

УДК @@@

## СОСТАВЫ РАСПЛАВОВ И УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АНДЕЗИТОВ ВУЛКАНОВ АВАЧИНСКИЙ, БЕЗЫМЯННЫЙ, ШИВЕЛУЧ И КАРЫМСКИЙ (ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ)

© 2004 г. Г. Е. Богоявленская<sup>1</sup>, В. Б. Наумов<sup>2</sup>, М. Л. Толстых<sup>2</sup>,  
А. Д. Бабанский<sup>3</sup>, С. А. Хубуная<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

<sup>2</sup>Институт геохимии и аналитической химии РАН, Москва, 117975

<sup>3</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, 119017

Поступила в редакцию. 20.06. 2004 г.

Проведены исследования расплавных включений в минералах некоторых вулканов Камчатского региона. Изучены андезибазальты и андезиты вулканов, расположенных в пределах Центральной Камчатской депрессии (вулканы Шивелуч и Безымянный), Восточно-Камчатского вулканического пояса (вулканы Авачинский и Карымский). Кроме того, изучены базальты извержения 1996 г. Карымского вулканического центра и дациты вулкана Дикий Гребень (Южная Камчатка). Используются методы гомогенизации расплавных включений и анализ закаленных стекол этих включений с помощью электронного и ионного микрозонда. Изучено более 200 расплавных включений в минералах из 25 образцов вулканических пород. Установлено, что составы расплавных включений во вкрапленниках андезитов сильно варьируют по основности: содержания  $\text{SiO}_2$  меняются от 56 до 80 мас.%, причем с ростом кремнезема закономерно уменьшаются содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , FeO, MgO, CaO и увеличиваются  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ . При этом большая часть (~80%) стекол включений имеет дацитовый и риолитовый состав. Однако составы кислых расплавов ( $\text{SiO}_2 > 65$  мас.), формирующих андезиты, отличаются от таковых, образующих дациты и риолиты. Сравнение составов расплавных включений из плагиоклазов андезитов четырех вулканов Камчатки показало значительное их различие. Основные андезиты (56–59%  $\text{SiO}_2$ ) вулкана Безымянный имеют большой разброс составов включений ( $\text{SiO}_2 = 56$ –81%). Более кислые андезиты ( $\text{SiO}_2 = 61\%$ ) вулкана Шивелуч обнаруживают меньший разброс составов включений ( $\text{SiO}_2 = 67$ –79%). Расплавные включения в андезитах вулкана Карымский оказались более основными. Они обогащены Fe, Ti, Ca, Mg, P, Na и значительно беднее K. Возможно, расплавы, формирующие андезиты вулкана Карымского, менее дифференцированы. В изученных образцах также были обнаружены высококалиевые расплавы ( $\text{K}_2\text{O} = 3.8$ –6.8 мас.%) независимо от содержаний в них  $\text{SiO}_2$  (диапазон от 51.4 до 77.2 мас.%). По содержаниям летучих компонентов расплавы вулканов существенно различаются. Максимальные концентрации  $\text{H}_2\text{O}$  установлены в расплавах вулканов Шивелуч (от 3.0 до 7.2 мас.% при среднем значении 4.7 мас.%) и Авачинский (4.7–4.8 мас.%), более низкие концентрации – в расплавах вулканов Дикий Гребень (0.4–1.8 мас.%) и Безымянный (<1 мас.%). По флюидным включениям  $\text{CO}_2$  в плагиоклазах андезитов вулкана Шивелуч определено давление, равное 350–1600 бар, что соответствует глубине магматической камеры 1.5–6 км. Определены концентрации 17 элементов-примесей в стеклах расплавных включений в плагиоклазах четырех вулканов (Авачинский, Безымянный, Дикий Гребень, Шивелуч). По характеру распределения содержаний этих элементов изученные расплавы близки типичным магмам островных дуг.

Проблема происхождения андезитов – одна из ключевых проблем петрологии, так как ее решение принципиально важно для понимания процессов магматической эволюции. Установлено, что валовый состав континентальной коры близок к андезитам [28, 39]. Извержения андезитовых вулканов – самые мощные и опасные проявления вулканической деятельности. Из 712 действующих в четвертичное время вулканов так называемого “Тихоокеанского огненного кольца” 406 (т.е. 57%) извергали андезитовые лавы [36]. Хотя

изучение проблемы андезитов имеет достаточно длинную историю, в настоящее время нельзя говорить о ясности большинства ее аспектов. Если вещественный состав андезитов, пространственное и хронологическое положение зон андезитового вулканизма в настоящее время хорошо изучены, то место андезитов в ряду магматической эволюции, структурное положение, связь с глубинным строением и особенности извержений андезитовых вулканов являются предметом многочисленных дискуссий [13].

Половину действующих вулканов Камчатки можно отнести к андезитовым (доля андезитов в них составляет 50%) [13]. Обычно это стратовулканы, осложненные экструзиями (Шивелуч, Безымянный, Кизимен), стратовулканы типа Сомма-Везувий (Авачинский) и кальдерные вулканы (Карымский, Академии Наук). Андезитовым вулканам свойственны различные типы извержений: пелейский, катмайский, плинианский, вулканский, направленного взрыва. Им присущи отложения разнообразных вулканических фаций – пирокластических потоков, пирокластических волн, обломочных лавин, лавовых потоков, экструзий. Общей чертой андезитовых вулканов является резкое преобладание в продуктах извержения пирокластического материала. Катастрофические извержения типа направленных взрывов, сопровождаемые пирокластическими волнами (палящие тучи), пирокластическими потоками, обломочными лавинами – наиболее опасны. При этом количество выброшенного почти мгновенно пирокластического материала может составлять от  $1.5 \text{ км}^3$  (вулкан Шивелуч в 1964 г.) до  $3 \text{ км}^3$  (вулкан Безымянный в 1956 г.), а энергия воздушной волны для указанных извержений достигать  $1.8 \cdot 10^{18}$  и  $3 \cdot 10^{24}$  эрг, соответственно [7, 10]. Проблема происхождения андезитов интересовала исследователей в течение всего прошлого века. Набор моделей андезитообразования, разрабатываемых различными авторами, достаточно широк [15]. Образование андезитов рассматривается как многостадийный процесс, включающий смешение магм различной (в том числе и близкой) основности, контаминацию расплавами вмещающих пород, а также возможное неполное фракционирование кристаллических фаз (кумулятивные процессы). Широко известно, что андезитовые лавы, как правило, хорошо раскристаллизованы и содержат большое количество вкрапленников. При таких структурах мы точно не знаем, соответствует ли состав пород магматическому расплаву или это механическая смесь расплава и фенокристаллов. В последнем случае рассматривать химический состав порфировой породы как магматический расплав было бы ошибкой.

Учитывая сложность проблемы генезиса андезитов, была сделана попытка рассмотреть ее с точки зрения результатов, полученных при исследовании расплавных включений. Проведены исследования расплавных включений в минералах некоторых вулканов Камчатки. Изучены андезибазальты и андезиты вулканов Центральной Камчатской депрессии (Шивелуч, Безымянный), Восточно-Камчатского вулканического пояса (Авачинский, Карымский). Кроме того, изучены базальты извержения 1996 г. Карымского вулканического центра и дациты вулкана Дикий Гребень, Южная Камчатка.

## КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВУЛКАНОВ

**Вулкан Шивелуч** – самый северный и самый активный действующий вулкан Камчатки. Одновременно Шивелуч – одно из крупнейших вулканических сооружений, возраст которого приближается к 60–70 тыс. лет. По объему и массе изверженных продуктов, скорости выноса вещества, частоте сильных извержений Шивелуч – одно из самых уникальных вулканических образований Камчатки [12]. Последние 10 тыс. лет для вулкана характерны катастрофические эксплозивные извержения и умеренные, связанные с формированием экструзивных куполов. Породы, слагающие постройку вулкана, представлены андезитами и андезибазальтами. Андезиты преобладают, базальты крайне редки.

Было изучено 8 образцов андезитов, их химический состав приведен в табл. 1. Два образца имеют радиоуглеродный возраст 3700 лет (обр. Ш–3700, пористый серый андезит из пирокластического потока) и 1400 лет (обр. Ш–1400- лапилли серой пемзы). Остальные образцы характеризуют извержения 1964–1995 гг. (образец Ш–1964 – пемзовидный андезит из отложений катастрофического извержения 1964 г.) [29, 33, 40].

Содержание фенокристаллов в лавах андезитов не превышает 35 об. %. Фенокристаллы представлены плагиоклазом, амфиболом, пироксенами и рудными минералами. Как правило, плагиоклаз ( $\text{An}_{67}\text{-An}_{32}$ ) преобладает, составляя более 50%. Амфибол представлен роговой обманкой, пироксены – гиперстеном и авгитом. Рудные минералы (титаномагнетит и магнетит) образуют включения во всех минералах, а также встречаются как фенокристаллы, содержащие включения апатита и пироксена.

**Вулкан Безымянный** расположен в центральной части Ключевской группы вулканов, к юго-западу от вулкана Ключевской, на склоне вулкана Камень. Это удлиненный в широтном направлении массив с разрушенной вершиной, которую занимает огромный кратер размером  $1.3 \times 2.8 \text{ км}$ . В кратере располагается купол Новый. На южном и юго-восточном подножии вулкана находятся 16 экструзивных куполов [10].

История вулкана началась 10–11 тыс. лет назад, когда на отрогах вулкана Камень начал формироваться вулкан Пра-Безымянный. Большая часть этого вулкана уничтожена катастрофическим извержением 1956 г. Собственно стратовулкан Безымянный возник ~5000 лет назад [12]. После катастрофы 1956 г. во вновь образованном кратере начался рост экструзивного купола Новый, формирование которого продолжается до настоящего времени. Это единственный в Ключевской группе вулканов, который продолжает расти.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) изученных образцов пород камчатских вулканов

№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	Сумма
<b>Вулкан Авачинский</b>														
91150	54.50	1.01	19.20	2.72	5.22	0.15	3.70	8.96	3.11	0.58	0.13	–	0.67	99.95
89161	58.54	0.65	18.79	2.44	3.60	0.21	2.80	6.98	3.36	0.81	0.13	–	0.24	99.52*
90305	59.40	0.67	18.30	2.86	3.43	0.16	2.79	6.48	3.43	0.71	–	–	1.38	99.61
<b>Вулкан Безымянный</b>														
1956**	59.54	0.88	17.57	3.17	3.22	0.14	2.81	6.97	3.80	1.32	–	–	–	99.82
1974**	57.54	0.71	16.11	3.55	4.48	0.17	3.48	8.16	3.60	1.35	0.18	0.12	0.18	99.61
1979**	56.42	0.83	17.80	3.87	4.31	0.16	3.83	7.46	3.56	1.27	–	0.26	–	100.61
1985**	56.54	0.81	18.10	4.51	3.02	0.10	3.98	7.67	3.22	1.24	0.28	0.21	0.25	99.93
1987**	56.58	0.82	18.46	2.32	4.42	0.17	3.96	7.36	3.38	1.34	0.20	0.21	0.37	99.59
1990**	58.36	0.79	18.70	2.36	4.57	0.14	3.72	6.70	3.40	1.33	0.18	0.20	–	100.45
<b>Вулкан Карымский</b>														
Кар-2****	52.00	0.73	19.21	–	8.30***	0.14	5.34	10.47	2.80	0.58	0.14	–	–	99.71
Кар-4	62.45	0.92	16.27	–	6.58***	0.15	2.01	5.38	4.52	1.57	0.26	–	0.11	99.99
Кар-63	62.05	0.88	16.60	–	6.95***	0.12	2.00	5.39	4.08	1.58	0.25	–	–	99.90
<b>Вулкан Шивелуч</b>														
Ш-3700	61.02	0.57	16.93	2.81	2.53	0.10	3.87	5.63	4.96	1.34	–	0.12	0.12	100.00
Ш-1400	59.15	0.77	15.50	2.42	3.35	0.10	4.22	6.93	4.30	1.35	–	0.45	1.03	99.57
Ш-1964**	56–94	0.64	16.67	2.88	3.23	0.12	5.51	7.10	4.21	1.10	–	0.10	0.66	99.16
Ш-1993а**	60.91	0.56	16.84	2.67	2.26	0.11	4.00	6.03	4.60	1.31	–	0.08	0.24	99.61
Ш-1993б**	61.26	0.55	16.76	4.49	0.58	0.11	3.96	6.03	4.39	1.31	–	0.04	0.24	99.72
Ш-1995а**	60.07	0.62	16.31	4.78	1.05	0.11	4.22	5.93	4.45	1.26	–	0.55	0.00	99.35

Примечание. \* – сумма с учетом п.п.п. = 0.97; \*\* – номер образца вулканов Безымянный и Шивелуч соответствует году извержения вулкана; \*\*\* – железо общее, \*\*\*\* Кар-2-базальтовая бомба с полуострова Новогодний.

чевской группе вулкан, постройка которого целиком представлена породами андезитового состава – пироксеновыми, пироксен-амфиболовыми и амфиболовыми разностями с содержаниями SiO<sub>2</sub> от 56.4 до 59.5 мас. % (табл. 1).

Изучение вкрапленников плагиоклаза из андезитов разных лет извержений (1956–1990 гг.) свидетельствует о сложной истории формирования пород этого вулкана [30]. Плагиоклаз представлен двумя генерациями. Первая генерация – крупные (до 4–5 мм) практически изометричные кристаллы или их ядра, с большим количеством кристаллических расплавленных и реже – флюидных включений. Зональность прямая, состав плагиоклазов An<sub>80–60</sub>. Вторая генерация представлена более мелкими (до 1 мм) кристаллами или каймами крупных вкрапленников. Этот плагиоклаз гораздо менее насыщен включениями, зональность его также прямая, состав An<sub>60–40</sub>. Амфибол встречается в виде некрупных (до 0.4 мм) удлиненных кристаллов. Пироксены чаще представлены гиперстеном, реже авгитом (в среднем соотношении 3:1).

**Вулкан Карымский** находится в центральной части Восточной вулканической зоны Камчатки. Он расположен в голоценовой кальдере, наложенной на средне-верхнеплейстоценовые вулканы Двор (возраст 150 тыс. лет) и Пра-Карымский (возраст 110 тыс. лет) [12]. Диаметр кальдеры 5 км, площадь 12 км<sup>2</sup>. Кальдера Карымского вулкана образовалась 7600–7700 лет назад. Стратовулкан Карымский начал формироваться 6100 лет назад. Объем конуса составляет 0.8 км<sup>3</sup>. Среднегодовой расход вулкана за 6000 лет его существования составлял  $1.2 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/год или  $2 \cdot 10^6$  т/год. Сильная активизация вулкана началась 500 лет назад и продолжается до настоящего времени [34].

2 января 1996 г. одновременно началось вершинное извержение Карымского вулкана и образование нового кратера в кальдере Академии Наук. Произошло возобновление вулканической деятельности в кальдере Академии Наук, которая считалась угасшей 28 тыс. лет назад. В первые дни (2–3 января) происходило извержение из двух вулканических центров, находящихся на расстоянии 6 км друг от друга. Из главного кратера наблюдался непрерывный подъем газопеплового

столба на высоту от 500 до 1200 м. В это же время в Карымском озере происходило подводное извержение базальтов из эруптивного центра, расположенного в 500 м от берега. Здесь сформировался полуостров Новогодний площадью 0,7 км<sup>2</sup>.

После 4 января эруптивная активность продолжалась только из вершинного кратера вулкана Карымский. Начиная с 13 января, происходило излияние лавовых потоков. Активность вулкана продолжается до настоящего времени [34].

Изучены три образца продуктов извержения 1996–1997 гг. Первый образец (Кар–2) – базальтовая вулканическая бомба (полуостров Новогодний), два других образца (Кар–4 и Кар–63) – андезиты лавовых потоков из вершинного кратера Карымского вулкана, отобранные в горячем состоянии 22.09.1996 и 19.08.1997 г., соответственно. Составы этих образцов приведены в табл. 1.

Базальт – черная пористая порода с большим количеством фенокристаллов плагиоклаза. Вкрапленники, представленные плагиоклазом, оливином и пироксеном, составляют ~35 об. % породы. Основная масса имеет гиалиновую структуру, состоит из стекла и микролитов плагиоклаза, пироксена и рудного минерала. Вкрапленники плагиоклаза преобладают (~80%), их размеры варьируют от 0,3 до 3 мм. Крупные вкрапленники плагиоклазов часто содержат обширные внутренние зоны, подвергшиеся сильной резорбции. Состав вкрапленников варьирует от An<sub>98–80</sub> в центральных частях фенокристаллов до An<sub>75–62</sub> в краевых зонах. Оливин по составу отвечает Fo<sub>83–72</sub>. Пироксен представлен моноклинной разновидностью, очень редко в основной массе кристаллизуется и ортопироксен [11].

Андезиты – слабо пористые породы темно-серого цвета с количеством вкрапленников около 30–35%. Главным порообразующим минералом в них является плагиоклаз, содержание которого составляет ~85% от всех вкрапленников. Плагиоклаз представлен разноразмерными зернами, однако даже в крупных вкрапленниках зоны резорбции не отмечались. Диапазон составов плагиоклазов от An<sub>85</sub> до An<sub>52</sub>. Основная масса состоит из стекла, микролитов плагиоклаза, пироксена и рудного минерала. Химический анализ стекла основной массы и вкрапленников в базальте и андезитах приведены в [32].

**Вулкан Авачинский** относится к типу Сомма-Везувий и располагается в 30 км от г. Петропавловск-Камчатский. Кратер – поздне-плейстоценовый стратовулкан, вершина которого 30 тыс. лет назад была уничтожена катастрофическим извержением с образованием кратера размером 4 × 4,5 км. Сейчас в этом кратере расположен действующий конус. Авторами работ [8, 9, 18, 19] были проведены на вулкане детальные геолого-геоморфологические

и тейфрохронологические исследования. В результате в голоценовой истории активности вулкана Авачинский было выделено два основных этапа: андезитовый (с возрастом 7,25–3,5 тыс. лет) и андезибазальтовый – после 3,5 тыс. лет.

Андезиты и андезибазальты вулкана Авачинский представляют собой порфиоровые породы, в которых вкрапленники составляют около 40%. Вкрапленники сложены плагиоклазом (40–50% от всей массы вкрапленников), орто- и клинопироксеном, амфиболом, биотитом и рудными минералами. Основная масса содержит в большом количестве микролиты рудного минерала, а остальные минералы представлены в подчиненном количестве. Химический состав образцов представлен в табл. 1.

Вкрапленники плагиоклазов представляют собой крупные идиоморфные кристаллы, слабо зональные, с удлинением около 2 : 1. Они часто содержат обширные концентрические зоны резорбции. Наличие этих зон не зависит от размера кристаллов. Изредка встречаются крупные изометричные кристаллы, лишенные зон резорбции. Составы плагиоклазов варьируют от An<sub>74</sub> до An<sub>48</sub> (среднее An<sub>60</sub>). Среди рудных минералов установлены титаномагнетит и магнетит.

**Вулкан Дикий Гребень** (Южная Камчатка) представляет собой сложную лавоэкструзивную постройку с общим объемом вулканических пород ~15 км<sup>3</sup>, расположенную на площади ~40 км<sup>2</sup> [25, 6]. Постройка состоит из множества отдельных экструзий и лавовых потоков, сложенных породами широкого спектра – от андезитов до риодацитов. Отличительной особенностью всех пород, кроме риодацитов, является присутствие в них меланократовых включений андезибазальтового состава.

Изученные дациты представляют собой светлые крупнопорфиоровые породы с вкрапленниками плагиоклаза, кварца, амфибола, пироксена и рудных минералов. Все вкрапленники в разной степени резорбированы, среди них преобладает плагиоклаз, состав которого колеблется от An<sub>67</sub> до An<sub>28</sub>, чаще всего встречаются плагиоклазы An<sub>30–40</sub>. Представительные анализы вкрапленников плагиоклаза приведены в статьях [31, 33].

**Исследования включений в минералах.** *Результаты предыдущих исследований.* Исследования расплавных включений в минералах вулканических пород Камчатки начались с 70-х годов XX в. В результате были получены многочисленные данные по температурам гомогенизации включений во вкрапленниках кварца (1260–780°C) и плагиоклаза (1350–1080°C) из дацитов вулкана Хангар [5], в плагиоклазе (1440–1040°C) из андезидацитовых лав Карымского вулкана [14]. Первые данные о химическом составе расплавных включений во вкрапленниках вулканических пород Камчатки были опубликованы в 1979 г. [17]. Авторы с помощью

**Таблица 2.** Химический состав (мас. %) стекол расплавных включений в минералах камчатских вулканов

№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	S	Сумма	n
<b>Вулкан Авачинский</b>														
91150	64.92	0.78	14.76	3.83	0.10	1.48	5.34	3.03	1.13	0.18	0.16	–	95.71	3
89161	66.07	0.25	16.28	1.73	0.07	0.40	4.59	3.69	1.45	0.06	0.12	–	94.71	9
90305	68.01	0.16	16.97	1.53	0.08	0.31	5.07	3.50	3.66	0.06	0.11	–	98.46	3
96002	69.81	0.22	15.04	1.74	0.12	0.41	3.97	4.36	1.78	0.06	0.14	–	97.65	7
<b>Вулкан Безымянный</b>														
1956	65.87	0.36	16.85	2.24	0.07	1.00	4.18	4.16	4.01	0.13	0.08	0.02	98.97	9
1974	70.04	0.47	13.82	3.24	0.09	1.23	3.56	3.54	2.88	0.09	0.10	0.04	99.10	16
1979	73.99	0.35	12.18	1.91	0.04	0.23	1.70	3.56	4.11	0.04	0.10	0.04	98.25	7
1985	69.10	0.24	14.71	2.36	0.09	1.91	3.81	3.60	3.70	0.06	0.09	0.02	99.69	3
1987	66.05	0.35	15.41	3.38	0.10	1.97	4.35	4.20	3.45	0.18	0.06	0.02	99.52	7
1990	68.90	0.55	14.60	3.23	0.10	0.83	3.32	4.43	2.89	0.07	0.14	0.03	99.09	5
<b>Вулкан Карымский</b>														
Кар-2	53.30	0.97	17.38	8.17	0.17	4.35	8.43	5.08	1.00	0.17	0.09	0.14	99.25	21
Кар-4	62.69	1.21	15.09	6.27	0.20	1.70	5.08	4.51	2.13	0.35	0.23	0.07	99.53	16
Кар-63	61.15	1.48	15.14	6.67	0.22	1.69	5.19	4.68	2.03	0.62	0.29	0.08	99.24	17
<b>Вулкан Шивелуч</b>														
Ш-3700	70.35	0.37	12.44	2.20	0.03	0.40	1.38	4.52	3.17	0.07	0.17	–	95.10	4
Ш-1400	66.96	0.19	17.94	1.24	0.06	0.39	3.79	4.64	2.10	0.09	0.15	–	97.55	5
Ш-1964	69.98	0.28	13.52	1.47	0.05	0.52	1.65	3.90	3.56	0.04	0.15	–	95.12	12
Ш-1993а	72.96	0.27	12.04	1.24	0.05	0.30	0.83	3.92	3.95	0.08	0.20	–	95.84	17
Ш-1993б	73.96	0.27	13.67	1.91	0.06	0.87	1.75	3.43	3.82	–	0.09	–	99.91	8
Ш-1995а	79.60	0.50	9.64	1.56	0.06	0.36	0.86	2.68	3.52	0.02	0.17	–	98.97	2
Ш-1995б	72.77	0.40	11.36	2.25	0.06	0.69	1.30	5.51	3.63	0.06	0.11	–	98.14	6
Ш-1995с	74.13	0.27	12.97	1.15	0.04	0.54	1.05	4.45	3.73	0.06	0.12	–	98.51	7

Примечание: n – количество изученных включений. Кар-2-базальтовая бомба полуострова Новогодний.

электронного микронзонда выполнили анализы стекол гомогенизированных включений во вкрапленниках плагиоклаза из андезидацитовых лав Карымского вулкана [16]. В дальнейшем данные о химическом составе расплавов были получены для базальта и андезита вулкана Малый Семячик [1] и для других объектов [2–4, 27]. В нескольких статьях последних лет [20, 26, 35] приведены результаты изучения химического состава расплавных включений в оливине, клинопироксене и плагиоклазе из базальтов Ключевского вулкана.

*Методы изучения включений.* Образцы минерала с расплавными включениями подвергались нагреванию до полной или частичной гомогенизации в микромуфелье с платиновым нагревателем [21] и быстрой закалке, после чего стекла включений путем шлифования образца выводились на поверхность и далее анализировались на электронном микроанализаторе “Сameбах Microbeam” при следующих условиях: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток 30 нА, развертка в растр 12 ×

12.5 × 5 и 2 × 2 мкм при исследовании стекол, 2 × 2 мкм – при определении кристаллических фаз. Точность определения элементов при их содержаниях > 10 мас. % составляла 2 отн. %, при содержаниях 5–10 мас. % – 5 отн. %, при содержаниях < 5 мас. % – 10 отн. %.

При анализе стекол расплавных включений почти всегда устанавливалась существенная потеря Na в случае сканирования луча зонда по малой площади [23, 30, 31, 33]. Поэтому для каждого из изучаемых объектов в нескольких крупных (30–50 мкм) расплавных включениях были выполнены анализы стекол при различных площадях сканирования, что позволяло рассчитать поправки в определении Na при анализе небольших расплавных включений. При площади сканирования 2 × 2 мкм коэффициент для Na для разных объектов составлял от 1.4 до 3.2, при площади 5 × 5 мкм – от 1.2 до 1.9.

Содержания элементов-примесей, воды и фтора в расплавных включениях были определены

**Таблица 3.** Химический состав (мас. %) расплавных включений, обнаруженных в одних и тех же вкрапленниках плагиоклаза андезитов вулкана Безымянный

Компо- нент	1974*									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
SiO <sub>2</sub>	56.62	59.48	62.10	63.59	65.55	72.52	75.08	77.34	78.26	
TiO <sub>2</sub>	0.22	1.14	0.79	0.46	0.29	0.65	0.58	0.51	0.53	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.04	15.31	16.92	12.99	16.49	9.90	11.56	10.91	11.40	
FeO	5.43	6.37	7.18	5.93	4.55	1.80	1.52	1.44	1.51	
MnO	0.17	0.29	0.14	0.16	0.15	0.06	0.00	0.00	0.02	
MgO	4.85	3.53	1.53	4.47	1.99	0.36	0.11	0.10	0.25	
CaO	7.71	8.10	5.72	6.13	6.03	1.39	1.15	0.96	0.87	
Na <sub>2</sub> O	5.03	4.29	3.93	4.27	3.76	2.81	3.47	3.16	2.97	
K <sub>2</sub> O	2.68	1.80	1.82	2.36	1.75	4.24	4.07	3.99	4.06	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.17	0.19	0.17	0.09	0.12	0.04	0.04	0.03	
Cl	0.03	0.00	0.18	0.04	0.09	0.07	0.03	0.07	0.04	
S	0.03	0.05	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	
Сумма	99.89	100.53	100.53	100.61	100.79	93.95	97.64	98.56	99.98	
Компо- нент	1956*		1979*		1985*		1987*			
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SiO <sub>2</sub>	65.67	73.90	68.96	76.36	55.87	80.89	56.35	57.15	63.78	72.45
TiO <sub>2</sub>	0.23	0.44	0.18	0.13	0.16	0.31	0.36	0.35	0.40	0.39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.78	11.54	15.55	9.87	19.44	10.05	16.33	16.68	16.38	12.91
FeO	1.48	2.08	2.04	2.78	3.02	1.99	5.42	4.92	3.57	2.98
MnO	0.05	0.03	0.09	0.00	0.14	0.02	0.16	0.17	0.05	0.12
MgO	0.24	0.52	0.30	0.26	5.17	0.24	4.06	4.16	2.24	1.86
CaO	3.98	1.69	3.56	0.97	7.13	1.60	6.96	7.12	3.66	2.43
Na <sub>2</sub> O	3.96	2.89	3.60	3.53	3.23	2.40	4.34	4.12	3.70	2.82
K <sub>2</sub> O	5.43	2.99	3.64	3.15	5.73	2.44	2.69	2.70	4.02	4.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.06	–	–	–	–	0.10	0.15	0.37	0.41
Cl	0.13	0.10	0.16	0.06	0.01	0.09	0.01	0.03	0.00	0.00
S	0.02	0.02	–	–	–	–	0.01	0.01	0.02	0.02
Сумма	97.09	96.26	98.08	97.11	99.90	100.03	96.79	97.56	98.19	101.42

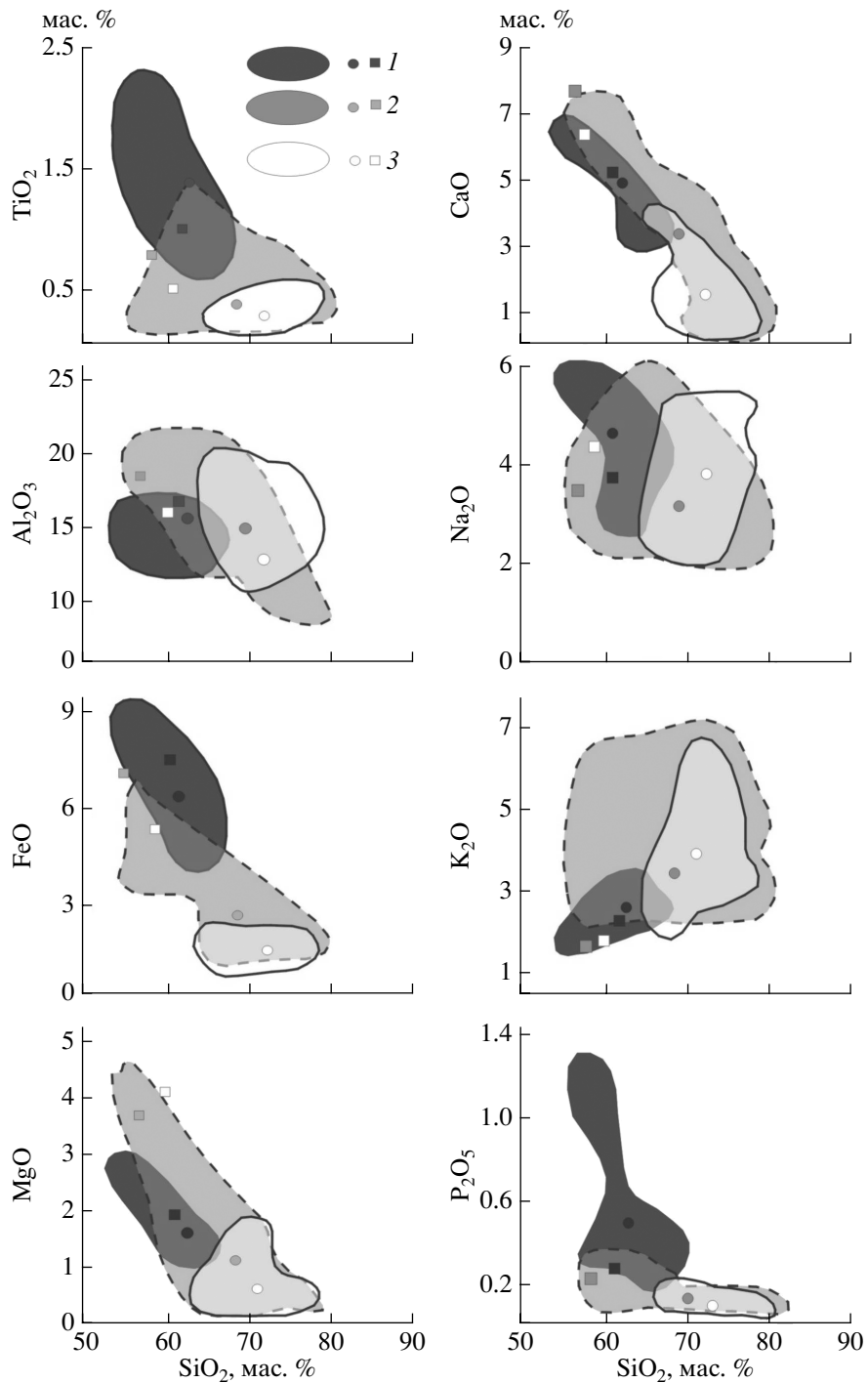
Примечание. \* – номер образца.

методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном микроанализаторе IMS-4f в Институте микроэлектроники РАН (г. Ярославль) по методике, детально описанной в работе [33].

Флюидные включения были изучены в криокамере, охлаждаемой жидким азотом, с точностью измерений  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ .

**Обсуждение результатов исследований.** Изучено около 200 расплавных включений. Полученные данные по химическому составу стекол расплавных включений представлены в табл. 2, 3 и на рис. 1. Для каждого образца, химический состав которого имеется в табл. 1, 2 приведен сред-

ний состав расплава, из которого кристаллизовались вкрапленники. Эти аналитические данные показывают, что в большинстве случаев расплавные включения имеют дацитовый или риолитовый состав. Лишь в базальтах и андезибазальтах вулкана Карымский встречены расплавы базальтового и андезибазальтового состава, геохимические особенности которых отличаются от аналогичных характеристик более кислых расплавов, также обнаруженных в породах этого вулкана. Это свидетельствует об участии процесса кристаллизационной дифференциации основных магматических расплавов в формировании изученных пород.

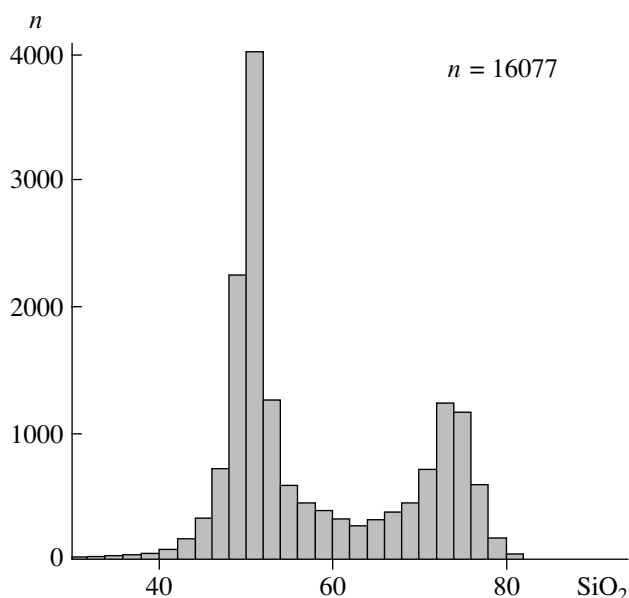


**Рис. 1.** Составы расплавных включений (поля), средние значения составов расплавных включений (кружки) и средние значения составов пород (квадраты) вулканов Карымский (1), Безымянный (2), Шивелуч (3).

Кроме того, впервые установлено широкое разнообразие состава расплавных включений в одних и тех же вкрапленниках плагиоклаза из андезитов вулкана Безымянный (табл. 3). Содержание SiO<sub>2</sub> варьирует от 56 до 81 мас. %, в то же время содержание MgO уменьшается от 5.2 до 0.1 мас. %, а содержание FeO – от 7.2 до 1.4 мас. %.

Это, безусловно, свидетельствует об очень сложной истории кристаллизации этих вкрапленников и, соответственно, расплавов, приведших к формированию андезитов вулкана Безымянный.

На рис. 1 представлены результаты анализа гомогенизированных стекол расплавных включе-



**Рис. 2.** Гистограмма распределения содержаний  $\text{SiO}_2$  в гомогенных расплавных включениях и закалочных стеклах вулканических пород.

ний. Отчетливо видно, что в отличие от состава пород большинство составов расплавных включений попадает в поле дацитов и риолитов. Поля на этих рисунках отражают области составов расплавных включений, а квадратами отмечены средние значения составов пород. Такое соотношение составов пород и расплавов весьма обычно для андезитового магматизма [22, 23, 24, 38]. В работе Б.В.Наумова с соавторами [24] 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 даже риолитовых магматических расплавов. Андезиты

**Таблица 4.** Средний состав (мас. %) стекол расплавных включений в минералах андезитов, дацитов и риолитов

Компонент	Андезиты $n = 496$	Дациты и риолиты $n = 986$
$\text{SiO}_2$	72.12	73.28
$\text{TiO}_2$	0.36	0.14
$\text{Al}_2\text{O}_3$	13.23	13.32
$\text{FeO}$	2.05	1.12
$\text{MgO}$	0.48	0.10
$\text{CaO}$	2.02	0.72
$\text{Na}_2\text{O}$	3.51	3.91
$\text{K}_2\text{O}$	3.68	4.45
Сумма	97.45	97.04

в этом случае являются кумулятивными образованиями, основность которых есть результат смешения более кислых магматических расплавов и более основных вкрапленников.

Сравнительная редкость природных магматических расплавов, имеющих средний (андезитовый) состав, отчетливо показана на рис. 2, где представлена гистограмма распределения содержаний  $\text{SiO}_2$ , опубликованных к настоящему времени по расплавным включениям и закалочным стеклам во всех типах магматических пород. (Таких данных уже 16077). Наглядно видно бимодальное распределение: первый пик приходится на содержания  $\text{SiO}_2$ , равные 50–52 мас. %, а второй – на 72–74 мас. %. Такая закономерность была уже отмечена ранее [24] при количестве анализов 3465. Несмотря на трехкратное увеличение количества данных, тип распределения совершенно не изменился. Таким образом, наибольшей распространенностью в природе пользуются магматические расплавы основного и кислого составов.

Однако, следует отметить, что составы кислых магматических расплавов, из которых формируются андезиты, существенно отличаются от таковых, образующих дациты и риолиты. Из всех опубликованных анализов стекол расплавных включений в минералах андезитов были отобраны составы с содержанием  $\text{SiO}_2 > 65$  мас. % (около 90% всех анализов) и рассчитан их средний состав. Таких анализов уже 496, их средний состав приведен в табл. 4. Достаточно представительны данные по расплавным включениям в минералах дацитов и риолитов – их 986. Сравнение приведенных в табл. 4 средних составов стекол показывает, что при близких содержаниях  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в обеих группах, в кислых магматических расплавах, образующих андезиты, значительно выше содержания  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$ , но ниже содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ . Скорее всего, это свидетельствует о связи таких расплавов с более основными, обогащенными  $\text{Ti}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Mg}$  и  $\text{Ca}$ , возможно, базальтовыми расплавами [1].

Почти на всех изученных вулканах были обнаружены расплавы с очень высоким содержанием  $\text{K}_2\text{O}$  – от 3.8 мас.% до 6.5–6.8 мас. % (дацитовые расплавы вулканов Безымянный и Шивелуч) (табл. 5). Наличие высококалиевых расплавов на многих объектах, вероятно, свидетельствует об участии в процессе генерации магматических расплавов Камчатского региона компонента, селективно обогащенного калием. Содержания  $\text{H}_2\text{O}$  и редких элементов в гомогенных стеклах расплавных включений в плагиоклазах 4-х вулканов Камчатского региона представлены в табл. 6, [33]. Максимальные концентрации  $\text{H}_2\text{O}$  установлены в расплавах вулканов Шивелуч (от 3.0 до 7.2 мас. % при среднем значении 4.7 мас. %) и Авачинский



**Таблица 5.** Химический состав (мас. %) стекол расплавных включений с высоким содержанием  $K_2O$  в плагиоклазах вулканических пород Курило-Камчатского региона

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	Сумма	An
Вулкан Авачинский												
68.72	0.20	16.22	1.64	0.09	0.30	4.02	2.70	5.71	0.07	0.08	99.75	57
Вулкан Безымянный												
55.87	0.16	19.44	3.02	0.14	5.17	7.13	3.23	5.73	–	0.01	99.90	51
56.30	0.58	17.76	4.97	0.08	1.73	6.45	4.56	4.90	0.28	0.06	97.77	70
63.84	0.41	16.22	3.60	0.18	2.23	4.68	4.44	4.22	0.25	0.03	100.10	58
64.80	0.28	16.85	2.51	0.06	1.74	4.01	3.37	5.77	0.08	0.00	99.47	65
65.67	0.23	15.78	1.48	0.05	0.24	3.98	3.96	5.43	0.12	0.13	97.07	60
66.07	0.26	17.49	2.59	0.01	0.36	4.72	5.23	5.24	0.10	0.00	102.08	60
71.78	0.36	13.48	1.09	0.17	1.42	3.29	6.65	0.03	0.00	0.00	98.31	53
75.11	0.56	11.02	1.52	0.04	0.19	0.85	2.94	4.39	0.10	0.00	96.72	53
Вулкан Карымский												
55.44	0.86	17.67	5.45	0.09	3.72	8.15	2.64	5.95	0.11	0.01	100.09	82
Вулкан Шивелуч												
66.93	0.32	12.96	2.03	0.07	1.00	1.54	4.81	4.07	–	0.14	93.87	37
69.48	0.26	12.70	0.96	0.04	0.28	1.04	5.26	4.35	–	0.17	94.54	34
71.03	0.17	14.59	1.34	0.04	0.23	1.72	2.77	6.47	–	–	98.36	43
71.08	0.44	11.37	2.23	0.00	0.15	0.81	5.11	4.54	0.09	0.34	96.16	40
71.40	0.24	13.02	1.01	0.06	0.31	1.00	4.16	4.04	–	0.17	95.41	–
71.58	0.17	12.08	0.97	0.04	0.27	0.84	4.18	4.43	–	0.16	94.72	–
73.19	0.31	11.70	1.24	0.05	0.30	1.05	4.99	4.06	–	0.15	97.04	36
73.41	0.36	11.87	1.96	0.03	0.93	0.62	5.77	4.15	0.03	0.10	99.23	–
74.20	0.35	12.17	1.14	0.05	0.30	0.73	5.02	4.15	–	0.17	98.28	38
74.36	0.25	13.23	1.43	0.02	0.91	1.24	3.32	4.31	–	0.09	99.16	–

(4.7 – 4.8 мас. %), более низкие концентрации – в расплавах вулканов Дикий Гребень (0.4 – 1.8 мас. %) и Безымянный (<1 мас. %)[33]. Концентрации хлора в расплавах также различны: минимальные значения определены в расплавных включениях в минералах вулкана Безымянный (в среднем 0.09 мас. %), максимальные значения – в расплавных включениях в минералах андезитов вулкана Карымский (в среднем 0.26 мас. %). Промежуточные значения концентраций хлора в расплавах (0.13 – 0.20 мас. %) установлены для вулканов Авачинский, Дикий Гребень, и Шивелуч. Что касается  $CO_2$ , то во вкрапленниках плагиоклаза вулкана Шивелуч обнаружены флюидные включения, которые по температуре плавления ( $-56.7^\circ C$ ) и температуре гомогенизации (от  $+8.0$  до  $+31.0$  в газовую фазу) определяются как включения чистой углекислоты с плотностью

0.13–0.45 г/см<sup>3</sup>. Расчет давления при температуре 1000–1100°C дает значения 350–1600 бар, что может соответствовать глубине магматической камеры 1.5–6.0 км.

Геохимические особенности исследованных расплавных включений представлены в виде спайдер-диаграммы (рис. 3), на которой составы базальтовых и риолитовых расплавов нормализованы к примитивному мантийному веществу по [38]. Анализ этой диаграммы приводит к следующим заключениям. Графики составов андезитов вулкана Безымянного, а также расплавных включений риолитов из плагиоклазов андезитов вулканов Шивелуча и Безымянного практически повторяют друг друга, что может свидетельствовать об одном мантийном источнике. Базальтовые микрорасплавы Ключевского вулкана обеднены легкими лантаноидами, Ba, Th, Nb, В и обогащены Ti и тяжелы-

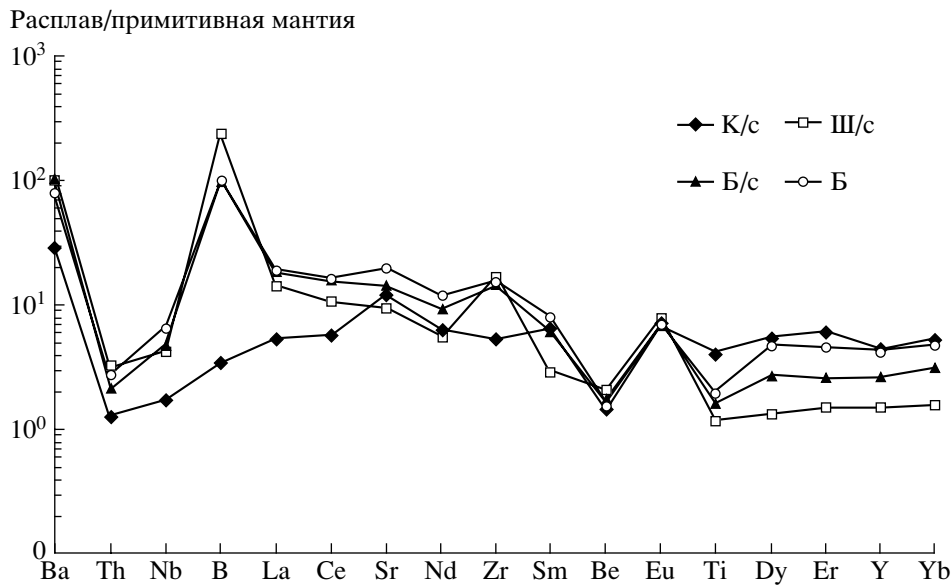
**Таблица 6.** Содержания петрогенных, летучих (мас. %) и редких (ppm) элементов в гомогенных стеклах расплавных включений в плагиоклазах вулканических пород Камчатки

Компо- нент	Авачинский		Безымянный			Шивелуч			
	96002*	96002	1985	1987	1990	Ш-1993а	Ш-1993а	Ш-1993а	Ш-1993а
SiO <sub>2</sub>	70.90	72.21	62.60	70.23	77.22	73.57	73.19	70.81	71.40
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.27	0.61	0.48	0.30	0.28	0.31	0.31	0.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.06	11.93	16.72	13.60	11.48	12.18	11.70	12.01	13.02
FeO	1.79	1.97	5.69	2.69	2.22	1.23	1.24	1.12	1.01
MnO	0.24	0.16	0.12	0.04	0.08	0.08	0.05	0.03	0.06
MgO	0.41	0.42	1.71	0.82	0.63	0.84	1.05	1.24	1.00
CaO	2.27	2.31	5.20	3.15	1.44	4.28	4.99	4.93	4.16
Na <sub>2</sub> O	3.76	3.79	3.74	3.59	3.67	3.96	4.06	3.97	4.04
K <sub>2</sub> O	1.71	1.67	2.11	3.29	3.09	0.16	0.15	0.14	0.17
Cl	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14				
H <sub>2</sub> O	4.79	4.74	–	0.10	–				
Сумма	98.07	99.61	98.81	98.22	100.38	100.74	101.15	100.34	100.06
Li	20.3	21.0	35.9	31.6	40.1	40.8	44.2	84.3	44.1
B	57.8	65.4	29.2	25.3	34.8	84.6	67.3	62.6	93.4
Be	1.12	0.90	1.03	1.26	1.18	1.46	1.09	1.38	1.50
Zr	54.4	102	165	128	166	226	203	171	107
Y	7.44	14.9	17.8	12.0	9.70	11.7	5.91	5.41	3.29
Nb	1.51	1.87	4.22	2.66	3.56	3.67	3.00	3.14	2.30
Th	0.84	1.08	2.11	1.43	1.94	2.54	2.06	2.58	2.70
Sr	314	331	390	363	199	83.5	103	140	317
Ba	526	525	541	544	796	673	638	711	548
La	7.76	6.90	12.0	9.40	14.0	10.1	9.25	10.0	6.06
Ce	15.4	16.5	26.7	20.2	31.3	21.7	18.6	19.7	11.0
Nd	7.00	9.20	14.4	10.6	12.0	9.60	6.75	7.27	4.49
Sm	1.31	2.19	3.19	2.36	2.34	1.92	1.09	1.22	0.59
Eu	0.42	0.65	0.76	0.74	0.81	<2	<2	<2	<2
Dy	0.96	2.29	3.05	2.02	1.45	1.38	0.79	1.10	0.60
Er	0.89	1.65	1.91	1.20	0.98	0.94	0.58	0.68	0.47
Yb	0.83	1.62	2.01	1.42	1.18	0.94	0.65	0.78	0.43
An**	50	49	67	57	53	39	49	48	46

Примечание: \* – номер образца; \*\* – анортит.

ми РЗЭ по сравнению с таковыми вулканов Шивелуч и Безымянный. Базальтовые и риолитовые расплавы характеризуются всеми особенностями, типичными для островодужных магм: отрицательными аномалиями в содержаниях высокозарядных элементов Nb, Ti и отчетливыми положительными аномалиями в содержаниях крупноионных элементов – Ba, Sr.

К сожалению, найти однозначный ответ на вопросы о генезисе расплавов для большинства объектов не представляется возможным, поскольку расплавные включения среднего и кислого состава есть результат многофакторного сложного процесса. Многие диагностические признаки тут неприменимы. Например, известный критерий определения степени участия в формировании пород мантийного



**Рис. 3** Спайдер-диаграммы составов расплавных включений в минералах андезитов и базальтов вулканов Шивелуч, Безымянный и Ключевской. К/с – средний состав расплавных включений из оливинов магнезиальных базальтов вулкана Ключевской (13 анализов); Ш/с – средний состав расплавных включений из плагиоклазов андезитов вулкана Шивелуч (7 анализов); Б/с – средний состав расплавных включений из плагиоклазов андезитов вулкана Безымянный (3 анализа); Б – состав андезита вулкана Безымянный.

и корового материала, использующий соотношения  $Ti/Sr$  и  $Sr/Y$ , едва ли применим к расплавным включениям в минералах андезитов, так как содержания  $Sr$  зависят уже не столько от состава источника, сколько от фракционирования плагиоклаза. Если же опираться на  $La/Yb$  отношение, то в диапазон 5–15 [9], характерный для продуктов плавления неметасоматизированного мантийного клина, попадают все расплавные включения, кроме одного включения на вулкане Шивелуч ( $La/Yb = 30$ ). В то же время выявленный для большинства расплавных включений дефицит тяжелых РЗЭ характерен именно для корового материала.

Что касается эволюции расплавов, то правомерно сравнить геохимию расплавов вулканов Ключевской и Безымянный, поскольку географическая близость этих вулканов позволяет предполагать общий глубинный очаг. На графике эти кривые довольно близки, причем более примитивными (ранними?) можно считать расплавы вулкана Ключевской, а расплавы вулкана Безымянный – более поздними дифференциатами.

**Выводы.** 1. Изучено около 200 расплавных включений в минералах из 25 образцов вулканических пород Камчатки (вулканы Авачинский, Безымянный, Дикий Гребень, Карымский, и Шивелуч). Установлено, что составы расплавных включений во вкрапленниках андезитов сильно варьируют по основности: содержания  $SiO_2$  меняются от 56 до 80 мас.%, причем с ростом кремнезема закономерно уменьшаются содержания

$Al_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$  и увеличиваются содержания  $Na_2O$  и  $K_2O$ . При этом большая часть (~80%) стеклов включений имеет дацитовый и риолитовый состав.

2. Преобладание дацитовых и риолитовых расплавных включений в минералах андезитов вулканов Шивелуч и Безымянный, возможно, свидетельствует о существовании зональности в коровом магматическом очаге и о кристаллизации некоторых минералов в верхней, кислой части дифференцированного очага.

3. Данные, полученные при изучении расплавных включений в минералах андезитов и базальтов извержения 1996 года Карымского центра, показали, что магмы, участвовавшие в этом извержении отличаются от расплавов вулканов Безымянный, Шивелуч и Авачинский. Главная их особенность – фактическое соответствие состава расплавных включений валовому составу пород.

4. В большинстве изученных образцов были обнаружены высококалийевые расплавы ( $K_2O = 3.8–6.8$  мас. %) независимо от содержаний в этих расплавах  $SiO_2$  (диапазон от 51.4 до 77.2 мас. %), что свидетельствует об участии в процессе генерации магматических расплавов всего региона компонента, селективно обогащенного калием.

5. Впервые установленное широкое разнообразие состава расплавных включений в одних и тех же вкрапленниках плагиоклаза из андезитов вулкана Безымянный свидетельствует о сложной

истории кристаллизации этих вкрапленников и, соответственно, эволюции расплавов, приведших к формированию андезитов.

6. По содержаниям летучих компонентов расплавы разных вулканов отличаются. Максимальные концентрации  $H_2O$  установлены в расплавах вулканов Шивелуч (от 3.0 до 7.2 мас. %) при среднем значении 4.7 мас. %) и Авачинский (4.7–4.8 мас. %), более низкие концентрации – в расплавах вулканов Дикий Гребень (0.4–1.8 мас. %) и Безымянный (<1 мас. %). По флюидным включениям  $CO_2$  в плагиоклазах андезитов вулкана Шивелуч определено давление, равное 350–1600 бар, что соответствует глубине магматической камеры 1.5–6 км.

7. Определены концентрации 17 элементов-примесей в стеклах расплавных включений в плагиоклазах 4-х вулканов (Авачинский, Безымянный, Дикий Гребень и Шивелуч). По характеру распределения содержаний этих элементов изученные расплавы близки типичным магмам островных дуг, различаясь между собой вследствие региональных геохимических особенностей. Кривые распределения редкоземельных элементов свидетельствуют о различной степени дифференцированности расплавов: на вулкане Шивелуч они наиболее дифференцированы.

8. Полученные данные по редкоземельным элементам и летучим компонентам расплавных включений не противоречат петрологическим свидетельствам связи кислых магм зонального очага с основными магмами, существующими в нижних горизонтах тех же очагов.

Процесс смешения основных магм с кислыми магмами верхних горизонтов корового очага по существующим представлениям приводит к активизации очага и является спусковым механизмом сильных катастрофических извержений на андезитовых вулканах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 04-05-65123, 00-05-7200, 03-05-64629, 03-05-65007, 00-15-98560); Гос. контракт № 10002-251(П-13)182-405/080604-473 от 8.06.2004 г.

Авторы благодарны Н. В. Горбач за помощь в подготовке электронной версии рисунков и И.Л. Ототюк за техническое оформление рукописи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабанский А.Д., Соловова И.П., Рябчиков И.Д., Богатииков О.А. Исходные магмы щелочно-земельных серий по данным изучения расплавных микровключений // Докл. АН СССР. 1980. Т. 253. № 4. С. 945–947.
2. Бакуменко И.Т., Косухин О.Н. Вода во включениях силикатных расплавов кислого состава // Докл. АН СССР. 1977. Т. 234. № 1. С. 164–167.
3. Бакуменко И.Т., Соболев В.С. Включения в минералах гипербазитовых ксенолитов Авачинского вулкана // Докл. АН СССР. 1974. Т. 218. № 6. С. 1430–1433.
4. Бакуменко И.Т., Попова Н.М., Красов Н.Ф., Шугурова Н.А. Изучение процессов вулканизма по включениям // Генетические исследования в минералогии. Новосибирск. 1976. С. 75–85.
5. Бакуменко И.Т., Шугурова Н.А., Эрлих Э.Н., Попова Н.М. Генезис кварца из пемз вулкана Хангар // Докл. АН СССР. 1970. Т. 191. № 3. С. 660–663.
6. Биндеман И.Н. Петрология вулкана Дикий Гребень (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 33–55.
7. Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др. Катастрофические извержения типа направленных взрывов на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный и Шивелуч // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 3–29.
8. Брайцева О.А., Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Крупнейшие голоценовые извержения вулкана Авачинский на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 3–24.
9. Вольнец О.Н., Пономарева В.В., Бабанский А.Д. Изотопные и геохимические вариации в лавах вулканов Северной группы (Камчатка) в связи с особенностями процесса субдукции. // Геохимия 2000. № 10. С. 1–17.
10. Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения. М.: Наука, 1965. 171 с.
11. Гриб Е.Н. Петрология продуктов извержения 2–3 января 1996 г. в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 71–97.
12. Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 1. 302 с. Т. 2. 415 с.
13. Иванов Б.В. Типы андезитового вулканизма Тихоокеанского подвижного пояса. М.: Наука. 1990. 212 с.
14. Ильин А.Г., Красов Н.Ф. Температурные условия кристаллизации вкрапленников плагиоклаза в лавах Карымского вулкана, различающихся по степени газонасыщенности // Термобарогеохимия и генетическая минералогия. Новосибирск: 1975. С. 37–46.
15. Кадик А.А., Максимов А.П., Иванов Б.В. Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов. М.: Наука, 1986. 158 с.
16. Красов Н.Ф. О кристаллизации лав андезитовой формации Камчатки по данным исследования расплавных включений в минералах // Термобарогеохимия земной коры и рудообразование. М.: Наука, 1978. С. 68–72.

17. Красов Н.Ф., Клоккъятти Р. Ликвация силикатного расплава и ее возможная петрогенетическая роль по данным изучения расплавных включений // Докл. АН СССР. 1979. Т. 248. № 1. С. 201–204.
18. Масуренков Ю.П., Егорова И.А., Пузанков М.Ю. и др. Вулкан Авачинский // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 246–273.
19. Мелекесцев И.В., Литасова С.Н., Сулержицкий Л.Д. О возрасте и масштабе катастрофических извержений типа направленного взрыва вулкана Авачинский (Камчатка) в позднем плейстоцене // Вулканология и сейсмология. 1991. № 2. С. 3–11.
20. Миронов Н.Л., Портнягин М.В., Плечов П.Ю., Хубуная С.А. Заключительные этапы эволюции магм Ключевского вулкана (Камчатка) по данным изучения расплавных включений в минералах высокоглиноземистых базальтов // Петрология. 2000. № 5. С. 477–495.
21. Наумов Б.В. Термометрическое исследование включений расплава во вкрапленниках кварца кварцевых порфиров // Геохимия. 1969. № 4. С. 494–498.
22. Наумов Б.В., 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.
23. Наумов В.Б., Карпухина В.С., Баранов Э.Н., Кононкова Н.Н. Составы расплавов, содержания летучих компонентов и элементов-примесей, температуры кристаллизации кварца кислых вулканитов Верхнеуральского рудного района (Южный Урал) // Геохимия. 1999. № 4. С. 339–351.
24. 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.
25. Огородов Н.В., Вольнец О.Н., Колосков А.В. и др. Дикий Гребень // Бюл. вулканол. станций. 1978. № 54. С. 75–88.
26. Плечов П.Ю., Миронов Н.Л., Плечова А.А., Хубуная С.А. Особенности химического состава и образования расплавных включений в плагиоклазах потока Апахончич, влк. Ключевской (Камчатка) // Геохимия. 2000. № 1. С. 39–47.
27. Романчев Б.П., Флеров Г.Б. Температуры лав Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. (Камчатка) // Геохимия. 1980. № 5. С. 688–697.
28. Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 182 с.
29. 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 // Докл. РАН. 1998. Т. 359. № 5. С. 676–679.
30. Толстых М.Л., 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.
31. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Кононкова Н.Н. Состав магм, формировавших дациты вулкана Дикий Гребень (Южная Камчатка), по данным изучения расплавных включений // Геохимия. 2000. № 10. С. 1116–1124.
32. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Озеров А.Ю., Кононкова Н.Н. Состав магм извержения 1996 г. Карымского вулканического центра (Камчатка) по данным изучения расплавных включений // Геохимия. 2001. № 5. С. 498–509.
33. Толстых М.Л., Наумов В.Б., Бабанский А.Д. и др. Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов, формировавших андезиты Курило-Камчатского региона // Петрология. 2003. Т. 11. № 5. С. 451–470.
34. Федотов С.А. Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 3–38.
35. Хубуная С.А., Соболев А.В. Первичные расплавы известково-щелочных магнезиальных базальтов Ключевского вулкана (Камчатка) // Докл. РАН. 1998. Т. 360. № 1. С. 100–102.
36. Gill J. Orogenic andesites and plate tectonics. Berlin. Springer-Verlag. 1981. 390 p.
37. Hofmann P.F. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1988. V. 73.N3/4. P. 223–253.
38. Melson W.C. Monitoring the 1980–1982 eruption of Mount St. Helens: compositions and abundances of glass // Sciences. 1983. V. 221. N 4618. P. 1387–1391.
39. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its and evolution. Blackwell. 1985. 312 p.
40. Tolstykh M.L., Naumov V.B., Babanskii A.D. et al. Chemical composition, trace elements, and volatile components of melt inclusions in minerals from andesites of the Shiveluch volcano, Kamchatka // Geochemistry International. 2000. V. 38. B1. 1 p. S123-S132.

## Melt Compositions and Crystallization Environments for Xandesites of Avacha, Bezmyannyi, Shiveluch and Karymskii Volcanoes Based on Studies of Melt Inclusions

G. E. Bogoyavlenskaya<sup>1</sup>, V. B. Naurava<sup>2</sup>, H. L. Toietykh<sup>2</sup>,  
A. D. Babanskii<sup>3</sup>, S. A. Khubunayal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117975, Russia*

<sup>3</sup>*Institute of the Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017, Russia*

Studies of melt inclusions in minerals of some Kamchatka volcanoes are reported, we studied andesite basalts and andesites in volcanoes situated in the Central Kamchatka Depression (Shiveluch and Bezmyannyi) and in the East Kamchatka Volcanic Belt (Avacha and Karymskii). In addition, we studied the basalts, of the 1996 eruption in the Karymskii volcanic Center and the dacites on Dikiy Greben Volcano, southern Kamchatka. We used homogenization of melt inclusions and the analysis of chilled glass in these inclusions with electron and ion microlog sondes. More than 200 melt inclusions have been studied in minerals from 25 volcanic rock samples. It was found that the compositions of melt inclusions in andesite phenocrysts strongly vary in basicity; the content of SiO<sub>2</sub> varies between 56 and 80 wt. increasing silica percentage going along with decreasing concentrations of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO, CaO and increasing concentrations of Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O. Most (about 80%) of glass in the inclusions have dacite and rhyolite compositions. However, the compositions of acid melts (SiO<sub>2</sub> > 65 wt) which produce the andesites are significantly different from those which produce the dacites and rhyolites as to the content of TiO<sub>2</sub>, FeO, MgO, CaO and K<sub>2</sub>O. Comparison between the compositions of melt inclusions from andesite plagioclase on the four volcanoes showed considerable differences. The basic andesites (56–59% SiO<sub>2</sub>) of Bezmyannyi volcano exhibit a large scatter in inclusion composition (SiO<sub>2</sub> – 56–81%). The more acid andesites (SiO<sub>2</sub> = 61%) of Shiveluch Volcano show a lower scatter in inclusion composition (SiO<sub>2</sub> = 57–79%). The melt inclusions in the Karymskii andesites are more basic. They are enriched with Fe, Ti, Ca, Mg, F, Na and are considerably depleted in K. The melts that produce the Karymskii andesites are probably less differentiated. On the volcanoes under study we also found high-potassium melts (K<sub>2</sub>O – 3.8–6.6% wt), independent of the concentrations of SiO<sub>2</sub> in them (the range here is between 51.4 and 77.2% wt). The melts differ considerably between volcanoes as to the concentration of volatiles. The greatest concentrations of H<sub>2</sub>O are found in the Shiveluch melts (3.0 to 7.2% wt with the mean equal to 4.7% wt) and on Avacha (4.8–4.8% wt), lower concentrations being in the melts of Dikiy Greben (0.4–1.8% wt) and Bezmyannyi (<1% wt). Using fluid inclusions of CO<sub>2</sub> found in andesite plagioclase of Shiveluch volcano, we inferred a pressure of 350–1600 bars, which corresponds to the depth of the magma chamber equal to 1.5–6 Km. We found the concentrations of 17 admixture elements in glass of melt inclusions sampled from the plagioclase of four volcanoes (Avacha, Bezmyannyi, Dikiy Greben, Shiveluch). Judging by the concentrations of these elements, the melts here studied are similar to the typical island arc magmas.