

УДК 548.4

АНДЕЗИТ-ДАЦИТ-РИОЛИТОВЫЕ РАСПЛАВЫ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВКРАПЛЕННИКОВ АНДЕЗИТОВ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ, КАМЧАТКА

© 1999 г. М. Л. Толстых*, В. Б. Наумов*, Г. Е. Богоявленская**, Н. Н. Кононкова*

* Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
117975 Москва, ул. Косыгина, 19

** Институт вулканологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,
Поступила в редакцию 12.08.97 г.

Исследованы расплавные включения во вкрапленниках плагиоклаза из андезитов экструзивного купола Новый, вулкан Безымянный, Камчатка. Изучены образцы извержений разных лет: 1956, 1974, 1979, 1985, 1987 и 1990 гг. Используются методы гомогенизации включений и анализ стекол этих включений (более 60) с помощью электронного микронзонда. Установлено, что составы расплавов сильно варьируют по основности: содержание SiO_2 меняется от 56 до 81 мас. %, причем с ростом кремнезема уменьшаются содержания Al_2O_3 , MgO , FeO , CaO и увеличиваются Na_2O . Весьма велики колебания в концентрациях K_2O (от 1.8 до 6.6 мас. %) вне зависимости от состава расплавов. Проведено сравнение состава расплавов вулканов Безымянный и Шивелуч. Показано, что общепринятое мнение о формировании пород вулкана Безымянный только из расплава андезитового состава является ошибочным. Процессы, в результате которых сформировались эти породы, чрезвычайно сложны и требуют дальнейшего изучения.

ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Безымянный (Камчатка) – единственный в Ключевской группе вулканов, постройка которого целиком представлена породами андезитового состава [1]. При сравнительно небольших размерах конуса этот вулкан отличали мощнейшие взрывные извержения (1956, 1985 гг.), что, в первую очередь, и привлекло в нему внимание вулканологов. Наряду с динамикой процесса [2–5] изучался и состав продуктов извержений, характеризовавшихся большой однородностью (пироксеновые, пироксен-амфиболовые и амфиболовые андезиты). Предпринимались также попытки моделирования генезиса этих однотипных пород [6]. По всеобщему мнению, породы сформировались в результате кристаллизации расплава андезитового состава, хотя и предлагались различные версии его происхождения.

В настоящей работе представлены результаты изучения расплавных включений во вкрапленниках плагиоклаза из андезитов разных лет извержений вулкана Безымянного: 1956, 1974, 1979, 1985, 1987 и 1990 гг., свидетельствующие о более сложной истории формирования андезитов этого вулкана.

КРАТКИЙ МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК И ИСТОРИЯ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ

Вулкан Безымянный расположен в центральной части Ключевской группы вулканов, к юго-

западу от вулкана Ключевской, на склоне вулкана Камень. Сейчас это несколько удлиненный в широтном направлении массив с разрушенной вершиной, которую занимает огромный кратер размером 1.3×2.8 км. В кратере располагается купол Новый. На южном и юго-восточном склонах и на южном подножье вулкана находятся 16 экструзивных куполов [1].

История вулкана начинается с позднего плейстоцена, когда на месте нынешнего Безымянного были образованы экструзивные купола дацитового состава. Несколько позднее появились андезитовые, андезитобазальтовые эффузивные и экструзивные купола. Около 10–11 тыс. лет назад на отрогах вулкана Камень начал формироваться вулкан Пра-Безымянный. Большая часть этого вулкана была уничтожена во время катастрофического извержения 1956 г. Единственный фрагмент вулкана, сохранившийся в восточной части постройки, сложен преимущественно пирокластикой андезитового и андезит-базальтового составов. Собственно стратовулкан Безымянный возник ~5000 лет назад. Первые 2000 лет активной эксплозивной и эффузивной деятельности, результатом которой явились андезитобазальтовые потоки и андезитовые экструзивные купола, закончились периодом покоя, после которого активность вулкана приобрела четко выраженный пульсационный характер с чередованием периодов активизации и покоя. Выделяется 3 эруптивных цикла, каждый длительностью 400–700 лет.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) андезитов вулкана Безымянный

Компонент	1956*	1974	1979	1985	1987	1990
SiO ₂	59.54	57.54	56.42	56.54	56.58	58.36
TiO ₂	0.88	0.71	0.83	0.81	0.82	0.79
Al ₂ O ₃	17.57	16.11	17.80	18.10	18.46	18.70
Fe ₂ O ₃	3.17	3.55	3.87	4.51	2.32	2.36
FeO	3.22	4.48	4.31	3.02	4.42	4.57
MnO	0.14	0.17	0.16	0.10	0.17	0.14
MgO	2.81	3.48	3.83	3.98	3.96	3.72
CaO	6.97	8.16	7.46	7.67	7.36	6.70
Na ₂ O	3.80	3.60	3.56	3.22	3.38	3.40
K ₂ O	1.32	1.35	1.27	1.24	1.34	1.33
H ₂ O ⁻	–	0.12	0.26	0.21	0.21	0.20
H ₂ O ⁺	–	0.18	–	0.25	0.37	–
P ₂ O ₅	–	0.18	0.17	0.28	0.20	0.18
Сумма	99.82	99.61	100.06	99.93	99.59	100.45

* Номер образца соответствует году извержения вулкана.

Первый период (2400–1700 лет назад) отличала повышенная эксплозивная активность и мощные эффузивные излияния (лавы среднего и основного состава). Во время второго периода (1350–1000 лет назад) происходили катастрофические извержения с образованием пирокластических потоков, а также возникли и самые молодые экструзивные купола (все вулканы имеют средний состав). Самое сильное в истории вулкана катастрофическое извержение 1955–1956 гг. после 1000 лет покоя открыло новый период активности вулкана. Начиная с этого времени эксплозивные и эффузивные извержения происходят каждый год. Самым сильным после взрыва 1956 г. стало эксплозивное извержение 1985 г.

В настоящее время деятельность вулкана характеризуется периодической активностью, выражающейся в выжимании экструзивных блоков, излиянии пирокластических и вязких лавовых потоков.

ПЕТРОГРАФИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ ПОРОД

Нами были изучены образцы андезитов экструзивного купола Новый извержений разных лет: 1956, 1974, 1979, 1985, 1987 и 1990 гг. Их химический состав представлен в табл. 1. По петрографическим особенностям породы можно подразделить на 3 группы, хотя минералогические характеристики различных групп практически одинаковы.

К первой группе можно отнести только андезиты 1956 г. Это плотные светло-серые порфиновые породы, где вкрапленники, составляющие

~40 об. %, представлены амфиболом (~50%), плагиоклазом (~40%), пироксеном (~5%) и рудными минералами. Основная масса сложена девитрифицированным стеклом, лейстами плагиоклаза, микролитами амфибола и рудного минерала.

Вторая группа – андезиты 1974, 1979 и 1985 гг. Это темно-серые порфиновые породы средней пористости с содержанием вкрапленников 25–30 об. %. Из них плагиоклаз составляет 65%, ортопироксен – 20%, клинопироксен – 5% и рудные минералы ~10%. Обращает внимание обилие крупных резорбированных вкрапленников плагиоклаза, которые в андезитах первой группы встречаются сравнительно редко.

Третья группа – андезиты 1987 и 1990 гг. Это темно-серые породы, значительно более пористые, чем андезиты предыдущей группы. Среди вкрапленников также преобладает плагиоклаз (~70–75%), встречаются и описанные выше мегакристы; пироксены относительно редки (~10–15%), рудные минералы составляют ~15% вкрапленников. Основная масса содержит стекло, микролиты плагиоклаза, реже – пироксенов и рудного минерала.

Плагиоклаз образует выделения двух генераций. Первая генерация представлена крупными (до 4–5 мм), практически изометричными кристаллами или ядрами их, резорбированными, с большим количеством кристаллических, расплавленных, реже флюидных включений. Зональность прямая, состав *An* 80–60. Вторая генерация представлена более мелкими (до 1 мм) серийнопорфировыми удлиненными кристаллами или каймами крупных вкрапленников. Этот плагиоклаз гораздо менее насыщен включениями, зональность его

Таблица 2. Представительные анализы (мас. %) вкрапленников плагиоклаза

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	48.85	47.42	49.88	52.12	50.41	51.46	52.40	57.05	55.86	59.20
Al ₂ O ₃	31.38	32.18	30.54	28.99	31.02	30.61	29.68	26.96	26.61	24.05
CaO	16.76	16.60	15.39	14.31	13.61	13.45	12.35	9.25	10.58	8.16
Na ₂ O	2.26	2.28	2.91	3.44	3.70	3.82	4.50	6.15	5.17	4.99
K ₂ O	0.08	0.05	0.10	0.15	0.16	0.12	0.16	0.27	0.28	0.72
FeO	0.37	0.26	0.34	0.37	0.54	0.38	0.56	0.39	0.33	0.91
Сумма	99.70	98.79	99.16	99.38	99.44	99.84	99.65	100.07	98.83	98.03
<i>An</i>	80.0	79.9	74.1	69.1	66.4	65.6	59.7	44.7	52.2	45.2
<i>Ab</i>	19.5	19.8	25.3	30.1	32.7	33.7	39.4	53.8	46.2	50.0
<i>Or</i>	0.5	0.3	0.6	0.8	0.9	0.7	0.9	1.5	1.6	4.8

также прямая, состав *An* 60–40. Представительные анализы плагиоклазов отражены в табл. 2, а гистограмма составов по 92 определениям – на рис. 1.

Амфибол встречается в виде некрупных (до 0.4 мм) удлинённых выделений со сглаженными углами, практически незональных. Пироксены чаще представлены гиперстеном, реже авгитом (в среднем соотношении 3 : 1). Они образуют слабо удлинённые, часто изометричные почти незональные кристаллы, которые по составу в разных образцах варьируют очень слабо. Химические составы пироксенов и амфиболов представлены в табл. 3. Рудные минералы чрезвычайно разнообразны по составу (титаномагнетиты и магнетиты, табл. 4), в наиболее крупных вкрапленниках час-

то заметны решетки распада. Апатит встречается лишь в виде кристаллических включений в плагиоклазах и пироксенах. Его состав (в мас. %): CaO – 52.1, P₂O₅ – 41.1, FeO – 0.49, MnO – 0.09, SrO – 0.00, F – 3.77, Cl – 1.97.

ИССЛЕДОВАНИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

Во вкрапленниках андезитов вулкана Безымянный распространены включения нескольких типов: кристаллические, флюидные и расплавные. Кристаллические включения идентичны для всех минералов вкрапленников – это клинопироксен, апатит и рудные минералы. Флюидные включения, обнаруженные только в плагиоклазах первой генерации андезитов 1956 г., представляют собой темные непрозрачные пузырьки несколько вытянутой формы размером не более 5–6 мкм. В связи с малой плотностью флюида этих включений определить их состав криометрическим методом не удалось.

Расплавные включения встречаются во всех минералах андезитов. В темноцветных минералах они имеют обычно правильную овальную форму, сложены чистым стеклом без газового пузырька. Размеры весьма различны – от 7 до 80 мкм. В плагиоклазах формы включений гораздо более разнообразны. Они могут иметь либо правильные (чаще всего изометричные), либо каплевидные или изогнутые формы; при этом первые сложены чистым бесцветным прозрачным стеклом, а среди вторых встречаются также и включения бурого стекла. Размеры включений сильно варьируют от 3 до 85 мкм. Газовая фаза во включениях занимает 10–15 об. %. Включения правильной формы могут быть либо одиночными, либо образовывать цепочки, приуроченные к достаточно узким зонам роста. Изогнутые и каплевидные включения, как правило, образуют густые скопления (зоны резорбции), также приуроченные к

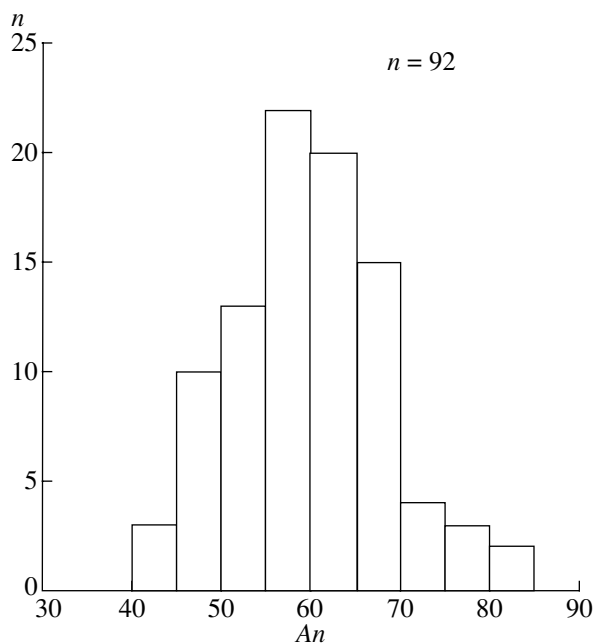


Рис. 1. Гистограмма составов плагиоклазов андезитов вулкана Безымянный.

Таблица 3. Химический состав (мас. %) пироксенов и амфиболов

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	51.82	50.03	51.12	53.91	53.02	52.74	45.03	42.85	44.32
TiO ₂	0.29	0.48	0.39	0.13	0.24	0.18	1.89	1.80	1.73
Al ₂ O ₃	1.44	3.38	2.44	0.98	0.76	1.35	10.02	12.13	10.29
FeO	9.25	10.56	10.16	17.60	20.53	19.92	13.52	13.43	13.83
MnO	0.30	0.45	0.42	0.42	0.79	0.71	0.29	0.26	0.35
MgO	15.01	12.98	13.76	25.12	21.64	23.36	13.59	12.93	13.30
CaO	19.72	20.45	20.16	1.38	1.77	1.21	11.02	11.02	10.84
Na ₂ O	0.13	0.36	0.26	–	–	–	1.72	1.95	1.72
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	–	–	–	0.45	0.46	0.42
Сумма	97.96	98.69	98.71	99.54	98.75	99.47	97.53	96.86	96.80

Примечание: 1–3 – клинопироксен (3 – среднее из 10 анализов), 4–6 – ортопироксен (6 – среднее из 32 анализов), 7–9 – амфибол (9 – среднее из 11 анализов).

Таблица 4. Химический состав (мас. %) рудных минералов

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
FeO	63.50	66.22	66.88	66.53	82.12	83.42	83.43	86.65	85.83	87.53	88.61	90.74
TiO ₂	31.86	29.93	29.16	28.24	14.08	10.48	9.61	8.47	7.21	5.19	5.06	0.96
MgO	1.63	1.65	1.31	1.65	1.65	1.88	1.84	1.69	2.03	1.77	1.51	3.91
MnO	0.38	0.30	0.28	0.25	0.52	0.57	0.54	0.68	0.50	0.54	0.46	0.89
CaO	0.02	0.04	0.06	0.23	0.17	0.19	0.29	0.07	0.03	0.04	0.01	0.00
Al ₂ O ₃	0.47	0.49	0.53	0.65	1.22	2.09	2.14	2.10	2.58	2.90	2.89	4.06
SiO ₂	0.00	0.01	0.01	0.04	0.12	0.09	0.11	0.07	0.07	0.05	0.07	0.00
Сумма	97.86	98.64	98.23	97.59	99.88	98.72	97.96	99.73	98.25	98.02	98.61	100.56

Примечание. FeO – железо общее.

определенным зонам вкрапленника (либо ядерные части вкрапленников, либо широкие кольцевые пояса несколько ближе к краю). Иногда включения правильной формы могут содержать дочерний рудный минерал.

Термометрическое исследование расплавных включений в плагиоклазах проводилось в микромуфеле с платиновым нагревателем с точностью измерений $\pm 10^\circ\text{C}$, при этом использовался метод закалки [7], что позволило наблюдать фазовые изменения даже в самых мелких включениях размером 3–5 мкм.

Составы стекол расплавных включений получены на электронном микроанализаторе “Самебах Microbeam” при следующих условиях: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток 30 нА, разверстка в растр 12×12 и 5×5 мкм при исследовании стекол, 2×2 мкм при определении кристаллических фаз. Точность определения элементов при их содержании >10 мас. % составляла ± 2 отн. %, при содержании 5–10 мас. % – ± 5 отн. %, при содержании 1–5 мас. % – ± 10 отн. %. Следует отметить, что при анализе стекол включений установлена

существенная потеря Na в случае сканирования по площади 5×5 мкм. Поэтому мы в нескольких крупных (30–50 мкм) включениях выполнили анализы стекол при различных площадях сканирования, что позволило рассчитать поправки в определении Na для небольших расплавных включений.

После нагревания вкрапленников плагиоклаза до температур 1100–1200°C и последующей быстрой закалки стекла расплавных включений анализировались на микрозонде. Результаты представлены в табл. 5 для образцов 1956 и 1974 гг. извержений, в табл. 6 для образцов 1979, 1985, 1987 и 1990 гг. извержений, а также в табл. 7. В последней таблице приведены химические составы расплавных включений, обнаруженных в одних и тех же вкрапленниках плагиоклаза.

Из таблиц следует, что стекла включений чрезвычайно разнообразны по составу. Самые основные из них отвечают андезитовым расплавам с содержаниями (в мас. %) SiO₂ от 55.9 до 64.1% и достаточно высокими содержаниями MgO (до 5.2%), CaO (до 7.1%), FeO (до 5.9%) и

Таблица 5. Химический состав (мас. %) расплавных включений в плагиоклазах андезитов 1956 и 1974 гг. извержений

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	56.30	63.84	64.66	64.80	66.39	67.30	69.98	64.06	69.25	72.48	73.04	74.09	77.84	79.36
TiO ₂	0.58	0.41	0.33	0.28	0.34	0.36	0.27	0.37	0.20	0.28	0.33	0.37	0.38	0.48
Al ₂ O ₃	17.76	16.22	19.23	16.85	19.21	17.42	17.60	17.23	17.09	12.98	13.96	13.29	13.34	10.63
FeO	4.97	3.60	1.40	2.51	1.05	1.64	1.39	3.57	2.27	1.86	3.28	1.78	1.52	1.78
MnO	0.08	0.18	0.02	0.06	0.05	0.05	0.09	0.06	0.11	0.06	0.05	0.07	0.07	0.01
MgO	1.73	2.23	0.29	1.74	1.38	0.52	0.36	0.60	0.42	0.30	0.26	0.32	0.36	0.28
CaO	6.45	4.68	5.25	4.01	3.23	4.66	3.67	4.44	3.50	2.70	2.63	2.14	2.03	1.43
Na ₂ O	4.56	4.44	5.86	3.37	4.13	4.98	3.22	4.15	3.89	4.53	3.67	2.98	2.27	1.42
K ₂ O	4.90	4.22	2.77	5.77	4.02	2.25	3.78	2.48	2.07	2.67	2.48	3.76	2.95	2.94
P ₂ O ₅	0.28	0.25	0.08	0.08	0.10	0.11	0.09	0.07	0.05	0.13	0.07	0.04	0.09	0.03
Cl	0.06	0.03	0.11	0.00	0.04	0.14	0.11	0.18	0.12	0.19	0.13	0.11	0.13	0.14
S	0.01	0.02	0.04	0.02	0.04	0.02	0.03	0.04	0.05	0.02	0.05	0.05	0.04	0.04
Сумма	97.78	100.12	100.04	99.49	99.98	99.45	100.59	97.25	99.02	98.20	99.95	99.00	101.02	98.54
T, С	1180	1180	1200	1180	1200	1180	1200	1180	1180	1200	1180	1180	1180	1180
An	70.3	58.3	46.6	65.2	46.6	58.3	46.6	64.2	71.5	71.0	71.5	71.5	64.2	64.2

Примечание: 1–7 – образец 1956 г., 8–14 – образец 1974 г.

Таблица 6. Химический состав (мас. %) расплавных включений в плагиоклазах андезитов 1979, 1985, 1987 и 1990 гг. извержений

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	69.20	71.78	75.11	77.25	79.28	70.54	66.07	72.34	74.22	66.73	66.91	66.96	68.42	75.50
TiO ₂	0.42	0.36	0.56	0.27	0.51	0.24	0.26	0.38	0.33	0.67	0.85	0.60	0.35	0.30
Al ₂ O ₃	14.11	13.48	11.02	11.02	10.22	14.64	17.49	13.91	14.15	14.20	13.94	16.20	17.34	11.34
FeO	2.46	1.09	1.52	1.62	1.86	2.08	2.59	2.65	1.56	4.30	4.40	2.92	1.83	2.69
MnO	0.06	0.04	0.04	0.03	0.05	0.10	0.01	0.07	0.09	0.14	0.11	0.12	0.03	0.10
MgO	0.40	0.17	0.19	0.23	0.05	0.32	0.36	0.71	0.35	1.20	1.06	0.85	0.39	0.66
CaO	3.24	1.42	0.85	1.20	0.69	2.70	4.72	3.18	2.41	3.30	4.16	4.00	3.75	1.40
Na ₂ O	5.15	3.29	2.94	3.30	3.08	5.18	5.23	4.05	4.12	3.62	3.72	5.59	5.48	3.75
K ₂ O	2.70	6.65	4.39	3.86	4.35	2.92	5.24	2.80	2.68	3.58	2.82	2.67	2.13	3.26
P ₂ O ₅	–	0.03	0.10	0.01	0.00	0.06	0.10	0.02	0.12	0.12	–	0.16	0.08	–
Cl	0.24	0.00	0.00	0.03	0.22	0.16	0.00	0.15	0.18	0.00	0.21	0.17	0.13	0.17
S	–	0.04	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.06	–	–	0.03	–
Сумма	97.98	98.35	96.75	98.86	100.35	98.96	102.11	100.29	100.24	97.92	98.18	100.24	99.96	99.17
T, С	1120	1200	1200	1200	20	1200	1200	1200	1200	1170	1100	1170	1200	1100
An		49.3	52.6	45.2	58.3	74.0	60.0	56.0	80.0	77.5	52.2	64.6	52.0	52.2

Примечание: 1–5 – образец 1979 г., 6 – образец 1985 г., 7–9 – образец 1987 г., 10–14 – образец 1990 г.

Таблица 7. Химический состав (мас. %) расплавных включений, обнаруженных в одних и тех же вкрапленниках плагиоклаза

Ком- понент	1956		1974								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	65.67	73.90	56.62	59.48	62.10	63.59	65.55	72.52	75.08	77.34	78.26
TiO ₂	0.23	0.44	0.22	1.14	0.79	0.46	0.29	0.65	0.58	0.51	0.53
Al ₂ O ₃	15.78	11.54	17.04	15.31	16.92	12.99	16.49	9.90	11.56	10.91	11.40
FeO	1.48	2.08	5.43	6.37	7.18	5.93	4.55	1.80	1.52	1.44	1.51
MnO	0.05	0.03	0.17	0.29	0.14	0.16	0.15	0.06	0.00	0.00	0.02
MgO	0.24	0.52	4.85	3.53	1.53	4.47	1.99	0.36	0.11	0.10	0.25
CaO	3.98	1.69	7.71	8.10	5.72	6.13	6.03	1.39	1.15	0.96	0.87
Na ₂ O	3.96	2.89	5.03	4.29	3.93	4.27	3.76	2.81	3.47	3.16	2.97
K ₂ O	5.43	2.99	2.68	1.80	1.82	2.36	1.75	4.24	4.07	3.99	4.06
P ₂ O ₅	0.12	0.06	0.08	0.17	0.19	0.17	0.09	0.12	0.04	0.04	0.03
Cl	0.13	0.10	0.03	0.00	0.18	0.04	0.09	0.07	0.03	0.07	0.04
S	0.02	0.02	0.03	0.05	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04
Сумма	97.09	96.26	99.89	100.53	100.53	100.61	100.79	93.95	97.64	98.56	99.98

Ком- понент	1979		1985		1987			
	12	13	14	15	16	17	18	19
SiO ₂	68.96	76.36	55.87	80.89	56.35	57.15	63.78	72.45
TiO ₂	0.18	0.13	0.16	0.31	0.36	0.35	0.40	0.39
Al ₂ O ₃	15.55	9.87	19.44	10.05	16.33	16.68	16.38	12.91
FeO	2.04	2.78	3.02	1.99	5.42	4.92	3.57	2.98
MnO	0.09	0.00	0.14	0.02	0.16	0.17	0.05	0.12
MgO	0.30	0.26	5.17	0.24	4.06	4.16	2.24	1.86
CaO	3.56	0.97	7.13	1.60	6.96	7.12	3.66	2.43
Na ₂ O	3.60	3.53	3.23	2.40	4.34	4.12	3.70	3.82
K ₂ O	3.64	3.15	5.73	2.44	2.69	2.70	4.02	4.03
P ₂ O ₅	–	–	–	–	0.10	0.15	0.37	0.41
Cl	0.16	0.06	0.01	0.09	0.01	0.03	0.00	0.00
S	–	–	–	–	0.01	0.01	0.02	0.02
Сумма	98.08	97.11	99.90	100.03	96.79	97.56	98.19	101.42

Al₂O₃ (до 19.4%). Среди андезитовых расплавов встречаются как высококальциевые (до 6.1%), так и низкокальциевые (1.8%) составы со всеми промежуточными разностями.

Однако большая часть включений (~80%) сложена стеклами дацитового и риолитового составов, образующими непрерывный ряд с содержаниями SiO₂ от 64 до 81 мас. %. С ростом кремнекислотности закономерно уменьшаются содержания в расплаве (рис. 2а–2д) Al₂O₃ (до 10.9%), FeO (до 1.1%), MgO (до 0.1%), CaO (до 0.7%). В то же время содержания K₂O изменяются совершенно независимо от общего состава расплава (от 1.8 до 6.6%).

Количество воды в расплаве, оцениваемое как разность между 100% и суммой количеств всех

компонентов, полученных при анализе стекла на микронзонде, невелико – менее 1–2 мас. % для большинства анализов и до 3–4 мас. % для образца 1956 г. извержения (табл. 7). Содержание Cl в среднем составляет 0.09 мас. %, а серы – 0.03 мас. %.

Необходимо отметить, что включения самых разных составов, в том числе и достаточно контрастных, нередко встречаются в одном вкрапленнике (табл. 7), чаще всего среди включений неправильной формы. Это, безусловно, свидетельствует об очень сложной истории кристаллизации этих вкрапленников и, соответственно, – расплавов, приведших к формированию андезитов вулкана Безымянный.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Итак, в результате проведенных исследований установлено, что андезиты вулкана Безымянный кристаллизовались из магматических расплавов

не только среднего, но и кислого состава. Такое же соотношение составов пород и расплавных включений отмечено для образцов извержения 1980–1982 гг. вулкана Сент-Хеленс (США): содержание

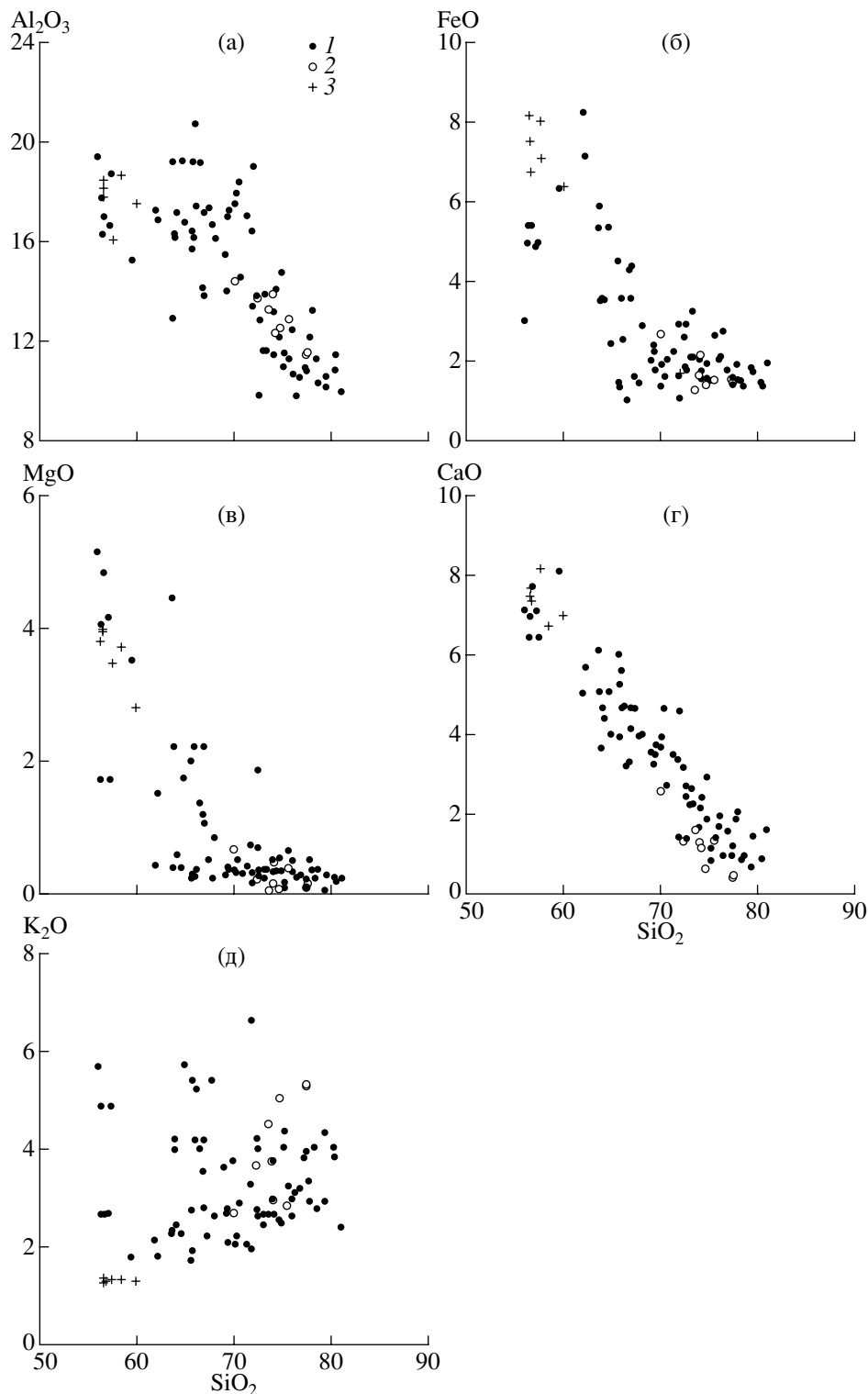


Рис. 2. Графики зависимостей содержания Al_2O_3 (а), FeO (б), MgO (в), CaO (г) и K_2O (д) от содержания SiO_2 в расплавных включениях (1), стекле основной массы андезитов (2) и породах (3).

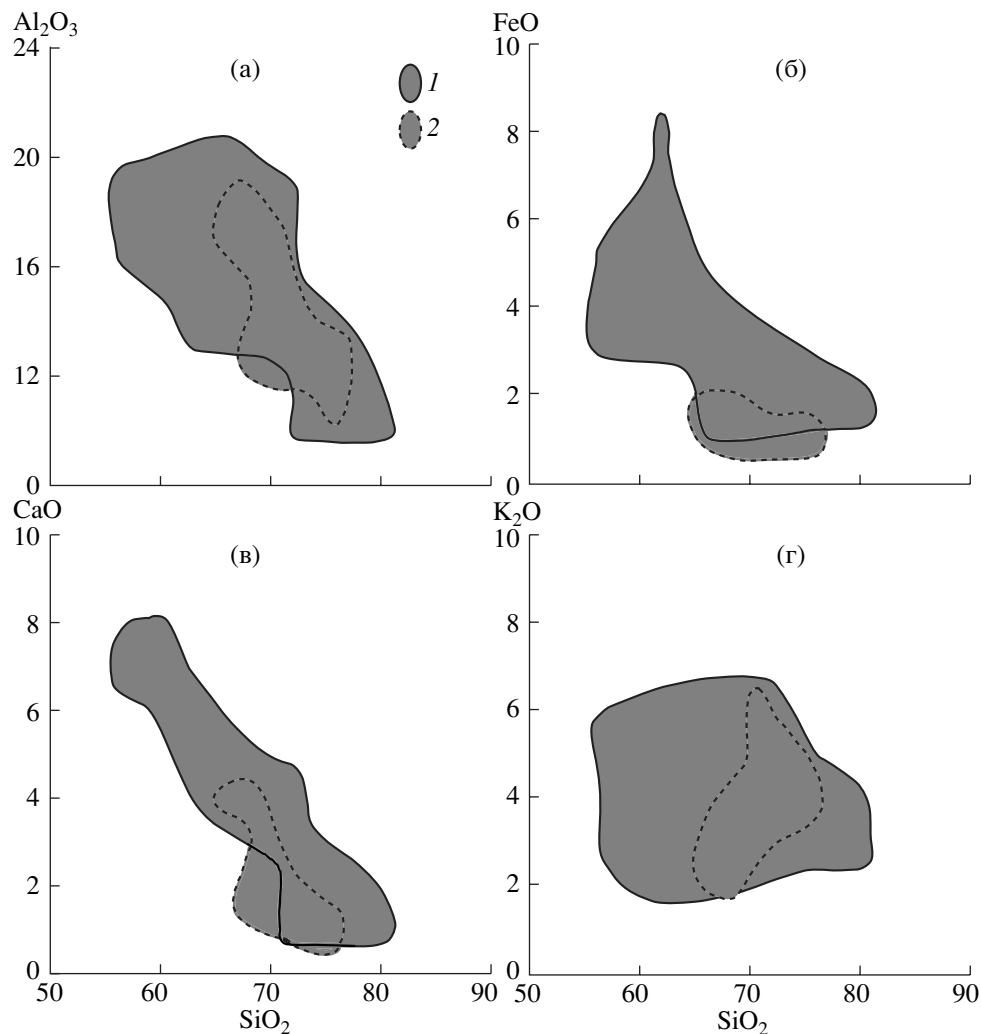


Рис. 3. Сравнение составов расплавных включений в плагиоклазах андезитов вулканов Безымянного (1) и Шивелуча (2) (а–г).

SiO_2 в породах (20 образцов) изменяется от 60.5 до 64.3 мас. % при среднем значении 63.0 мас. %, а в расплавных включениях (более 300 определений) – от 67.9 до 76.6 мас. % [8]. Кислый состав расплавов подтверждается и анализами стекла основной массы пород, в которых содержание SiO_2 еще более высокое – от 70.8 до 79.6 мас. %. Составы пород и расплавных включений существенно отличаются и по другим петрогенным элементам. Прямое определение воды в расплавных включениях с помощью ионного микрозонда дало высокое ее содержание – от 3 до 7 мас. %. Аналогичные результаты по расплавным включениям в образцах этого извержения вулкана Сент-Хеленс получены позднее и другими исследователями [9].

Такое соотношение пород и расплавов весьма обычно для андезитового вулканизма [8–11]. В работе [10] после обобщения всего имеющегося в литературе материала (85 анализов андезитов и

317 анализов расплавных включений в минералах этих пород) было показано, что подавляющее число андезитов образовалось при кристаллизации дацитовых и риолитовых магматических расплавов. Однако породы Безымянного отличается определенная петрохимическая специфика: во-первых, здесь достаточно широко представлены расплавы среднего состава, а также и все переходные различия от андезитов до риолитов, причем с понижением основности расплавов закономерно уменьшается содержание Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO и растет содержание Na_2O . Во-вторых, чрезвычайно сильно и независимо от остальных компонентов варьирует содержание K_2O (от 1.8 до 6.6 мас. %). И высоко-, и низкокальциевые различия встречаются как в кислых, так и в средних по составу расплавах. В-третьих, расплавы вулкана Безымянного содержат относительно мало воды.

Для других проявлений андезитового вулканизма (например, андезиты вулкана Шивелуч,

Камчатка; Штъявницкая кальдера, Центральная Словакия) характерен гораздо меньший разброс составов включений, сосредоточенных исключительно в кислой области (рис. 3). В то же время для стекол этих включений характерно высокое содержание воды: до 5–6 мас. % в расплавах Шивелуча [12] и до 7–13 мас. % в расплавах Штъявницкой кальдеры [13].

Таким образом, Безымянный, возможно, представляет несколько иной тип андезитового магматизма. Делать какие-либо окончательные выводы относительно процессов, в результате которых сформировались породы данного вулкана, преждевременно. Однако с уверенностью можно утверждать, что эти породы не являются результатом равновесной кристаллизации только андезитовых расплавов, как полагали некоторые исследователи [6]. В качестве альтернативы могут быть предложены процессы кристаллизационной дифференциации, смешения магм и взаимодействия расплава с коровым материалом или водно-щелочным флюидом [14]. Рассмотрим вероятность участия этих процессов в формировании пород вулкана Безымянный.

Полученные составы расплавов и пород на вариационных диаграммах ложатся на четкие тренды дифференциации (рис. 2). Однако не было отмечено какой-либо корреляции между составом расплава включений и основностью минерала-хозяина. Включения различных составов, в том числе низко- и высококальциевых, располагаются часто в одном вкрапленнике, чрезвычайно близко друг от друга. Все это опровергает возможность образования этих расплавов последовательно, исключительно в процессе кристаллизационной дифференциации андезитового расплава.

Наличие смешения среди породообразующих процессов, как правило, четко идентифицируется по характерным петрографическим особенностям пород [15, 16]. Однако не было обнаружено ни текстурных неоднородностей в основной массе пород, ни контрастных парагенезисов и ксенокристов, хотя некоторые особенности морфологии плагиоклаза (зоны резорбции – свидетельства прерывистой, неравновесной кристаллизации) могут служить косвенным доказательством смешения расплавов. Но, в любом случае, вряд ли можно полагать смешение главным процессом в формировании этих андезитов.

Контаминация в том или ином виде, скорее всего, присутствовала; по крайней мере, таким образом можно объяснить появление высококальциевых расплавов (иногда калий считают индикатором ассимиляции корового материала [14]), хотя в некоторых работах чрезвычайно высокое содержание этого элемента отмечается и в первичных, примитивных расплавах (пикрито-базальтовые породы хребта Тумрок, Восточная Камчатка [17]). Счи-

тать образование высококальциевых разностей результатом взаимодействия расплава и водно-щелочного флюида не позволяет пока отсутствие точных измерений концентрации воды. На основании имеющихся данных никакой корреляции между содержаниями воды и калия в расплавах выявить нельзя.

Скорее всего, при формировании пород вулкана Безымянный имели место все эти процессы в тех или иных соотношениях. В любом случае, для того, чтобы иметь возможность делать генетические выводы, необходимы более глубокие, комплексные исследования объекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 95-05-14853, 96-05-66211 и 97-05-64541), проекта 96-15-98442 (Научные школы) и Министерства науки РФ (проект “Магматизм Курило-Камчатской зоны”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 168–198.
2. Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения. М.: Наука, 1965. 171 с.
3. Богоявленская Г.Е., Иванов Б.В., Кирсанов И.Т., Максимов А.П. Зависимость кристаллизации лав вулкана Безымянного от механизма извержения // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток. 1976. С. 118–126.
4. Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т. Двадцать пять лет вулканической активности вулкана Безымянный // Вулканология и сейсмология. 1981. № 2. С. 3–13.
5. Брайцева О.А., Кирьянов Б.Ю. О прошлой активности вулкана Безымянного по данным тефрохронологических исследований // Вулканология и сейсмология. 1982. № 6. С. 44–55.
6. Кадик А.А., Максимов А.П., Иванов Б.В. Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов (на примере Ключевской группы вулканов). М.: Наука, 1980. 157 с.
7. Наумов В.Б. Термометрическое исследование включений расплава во вкрапленниках кварца кварцевых порфиров // Геохимия. 1969. № 4. С. 494–498.
8. Melson W.G. Monitoring the 1980–1982 eruptions of Mount St. Helens: compositions and abundances of glass // Sciences. 1983. V. 221. № 4618. P. 1387–1391.
9. Rutherford M.J., Sigurdsson H., Carey S., Davis A. The May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens. 1. Melt composition and experimental phase equilibria // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. № B4. P. 2929–2947.
10. Наумов В.Б., Коваленко В.И., Бабанский А.Д., Толстых М.Л. Генезис андезитов по данным изучения расплавных включений в минералах // Петрология. 1997. Т. 5. № 6. С. 654–665.

11. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Кононкова Н.Н. Три типа расплавов, участвовавших в формировании андезитобазальтов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) // *Геохимия*. 1997. № 4. С. 391–397.
12. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Бабанский А.Д. и др. Состав расплава и условия кристаллизации андезитов вулкана Шивелуч (Камчатка) по данным изучения включений в минералах // *Доклады РАН*. 1998. Т. 359. № 5. С. 676–679.
13. Наумов В.Б., Толстых М.Л., Коваленкер В.А., Кононкова Н.Н. Сверхдавление флюидов при образовании андезитов Центральной Словакии по данным изучения включений в минералах // *Петрология*. 1996. Т. 4. № 3. С. 283–294.
14. Фролова Т.И., Перчук Л.Л., Бурикова И.А. Магматизм и преобразование земной коры активных окраин. М.: Недра, 1989. 260 с.
15. Биндеман И.Н. О возможных механизмах смешения магм // *Геохимия*. 1991. № 2. С. 291–296.
16. Биндеман И.Н. Периодическое смешение магм с кумулятами как механизм циклической эволюции вулкана Баранского (о. Итуруп, Курильские острова) // *Геохимия*. 1997. № 4. С. 380–390.
17. Каменецкий В.С., Портнягин М.В., Соболев А.В., Данюшевский Л.В. Условия кристаллизации и состав расплава пикрит-базальтовой толщи хребта Тумрок (Восточная Камчатка) // *Геохимия*. 1992. № 8. С. 1133–1148.