. Содержание воды в расплавах на уровне 3–4 мас. % было также оценено по расплавленным включениям в плагиоклазах (Толстых и др., 1999).

Мы определяли условия образования вкрапленников на основе сопоставления котектических линий кислого расплава (рассчитанных по программе MELTS) с результатами плагиоклаз-роговообманкового геотермометра (Holland, Blundy, 1994). В качестве состава расплава использовался усредненный состав расплавленных включений в ортопироксенах (табл. 2). С помощью программы MELTS (Ghiorso, Sack, 1995) была рассчитана сетка котектических температур для различных давлений и содержаний воды. При заданном содержании воды и температуре, определенной по (Holland, Blundy, 1994), было оценено давление кристаллизации. Минимальное количество воды принималось равным 3 мас. % (расплав в поле устойчивости роговой обманки), увеличение заданного содержания воды на 0.5 мас. % приводило при одном и том же давлении к уменьшению котектических температур на 15–20°C и к повышению оценки давления на 1 кбар. При данной методике минимальное давление (5.1 кбар) получится при минимальном содержании воды (3 мас. % H_2O). Если принять содержания воды, определенные Толстых и др. (1999) в расплавленных включениях в плагиоклазах извержения 1956 г. (3.5–4 мас. % H_2O), то температура образования вкрапленников будет равна $890 \pm 20^\circ\text{C}$, давление 6 ± 2 кбар. Полученные оценки хорошо согласуются с литературными данными и находятся в поле устойчивости роговой обманки (Кадик и др., 1986).

Как было показано выше, в андезитах вулкана Безымянный наблюдается два типа распада роговой обманки: каймы опацинизации и области объемного распада. Двупироксен-плагиоклаз-титаномагнетитовые парагенезисы, подходящие для определения *P-T* условий, были обнаружены только в областях объемного распада роговых обманок. В каймах опацинизации клинопироксен отсутствует. Области объемного распада секут опацитовые каймы, но, с другой стороны, объемный распад роговых обманок прошел не полностью, остановившись на начальной стадии изменения фрагментов зерен. Таким образом, температуры и давления образования агрегатов объемного замещения могут быть использованы

как переходные условия от роста реакционных кайм к объемному распаду роговых обманок. Температура образования агрегатов объемного распада определялась по двуокисловым геотермометрам по методике, описанной в (Pletchov et al., 2005), и составила $1005 \pm 36^\circ\text{C}$.

Определенные нами температуры реакций разложения роговых обманок на 100°C выше, чем температуры кристаллизации парагенезиса вкрапленников. Разогрев мог быть вызван инъекцией в магматический очаг порции горячей, более основной магмы. Такое предположение подтверждается повышением магнезиальности ортопироксена и основности плагиоклаза в краевых частях вкрапленников.

Давление образования агрегатов объемного распада оценивалось по методике, предложенной в (Nimis, Ulmer, 1998). Эти авторы используют корреляцию между давлением кристаллизации и объемом ячейки клинопироксена, который они определяли в экспериментальных и природных образцах рентгеноструктурным методом. Действительно, давление является главным фактором, влияющим на объем элементарной ячейки клинопироксена, а химический состав кристаллизующегося клинопироксена является зависимым параметром и будет определяться как допустимым объемом ячейки, так и составом расплава. Практическое применение этой методики сводится к оценке структурных параметров элементарной ячейки клинопироксена по его составу, а затем – оценке давления кристаллизации по объему элементарной ячейки. Наибольшая неопределенность заключается в оценке объема элементарной ячейки, поскольку в клинопироксенах возможны разные схемы изоморфизма. П. Нимис с соавторами предложили несколько вариантов калибровок оценки структурных параметров элементарной ячейки клинопироксена для основных магматических систем. Для расчетов мы использовали калибровку, предложенную для известково-щелочных расплавов (Nimis, Ulmer, 1998), как наиболее подходящую для островодужных систем. Рассчитанные по 5 зернам клинопироксена давления лежат в узком диапазоне от 6.1 до 6.7 кбар, среднее 6.4 кбар. Нимис и Ульмер (1998) приводят погрешность для данной калибровки 1.7 кбар. Применение других предлагаемых калибровок (Nimis, Ulmer, 1998) дает давления не ниже 5 кбар. Таким образом, можно предположить, что давление 6.4 ± 1.7 кбар в магматической системе во время распада роговых обманок в пределах точности метода соответствует давлению образования парагенезиса вкрапленников, т.е. реакции разложения роговых обманок в андезитах вулкана Безымянный проходили в изобарических условиях и не связаны с декомпрессией магмы и дегазацией при давлениях менее 1 кбар, как было предложено в (Rutherford, Hill, 1993) для вулкана

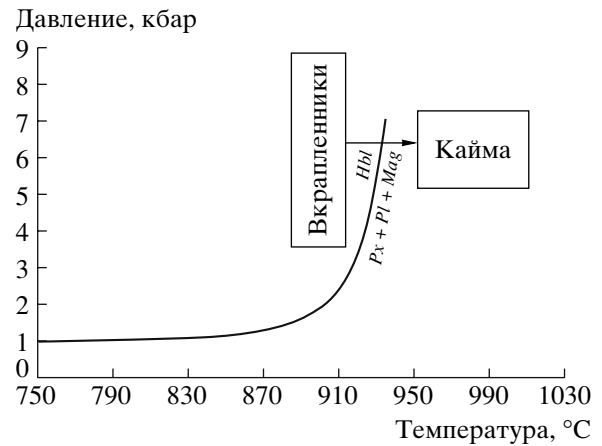


Рис. 10. Условия опацификации роговых обманок в андезитах извержения 30 марта 1956 г. вулкана Безымянный.

Прямоугольниками выделены области P - T параметров формирования вкрапленников и минералов опацифированных кайм. Сплошной линией показано поле устойчивости роговой обманки по (Rutherford, Hill, 1993).

Сент-Хеленс. Резкое окисление роговой обманки за счет контакта с атмосферным кислородом также выглядит маловероятным на глубинах более 20 км. Таким образом, главной причиной, вызвавшей распад роговых обманок в андезитах вулкана Безымянный, является изобарический нагрев магматического очага от 890 до 1005°C (рис. 10).

МОЩНОСТИ РЕАКЦИОННЫХ КАЙМ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Результаты измерений мощностей реакционных кайм на зернах различной ориентировки представлены в табл. 1. Несмотря на различия в морфологии агрегатов, образовавшихся в результате реакции разложения роговой обманки, по различным кристаллографическим направлениям, мощность кайм не зависит (в пределах ошибки измерений) от кристаллографического направления, в котором они развиваются. Выдержанность мощностей кайм для всех исследованных зерен показывает, что процесс разложения был инициирован практически одновременно и не зависел от местоположения зерна в магматическом очаге.

Оценка времени формирования реакционных кайм производилась по результатам экспериментов (Rutherford, Hill, 1993; Rutherford, Devine, 2003) (рис. 11). Метод Рутерфорда с соавторами (Rutherford, Hill, 1993; Rutherford, Devine, 2003) основан на декомпрессионных экспериментах, моделирующих подъем магмы при конкретном извержении. Как было показано выше, каймы опацификации роговых обманок вулкана Безымянный образуются при изобарических условиях. Фактором, контролирующим скорость роста кайм, является

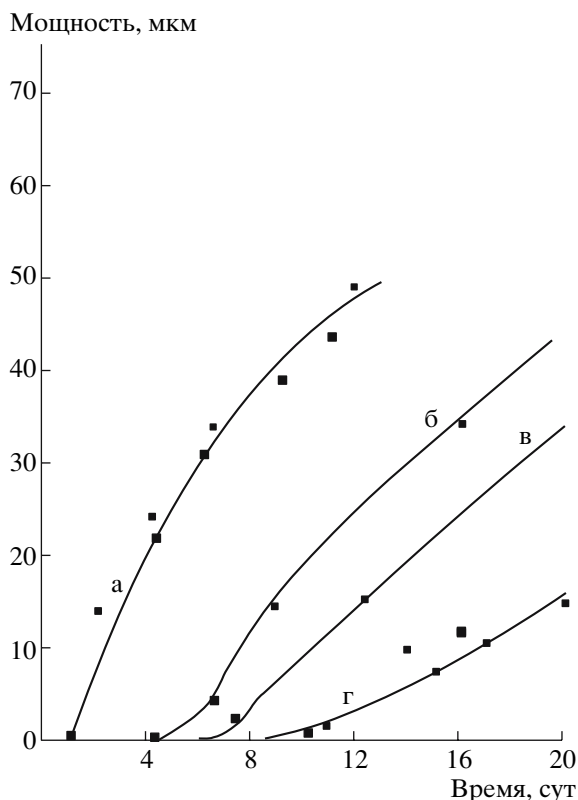


Рис. 11. Графики зависимости мощности реакционных кайм от времени их образования.

Условия проведения экспериментов: а — 900°C, 90 МПа; б — 900°C, 160–2 МПа; в — 900°C, 220–2 МПа; г — 900°C, 20 МПа. Результаты экспериментов (Rutherford, Hill, 1993; Rutherford, Devine, 2003).

скорость диффузии компонентов через реакционную кайму (Coombs, Gardner, 2004). Мы использовали уравнение, сходное с уравнением диффузии:

$$t = t_0 + X^2/D, \quad (1)$$

где t — время, сут; X — мощность каймы, мкм; t_0 — время покоя, сут; D — коэффициент. Методом наименьших квадратов по изобарическим экспериментам (Rutherford, Hill, 1993; Rutherford, Devine, 2003) были определены максимально возможные диапазоны для D (23.6–209.3 мкм²/сут, что соответствует 2.7×10^{-16} – 2.0×10^{-15} м²/с) и t_0 (2–5 сут). Расчет времени образования кайм разложения роговой обманки извержения 30 марта 1956 г. вулкана Безымянный с использованием максимально и минимально возможных значений t_0 и D приводит к оценке 4–37 сут.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ, ПРЕДШЕСТВОВАВШИХ ИЗВЕРЖЕНИЮ 30 МАРТА 1956 г.

Полученная оценка времени образования реакционных кайм вокруг роговых обманок в про-

дуктах извержения 30 марта 1956 г. позволяет по-новому рассмотреть последовательность вулканических событий, предшествовавших извержению. Инъекция горячей магмы в очаг, вызвавшая опацинизацию роговых обманок, могла произойти в феврале–марте 1956 г., тогда как первые извержения вулкана были зафиксированы 22 октября 1955 г., и серия извержений, сопровождавшихся пеплопадами, продолжалась только до конца ноября. В пеплах этих извержений среди темноцветных минералов преобладал ортопироксен (Горшков, Богоявленская, 1965), а в продуктах извержения 30 марта 1956 г. роговая обманка явно доминирует над ортопироксеном. С ноября 1955 г. по март 1956 г. в магматическом очаге должны были произойти существенные изменения, вызвавшие смену парагенезиса вкрапленников. Таким образом, вулканические события 1955 г. не связаны напрямую с процессами в очаге перед извержением 30 марта 1956 г., однако порция магмы, вызвавшая эти извержения, могла активизировать долгоживущий очаг под вулканом Безымянный и вызвать кристаллизацию вкрапленников роговой обманки. В феврале–марте 1956 г. инъекция новой порции магмы вызвала существенный прогрев магматического очага, опацинизацию роговых обманок, образование внешних зон вкрапленников ортопироксена и плагиоклаза с обратной зональностью и, в конечном итоге, катастрофическое извержение 30 марта 1956 г.

ВЫВОДЫ

1. Реакции распада роговых обманок в андезитах извержения 1956 г. вулкана Безымянный могут быть подразделены на два основных типа: каймы опацинизации и реакции объемного распада.

2. Каймы опацинизации образовались вследствие биметасоматической реакции роговой обманки и расплава с образованием зональности: роговая обманка $\rightarrow Px + Pl + Ti-Mag \rightarrow Px + Pl \rightarrow Px \rightarrow$ расплав, при которой происходил вынос CaO и привнос SiO₂ в реакционных каймах относительно составов роговых обманок. Напротив, реакции объемного распада проходили в почти изохимических условиях и согласуются с реакциями, предложенными в (Buckley et al., 2006).

3. Образование кайм опацинизации происходило в изобарических условиях. Главной причиной нестабильности роговых обманок послужил нагрев магматического очага от 890 до 1005°C вследствие инъекции порции более горячей магмы.

4. Время, прошедшее от внедрения порции горячей магмы в очаг и до начала извержения 30 марта 1956 г., не превышает 4–37 сут. Эпизод

активности вулкана Безымянный в октябре–ноябре 1955 г. не связан напрямую с катастрофическим извержением 30 марта 1956 г.

Благодарности. Авторы благодарны Л.В. Даниюшевскому (университет Тасмании) за предоставленную возможность детальных микроскопических исследований и плодотворные обсуждения и Г.И. Дороховой (МГУ) за помощь при интерпретации кристаллографических данных. Авторы благодарят А.В. Гирниса (ИГЭМ РАН) за ценные конструктивные замечания, сделанные в ходе рецензирования статьи.

Работа выполнена при поддержке программы Президента РФ “Ведущие научные школы России” (грант 5338.2006.5, рук. Л.Л. Перчук), гранта Royal Society и проекта РФФИ № 05-01-02901-ЯФ_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альмеев Р.Р., Арискин А.А., Озеров А.А., Кононкова Н.Н. Проблемы стехиометрии и термобарометрии магматических амфиболов (на примере роговых обманок из андезитов вулкана Безымянный, Восточная Камчатка) // *Геохимия*. 2002. № 8. С. 803–819.
- Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Кирьянов В.Ю., Миллер Д.С. Катастрофические извержения типа направленного взрыва на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный и Шивелуч // *Вулканология и сейсмология*. 1985. № 2. С. 3–29.
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Богоявленская Г.Е. и др. Вулкан Безымянный: история формирования и динамика активности // *Вулканология и сейсмология*. 1990. № 2. С. 3–22.
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955–1963 гг. М.: Наука, 1965. 172 с.
- Кадик А.А., Максимов А.П., Иванов А.П. Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов. М.: Наука, 1986. 158 с.
- Левинсон-Лессинг Ф.Ю. Петрография. Л., М., Новосибирск: Горгеонефтеиздат, 1933. 460 с.
- Лодочников В.Н. Главнейшие породообразующие минералы. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 248 с.
- Мальшев А.И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 261 с.
- Толстых М.Н., Наумов В.Б., Богоявленская Г.Е., Кононкова Н.Н. Андезит-дацит-риолитовые расплавы при кристаллизации вкрапленников андезитов вулкана Безымянный, Камчатка // *Геохимия*. 1999. № 1. С. 14–24.
- Треггер В.Е. Таблицы для оптического определения породообразующих минералов. М.: Госгеолтехиздат, 1958. 185 с.
- Barclay J., Carmichael I.S.E. A Hornblende basalt from Western Mexico: water-saturated phase relations constrain a pressure-temperature window of eruptibility // *J. Petrol.* 2004. V. 45. № 5. P. 485–506.
- Buckley V.J.E., Sparks R.S.J., Wood B.J. Hornblende dehydration reactions during magma ascent at Soufriere Hills Volcano, Montserrat // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2006. V. 151. № 2. P. 121–140.
- Coombs M.L., Gardner J.E. Reaction rim growth on olivine in silicic melts: implications for magma mixing // *Amer. Mineral.* 2004. V. 89. P. 748–759.
- Garcia M.O., Jacobson S.S. Crystal clots, amphibole fractionation and the evolution of calc-alkaline magmas // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1979. V. 69. P. 319–327.
- Gill J. Orogenic andesites and plate tectonics. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 390 p.
- Ghiorso M.S., Sack R.O. Chemical mass transfer in magmatic processes. IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1995. V. 119. P. 197–212.
- Holland T.J.B., Blundy J.D. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1994. V. 116. P. 433–447.
- Kuno H. Geology of Hakone volcano and adjacent areas, Japan // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1950. V. 61. P. 957–1020.
- Kozu Sh., Yoshiki B. Die Dissoziationstemperatur von brauner Hornblende und ihre rasche Expansion bei dieser Temperatur // *Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 3*. 1927. V. 3. № 2. P. 7.
- Leake B.E., Woolley A.R., Birch W.D. et al. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names // *Can. Mineral.* 1997. V. 35. № 1. P. 219–246.
- Murphy M.D., Sparks R.S.J., Barclay J. et al. Remobilization of andesite magma by intrusion of mafic magma at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat, West Indies // *J. Petrol.* 2000. V. 41. № 1. P. 21–42.
- Nimis P., Ulmer P. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. Part 1: An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1998. V. 133. № 1–2. P. 122–135.
- Pletchov P.Yu., Zinovieva N.G., Latyshev N.P., Granovsky L.B. Evaluation of the crystallization temperatures and pressures for clinopyroxene in the parental bodies of ordinary chondrites // *Abstracts of Lunar and Planetary Science XXXVI*, 2005. Abstract № 1041.
- Rutherford M.J., Hill P.M. Magma ascent rates from amphibole breakdown: an experimental study applied to the 1980–1986 Mount St. Helens eruptions // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 19 667–19 685.
- Rutherford M.J., Devine J.D. Magmatic conditions and magma ascent as indicated by hornblende phase equilibria and reactions in the 1995–2002 Soufriere Hills magma // *J. Petrol.* 2003. V. 44. № 8. P. 1433–1454.
- Tepley F.J., Davidson J.P., Clyne M.A. Magmatic interactions as recorded in plagioclase phenocrysts of Chaos Crags, Lassen volcanic center, California // *J. Petrol.* 1999. V. 40. № 5. P. 787–806.
- Vogelsang H. Philosophie der Geologie und Mikroskopische Gesteinsstudien. Bonn: Max Cohen & Sohn, 1867. 229 p.