

Ю. М. ДУБИК, О. Н. ВОЛЫНЕЦ

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА ЭРУПТИВНОГО ПРОЦЕССА НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ПЛАГИОКЛАЗА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗВЕРЖЕНИЯ

С 1955 г. по настоящее время вулкан Безымянный находится в состоянии извержения. Новый эруптивный цикл характеризуется неравномерным по времени уровнем активности: вслед за пароксизмом на фоне непрерывного экструзивного процесса происходили отдельные взрывные извержения. Ювенильный материал поступал на поверхность в форме блоков экструзивного купола, вулканических пеплов и отложений пирокластических потоков и раскаленных лавин. Общий объем ювенильных продуктов к 1965 г. достиг $2,5 \text{ км}^3$ (Горшков, Богоявленская, 1965). Изучение последовательно поступавших на поверхность порций расплава в ходе извержения позволяет получить глубинный разрез вулканического канала и выяснить условия кристаллизации в верхних его участках. Исходя из наиболее вероятной площади сечения вулканического канала $0,5 \text{ км}^2$, можно предположить, что перед началом извержения эта порция расплава занимала верхнюю часть магматической колонны на глубину до 5 км. В течение длительного периода покоя вулкана условия кристаллизации расплава на разных его уровнях были различными. Так, весь объем расплава (почти 2 км^3), давший в 1956—1957 гг. лавы пирокластических потоков, ювенильные пеплы и экструзивные лавы первых порций купола, находился в период длительного покоя вулкана на глубине 0—4 км; материал последующих извержений 1959—1965 гг. занимал более глубокие уровни канала, а после пароксизма извержения попал в приповерхностные его участки. Дальнейшее продвижение расплава к поверхности резко замедлилось. Таким образом, условия и длительность нахождения каждой порции расплава на определенном уровне канала должны были отразиться на петрологических особенностях последовательно извергавшихся продуктов. Действительно, по целому комплексу особенностей — минералогических, петрографических, по составу летучих компонентов — такой механизм подтверждается.

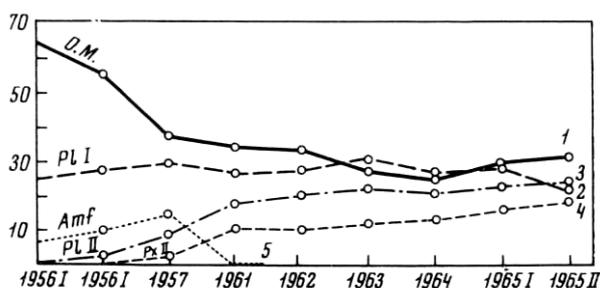


Рис. 1. Изменение минерального состава лав в процессе извержений вулкана Безымянный

- 1 — основная масса (вулканическое стекло с микролитами);
- 2 — плагиоклаз (вкрапленники I генерации);
- 3 — плагиоклаз (вкрапленники II генерации);
- 4 — пироксен (вкрапленники II генерации);
- 5 — роговая обманка

На графике (рис. 1) показан ход изменения минерального состава лав в процессе извержения. Закономерно увеличивается степень кристалличности лав. Количество стекла и микролитов резко снижается, от 65% в 1956 г. до 35—40% в последующие годы. Роговую обманку в качестве главного цветного порообразующего минерала сменяет ромбический пироксен. Наиболее характерной особенностью лав, кристаллизовавшихся в приповерхностных условиях, следует считать появление субфенокристаллов плагиоклаза и пироксена — II генерации вкрапленников (Богоявленская, Дубик, 1969). За период 8—10 лет их количество, постоянно возрастая, достигло 40% общего объема породы. В настоящей работе особое внимание уделяется изменениям, зафиксированным в составе и форме выделений плагиоклаза в лавах современного эруптивного цикла вулкана Безымянный.

МАТЕРИАЛ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДАННЫЕ ЕГО ОБРАБОТКИ

Материал отбирался непосредственно в процессе извержения из вновь выжимавшихся блоков экструзивного купола либо же из отложений раскаленных лавин и пирокластических потоков. Поэтому каждый образец представляет новую порцию ювенильного материала, а серия образцов за весь охватываемый период активности вулкана характеризует разрез лавовой колонны на глубину до 5 км.

Исследовались вкрапленники плагиоклаза I и II генераций. Основными критериями для отнесения кристалла к той или иной генерации служили размер, габитус, характер зональности, степень резорбции и др. Для вкрапленников I генерации характерны таблитчатый габитус, сложное зональное строение, средний размер 0,7 мм, обилие включений стекла в ядре и на границах зон, наличие признаков оплавления и резорбции. Вкрапленники II генерации выделялись достаточно четко по следующему набору признаков: столбчатый габитус, средний размер 0,15 мм, почти полное отсутствие включений и признаков резорбции, прямая зональность для немногочисленных вкрапленников сложного строения.

Измерение состава плагиоклаза производилось зональным методом в зоне \perp (010) и (001).

Всего было сделано более 400 замеров. При обработке замеров рассчитывались параметры распределения составов плагиоклазов (каждой генерации отдельно) для лав извержений 1956, 1957, 1961, 1963, 1965 гг. Результаты расчетов сведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, распределение составов плагиоклазов в каждом рассмотренном случае не противоречит нормальному закону¹. Средние составы плагиоклазов I и II генераций различаются существенно — на 17—19% An, причем это значение разницы выдерживается для лав всех изученных извержений. Параметры распределения составов плагиоклазов лав ранних этапов эруптивного цикла (извержения 1956 и 1957 гг.) практически не различаются (табл. 2), и эти выборки могут быть объединены в одну совокупность (что и сделано в табл. 1). В ходе дальнейших извержений и средние составы плагиоклазов, и дисперсии их закономерно изменяются.

Величина \bar{S}^2 (дисперсия составов) последовательно возрастает в ходе эруптивного цикла. Однако сравнение вычисленных дисперсий с помощью критерия Фишера (F) при 2%-ном и 10%-ном уровнях значимости показывает, что наблюдаемые отличия далеко не всегда являются значимыми:

¹ Для проверки соответствия эмпирических данных нормальному закону использовались оценки асимметрии и эксцесса (Родионов, 1964).

Таблица 1

Статистические параметры распределения составов плагиоклазов в лавах вулкана Безымянного (извержение 1956—1965 гг.)

Плагиоклазы	Год извержения	Среднее арифметическое (\bar{x}) % An	Дисперсия (\bar{s}^2)	Стандартное отклонение (\bar{s})	Число наблюдений (n)	Оценка асимметрии (Sk)	Оценка эксцесса (Ek)	Оценка отклонений от отклоненного закона	
								$\frac{Sk}{\sigma_{Sk}}$	$\frac{Ek}{\sigma_{Ek}}$
I генерации	1956 г.	69,6	6,6	2,6	38	-0,29	-1,31	0,73	1,67
	1957 г.	70,0	5,6	2,7	16	—	—	—	—
	1956—1957 г.	69,6	6,8	2,6	54	-0,007	-0,37	0,2	0,5
	1961 г.	63,7	24,9	5,0	54	0,106	-0,74	0,32	1,12
	1963 г.	66,9	26,8	5,2	60	-0,27	-1,03	0,9	1,7
	1965 г.	69,5	41,2	6,4	57	0,03	-0,22	0,09	0,33
II генерации	1956 г.	52,0	18,1	4,2	35	0,203	0,04	0,5	0,05
	1957 г.	52,0	19,1	4,4	15	—	—	—	—
	1956—1957 г.	52,0	18,0	4,2	50	0,25	-0,24	0,74	0,89
	1961 г.	45,7	18,8	4,3	53	0,97	0,1	2,9	0,15
	1963 г.	47,6	25,5	5,0	52	0,62	-0,28	1,8	0,4
	1965 г.	51,5	93,8	9,7	39	0,34	-1,37	0,9	1,8
I генерации	1965 г. Пирокластические потоки I серии	70,1	10,4	3,2	33	-0,65	-0,42	1,5	0,5
II генерации		55	70,5	8,6	29	-0,21	-1,30	0,46	1,44
I генерации	Пирокластические потоки II серии	60,6	37,3	5,6	17	0,27	-0,36	0,45	0,3
II генерации		41,2	21,2	4,6	9	—	—	—	—

Таблица 2

Значения вычисленных и табличных критериев F и t*

№ из таблицы 1	F вычисленные	F табличные		t вычисл.	t табличн.
		F 5%	F 1%		
1	2	3	4	5	6
1-2	1,18	2,22	3,14	0,55	$t_{5,0} = 1,96$
3-4	4,32	1,57	1,89	7,35	
3-5	3,94	1,54	1,84	2,85	
3-6	6,05	1,55	1,87	0,02	
4-5	1,10	1,54	1,84	3,72	
4-6	1,40	1,55	1,87	5,44	
5-6	1,53	1,53	1,84	2,41	
7-8	1,05	1,39	1,59	0,00	
9-10	1,04	1,59	1,92	7,64	
9-11	1,41	1,59	1,92	4,67	
9-12	5,21	1,64	2,01	0,24	
10-11	1,35	1,53	1,90	2,14	
10-12	4,97	1,61	1,96	3,51	
11-12	3,68	1,63	1,93	2,28	
13-15	3,46	1,97	2,62	5,98	
14-16	3,32	3,08	5,22	6,33	

* Табличные значения F и t взяты из книги Н. В. Смирнова и И. В. Дунина-Барковского (1965).

в случае I генерации существенно отличаются от других лишь дисперсии составов плагиоклазов лав извержений 1956—1957 гг., а в случае II генерации — дисперсии плагиоклазов лав извержения 1965 г.

Характер изменения величины \bar{x} (средних составов плагиоклазов по генерациям) несколько иной: высокое значение x в лавах ранних извержений (1956—1957 гг.) сменяется минимальным в лавах извержения 1961 г., а затем снова увеличивается в лавах более поздних извержений (рис. 2). При этом средние составы плагиоклазов каждой генерации в лавах извержения 1965 г. достигают таковых в лавах извержения 1956—1957 гг. и существенно от них не отличаются при 2 и 10%-ном уровнях значимости, тогда как при любых других возможных вариантах попарного сравнения средних составов плагиоклазов отличия между ними при тех же уровнях значимости являются существенными (см. табл. 2).

В лавах разных стадий одного извержения (на примере извержения 1965 г.) составы плагиоклазов также не остаются постоянными, изменяясь от более кальциевых в ранних продуктах извержения к менее кальциевым — в поздних (см. табл. 1—2).

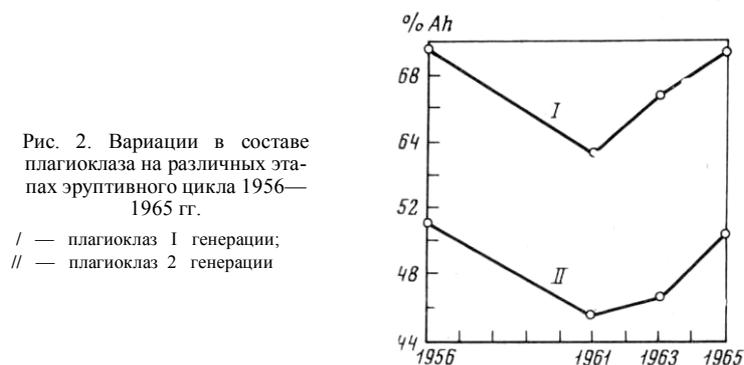


Рис. 2. Вариации в составе плагиоклаза на различных этапах эруптивного цикла 1956—1965 гг.

I — плагиоклаз I генерации;
II — плагиоклаз 2 генерации

Характер вариаций валовых модалных¹ и нормативных² составов плагиоклазов в ходе эруптивного цикла в общем аналогичен изменению составов плагиоклазов отдельных генераций (табл. 3). Однако в отличие от последних валовой модалный состав плагиоклаза извержения 1965 г. все же заметно менее кальциевый по сравнению с таковым извержения 1956—1957 гг., что связано с более широким распространением в лавах 1965 г. плагиоклаза II генерации.

Оценка среднего состава плагиоклаза в лавах, извергнутых в ходе всего эруптивного цикла с учетом объемов, занимаемых каждой порцией, показывает, что все наблюдаемые вариации составов плагиоклазов по генерациям мало сказываются на среднем составе их за все годы (см. табл. 3) в силу того, что в начальные этапы эруптивного цикла было выброшено на поверхность не менее 80% всего извергнутого за это время материала и этот материал был достаточно однородным, а также в силу

¹ Вычислены как средние взвешенные по количеству каждой генерации в лавах отдельных извержений.

² Рассчитаны по данным химических анализов, опубликованных в работах Г. С. Горшкова (1957), Г. С. Горшкова и Г. Е. Богоявленской (1965), Ю. М. Дубика и И. А. Мейнйлова (1969).

Средние составы плагиоклазов в лавах вулкана Безымянный
(извержение 1956 — 1965 гг.)

Характеристика рассчитанного среднего	Год извержения				
	1956	1957	1961	1962	1963
Средние валовые модальные составы вкрапленников плагиоклазов (% An)	63,1	66,2	56,4	—	59,0
Средние валовые нормативные составы плагиоклазов (% An)	46,8 (ср.) из 5)	—	—	42,2	44,1
Средние составы плагиоклазов за все годы извержения (% An)	I генерация	69,0	валовой состав	модальный	
	II генерация	51,2	валовой состав	нормативный	46,9

того, что уже при извержении 1965 г. состав каждой генерации плагиоклаза вновь стал соответствовать таковому на начальных этапах извержения. Валовой же состав занимает положение, промежуточное между извержениями 1956 и 1965 гг., что обусловлено постепенной раскристаллизацией поднимающихся к поверхности магматических расплавов.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Указанные вариации составов плагиоклазов в лавах исторических извержений вулкана Безымянный, как показывают результаты статистической обработки материалов (см. табл. 2), являются статистически значимыми и, следовательно, должны рассматриваться не как случайные, а как закономерные, связанные с реальными особенностями процесса кристаллизации магматических расплавов в канале вулкана.

О том, что такая кристаллизация действительно происходит, свидетельствует прежде всего возрастание степени кристалличности лав, последовательно поставлявшихся на поверхность в ходе всего эруптивного цикла 1956—1965 гг. При этом степень кристалличности лав растет за счет второго поколения вкрапленников (субфенокристаллов плагиоклаза и пироксена), тогда как количество вкрапленников плагиоклаза и пироксена I генерации в лавах изменяется мало (см. рис. 1), а вкрапленники роговой обманки практически исчезают уже в лавах извержения 1961 г., подвергаясь интенсивной гранулярной диссоциации с образованием агрегатов плагиоклаза, гиперстена и магнетита. Устойчивое содержание плагиоклазов и пироксенов I генерации в лавах всего эруптивного цикла и особенности их морфологии позволили одному из авторов несколько ранее высказать предположение об их интрателлурическом происхождении (Богоявленская, Дубик, 1969). Возможны два варианта интерпретации наблюдающегося увеличения степени кристалличности пород.

1. Статическая модель. Лавы, последовательно появившиеся на поверхность в ходе эруптивного цикла 1956—1965 гг., можно рассматривать в качестве вертикального разреза магматической колонны в канале вулкана, которая длительное время находилась в статическом положении (вулкан не действовал), вследствие чего в глубинных частях ее (судя по объемам извергнутого материала и вероятной площади вул-

канического канала — в массовом масштабе на глубине около 4 км) началась кристаллизация второго поколения вкрапленников (вкрапленники первого поколения при этом рассматриваются как интрателлурические). Проявлению интенсивной кристаллизации в верхних частях магматической колонны препятствовало накопление летучих за счет диффузии их снизу. О высоком содержании летучих свидетельствует характер ранних извержений цикла и наличие в лавах этого этапа роговой обманки.

2. Динамическая модель. Прорыв магматического расплава к поверхности, сопровождающийся выбросом в начальные этапы извержения огромного количества газонасыщенного ювенильного материала, содержавшего интрателлурические вкрапленники амфибола, а также плагиоклаза и пироксена (I генерация), привел к резкому изменению условий кристаллизации расплавов в той порции, которая осталась в канале вулкана.

Распад роговой обманки и кристаллизация вкрапленников второго поколения могут быть прямым результатом этого явления, тем более что обычно подобные петрографические признаки рассматриваются как критерии резкого изменения условий кристаллизации (Заварицкий, 1955). Конечно, какое-то количество минералов второго поколения могло кристаллизироваться до пароксизма 1956 г., однако, судя по количественно-минералогическим подсчетам (см. рис. 1), оно было крайне невелико, а размеры новообразований кристаллической фазы — малы (Горшков, Богоявленская, 1965).

Изменения структур пород и состава слагающих их минералов получают, по-видимому, наиболее убедительное толкование в случае сочетания обоих предложенных механизмов. При этом увеличение степени кристалличности пород обусловлено, по-видимому, в большей степени динамикой извержения, а на состав минералов лав оказывают влияние оба типа процессов.

Главным следствием прорыва магмы на поверхность явился непрерывный отток летучих, вызвавший резкое снижение степени газонасыщенности лав. Значение этого процесса в стадию непрерывного роста купола Нового (март 1956—начало 1957 г.) еще было невелико — в этот этап происходило быстрое выдавливание того же газонасыщенного ювенильного материала, который дал взрывные отложения. Как следствие состав минералов практически не изменился, а количество вкрапленников второго поколения увеличилось незначительно. Однако в продуктах уже следующего опробованного извержения (1961 г.) изменения весьма значительны. Именно здесь впервые наблюдаются в массовых масштабах гранулярная диссоциация роговой обманки и появление плагиоклаза и пироксена с размером 100 и более микрон (Горшков, Богоявленская, 1965). В дальнейшем, по-видимому, разгрузка газовой фазы в какой-то мере постепенно уравнивалась диффузией газов из нижних частей колонны, пока в 1965 г. не появились достаточно газонасыщенные лавы, на что указывает наличие в них среди аксессуарных минералов флюорита.

Представляется возможным связать наблюдаемые вариации составов плагиоклазов в ходе эруптивного цикла 1956—1965 гг. с изменением степени газонасыщенности магматических расплавов: чем выше газонасыщенность (т. е. давление водяного пара), тем более основные плагиоклазы кристаллизуются. Последнее можно объяснить эффектом переохлаждения расплавов. Это согласуется также с экспериментальными исследованиями по тройной системе альбит — анортит — вода (Заварицкий, Соболев, 1961), показывающей заметное снижение линий солидуса

и ликвидуса в этой системе с увеличением давления водяного пара¹. Заметно влияет на изменение составов кристаллизующихся плагиоклазов, и газовый перенос, на что указывает тот факт, что нормативные составы плагиоклазов изменяются так же, как и модальные².

Изменение составов плагиоклазов в ходе извержения 1965 г., когда в первой, более газонасыщенной (по данным феноменологических наблюдений), порции расплава плагиоклазы заметно более основные, чем во второй — менее газонасыщенной, они хорошо согласуются с предложенным механизмом.

Принятая гипотеза удовлетворительно объясняет изменение составов плагиоклазов II генерации. Однако остается неясной причина параллельного изменения составов I (интрателлурической) генерации. Реакционная переработка плагиоклазов I генерации в лавах извержений 1961 — 1965 гг., по-видимому, имеет место, о чем свидетельствует более сложная, часто повторяющаяся зональность их (Дубик, Меняйлов, 1969) по сравнению с 1956—1957 гг. (Горшков, Богоявленская, 1965), а также наблюдающееся увеличение дисперсий составов. В результате такой переработки составы плагиоклазов I генерации должны приближаться к составам кристаллизующихся плагиоклазов II генерации, однако неясно, почему разрыв в составе обеих генераций остается постоянным.

Таким образом, петрологические особенности лав, последовательно поставлявшихся на поверхность в ходе длительного эруптивного цикла, связаны с кристаллизацией магматических расплавов в приповерхностных условиях в канале действующего вулкана и во многом определяются режимом летучих в ходе подъема расплавов к поверхности, длительностью нахождения отдельных порций расплава на определенных уровнях канала и скоростью подъема их. Отмечается определенное подобие процессов кристаллизации расплавов в ходе одного извержения и всего эруптивного цикла.

ЛИТЕРАТУРА

- Богоявленская Г.Е., Дубик Ю.М. Кристаллизация андезитов в верхних частях вулканического канала. — Сб. «Вулканизм, гидротермы и глубины Земли» (материалы к III Всес. вулканол. совещ.). Петропавловск-Камчатский, 1969.
- Горшков Г.С. Извержение сопки Безымянной (предварительное сообщение). Бюлл. вулканологических станций, № 26, 1957.
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955—1963 гг. М., «Наука», 1965.
- Дубик Ю.М., Меняйлов И.А. Новый этап эруптивной деятельности вулкана Безымянного. Сб. «Вулканы и извержения». М., «Наука», 1969.
- Заварицкий А.Н. Изверженные горные породы. М., Изд-во АН СССР, 1955.
- Заварицкий А.Н., Соболев В.С. Физико-химические основы петрографии изверженных пород. М., Госгеолтехиздат, 1961.
- Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М., «Наука», 1965.
- Родионов Д.А. Функции распределения содержания элементов и минералов в изверженных горных породах. М., «Наука», 1964.

¹ Положение солидуса в обсуждаемом эксперименте не установлено, поэтому вывод о кристаллизации более основного плагиоклаза при повышении давления водяного пара из этого эксперимента не вытекает (*прим. ред.*).

² Изменение нормативного состава плагиоклазов указывает не на наличие газового переноса, а на непостоянство химического состава магмы. Все вариации составов плагиоклазовых вкрапленников связаны и повторяют это непостоянство химического состава магмы, поэтому не нуждаются в дополнительной интерпретации (*прим. ред.*).