

ПЕТРОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ

УДК. 548.4 (571.66)

СОСТАВ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД ВУЛКАНА ДИКИЙ ГРЕБЕНЬ (КАМЧАТКА)

Л. Н. Хетчиков, В. А. Пахомова, В. К. Попов, А.А. Чащин, В.И. Сапин

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г.Владивосток

Приведены сведения об особенностях пород вулкана Дикий Гребень (юг Камчатки) и характеристика включений минералообразующих сред в их минералах. Микрорентгеноспектральным анализом установлены высокие содержания SiO_2 (более 71 мас. %) в силикатных стеклах всех изученных включений, особенности концентрации в них оксидов других элементов. Показано, что во включениях, скорее всего, законсервированы остаточные расплавы. Для всех пород, независимо от их основности, стекло основной массы также характеризуется высоким содержанием SiO_2 (нередко 78 мас. %) и по концентрации других компонентов близко к стеклу расплавных включений. Валовый состав пород, таким образом, определяется составом минералов-вкрапленников. Методом гомогенизации расплавных включений изучена эволюция температурного режима в процессе кристаллизации минералов-вкрапленников в магматическом очаге.

Ключевые слова: Камчатка, вулканические породы, расплавные включения.

ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Дикий Гребень, расположенный на юге Камчатки на западном берегу Курильского озера, представляет собой сложную по составу и строению лаво-экструзивную постройку, занимающую площадь около 40 км², с общим объемом изверженного материала 15 км³. Активная деятельность вулкана продолжалась довольно длительное время и началась около 8000 лет тому назад [5]. В первый, довольно продолжительный период, 8000-1500 лет, продуктами вулканической деятельности были преимущественно лавовые потоки и экструзии риодацитов, составляющие всего около 1/3 общего объема пород. Основной же объем вулканитов, представленных, главным образом, дацитами, меньше - андезитами и риодацитами, образован после 1500 лет.

Характерной особенностью всех пород вулкана - риодацитов, дацитов и андезитов - является наличие в них мелких обособлений (включений - по данным других авторов) пород, отвечающих по составу андезитам (в риодацитах и дацитах) или андезибазальтам (в дацитах и андезитах). Размеры обособлений колеблются в широких пределах от нескольких мм до 40-50 см. По форме преобладают ок-

руглые, но встречаются и угловатые обособления. Краевые части обособлений часто имеют афировую или стекловатую закалочную оторочку, переходящую в хорошо раскристаллизованную центральную часть.

Первые сведения о строении вулкана появились в работах Б.И. Пийпа [6] и А.Е. Святловского [8]. Позднее Н.В. Огородов с соавторами [5] провели геолого-петрографическое изучение вулкана и предложили модель образования вулканитов за счет смешения базальтовых и риодацитовых расплавов. В последние годы механизм смешения этих расплавов в магматическом очаге вулкана Дикий Гребень более подробно рассмотрен И.Н. Биндеманом [1, 2, 12]. Участие основной магмы в формировании пород вулкана обосновывалось только геолого-петрографическими материалами, расплавные включения в минералах не изучались, хотя по данным [3, 7, 9, 10] их изучение дает возможность оценить состав исходных расплавов. Нами кроме дополнительных петрографических исследований проведено изучение расплавных включений в минералах риодацитов, дацитов, андезитов и андезибазальтов, образцы кото-

рых собраны при полевых работах в пределах вулканической постройки.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные типы пород детально изучены в шлифах под микроскопом, около 40 проб подвергнуто химическому анализу, а в 15 тонких полированных пластинках с помощью микрозонда определен состав стекла основной массы пород. В плагиоклазе, гиперстене и кварце пород газохроматографическим анализом, путем извлечения газов в два этапа - при 600 и 1200°C, изучен состав летучих компонентов. После таких исследований отбирались образцы для изучения включений. Сначала в полированных пластинках под микроскопом при увеличениях от 200 до 1000 раз определялись формы, размеры, фазовый состав включения. При этом особенно тщательно оценивалось, относятся ли они к одному семейству, являются ли первичными, не связанными с процессами изменения минералов и пород. Именно первичные включения необходимых размеров и отбирались для приготовления препаратов на микрозондовый анализ. Последний выполнялся на рентгеновском микроанализаторе JXA-5A при ускоряющем напряжении 20 kv и токе зонда 40 мкА. Анализ минералов осуществлялся при фокусировке зонда около 2 мкм, а анализ силикатного стекла включений и основной массы - при расфокусированном до 20-30 мкм зонде. В качестве эталонов использовались химически проанализированные однородные по составу минералы.

КРАТКАЯ ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД ВУЛКАНА

Геологическое строение, история развития и вещественный состав пород вулкана Дикий Гребень достаточно подробно изложены в работах [1, 2, 7], поэтому отметим только некоторые особенности петрографического состава слагающих его вулкаников. Вулканическая постройка Дикого Гребня представляет собой нагромождение экструзий и лавовых потоков. Как уже отмечалось, возраст самых древних из них датируется 8000 лет [5], а формирование наиболее сохранившегося купола горы Неприятной завершилось в историческое время. Н.В. Огородов с соавторами [5] различают два комплекса вулканогенных образований: дозрывные и постзрывные. В каждом из них они выделяют две возрастные подгруппы, отражающие антидромную последовательность состава пород от риолитов и риодацитов до андезидацитов и андезитов. Все исследователи отмечают, что особенностью вулканогенных образований является наличие в них меланократовых обособлений, относимых к типу гомеогенных или каркасных включений, химический состав которых отвечает андезитам или базальтам [5]. В последнее время

получены интересные материалы по составу силикатных стекол основной массы пород вулкана. В [12] приведены результаты анализов этих стекол в риодацитах, дацитах, андезитах и андезибазальтах. По результатам анализов сделан вывод, что стекла основной массы всех пород соответствуют по составу высококремнистому калиевому риолиту, имеющему природу остаточного расплава.

Приведем краткую характеристику петрографических особенностей пород вулкана, основанную на изучении образцов, в минералах которых исследовались расплавные включения.

Риодациты представляют собой стекловатую породу с многочисленными (до 25% объема) вкрапленниками кислого плагиоклаза (An 20-24), кварца, роговой обманки, орто-, редко клинопироксена, магнетита и ильменита. В единичных случаях отмечены оливин и биотит. Размеры вкрапленников достигают 5-7 мм. Зерна кварца часто округлые с бухтообразными заливами основной массы. В стекловатой основной массе содержатся немногочисленные лейсты плагиоклаза, амфибола, ортопироксена и рудных минералов. Иногда в стекле наблюдаются сферолиты кварц-плагиоклазового состава. Некоторые экструзивные тела риодацитов содержат обособления андезитового состава, отличающиеся более темной окраской и нередко мелкозернистым строением основной массы. Меланократовые обособления имеют округлую форму, их размеры колеблются от десятых долей см до 40 см, преимущественно 10-20 см. Породы отличаются порфиловым сложением и содержат редкие вкрапленники плагиоклаза, кварца и роговой обманки. Кристаллы кварца бывают окружены реакционной клинопироксеновой оторочкой, а кристаллы резорбированного кислого плагиоклаза имеют внешнюю узкую кайму плагиоклаза более основного состава. Стекло основной массы пород насыщено лейстами плагиоклаза, клино- и ортопироксена, иголочками роговой обманки, выделениями титаномагнетита и ильменита. Иногда в риодацитах встречаются обособления в виде сростков кристаллов плагиоклаза, роговой обманки и рудных минералов, которые можно отнести к сегрегационным образованиям.

Дациты и андезиты имеют много общего между собой по структурным особенностям и по видовому составу минералов. Макроскопически это породы темно-серой окраски со стекловатой основной массой и порфиловыми вкрапленниками таблитчатых кристаллов плагиоклаза (An 25-35), кварца, роговой обманки, орто- и клинопироксена, оливина, ильменита и титаномагнетита. Кристаллы оливина, нередко зональные, более характерны для андезитов. По наблюдениям Н.В. Огородова и др. [5] общее содержание вкрапленников в андезитах заметно мень-

шее, чем в дацитах. Главный минерал вкрапленников - плагиоклаз - отличается зональным строением, причем зональность бывает прямой, обратной и сложной. В ядрах плагиоклазов с прямой зональностью обычно содержатся микровыделения силикатного стекла и клинопироксена, содержащего, в свою очередь, микроскопления рудного вещества. Зерна кварца обычно округлые, с заливами стекловатой основной массы по периферии, реже угловатые, разбитые многочисленными трещинками. В андезите они бывают окружены шестоватыми кристалликами клинопироксена. Отмечаются сростки кристаллов кварца с плагиоклазом, роговой обманкой и ортопироксеном. Оливин образует округлые, иногда футляровидные небольшие (до 0.5 мм) кристаллы с хорошо выраженной огранкой.

Основная масса андезитов и дацитов содержит местами многочисленные лейсты минералов того же видового состава, что и вкрапленники. Иногда встречаются участки с раскристаллизованной основ-

ной массой, сложенной лейстовидными кристаллами плагиоклаза, пироксенов, оливина, среди которых выделяются более крупные вкрапленники плагиоклаза. Границы таких участков с силикатным стеклом основной массы довольно резкие, вдоль контакта отмечаются скопления газовых пузырьков.

Меланократовые обособления встречаются в андезитах и дацитах повсеместно, размеры их колеблются в тех же пределах, что и в риодацитах. Общими для меланократовых обособлений и вмещающих их вулканитов являются порфировидная структура и набор минералов-вкрапленников, среди которых преобладает плагиоклаз. Однако по составу одноименных минералов эти образования существенно различаются между собой. Особенно четко это заметно по составу плагиоклаза. Например, в изученных нами дацитах он представлен олигоклазом (An_{25}), а в содержащихся в них обособлениях андезибазальтов - андезином (An_{45}) или даже лабрадором (табл. 1). Плагиоклазы вкрапленников обособлений

Таблица 1. Составы минералов и силикатных стекол содержащихся в них расплавных включений.

№ п/п	Минералы, стекло включений	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1	Плагиоклаз, вкрапленник в риодацитах	60.70	0.01	24.40	0.26	0.00	7.08	0.00	60.93	0.58	100.05
	Силикатное стекло включения	72.07	0.21	11.00	0.79	0.00	0.65	0.08	0.38	3.96	89.94
2	То же	60.15	0.01	25.06	0.40	0.00	7.44	0.00	7.13	0.58	100.77
		71.82	0.01	11.65	1.25	0.00	0.75	0.11	1.95	4.58	92.11
3	Кварц, вкрапленник риодацитов										
	Силикатное стекло включения	71.75	0.14	11.50	0.83	0.07	0.79	0.09	0.49	4.51	92.99
4	То же	72.01	0.10	11.75	0.79	0.02	0.83	0.11	0.62	4.35	94.77
5	Роговая обманка, вкрапленник риодацитов	49.95	1.08	7.18	12.51	0.49	10.99	14.63	1.32	0.33	98.49
	Силикатное стекло включения	72.37	0.15	13.10	0.87	0.04	4.15	0.10	1.54	4.93	97.25
6	Гиперстен, вкрапленник андезитов меланократового обособления в риодацитах	52.76	0.08	0.39	21.97	1.82	0.73	19.27	0.00	0.00	97.03
	Силикатное стекло включения	75.46	0.17	11.55	0.89	0.00	1.10	0.07	0.54	3.33	93.17
7	То же	53.75	0.11	0.29	21.88	1.51	0.63	22.64	0.00	0.00	100.82
		75.07	0.21	11.09	0.79	0.00	0.65	0.08	0.38	3.98	92.24
8	Плагиоклаз, вкрапленник андезитов меланократового обособления в риодацитах	57.99	0.1	25.82	0.17	0.00	7.71	0.00	6.94	0.62	99.27
	Силикатное стекло включения	75.98	0.50	11.57	0.93	0.03	0.93	0.09	1.75	5.21	96.26
	То же в Pl ₃₀	74.55	0.01	12.71	1.59	0.00	0.94	0.20	2.82	4.70	97.54
	То же	75.38	0.01	11.55	1.01	0.00	0.54	0.14	0.87	4.58	94.09
9	Плагиоклаз, вкрапленник дацитов	59.54	0.01	24.81	0.22	0.00	6.95	0.00	7.07	0.80	99.40
	Силикатное стекло включения	72.62	0.01	12.14	1.25	0.00	0.86	0.11	0.96	4.14	92.59
10	Плагиоклаз, вкрапленник андезибазальтов меланократового обособления в дацитах	59.72	0.10	24.22	0.12	0.12	8.08	0.00	6.57	0.64	99.57
	Силикатное стекло включения	75.55	0.34	1.39	4.96	0.06	0.83	0.16	0.45	4.17	99.07
	То же в Pl ₄₅	78.63	0.30	11.52	1.25	0.00	0.54	0.11	0.93	5.00	98.37
	То же	77.08	0.31	12.09	2.02	0.08	0.74	0.21	0.59	4.94	98.05
	То же в Pl ₄₀	78.08	0.23	11.88	1.18	0.07	0.59	0.20	1.01	4.80	98.01
11	Плагиоклаз, вкрапленник базальтов вулкана Горелый	54.23	0.9	26.87	0.68	0.00	10.34	0.09	4.71	0.59	
	Силикатное стекло включения	53.30	1.56	13.26	9.76	0.27	4.26	2.41	0.88	3.22	88.90
12	Силикатное стекло включения в плагиоклазе андезитов вулкана Горелый										
		59.57	1.51	9.51	13.34	0.00	5.79	4.31	1.20	4.04	99.29

отличаются от вмещающих пород по особенностям зональности, аналогичные отличия характерны также для клино- и ортопироксенов [12].

Меланократовые обособления содержат большее количество темноцветных и рудных минералов по сравнению с вмещающими их породами. Нужно отметить также наблюдаемое иногда непостоянство состава близко расположенных меланократовых обособлений в пределах одного блока вмещающих пород.

ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ ПОРОД

Микровключения обнаружены в основных породообразующих минералах риодацитов, дацитов и содержащихся в них обособлений андезитов и андезибазальтов. Особенно они обильны и разнообразны по составу в плагиоклазах, хотя нередки и в кварце, пироксене и роговой обманке. Вкрапленники плагиоклаза бывают также насыщены микровключениями минералов-спутников - апатита, пироксена, роговой обманки и рудного минерала. Иногда микрокристаллики окружены узкими каймами силикатного стекла, содержащего один или несколько газовых пузырьков. В других случаях силикатной каймы вокруг кристалликов не обнаруживается, а газовый пузырек располагается на боковой грани минерала, как бы прилегая к ней. Обычны сростки нескольких кристалликов одного или разных минералов. Встречаются своеобразные округлые включения, содержащие несколько прозрачных микрокристалликов, среди которых диагностированы апатит (наиболее распространенный), пироксен, роговая обманка и рудный минерал, один или несколько газовых пузырьков, занимающих от 5 до 50% объема вакуолей, и небольшое количество силикатного стекла в промежутках между кристалликами. Отмечается, что выделения рудного минерала приурочены или к стенкам вакуоли, или располагаются вблизи газовых пузырьков. Весьма распространенными в плагиоклазе являются двухфазовые расплавные включения, состоящие из газового пузырька и силикатного стекла. Эти включения распределены очень неравномерно, в отдельных зернах плагиоклаза они многочисленны, в рядом расположенных - единичны или не обнаруживаются. Включения весьма разнообразны по форме (округлые, удлиненно-призматические, таблитчатые) и размерам (от нескольких до сотен мкм). Чаще всего включения располагаются вдоль зон роста кристаллов, причем к одним зонам могут быть приурочены крупные включения, а к другим - более мелкие.

В некоторых образцах включения не обнаруживаются в центральных и периферических частях зерен плагиоклаза, а приурочены к промежуточным зонам. Ограничения включений обычно четкие и

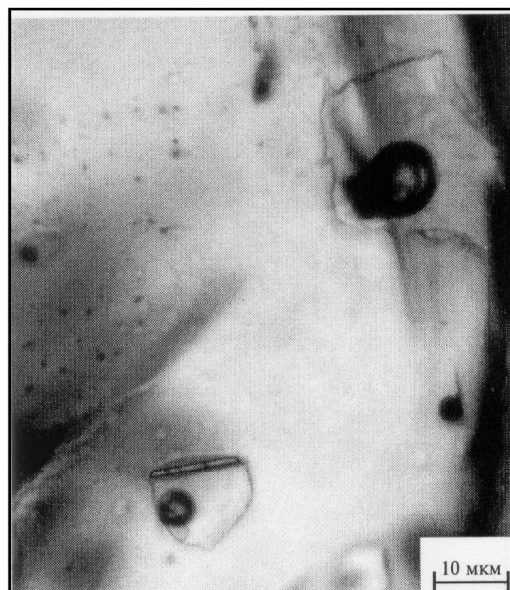


Рис. 1. Расплавные включения в плагиоклазе.

ровные (рис. 1), но в плагиоклазе одного из обособлений андезибазальтов в дацитах встречены округлые включения с зубчатыми краями, напоминающими микрошестеренку с равномерно распределенными зубцами. Стекло основной массы включений иногда раскристаллизовано.

Помимо двухфазовых включений встречаются однофазовые, представленные только силикатным стеклом, а также многофазовые, в составе которых, кроме одного или нескольких газовых пузырьков и силикатного стекла, наблюдаются непрозрачное рудное вещество, кристаллики апатита, более редкие амфибол и пироксен.

Газовые пузырьки в расплавных включениях занимают от 15 до 25% и более объема вакуолей. Наиболее часто встречаются включения с объемом газового пузырька около 20%. Газовый пузырек, как правило, имеет зональное строение: по периферии он окружен узкой темной каймой, визуалью напоминающей кайму жидкой углекислоты в трехфазовых включениях в минералах других магматических пород. Определение состава газов криометрическим методом не увенчалось успехом - при охлаждении их до 110°C критических явлений не наблюдалось. Сделано предположение о низкой плотности содержащихся в пузырьках газов. Газохроматографическим анализом установлено, что в составе флюидов в плагиоклазе преобладает вода при небольшом содержании углекислоты, заметный объем занимает водород и окись углерода при малом количестве углеводородов. Азот в составе флюидов не обнаружен.

Расплавные включения встречаются и в кристалликах апатита, содержащихся в плагиоклазе и гиперстене. Они двухфазовые, состоят из нераскри-



Рис. 2. Расплавное включение в апатите (апатит-минеральное включение в пироксене).

таллизованного силикатного стекла и газового пузырька, занимающего до 15% объема вакуолей. Включения обычно вытянутые по длинной оси кристалликов (рис. 2). В зависимости от длины последних их размеры варьируют от нескольких до 20-30 мкм.

Расплавные включения в зернах пироксена обычно одиночные и лишь иногда образуют небольшие семейства. Включения чаще неправильной формы, иногда прямоугольные со сглаженными углами и состоят из газового пузырька (около 10% объема) и прозрачного силикатного стекла. Обычно также третья - рудная - фаза, занимающая иногда значительный объем вакуоли. Размеры включений от десятков мкм, редко до 0.1 мм.

Для кварца характерны негативные расплавные включения, представленные нераскristализованным силикатным стеклом с газовым пузырьком, занимающим до 20-25% объема вакуолей (рис. 3).

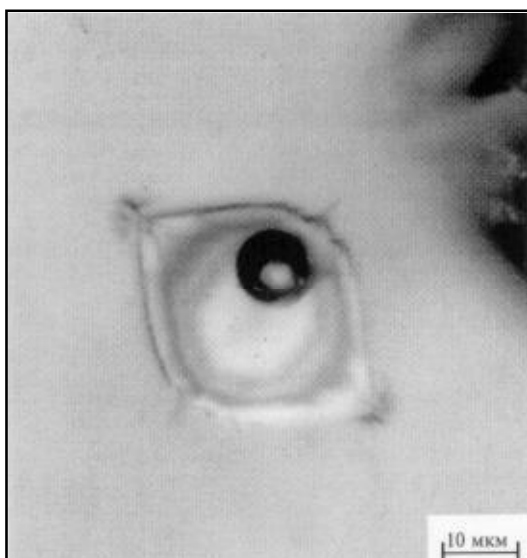


Рис. 3. Расплавное включение в кварце.

Кроме того, встречаются включения, содержащие третью фазу в виде мельчайших выделений минерала, определить состав которого не удалось. Размеры включений в кварце в некоторых случаях достигают 300 мкм.

В плагиоклазе, пироксене и стекле основной массы пород наряду с расплавными встречаются газовые включения. Как одиночные, так и образующие группы включения характеризуются весьма непостоянным, но высоким (более 70%) содержанием газовой составляющей. Некоторые участки стекла основной массы пород отличаются темно-серой окраской. Обнаружено, что стекло в них насыщено большим количеством газовых включений микронного размера. Реже такие же участки с разной степенью насыщения мельчайшими газовыми включениями отмечаются в зернах плагиоклаза из меланократовых обособлений.

СОСТАВ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ И ОСНОВНОЙ МАССЫ ПОРОД

В табл. 1 приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа силикатных стекол расплавных включений в плагиоклазе, гиперстене, кварце и роговой обманке вкрапленников в разных породах вулкана Дикий Гребень. Для сравнения приведен единственный анализ стекла включения в плагиоклазе из базальтов и андезитов вулкана Горелый (юг Камчатки).

По результатам анализов видно, что стекла расплавных включений в минералах всех пород вулкана Дикий Гребень от риодацитов до андезибазальтов характеризуются высоким содержанием SiO_2 , превышающим во всех проанализированных препаратах 71 мас.%. Как видно из таблиц 1 и 2, по содержанию SiO_2 (около 72 мас.%) риодациты и стекло законсервированных во вкрапленниках этих пород расплавных включений почти не различаются между собой. В дацитах это различие достигает почти 4 мас.% (68.83% - в даците и 72.62% - в стекле

Таблица 2. Химический состав пород и их основной массы (мас. %), в минералах которых анализировались включения.

№ п.п.	Порода, стекло основной массы	Оксиды										
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O ⁺
1	Гиалориолит	71.90	0.28	13.82	0.25	1.50	0.06	0.23	2.35	4.50	1.85	3.50
	Стекло основной массы (3)	78.34	-	13.08		0.98*	-	-	1.02	2.91	3.91	-
2	Дацит	68.85	0.47	15.00	1.45	2.12	0.07	1.88	4.03	3.78	2.19	0.38
	Стекло основной массы (4)	78.85	0.01	12.71	-	1.59*	-	0.20	0.94	2.83	4.70	-
3	Андезит	61.25	0.85	15.35	2.20	3.90	0.12	3.80	6.00	3.58	2.07	0.21
	Стекло основной массы (2)	71.76	0.17	16.07	-	0.97*	0.00	0.00	3.15	3.52	3.01	-
4	Обособление андезитов в риодацитах	58.70	0.68	17.23	2.92	1.90	0.14	4.30	6.10	3.42	1.75	0.30
	Стекло основной массы (1)	73.01	0.10	12.34	-	1.10*	0.00	0.00	3.25	1.15	6.36	-
5	Обособление андези- базальтов в дацитах	55.60	0.80	16.98	5.20	2.80	0.13	5.25	7.17	3.31	1.60	0.68
	Стекло основной массы (2)	78.21	0.31	10.64	-	0.99*	-	0.08	0.98	2.34	2.14	-
6	Базальт вулкана Горелый	52.82	1.07	11.50	4.43	5.18	0.14	6.39	7.73	3.73	1.54	-
	Стекло основной массы (1)	58.08	1.13	20.66	-	3.64*	-	0.56	6.97	4.46	2.10	-

Примечание. В скобках цифрами указано количество анализов. Прочерк - содержание компонентов не определялось. * - все железо определено как FeO.

включения во вкрапленнике плагиоклаза), а особенно оно заметно в андезитах и андезибазальтах, где разрыв по содержанию SiO₂ в породах и стекле включений составляет уже 15-20 мас.%. Большинство приведенных в табл. 1 анализов относится к расплавленным включениям в плагиоклазах. Результаты анализов свидетельствуют о более высоком содержании SiO₂ во включениях, содержащихся в более основных плагиоклазах, т.е. существует обратная зависимость между содержанием этого компонента в минерале-хозяине и стекле включений. Проанализированный гиперстен из меланократового обособления в риодацитах по содержанию SiO₂ (около 54 мас.%) мало отличается от сингенетичного с ним основного плагиоклаза. Силикатное стекло включений в этом минерале также содержит около 76 мас.% SiO₂.

В стекле всех изученных включений обращает на себя внимание очень высокое содержание калия (более 5 мас.% K₂O в некоторых включениях), во много раз превышающее его концентрацию как в породах, так и в содержащих включения минералах.

Содержание Na₂O в стекле всех включений низкое. Однако надо иметь в виду, что часть Na может теряться в процессе анализа. Так опыты с искусственными водосодержащими силикатными стеклами, заранее проанализированными химическим методом, показали, что при анализе фокусированным пучком диаметром 3-4 мкм происходит потеря Na, достигающая 65% при содержании воды в стекле 6-8%. За счет потери натрия, воды и других летучих веществ в процессе анализов сумма компонентов для всех исследованных нами стекол включений составляла меньше 100%. Дефицит в основном колеблется в пределах 3-3.5%, но в некоторых случаях превышает

9%. Как предлагается в работе [4], по величине этого дефицита можно предварительно оценивать содержание воды в расплаве.

Стекло всех проанализированных расплавленных включений характеризуется малыми содержаниями CaO (менее 1 мас.%) и FeO, несравненно более низкими, чем в валовом составе пород и в содержащих включения минералах. Магний в стекле включений обнаружен в весьма малых количествах.

С целью сопоставления особенностей расплавленных включений в минералах андезибазальтов вулкана Дикий Гребень были изучены включения в плагиоклазе базальтов и андезитов вулкана Горелый (юг Камчатки), несомненно образованных за счет кристаллизации преимущественно основной магмы. Анализ включений показал, что они резко отличаются по составу от включений в плагиоклазах андезибазальтов вулкана Дикий Гребень по содержанию SiO₂, CaO, MgO, FeO, в общих чертах отвечая составу материнского расплава.

В таблице 2 приведены результаты химического анализа изученных пород и данные микрорентгеноспектрального анализа силикатного стекла их основной массы. При этом в связи с близкими составами стекол основной массы пород в разных образцах (отличия в пределах сотых долей процента), в таблице, для ее упрощения, приведен только усредненный анализ, а в скобках указано количество определений. По результатам анализа видно, что для всех без исключения пород вулкана Дикий Гребень, так же как и для расплавленных включений в минералах, характерно высокое содержание кремнекислоты, колеблющееся в пределах 75-79 мас.%. По сравнению с валовым составом пород отмечается более низкое содержание

Na_2O и более высокое - K_2O . Если в породах натрий преобладает над калием, то в стекле основной массы риодацитов и дацитов, наоборот, калий преобладает над натрием, а в стекле основной массы андезитов и андезибазальтов содержание K_2O и Na_2O примерно одинаковое. Все изученные образцы отличаются заметно более низким содержанием оксидов Ca, Mg и Fe в стекле основной массы по сравнению с валовым составом пород. Иной состав силикатного стекла основной массы имеет базальт вулкана Горелый (табл. 2). Помимо низкого содержания SiO_2 , по сравнению хотя бы с составом стекла основной массы андезибазальтов вулкана Дикий Гребень, здесь обращают на себя внимание относительно высокие концентрации Ca, Fe, Na при малом содержании K.

Оценка температур кристаллизации пород

Температурный режим формирования минералов-вкрапленников в риодацитах и дацитах, а также в андезитах и андезибазальтах меланократовых обособлений в этих породах определялся по температурам гомогенизации ($T_{\text{гом.}}$) расплавных включений в апатите и плагиоклазе. Самая высокая температура гомогенизации оказалась характерной для расплавных включений в апатите, содержащемся в виде вкрапленников в плагиоклазе из обособления андезибазальтов в дацитах. Она оказалась равной 1250°C . Немного ниже температура гомогенизации расплавного включения в апатите ($1150\text{-}1200^\circ\text{C}$), содержащемся в плагиоклазе андезитового обособления из риодацитов.

Во вкрапленниках плагиоклазов риодацитов, дацитов и меланократовых обособлений в них термометрическим исследованиям подверглись наиболее распространенные двухфазовые расплавные включения, состоящие из нераскристаллизованного силикатного стекла и газового пузырька, занимающего 15-20% объема валуолей.

Судя по полученным $T_{\text{гом.}}$, кристаллизация вкрапленников плагиоклаза в риодацитах происходила при $840\text{-}850^\circ\text{C}$, а в дацитах - при $870\text{-}880^\circ\text{C}$. Температуры гомогенизации включений в плагиоклазах из андезитов обособлений в риодацитах в большинстве препаратов колебались в пределах $920\text{-}960^\circ\text{C}$. В одном из препаратов, где включения отличались зубчатыми ограничениями, температуры их гомогенизации составили $890\text{-}1000^\circ\text{C}$.

Более высокие температуры гомогенизации (1120°C) установлены для большинства двухфазовых включений в плагиоклазах из обособлений андезибазальтов в дацитах. В одном из зерен зонального с признаками резорбирования плагиоклаза установлено зональное расположение расплавных включений. Их нагревание показало, что $T_{\text{гом.}}$ включений, расположенных ближе к центральным частям кристалла плагиоклаза, равны 1060°C , а в удаленных от центра

зонах - 1120°C . Такое изменение температуры характерно для кристаллов плагиоклаза с обратной зональностью, на наличие которых в породах вулкана ранее обратил внимание И.Н. Биндеман [1]. Попытки гомогенизировать многофазовые включения, содержащие минеральные и рудные фазы, не увенчались успехом. Рудные фазы, хотя и испытывали уменьшение в размерах, но сохранились до момента взрывания включений. Температуры кристаллизации риодацитов и дацитов определялись с помощью магнетит-ильменитового геотермометра. Состав магнетита и ильменита изучался микрозондовым анализом. Определение температур кристаллизации путем пересчета полученных результатов анализов по программе GUN показало, что кристаллизация риодацитов происходила в интервале $650\text{-}800^\circ\text{C}$, а дацитов - $810\text{-}830^\circ\text{C}$. Температура же кристаллизации андезибазальтового обособления в дацитах, рассчитанная по составам магнетита и ильменита, заимствованным из работы [1], составила 890°C .

Обсуждение результатов

Как видно из табл. 1, силикатные стекла расплавных включений в минералах всех пород вулкана Дикий Гребень, включая андезиты и андезибазальты, по химическому составу соответствуют риолитам. Такой же состав, иногда с более высоким содержанием SiO_2 , имеют силикатные стекла основной массы пород (табл. 2). При общем высококремнеземистом риолитовом составе стекол основной массы породы вулкана существенно различаются по валовому составу. Из этого следует, что последний определяется особенностями состава и количеством минералов-вкрапленников. Действительно, в риодацитах и дацитах вкрапленники представлены кислым плагиоклазом ($\text{P}_{1\text{-}20\text{-}24}$) и кварцем при относительно небольшом содержании темноцветных и рудных минералов, а в андезитах и андезибазальтах наблюдается обилие вкрапленников более основного плагиоклаза и значительное количество рудных, а также темноцветных минералов - клино- и ортопироксена, роговой обманки, реже оливина. Отмечаются и некоторые особенности петрографического состава основной массы кислых и более основных пород. Так, в риодацитах она представлена преимущественно силикатным стеклом с содержанием SiO_2 более 78 мас.% и относительно небольшим количеством лейст плагиоклаза, пироксена, рудных и других минералов, а в андезитах и, особенно, в андезибазальтах меланократовых обособлений стекло основной массы, содержащее также более 78 мас.% SiO_2 , нередко бывает пересыщено лейстами перечисленных выше минералов и занимает лишь небольшой объем в промежутках между ними. Экспериментальные данные [13] и геологические наблюдения, в том числе и на вулкане Дикий Гребень [1], показывают, что стекло основ-

ной массы пород относится к остаточным образованиям после кристаллизации минералов-вкрапленников еще в магматическом очаге, и его застывание происходит уже при излиянии лавы на земную поверхность.

Скорее всего, и в расплавных включениях также консервируются остаточные расплавы, возникшие в процессе кристаллизации минералов-вкрапленников в магматическом очаге. В пользу этого заключения свидетельствуют следующие факты. Стекла всех изученных включений характеризуются значительным содержанием SiO_2 , но относительно высокие его концентрации зафиксированы во включениях в минералах со сравнительно низким содержанием этого компонента в их составе. Магний практически не обнаруживается в расплавах включений во всех изученных минералах, но в парагенезисе с последними кристаллизовался оливин и другие магнийсодержащие минералы, на образование которых, видимо, и был почти полностью использован находящийся в расплаве магний. Заметное понижение содержания MgO в остаточном расплаве, по сравнению с исходным, по мере образования в нем с понижением температуры кристалликов оливина, подтверждено экспериментальными работами [13].

Во всех породах вкрапленники представлены минералами, в составе которых важную роль играют кальций и железо (плагиоклазы, пироксены, амфиболы, магнетит, ильменит). В силикатном стекле расплавных включений из минералов-вкрапленников отмечается незначительное содержание как кальция, так и железа. Обычно в силикатном стекле расплавных включений более чем в два раза меньше TiO_2 по сравнению с валовым составом пород. В то же время, среди вкрапленников не обнаружены минералы, содержащие заметные количества калия, а его относительно высокие концентрации характерны для стекол расплавных включений. Возможность консервации во включениях остаточных расплавов не отмечалась исследователями и тем самым не учитывалась при определении по составу силикатных стекол этих включений особенностей исходных для образования пород расплавов. Консервация остаточных растворов в газовой-жидких включениях в минералах гидротермального генезиса была показана в [11], основанной на изучении как природных образцов, так и полученных экспериментально.

Судя по $T_{\text{гом}}$ расплавных включений, кристаллизация минералов-вкрапленников пород вулкана происходила в магматическом очаге в широком температурном интервале, причем изначальная температура как риодацитовых, так и дацитовых расплавов превосходила $1200\text{--}1250^\circ\text{C}$. Наблюдаются общие особенности в последовательности кристаллизации минералов в риодацитах и дацитах. В тех и дру-

гих породах наиболее высокотемпературными являются кристаллики апатита из меланократовых обособлений. Эти кристаллики позднее в виде минеральных включений захватывались в процессе роста зерен плагиоклаза, пироксена и других минералов. При более низких температурах в магматическом очаге начиналась кристаллизация вкрапленников плагиоклаза и его сегрегация в виде небольших обособлений. При этом вкрапленники плагиоклаза в андезитовых обособлениях из риодацитов образовались при температурах ниже 1000°C , а в андезибазальтовых обособлениях из дацитов - при температурах более 1100°C . Отметим, что для андезитов характерны более кислые плагиоклазы по сравнению с андезибазальтами. Только при температурах ниже 900°C происходит кристаллизация вкрапленников в самих породах, но различия в температурах для риодацитов и дацитов здесь уже не превосходят $30\text{--}40^\circ\text{C}$. Не так резко различаются по содержанию анортитовой составляющей плагиоклазы вкрапленников в риодацитах и дацитах. При излиянии на земную поверхность температуры расплавов уже не превышали, видимо, 800°C . Таким образом, формирование риодацитов и дацитов связано с постепенным понижением температуры в магматическом очаге и началось с кристаллизации здесь вкрапленников меланократовых обособлений. Позднее при более низких температурах образовывались вкрапленники самих пород, а остаточный кислый расплав заполнил промежутки между теми и другими вкрапленниками, застывая при излиянии лавы на земную поверхность. Экспериментальными работами [4] показана зависимость состава плагиоклазов от содержания кальция и воды в расплавах. Полученные данные указывают на возможное влияние температуры на состав плагиоклазов, преобладающих во вкрапленниках изученных пород. Следовательно, изменения валового состава пород могут находиться в определенной зависимости от этого параметра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучением расплавных включений в минералах пород вулкана Дикий Гребень не установлено участие в их формировании процессов смешения кислой и основной магмы и показано, что в силикатных стеклах этих включений и основной массы пород фиксируются остаточные риолитовые расплавы. Эти расплавы по своему составу существенно отличаются от валового состава пород, который определяется особенностями содержащихся в них минералов-вкрапленников. По составу же силикатного стекла основной массы все различия пород почти не различаются между собой. Кристаллизация вкрапленников происходила в магматическом очаге по мере снижения температуры. Изначальная температура как

риодацитовых, так и дацитовых расплавов превышала 1200-1250°C. Уже при этих температурах началось образование в расплаве кристалликов апатита, которые в виде минеральных включений содержатся в зернах более низкотемпературного плагиоклаза и других минералов.

По температурам гомогенизации расплавных включений в плагиоклазах выясняется, что формирование риодацитов и дацитов начиналось с кристаллизации вкрапленников, как сегрегированных в меланократовые обособления, так и встречающихся в виде разрозненных фенокristов, и только при понижении температуры на 120-150°C начинается образование вкрапленников в самих породах. Вкрапленники в риодацитах появляются в расплаве при температурах на 30-40°C ниже, чем в дацитах. В процессе подъема из магматического очага к земной поверхности по лавоподводящему каналу происходит заметное понижение температуры, которая при излиянии, например, риодацитов была менее 800°C. Таким образом, в промежутках между излияниями лавы на земную поверхность прослеживается эволюция температурного режима магматического расплава на глубине с кристаллизацией в нем минералов-вкрапленников, состав которых, помимо других факторов, в какой - то мере определяется и температурным параметром.

В заключение подчеркнем, что вулканическая постройка Дикий Гребень представляет своеобразный тип магматизма и окончательные выводы о процессах, которые сформировали комплекс пород столь разного состава, иногда с многочисленными меланократовыми обособлениями, обусловили антидромную последовательность извержений в каждом цикле, пока преждевременны. Необходимо проведение дополнительных исследований, в том числе и экспериментальных, по возможности накопления в кислой магме более основных компонентов (Ca, Mg, Fe и др.) и выделения их из расплава в виде минералов-

вкрапленников по мере изменения температурного режима в магматическом очаге.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биндеман И.Н. Петрология вулкана Дикий Гребень (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 33-55.
2. Биндеман И.Н. Ретроградная везикуляция базальтовой магмы в малоглубинных очагах: модель происхождения меланократовых включений в кислых и средних породах // Петрология. 1995. № 6. С. 632-644.
3. Ермаков Н.П. Исследование минералообразующих растворов. Харьков: Изд-во Харьков. Ун-та, 1950. 460 с.
4. Наумов В.Б., Коваленко В.И., Бабанский А.Д и др. Генезис андезитов по данным изучения расплавных включений в минералах // Петрология. 1997. № 6. С. 654-665.
5. Огородов Н.В., Вольнец О.Н., Колосков Ф.В. и др. Дикий Гребень // Бюл. вулканол. станций. 1978. № 54. С. 75-88.
6. Пийп Б.И. Маршрутные геологические наблюдения на юге Камчатки // Тр. Камчатской вулканологической станции. 1947. Вып. 3. С. 89-136.
7. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987. Т. 1. 558 с.
8. Святловский А.Е. Атлас вулканов СССР. М.: Наука, 1959. 174 с.
9. Соболев А.В. Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // Петрология. 1996. № 3. С. 228-239.
10. Хетчиков Л.Н. Исследование включений минералообразующих сред в искусственных и природных кристаллах. Автореф. дис.... д-ра геол.-минер.наук. М., 1974. 48 с.
11. Хетчиков Л.Н. Раткин В.В., Пахомова В.А. Флюидные включения в минералах - истинные или ложные свидетели состава минералообразующих растворов // Зап. Всерос. минерал. о-ва. 1994. № 1. С. 1-8.
12. Bindeman I.N, Bailey J.C. A model of reverse differentiation at Dikiy Greben volcano, Kamchatka: progressive basic magma vesiculation in a silicic magma chamber // Contrib. Mineral. Petrol. 1994. V. 117. P. 263-278.
13. Huppert H.E The intrusion of fluid mechanics into geology // Journal of fluid mechanics. 1986. N 176. P. 557-594.

Поступила в редакцию 2 июня 1999 г.

Рекомендована к печати В.И. Суховым

L.N.Khetchikov, V.A.Pakhomova, V.K.Popov, A.A.Chashchin, V.I.Sapin

Composition of melted inclusions in minerals and temperature regime of rock formation, Dikiy Greben Volcano (Kamchatka)

Data on peculiarities of Dikiy Greben Volcano rocks (southern Kamchatka) and characteristics of mineral-forming inclusions in their minerals are presented. X-ray spectroscopy showed high SiO₂ contents (more than 71 wt%) in silicate glasses of all the study inclusions, and peculiarities of other oxides concentration in them. In all probability, the inclusions preserved residual liquors. Irrespective of the rock basicity, the SiO₂- content is high in a matrix glass as well (often 78 wt%). The concentration of other components is close to that of the mineral-impregnations. Thus, a total rock composition is determined by the composition of minerals-impregnations.

Evolution of temperature regime during crystallization of mineral-impregnations in a magmatic chamber has been studied using homogenization of melted inclusions.