

УДК 550.422

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ЛЕГУЧИЕ КОМПОНЕНТЫ И ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ РАСПЛАВОВ КАРЫМСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА (КАМЧАТКА) И ВУЛКАНА ГОЛОВНИНА (О. КУНАШИР) ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

© 2008 г. В. Б. Наумов*, М. Л. Толстых*, Е. Н. Гриб*, В. Л. Леонов**, Н. Н. Кононкова*

* Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

119991 Москва, ул. Косыгина, 19, Россия;

e-mail: naumov@geokhi.ru

** Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9, Россия;

e-mail: gen@kscnet.ru

Поступила в редакцию 01.10.2006 г.

Исследованы расплавные включения во вкрапленниках базальта, андезитов, дацитов и риодацитов Карымского вулканического центра (Камчатка) и дацитов вулкана Головнина (о. Кунашир, Курильские острова). Используются методы гомогенизации включений и анализ стекол более 80 включений с помощью электронного и ионного микрозонда. Содержания SiO_2 в расплавных включениях во вкрапленниках плагиоклаза из базальта Карымского вулканического центра изменяются от 47.4 до 57.1 мас. %, во вкрапленниках плагиоклаза из андезитов – от 55.7 до 67.1 мас. %, во вкрапленниках плагиоклаза из дацитов и риодацитов – от 65.9 до 73.1 мас. % и во вкрапленниках кварца из риодацитов – от 72.2 до 75.7 мас. %. Содержания SiO_2 в расплавных включениях в кварце из дацитов вулкана Головнина варьируют от 70.2 до 77.0 мас. %. Базальтовые расплавы характеризуются обычными содержаниями (в мас. %) TiO_2 (0.7–1.3), FeO (6.8–11.4), MgO (2.3–6.1), CaO (6.7–10.8) и K_2O (0.4–1.7), но значительно обогащены Na_2O (2.9–7.4 мас. % при среднем 5.1 мас. %), причем самые высокие содержания Na_2O установлены в наиболее основных расплавах ($\text{SiO}_2 = 47.4\text{--}52.0$ мас. %). Концентрации летучих в базальтовых расплавах составили 1.6 мас. % H_2O , 0.14 мас. % S, 0.09 мас. % Cl и 50 ppm F. Для андезитовых расплавов характерны высокие содержания (в мас. %) FeO (в среднем 6.5), CaO (5.2), Cl (0.26) и обычные содержания Na_2O (4.5), K_2O (2.1), S (0.07). Высокие концентрации воды определены в дацитовых и риодацитовых расплавах – от 0.9 до 7.3 мас. % (среднее 4.5 мас. % из 15 определений). Содержание Cl в этих расплавах составляло 0.15 мас. %, F – 0.06 мас. % и S – 0.01 мас. %. В расплавных включениях в кварце из дацитов вулкана Головнина содержания воды также очень высокие – от 5.0 до 6.7 мас. % (среднее 5.6 мас. %). Сравнение составов расплавов Карымского вулканического центра с ранее изученными нами расплавами вулканов Безымянный и Шивелуч показало существенное их различие. Первые, более основные, обогащены Ti, Fe, Mg, Ca, Na, P, но значительно беднее калием. Скорее всего, расплавы Карымского вулканического центра являются менее дифференцированными по сравнению с расплавами вулканов Безымянный и Шивелуч. Концентрации воды и 20 элементов-примесей были измерены в стеклах 22 расплавных включений в плагиоклазе и кварце изученных образцов. Необычным явилось очень высокое содержание Li (наряду с высоким содержанием Na) в базальтовых расплавах Карымского вулканического центра – от 118 до 1750 ppm, тогда как в дацитовых и риолитовых расплавах содержание Li в среднем равно 25 ppm. Для риолитовых расплавов вулкана Головнина содержание Li значительно ниже – в среднем 1.4 ppm. Расплавы Карымского вулканического центра характеризуются относительными минимумами по Nb и Ti и максимумами по Ba, K, что типично для магм островных дуг.

Карымский вулканический центр расположен на юго-западном фланге центрального участка Восточного вулканического пояса Камчатки. Он имеет размеры 55 × 65 км и несколько вытянут в северо-восточном направлении вдоль вулканического пояса. Карымский вулканический центр представляет собой сложное образование (рис. 1), состоящее из множества вулканических построек

дифференцированного состава и ряда кальдерных структур, динамически развивающихся во времени начиная с плиоцена (Влодавец, 1947; Иванов, 1970; Гриб, 1997; Озеров, 1997; Федотов, 1997 и др.). Процесс кальдерообразования (кальдеры Стена, Соболиная, Половинка) начался в среднем плейстоцене 180–150 тыс. лет назад (Вулканический центр..., 1980) и сопровождался

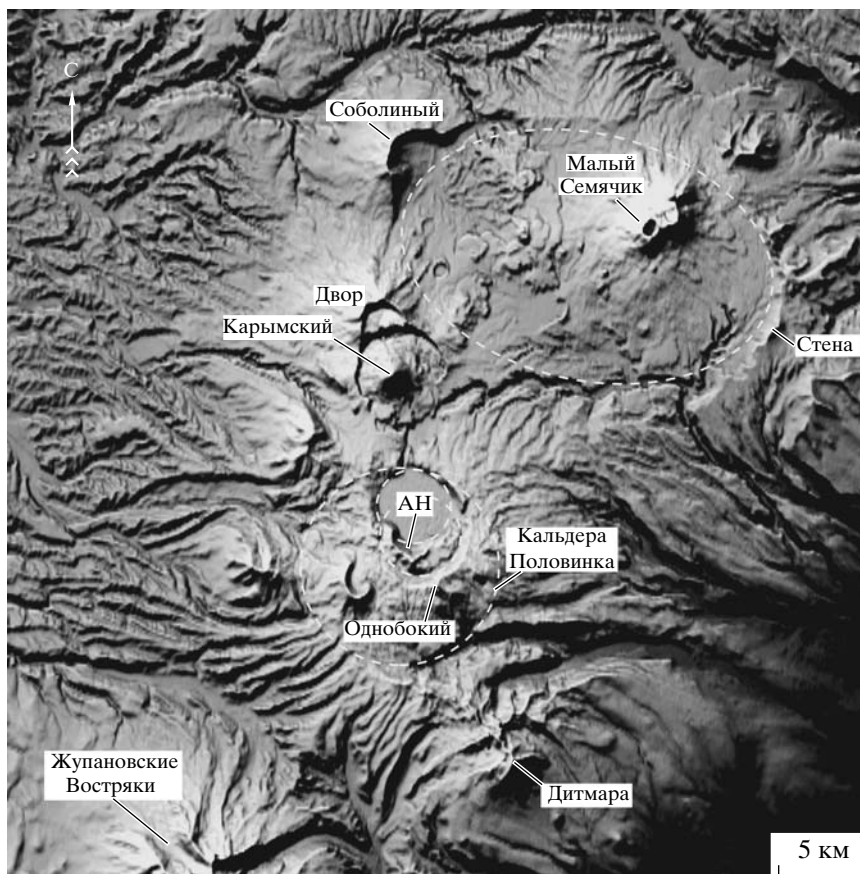


Рис. 1. Космический снимок центральной части Карымского вулканического центра.

Пунктирными линиями обозначены кальдеры, АН – вулкан и кальдера Академии Наук (кальдера заполнена оз. Карымское). На севере расположена сложная система кальдер Стена–Соболиная, которая очерчена общим овалом.

мощными извержениями пирокластики среднего и кислого состава объемом $\sim 280 \text{ км}^3$ или, в пересчете на магму, около 100 км^3 (Гриб, Леонов, 2001а, 2001б). После формирования среднеплейстоценовых кальдер вулканизм сосредоточился исключительно внутри них. В этот период, в начале позднего плейстоцена, формируются такие вулканы, как Однобокий, Двор, Пра-Семячик, Пра-Карымский. Состав лав, слагающих их, преимущественно базальтовый, андезитобазальтовый, андезитовый. Объем материала этого периода оценивается в 80 км^3 (Вулканический центр..., 1980). На некоторых вулканах позже формируются новые кальдеры (Однобокая, Малый Семячик), а в позднем плейстоцене внутри этих кальдер возникают новые вулканы (Академии Наук, Малый Семячик), а затем – снова кальдеры (Академии Наук, Карымская). Вулканизм в позднем плейстоцене–голоцене отличался большим разнообразием составов продуктов и их фациальных типов.

Множество статей посвящено геологическому строению, тектонике, динамике извержений, пет-

рографии изверженных пород и их возможной генетической связи. Однако пока еще очень мало данных о химическом составе, летучих компонентах и редких элементах магматических расплавов, формировавших породы Карымского вулканического центра. Без этих данных невозможно в полной мере рассматривать как генезис конкретных пород, так и общие вопросы магматической истории региона. В связи с этим цель настоящей работы заключалась в детальном изучении расплавных включений в минералах различных по составу пород (от базальтов до риодацитов) для выяснения химического состава магматических расплавов и возможности генетической связи различных по основности пород. Первые данные этих исследований были опубликованы ранее (Tolstykh et al., 2001). Для сравнения полученных результатов по химическому составу расплавов Карымского вулканического центра мы изучили также расплавные включения в кристаллах кварца из дацитов вулкана Головнина (о. Кунашир).

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-
ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
КАРЫМСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО
ЦЕНТРА

Карымский вулканический центр привлек к себе особое внимание после извержений, произошедших в нем в 1996 г. Особенностью этих извержений было то, что они произошли одновременно в двух местах и на поверхность поступили расплавы как среднего, так и основного состава. Процесс извержения можно разделить на 3 этапа. В течение первого этапа (2–3 января 1996 г.) происходило извержение из двух вулканических центров, находящихся на расстоянии 6 км друг от друга: из вершинного кратера вулкана Карымский и в северном секторе озера Карымского, представляющего собой кальдеру Академии Наук (Федотов, 1997). Из главного кратера наблюдался непрерывный подъем газопеплового столба на высоту от 500 до 1200 м. От поднимающейся колонны на юг простирался темный шлейф длиной до 50–70 км, из которого постоянно происходило выпадение тефры. В это же время в Карымском озере происходило подводное извержение базальтов из эруптивного центра, расположенного в 500 м от берега (Гриб, 1997). Мощные дискретные фреатомагматические взрывы следовали друг за другом с интервалом 10–15 мин, парогазовые выбросы с примесью пепла поднимались на высоту нескольких километров. При наиболее сильных взрывах происходил выброс большого количества бомб, а на поверхности озера наблю-

дались волны, достигающие высоты 10 м. Во время первого этапа извержения в Карымском озере сформировался полуостров Новогодний площадью 0.7 км².

Второй этап извержения (4–12 января 1996 г.) характеризовался эруптивной деятельностью только из вершинного кратера вулкана Карымский, при этом частота взрывов значительно уменьшилась. Высота выбросов составляла 500–900 м, пепловые шлейфы тянулись на 50–60 км, главным образом в западном и восточном направлениях. В течение третьего этапа (с 13 января 1996 г. и по настоящее время) из главного кратера Карымского вулкана происходило последовательное излияние серии лавовых потоков. Длина самого мощного из них достигала 1.5 км, а высота фронтальной части – 25 м. Излияние лав сопровождалось эксплозиями. Парогазовые выбросы, нагруженные пеплом, поднимались на высоту от 100 до 500–600 м, формируя эруптивные облака. При наиболее сильных эксплозиях (250 м и более) в их нижней части постоянно наблюдались раскаленные бомбы размером 1–2 м, значительно реже – до 4–5 м (Озеров, 1997).

Изучены 3 образца продуктов извержения 1996–1997 гг., состав которых приведен в табл. 1. Первый образец (К-2) – базальтовая вулканическая бомба с полуострова Новогодний представляет собой черную пористую стекловатую породу с большим количеством фенокристаллов плагиоклаза размером от 0.3 до 3 мм. Состав вкрапленников варьирует от An_{94-80} в централь-

Таблица 1. Химический состав (мас. %) пород и стекол основной массы из пород Карымского вулканического центра

Компоненты	К-2	К-4	К-63	К-41	К-35	К-31	К-23	К-2а	К-4а	К-63а
SiO ₂	52.00	62.45	62.05	64.80	65.41	66.32	69.00	66.59	74.80	75.28
TiO ₂	0.73	0.92	0.88	0.72	0.56	0.38	0.43	0.50	1.06	0.83
Al ₂ O ₃	19.21	16.27	16.60	16.00	16.39	14.99	14.35	19.52	12.62	12.46
Fe ₂ O ₃	–	–	–	1.79	2.77	1.19	1.26	–	–	–
FeO	8.30*	6.58*	6.95*	3.45	2.27	2.27	1.94	1.78*	3.59*	3.14*
MnO	0.14	0.15	0.12	0.18	0.16	0.03	0.16	0.06	0.10	0.11
MgO	5.34	2.01	2.00	1.62	0.90	0.94	0.94	0.23	0.18	0.49
CaO	10.47	5.38	5.39	3.90	4.41	3.28	1.76	4.65	0.92	0.94
Na ₂ O	2.80	4.52	4.08	3.72	4.12	3.91	3.66	5.76	1.88	1.77
K ₂ O	0.58	1.57	1.58	1.86	1.48	1.98	2.46	1.64	3.50	3.44
P ₂ O ₅	0.14	0.26	0.25	0.03	0.19	0.09	0.06	–	–	–
П.п.п.	–	–	–	2.40	1.48	4.10	3.80	–	–	–
Сумма	99.71	100.11	99.90	100.47	100.14	99.48	99.82	100.73	98.65	98.46

Примечание. Здесь и в табл. 2–5: К-2 – базальт извержения 1996 г., полуостров Новогодний, кальдера Академии Наук; К-4, К-63 – андезиты лавовых потоков извержений 1996 и 1997 гг. из вершинного кратера Карымского вулкана; К-41 – дацит, восточный борт кальдеры Однобокая; К-35 – спекшийся туф дацитового состава, западный борт кальдеры Половинка; К-31 – пемза дацитового состава, левый борт р. Карымская, восточный борт кальдеры Карымская; К-23 – пемза риодацитового состава, восточный склон вулкана Академии Наук; К-2а, К-4а, К-63а – стекла основной массы образцов. * – железо общее.

Таблица 2. Представительные анализы (мас. %) плагиоклазов из пород Карымского вулканического центра

Компоненты	К-41	К-2	К-2	К-4	К-63	К-41	К-41	К-31	К-23	К-35
SiO ₂	45.00	44.79	47.64	47.58	52.85	53.39	57.66	58.26	60.40	62.15
Al ₂ O ₃	33.02	34.35	33.66	31.65	30.47	28.03	24.99	24.74	23.54	21.59
FeO	0.55	0.62	0.59	0.75	0.66	0.40	0.35	0.44	0.33	0.07
CaO	19.29	18.09	17.10	17.41	14.51	13.13	9.92	9.65	7.36	5.31
Na ₂ O	0.82	0.99	1.56	2.65	3.36	4.25	6.15	5.83	7.42	8.22
K ₂ O	0.01	0.03	0.01	0.08	0.11	0.10	0.20	0.25	0.36	0.93
Сумма	98.69	98.87	100.56	100.12	98.04	99.30	99.27	99.17	99.41	98.27
An	92.7	90.8	85.8	78.1	70.0	62.7	46.6	47.1	34.7	24.5
Ab	7.2	9.0	14.1	21.5	29.4	36.7	52.3	51.5	63.3	69.9
Or	0.1	0.2	0.1	0.4	0.6	0.6	1.1	1.4	2.0	5.2

Таблица 3. Представительные анализы (мас. %) пироксенов из пород Карымского вулканического центра

Компоненты	К-2	К-63	К-63	К-4	К-41	К-41	К-35	К-35	К-23	К-31
SiO ₂	53.58	52.35	52.08	50.76	53.63	52.53	51.97	52.97	53.12	52.48
TiO ₂	0.49	0.34	0.53	0.63	0.21	0.16	0.10	0.13	0.10	0.26
Al ₂ O ₃	1.33	1.11	1.54	1.88	1.26	0.87	0.35	0.74	0.40	0.89
FeO	19.55	20.37	10.94	10.40	19.41	11.63	21.39	8.96	22.95	10.62
MnO	0.44	0.71	0.49	0.49	0.59	0.44	1.49	0.58	1.48	0.40
MgO	20.80	23.24	14.75	13.89	23.74	13.63	22.92	14.11	21.30	13.83
CaO	2.24	1.92	19.78	20.98	1.69	20.36	1.11	21.88	1.02	20.44
Na ₂ O	0.13	0.00	0.35	0.31	0.00	0.20	0.00	0.15	0.00	0.29
Сумма	98.56	100.04	100.46	99.34	100.53	99.82	99.33	99.52	100.37	99.21
Fs	32.9	31.7	17.5	16.8	30.4	18.8	33.6	14.4	36.9	17.3
En	62.3	64.5	42.0	39.9	66.2	39.2	64.2	40.5	61.0	40.1
Wo	4.8	3.8	40.5	43.3	3.4	42.0	2.2	45.1	2.1	42.6

ных частях до An_{75-62} в краевых зонах. Составы плагиоклазов, насыщенных расплавыми включениями, представлены в табл. 2. Оливин (Fo_{83-72}) и пироксен (орто- и клинопироксены, табл. 3) встречаются реже. Акцессорные минералы базальта – апатит и рудный минерал. Первый встречается лишь в виде кристаллических включений, а второй – в виде кристаллических включений и микролитов (табл. 4).

Два других образца (К-4 и К-63, табл. 1–4) – андезиты лавовых потоков из вершинного кратера Карымского вулкана отобраны в горячем состоянии 22.09.1996 и 19.08.1997 соответственно. Они представляют собой слабопористые породы темно-серого цвета с количеством вкрапленников 30–35 об. %. 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_{85} до An_{52} . Темноцветные минералы представлены орто- и клинопироксеном, оливин редок и находится в реакционных взаимоотношениях с пироксенами. Основная масса сложена стеклом, микролитами плагиоклаза, пироксена и рудного минерала.

Вулкан Карымский приурочен к центру одноименной кальдеры, которая образовалась в результате катастрофического эксплозивного извержения на вулкане Пра-Карымский 7600–7700 лет назад (Вулканический центр..., 1980). Пирокластические отложения, связанные с ее образованием, представлены пемзовыми туфами дацитового состава (обр. К-31, табл. 1–4). Пемзовые обломки бежевого цвета от псефитовой до

Таблица 4. Представительные анализы (мас. %) рудных минералов из пород Карымского вулканического центра

Компо- ненты	К-2	К-63	К-4	К-4	К-41	К-41	К-35	К-31	К-31	К-23
FeO	52.25	78.09	78.05	92.90	52.04	85.63	55.31	55.52	86.26	85.60
TiO ₂	40.13	11.80	12.87	3.17	43.61	10.15	40.72	40.52	9.25	8.89
Al ₂ O ₃	0.43	3.26	3.35	1.30	0.43	2.14	0.05	0.33	1.59	1.54
MnO	0.29	0.45	0.42	0.45	0.70	0.48	0.74	0.09	0.04	0.61
MgO	3.18	2.69	1.91	1.11	2.86	1.69	2.10	1.86	1.40	0.58
CaO	0.04	0.13	0.06	0.06	–	–	–	–	–	–
SiO ₂	0.03	0.18	0.06	0.19	–	–	–	–	–	–
Сумма	96.35	96.60	96.72	99.18	99.64	100.09	98.92	98.32	98.55	97.22

агломератовой размерности погружены в тонко-обломочный материал, образуя иногда слои, насыщенные пемзовыми лапилли.

Другие образцы, изученные в данной работе, представляют собой пирокластические отложения южного сектора Карымского вулканического центра, состоящего из трех телескопированно вложенных друг в друга кальдер. Наиболее древней является кальдера Половинка. Основной объем (около 42 км³) пирокластических отложений составляют спекшиеся пеплово-пемзовые туфы риодацитового и дацитового состава (обр. К-35, табл. 1–4). В дальнейшем внутри кальдеры Половинка сформировался вулкан Однобокий, лавы которого почти полностью заполнили ее. В истории развития вулкана отмечается два этапа катастрофических эксплозивных извержений, разделенных периодом эффузивной деятельности. В результате этих процессов 110–80 тыс. лет назад сформировалась кальдера Однобокая (Вулканический центр..., 1980; Гриб, Леонов, 2004а, 2004б). Пирокластические потоки сложены в основном пеплово-пемзовыми туфами и отличаются зональным строением, что выражается в изменении состава отложений от риодацитов в их основании до дацитов в верхней части. Пемзовые туфы (обр. К-41, табл. 1–4) состоят из угловатых пемзовых обломков псефитовой и агломератовой размерности, погруженных в более тонкообломочный материал. Пемзы плотные, тонкопористые, цвет бежевый, серый. Содержание кристаллической фазы варьирует в пределах 10–20 об. %.

В позднем плейстоцене у южной границы кальдеры Однобокая сформировался вулкан Академии Наук. Пирокластические отложения, связанные с эксплозивным извержением на вулкане, представлены агломератовыми пемзовыми туфами риодацитового состава (обр. К-23, табл. 1–4), которые перекрывают южные склоны вулкана. Туфы белого цвета, размер пемзовых обломков не превышает 5–10 см, пористость составляет 30–50%. Верхи разрезов перекрыты, что указывает на их отложение в озеро. По поводу

происхождения кальдеры Академии Наук в современном ее виде нет однозначного мнения, так как не обнаружены значительные объемы пирокластических отложений, связанных с ее образованием. Предполагается, что формирование кальдеры произошло в верхнем плейстоцене – нижнем голоцене в результате извержения базальтов в зоне субмеридионального разлома в северной части озера Карымского. Это извержение было подобно событию 1996 г. Инъекция базальтов в основание верхнекорового очага привела к мобилизации кислого расплава в нем и вызвала субсинхронное извержение на вулкане Академии Наук, его разрушение и обрушение бортов уже существовавшей до этого кальдеры Однобокая. При детальном изучении разрезов пирокластических отложений, связанных с кальдерами южного сектора Карымского вулканического центра, было обнаружено, что слои базальтовой тефры (иногда в ассоциации со слабо уплотненными базальтовыми туфами) встречаются в них довольно часто, начиная с конца среднего плейстоцена. Это свидетельствует о том, что события, подобные извержению 1996 г., происходили в этом районе и ранее (Гриб, Леонов, 2004а, 2004б). Базальтовая тефра позднплейстоценовых и голоценовых извержений образует террасы вдоль северного борта озера Карымского, заполняющего кальдеру Академии Наук.

Вкрапленники пирокластических отложений представлены плагиоклазом, орто- и клинопироксеном, рудными минералами, составы которых нередко отражают неравновесное состояние расплава в процессе кристаллизации. В начальных продуктах каждой кальдеры отмечена роговая обманка, а в наиболее ранних спекшихся туфах кальдеры Половинка – кварц и биотит. Отличительной особенностью пирокластических отложений кальдеры Однобокая является присутствие в них полнокристаллических кластеров (кумулятов?). В пемзовых агломератовых туфах первого этапа они представлены ассоциацией плагиоклаза, клинопироксена, титаномагнетита,

образующих пойкилоофитовые структуры прораствания. К этой ассоциации иногда присоединяется высокоглиноземистая роговая обманка. Для туфов и игнимбригов второго этапа характерно присутствие оливин-анортитовых включений и их кристаллических фрагментов, которые распределены крайне неравномерно. В спекшихся туфах андезитового состава наблюдаются микровкрапленники оливина со структурами скелетного роста.

Плагиоклаз преобладает во всех типах пирокластических отложений. Размер вкрапленников варьирует в пределах 0.6–1.5 мм, реже 2–3 мм. Состав плагиоклаза определяется в основном составом пирокластических отложений. Так, в риодацитовых пемзовых туфах преобладает олигоклаз-андезин (An_{28-42}), в дацитовых – андезин (An_{42-52}). В некоторых фенокристаллах обнаруживаются корродированные ядра кальциевого состава (An_{52-55} , реже An_{75-85}). Плагиоклаз содержит расплавные включения, апатит, реже магнетит и ильменит. В составе полнокристаллических сростков преобладает битовнит-анортит (An_{68-94}). В базальтовой тефре фенокристаллы плагиоклаза имеют состав битовнита (An_{85-90}), содержат кристаллические включения клинопироксена и расплавные включения. В краевых зонах плагиоклаза количество анортита прогрессивно снижается до An_{68-66} .

Среди темноцветных минералов во всех пирокластических отложениях преобладают орто- и клинопироксены. Они встречаются в виде фенокристаллов (0.6–1.5 мм), микровкрапленников (100–300 мкм), в составе полиминеральных сростков и реже – в виде кристаллических включений в других минералах. В свою очередь, пироксены содержат кристаллические включения магнетита, ильменита, апатита, реже плагиоклаза, а также расплавные включения. Амфиболы встречаются в начальных продуктах каждой из кальдер южного сектора Карымского вулканического центра. Форма кристаллов удлинненно-шестоватая, размер от 1.5 до 2.5 мм, цвет черный. Кристаллы отличаются правильными кристаллографическими формами и свежим обликом. Роговые обманки из риодацитовых пемзовых отложений кальдеры Однобокая и вулкана Академии Наук близки по составу и относятся к обыкновенной умеренно-глиноземистой (6.0–8.0 мас. % Al_2O_3) разновидности. Фенокристаллы содержат кристаллические включения титаномагнетита, ильменита, апатита, реже плагиоклаза (An_{42-48}) и расплавные включения. В пемзовых туфах кальдеры Однобокая встречается также амфибол с высокой глиноземистостью (9–11, реже 12–13 мас. % Al_2O_3). Биотит присутствует в качестве единственного темноцветного минерала в наиболее эволюционированных породах, а именно в туфах

и игнимбригах, выброшенных в начальный период формирования кальдеры Половинка.

Рудные минералы представлены титаномагнетитом и ильменитом, количество которых варьирует от долей процента до 1.5–2.0%. Содержания их минимальны в пирокластике риодацитового состава и значительно увеличиваются в дацитовой пирокластике. Присутствуют они в виде кристаллических включений во вкрапленниках пироксена и амфибола (в меньшей степени – плагиоклаза и кварца), в составе полиминеральных сростков. Размер вкрапленников изменяется от 100 до 300 мкм, размер кристаллических включений – от первых мкм до 100–150 мкм.

Кроме указанных в табл. 1 образцов были изучены крупные кристаллы кварца из захороненного пирокластического потока, обнаруженного в районе западного борта комплекса южных кальдер Карымского вулканического центра. В расчистке на пирокластическом потоке, связанном с кальдерой Половинка, имеется слой захороненного крупнозернистого песка, который, в свою очередь, перекрывается более поздними игнимбригами. Кристалло-лапилли кварца и плагиоклаза из этого слоя достигают 2–3 мм, а расплавные включения в них видны даже под биноклем.

Как уже упоминалось ранее, для сравнения мы изучили также расплавные включения в кристаллах кварца из вулкана Головнина. Этот вулкан расположен в южной части острова Кунашир, имеет кальдеру и центральный экструзивный купол голоценового возраста (Горшков, 1967; Фролова и др., 1985). Дациты этого вулкана представлены порфиоровыми разностями с вкрапленниками плагиоклаза (An_{72-43}), ортопироксена и крупными кристаллами кварца.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

Исследования расплавных включений (подготовка и анализ на электронном микроанализаторе Camebax Microbeam) проводились по методике, которая применялась нами ранее при изучении андезитов некоторых вулканов Курило-Камчатского региона (Толстых и др., 2003) и трахибазальтов Восточно-Тувинского вулканического нагорья (Наумов и др., 2003). Содержания воды, фтора и элементов-примесей в расплавных включениях были определены методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном микроанализаторе IMS-4f в Институте микроэлектроники РАН (г. Ярославль) по методике, детально описанной в работах (Соболев, 1996; Носова и др., 2002; Портнягин и др., 2002).

Изучено более 70 расплавных включений в плагиоклазах и кварце из различных пород Ка-

Таблица 5. Химический состав (мас. %) стекол расплавных включений в плагиоклазах пород Карымского вулканического центра

Номер включения	Компоненты												Сумма	T, °C	An
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	S			
Образец К-2															
1	47.44	0.73	19.67	6.83	0.13	5.19	10.82	7.40	0.44	0.09	0.07	0.14	98.95	1140	93
2	49.47	1.08	16.09	8.66	0.12	6.10	10.00	5.96	1.13	0.24	0.12	0.19	99.16	1140	81
3	50.71	0.99	18.93	8.01	0.19	3.20	9.93	4.64	0.73	0.25	0.07	0.13	97.79	20	88
4	50.92	1.05	15.69	8.77	0.22	4.95	9.08	6.90	1.24	0.18	0.10	0.16	99.26	20	84
5	50.98	0.79	19.05	7.86	0.16	4.30	9.69	6.21	0.66	0.15	0.10	0.16	100.11	1120	89
6	51.27	0.91	17.36	8.12	0.22	3.65	8.90	5.33	1.07	0.16	0.06	0.15	97.20	1140	84
7	51.47	0.95	17.76	9.03	0.21	4.70	9.05	6.38	0.66	0.16	0.08	0.10	100.55	1120	92
8	51.84	0.87	19.83	7.24	0.13	3.75	9.28	5.91	0.74	0.16	0.07	–	99.82	1100	85
9	52.04	1.02	16.45	8.45	0.12	5.26	8.38	7.07	1.40	–	–	0.22	100.41	1130	91
10	53.55	1.08	18.71	7.83	0.23	3.06	9.82	4.02	0.92	0.19	0.09	0.19	99.69	1100	89
11	53.87	1.01	18.35	7.71	0.14	3.55	7.61	5.56	0.94	0.22	0.09	–	99.09	1100	88
12	53.90	1.30	13.93	11.39	0.23	4.76	7.03	3.88	1.25	0.24	0.11	0.11	98.13	20	84
13	54.11	0.85	16.42	8.90	0.21	4.63	8.16	4.43	1.66	0.14	0.07	0.17	99.58	1120	86
14	54.68	1.00	17.30	7.70	0.15	3.68	8.12	6.05	0.91	0.13	0.08	0.14	99.94	1140	87
15	54.87	0.83	14.41	8.98	0.14	6.59	8.21	4.60	0.68	0.24	0.09	0.10	99.74	1140	86
16	55.44	1.19	16.23	8.96	0.15	3.92	6.66	5.15	1.44	0.19	0.11	0.15	99.59	1100	83
17	55.44	0.86	17.67	5.45	0.09	3.72	8.15	2.64	5.95	0.11	0.01	0.03	100.12	1140	82
18	55.47	1.03	17.62	8.08	0.21	3.63	7.24	3.09	1.11	0.17	0.11	–	97.76	20	83
19	55.62	0.91	18.59	6.85	0.16	3.61	7.90	4.84	1.04	0.21	0.09	0.10	99.92	1120	83
20	57.14	0.88	17.97	7.29	0.17	3.50	7.46	2.87	1.10	0.15	0.11	0.10	98.74	1120	83
Образец К-63															
21	56.89	2.25	13.60	8.98	0.26	2.43	6.17	5.66	1.80	–	0.38	0.12	98.54	1110	84
22	57.26	1.71	15.76	7.82	0.26	2.15	6.33	5.22	1.79	1.16	0.30	0.15	99.91	1110	84
23	58.21	1.70	15.15	7.84	0.20	1.97	6.44	4.95	1.74	1.23	0.30	0.13	99.86	1110	84
24	59.26	1.33	16.34	6.73	0.23	1.62	6.00	5.22	1.75	0.89	0.29	0.06	99.72	1110	60
25	59.45	1.47	16.58	6.29	0.18	1.63	5.53	5.83	1.84	0.36	0.29	0.05	99.50	1120	78
26	59.55	2.11	16.03	6.89	0.25	1.67	5.52	5.28	1.81	0.46	0.29	0.09	99.95	1110	60
27	60.39	1.60	14.86	8.16	0.23	1.99	5.47	4.74	1.77	0.28	0.30	0.13	99.92	1110	84
28	60.64	1.29	16.42	5.94	0.15	1.67	5.35	5.60	1.67	0.39	0.25	0.07	99.44	1120	78
29	60.71	1.69	15.48	7.02	0.24	1.68	5.68	4.42	1.77	0.59	0.33	0.06	99.67	1120	70
30	61.30	1.35	14.12	6.87	0.26	2.27	5.40	5.02	1.89	1.16	0.33	0.09	100.06	1110	84
31	62.45	1.22	15.49	6.23	0.21	1.57	5.32	3.88	2.12	0.46	0.29	0.06	99.30	1120	70
32	63.02	1.58	15.62	5.70	0.25	1.20	4.57	3.84	1.94	0.45	0.21	–	98.38	1120	78
33	63.64	0.98	16.88	4.31	0.16	1.02	3.77	4.84	3.10	0.59	0.31	0.07	99.67	1120	58
34	64.57	1.14	12.30	5.45	0.20	1.36	3.23	4.86	2.85	0.47	0.21	0.04	96.68	1120	52
35	67.10	0.90	13.85	5.66	0.21	1.28	3.55	4.22	2.21	0.33	0.20	0.08	99.59	1120	59
Образец К-4															
36	55.70	1.27	15.87	8.15	0.14	2.74	6.45	5.82	1.37	0.32	0.27	0.10	98.20	1100	80
37	56.67	1.47	15.36	8.54	0.46	2.70	6.81	5.71	1.68	0.36	0.26	0.07	100.09	1100	78
38	58.33	1.40	15.09	7.54	0.21	2.15	6.60	5.94	1.89	0.45	0.35	0.09	100.04	1100	78
39	61.68	1.47	14.20	7.75	0.21	2.00	5.34	4.65	1.96	0.33	0.26	0.06	99.91	1110	65
40	62.26	1.52	14.44	7.41	0.24	1.87	5.02	4.29	1.93	0.36	0.28	0.05	99.67	1110	65

Таблица 5. Окончание

Номер включения	Компоненты												Сумма	T, °C	An
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	S			
41	63.01	1.52	14.48	7.69	0.22	1.77	5.30	3.24	1.88	0.45	0.26	0.08	99.90	1110	69
42	64.13	0.92	15.38	5.60	0.17	1.57	5.07	4.06	2.29	0.32	0.21	0.08	99.80	1110	64
43	64.30	0.69	16.30	4.08	0.12	1.05	4.97	4.96	3.07	0.18	0.14	0.07	99.93	1110	58
44	64.70	1.39	14.06	6.03	0.20	1.48	4.40	3.98	2.77	0.53	0.19	0.06	99.79	1110	58
45	64.73	0.83	15.46	4.72	0.14	1.07	4.97	4.96	2.00	0.22	0.15	0.07	99.32	1110	59
46	65.21	1.02	14.64	4.48	0.20	1.06	3.66	4.18	2.03	0.24	0.17	0.08	96.97	1100	53
47	65.46	1.04	15.70	4.65	0.11	1.26	4.47	4.12	2.05	0.36	0.18	0.08	99.48	1100	53
48	65.75	0.94	14.13	4.93	0.18	1.18	3.62	3.65	2.54	0.37	0.16	0.06	97.51	1100	55
49	65.78	0.96	15.05	5.33	0.20	1.39	4.39	3.65	2.55	0.41	0.15	0.07	99.93	1100	53
Образец К-41															
50	47.27	0.67	18.93	6.34	0.16	5.56	10.56	7.07	0.25	0.15	0.04	0.09	97.09	1150	93
51	50.69	0.74	16.42	7.99	0.15	5.80	9.22	6.62	0.47	0.11	0.03	0.12	98.36	1150	93
52	65.93	0.37	13.77	2.02	0.12	0.63	2.29	3.64	2.55	0.09	0.17	0.01	91.59	20	49
53	66.05	0.40	13.80	2.21	0.00	0.59	2.10	4.54	2.40	0.12	0.19	0.01	92.41	20	47
54	66.76	0.32	13.89	2.31	0.11	0.64	2.23	4.40	2.46	0.00	0.15	0.00	93.27	20	63
55	68.24	0.46	14.00	2.59	0.14	0.66	2.26	4.20	2.56	0.06	0.19	0.01	95.37	20	63
56	68.32	0.21	13.93	2.32	0.11	0.64	2.15	4.48	2.46	0.08	0.19	0.01	94.90	20	47
57	69.95	0.47	13.73	2.94	0.03	0.89	2.23	4.44	2.47	0.10	0.19	0.02	97.46	20	63
Образец К-35															
58	71.76	0.21	13.16	0.94	0.03	0.27	0.83	4.97	3.32	0.00	0.20	0.01	95.70	1150	25
Образец К-31															
59	70.78	0.23	12.25	1.59	0.08	0.31	1.49	4.18	3.33	0.06	0.22	0.01	94.53	20	43
60	71.74	0.30	12.45	1.58	0.06	0.37	1.40	4.25	3.43	0.09	0.24	0.01	95.92	20	43
61	71.85	0.29	12.36	1.38	0.06	0.26	1.25	4.21	3.15	0.03	0.17	0.00	95.01	20	43
62	72.09	0.35	12.48	1.57	0.03	0.33	1.41	2.99	3.26	0.01	0.19	0.01	94.72	20	47
63	72.13	0.32	11.67	1.44	0.08	0.30	1.28	3.89	3.19	0.01	0.19	0.00	94.50	20	41
64	72.18	0.28	12.42	1.67	0.01	0.34	1.30	3.80	3.29	0.02	0.18	0.02	95.51	20	41
65	72.35	0.27	12.09	1.39	0.10	0.25	1.27	3.86	3.26	0.04	0.16	0.00	95.04	20	41
Образец К-23															
66	72.42	0.18	12.40	1.16	0.07	0.24	1.20	3.60	3.06	0.01	0.20	0.01	94.55	20	35
67	72.54	0.18	11.93	1.13	0.00	0.21	1.20	3.63	3.05	0.00	0.20	0.02	94.09	20	35
68	73.09	0.28	12.50	1.20	0.09	0.27	1.28	2.80	2.91	0.06	0.19	0.01	94.68	20	35

рымского вулканического центра и несколько включений в кварце из дацитов вулкана Головнина. Полученные данные по химическому составу стекол расплавленных включений представлены в табл. 5–7. Содержания SiO₂ в расплавленных включениях во вкрапленниках плагиоклаза из базальта Карымского вулканического центра изменяются от 47.4 до 57.1 мас. %, во вкрапленниках плагиоклаза из андезитов – от 55.7 до 67.1 мас. %, во вкрапленниках плагиоклаза из дацитов и риодацитов – от 66.1 до 72.5 мас. % (табл. 5) и во вкрапленниках кварца из риодацитов – от 72.2 до

75.7 мас. % (табл. 7). Содержания SiO₂ в расплавленных включениях в кварце из дацитов вулкана Головнина варьируют от 70.2 до 77.0 мас. % (табл. 7).

Базальтовые расплавы (табл. 5) характеризуются обычными содержаниями (в мас. %) TiO₂ (0.7–1.3), FeO (6.8–11.4), MgO (2.3–6.1), CaO (6.7–10.8), но значительно обогащены Na₂O (2.9–7.4 при среднем 5.1), причем самые высокие содержания Na₂O установлены в наиболее основных расплавах (SiO₂ = 47.4–52.0 мас. %). Содержания K₂O изменяются от 0.4 до 1.7 мас. %. Исключение составляет одно расплавленное включение, в кото-

Таблица 6. Содержания воды (мас. %) и элементов-примесей (ppm) в расплавных включениях в плагиоклазах пород Карымского вулканического центра (Камчатка)

Компоненты	Номер включения в табл. 5											
	50	3	4	53	54	56	60	61	62	65	67	58
H ₂ O	0.69	2.44	–	7.27	4.64	4.97	5.14	5.87	3.12	4.96	6.65	4.75
Li	1750	284	118	25.2	22.3	23.2	14.8	14.6	16.0	15.8	22.2	73.7
Be	0.19	0.69	0.56	1.07	1.25	1.34	1.13	1.18	0.95	1.04	1.11	0.95
B	5.98	7.90	6.32	36.0	26.9	14.9	32.6	32.7	32.0	35.1	41.6	58.4
F	6.79	142	6.32	533	508	814	801	569	948	587	324	14.0
Cr	–	36.3	70.6	–	–	–	–	–	–	–	–	0.81
Rb	–	12.0	30.0	–	–	–	–	–	–	–	–	91.8
Sr	531	418	449	255	285	363	107	105	188	102	107	57.2
Y	8.90	15.2	19.3	19.8	16.1	9.19	18.6	21.5	22.4	22.9	16.9	8.15
Zr	17.5	55.9	64.1	134	107	58.2	183	177	204	209	140	57.2
Nb	0.42	1.88	1.87	2.89	2.53	1.46	4.05	4.31	6.30	4.96	3.71	3.69
Ba	88.1	187	236	413	481	461	629	629	734	685	606	1070
La	1.81	4.88	7.17	8.19	8.07	7.44	10.8	11.3	12.8	11.6	10.3	12.4
Ce	3.35	12.8	17.7	23.8	20.1	24.0	27.6	28.6	29.8	30.2	24.0	21.5
Nd	4.28	8.87	13.0	10.9	10.0	7.08	12.2	13.1	14.4	13.4	10.6	7.54
Sm	0.87	2.37	3.41	3.52	2.56	2.57	3.11	3.50	3.42	3.78	2.71	1.32
Eu	0.42	0.86	1.27	0.57	0.91	0.72	0.68	0.99	0.70	0.72	0.76	0.31
Gd	1.13	2.84	3.35	3.80	2.51	2.99	2.24	4.41	3.17	3.77	2.51	0.64
Dy	1.15	2.53	3.56	3.76	2.71	2.70	2.85	3.63	3.36	4.15	2.52	1.24
Er	0.77	1.83	2.59	2.87	2.08	2.09	2.17	2.68	2.61	3.08	2.00	1.04
Yb	0.79	2.03	2.35	2.86	2.00	1.80	2.62	2.97	2.72	3.32	2.26	1.25
Hf	–	1.69	2.17	–	–	–	–	–	–	–	–	1.78
Th	0.14	0.90	0.59	1.63	1.42	0.80	2.32	2.11	2.42	2.44	2.76	3.76
U	0.05	0.47	0.36	1.11	0.85	0.54	1.52	1.49	1.78	1.88	1.66	2.17
Th/U	2.80	1.91	1.64	1.47	1.67	1.48	1.53	1.42	1.36	1.30	1.66	1.73
La/Yb	2.29	2.40	3.05	2.86	4.04	4.13	4.12	3.80	4.71	3.49	4.56	9.92

ром содержание K₂O (5.95 мас. %) значительно выше, чем Na₂O (2.64 мас. %). Отметим, что это существенно калиевое включение почти не содержит Cl (0.01 мас. %), в то время как в остальных 19 включениях образца К-2 концентрация Cl значительно выше (0.06–0.12 мас. % при среднем 0.09 мас. %). Такая особенность калиевых расплавов в отношении хлора была нами установлена ранее в расплавах вулканических кальдеры Медвежья на о. Итуруп, Южные Курилы (Голстых и др., 1997) и в кислых расплавах Верхнеуральского рудного района, Южный Урал (Наумов и др., 1999). Сравнительно высокая в расплавах базальта концентрация S – от 0.07 до 0.22 мас. %, при средней величине 0.14 мас. % в 17 включениях. В 2 включениях была определена концентрация воды в расплаве 0.7 и 2.4 мас. % (табл. 6).

Содержания SiO₂ в стеклах расплавных включений в образцах андезитов, варьирующие от 55.7

до 67.1 мас. %, в среднем на 9 мас. % выше, чем в стеклах расплавных включений образца базальта (табл. 5). Для расплавов в плагиоклазах андезитов характерны высокие содержания FeO (от 9.0 до 4.1 мас. % при среднем 6.5 мас. %), CaO (в среднем 5.2 мас. %) и обычные содержания Na₂O (4.5 мас. %) и K₂O (2.1 мас. %). Концентрация Cl в андезитовом расплаве по сравнению с базальтовым расплавом значительно выше (в среднем до 0.26 мас. %), а концентрация S ниже (в среднем до 0.07 мас. %).

Стекла расплавных включений в плагиоклазах (An_{63–25}) образцов дацитов и риодацитов характеризуются обычными содержаниями (в мас. %) SiO₂ (65.9–73.1), FeO (1.1–2.9), MgO (0.2–0.9) Na₂O (2.8–5.0) и K₂O (2.4–3.4). Концентрация Cl в этих расплавах такая же высокая (в среднем 0.19 мас. %), как и в андезитовых расплавах, но концентрация S значительно ниже – 0.01 мас. %. Анализ 9 расплавных включений на ионном микронзонде поз-

Таблица 7. Химический состав расплавных включений в кварце из захороненного пирокластического потока Карымского вулканического центра, Камчатка (1–6), и в кварце из дацитов вулкана Головнина, о. Кунашир (7–10)

Компо- ненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	72.15	72.83	73.28	74.02	74.91	75.67	70.18	72.12	74.05	77.02
TiO ₂	0.24	0.11	0.12	0.09	0.31	0.11	0.24	0.19	0.16	0.16
Al ₂ O ₃	12.82	12.51	12.98	12.44	12.95	12.83	10.95	11.78	11.02	9.29
FeO	1.30	0.51	0.57	0.54	1.25	0.67	1.57	1.25	1.18	0.90
MnO	0.04	0.06	0.07	0.13	0.15	0.11	0.00	0.15	0.08	0.04
MgO	0.27	0.12	0.16	0.06	0.24	0.10	0.27	0.21	0.20	0.19
CaO	1.23	0.66	0.88	0.62	1.19	0.68	1.43	1.35	1.04	0.98
Na ₂ O	3.89	3.32	3.60	3.72	4.03	3.64	5.81	4.79	4.46	4.10
K ₂ O	2.82	3.82	3.74	3.92	3.12	4.12	1.78	1.83	1.84	1.69
P ₂ O ₅	0.02	0.04	0.00	0.06	0.01	0.04	0.02	0.02	0.04	0.10
Cl	0.14	0.11	0.10	0.11	0.15	0.10	0.28	0.26	0.26	0.19
H ₂ O	4.89	4.88	4.20	3.41	0.90	1.64	6.68	5.73	4.98	5.10
Сумма	99.81	98.97	99.70	99.12	99.21	99.71	99.21	99.68	99.31	99.76
Li	18.2	13.6	21.0	18.9	16.9	24.0	0.16	0.59	0.27	4.42
Be	1.04	0.94	0.76	0.94	0.99	0.93	0.70	0.58	0.58	0.49
B	30.0	55.4	37.1	54.6	43.5	57.5	105	110	100	70.9
F	605	269	223	274	644	163	539	925	765	401
Cr	2.26	0.74	1.13	0.73	2.38	1.09	1.10	2.00	2.50	1.46
Rb	–	–	–	–	–	–	25.7	39.3	43.4	23.8
Sr	123	50.6	113	54.9	121	59.1	74.0	68.2	56.5	45.2
Y	15.8	11.5	7.20	9.62	26.6	8.65	37.8	29.8	27.8	20.6
Zr	163	64.0	63.2	59.9	237	56.5	148	121	117	95.3
Nb	3.22	5.44	2.90	4.14	4.19	3.85	1.35	1.44	1.46	1.10
Ba	563	843	782	933	556	778	464	575	554	323
La	11.6	14.7	9.82	12.5	14.7	10.7	8.02	9.12	8.29	5.87
Ce	28.0	22.2	19.2	25.0	36.8	20.9	21.9	20.4	21.1	13.6
Nd	13.9	10.3	7.24	8.91	21.1	7.42	12.7	12.5	12.3	8.25
Sm	2.87	1.52	1.40	2.15	5.12	1.48	3.84	3.43	3.27	2.25
Eu	0.77	0.74	0.47	0.11	1.12	0.21	0.43	0.61	0.81	0.49
Gd	2.78	1.45	1.08	1.60	5.19	1.82	4.89	5.01	4.76	2.14
Dy	2.64	1.44	1.09	1.57	4.31	1.44	5.35	4.83	4.52	2.96
Er	1.69	1.27	0.92	1.34	3.13	1.02	4.47	3.89	3.48	2.32
Yb	1.91	1.35	0.95	1.53	3.19	1.20	5.45	4.29	9.35	2.84
Hf	4.28	2.21	1.85	1.96	5.26	1.63	4.94	4.79	4.75	3.08
Th	1.99	4.66	2.54	4.52	2.28	3.53	2.77	2.49	2.34	1.84
U	1.38	2.90	1.73	2.77	1.48	2.19	1.27	1.31	1.17	0.82
Th/U	1.44	1.61	1.55	1.63	1.54	1.61	2.18	1.90	2.00	2.24
La/Yb	6.07	10.9	10.3	8.17	4.61	8.92	1.47	2.12	0.89	2.07

Примечание. Оксиды приведены в мас. %, элементы – в ppm.

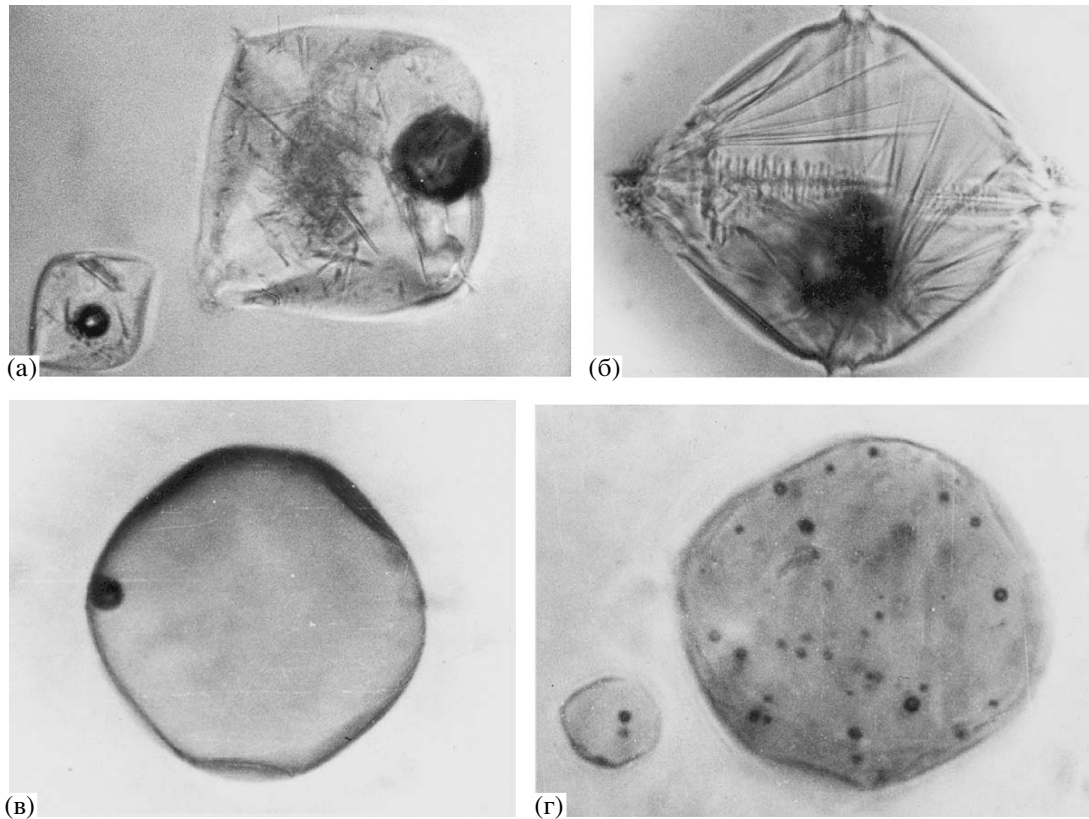


Рис. 2. Расплавные включения в кварце из дацитов вулкана Головнина.
Размер включений: (а, в) – 100 мкм, (б, г) – 50 мкм.

волил определить содержания воды при кристаллизации плагиоклазов (табл. 6). Эти концентрации оказались очень высокими – от 3.1 до 7.3 мас. %, при среднем 5.5 мас. %. Следует отметить, что в образце дацита К-41 был встречен вкрапленник плагиоклаза An_{93} , содержащий расплавные включения, по составу аналогичные включениям из образца базальта К-2. В них также определены (табл. 5) высокие содержания (в мас. %) Na_2O (6.6–7.1), MgO (5.6–5.8), FeO (6.3–8.0) и низкие содержания K_2O (0.2–0.5). Напомним, что образец К-2 является базальтом извержения 1996 г. на полуострове Новогодний в кальдере Академии Наук, а образец К-41 отобран из восточного борта кальдеры Однобокая (рис. 1).

Содержания SiO_2 в стеклах расплавных включений в кварце из захороненного пирокластического потока (табл. 7) еще более высокие – от 72.2 до 75.7 мас. %. Для этих расплавов кислого состава установлены обычные содержания (в мас. %) TiO_2 (0.09–0.31), FeO (0.5–1.3), MgO (0.06–0.27), CaO (0.6–1.2), Na_2O (3.3–4.0), K_2O (2.8–4.1), Cl (0.10–0.15). Концентрация воды в расплаве менялась от 0.9 до 4.9 мас. % (среднее значение 3.3 мас. % из 6 определений).

Для сравнения с составами кислых расплавов Карымского вулканического центра мы изучили расплавные включения в кварце из дацитов вулкана Головнина. Эти включения (рис. 2) характеризуются крупными размерами, достигающими 100–140 мкм. Они или частично раскристаллизованы (рис. 2а, 2б), или содержат только стекло и небольшой газовый пузырек (рис. 2в). Температуры полной гомогенизации включений составляют 820–850°C, причем обычно для этого достаточно выдержки 5–10 минут. Гетерогенизация расплава с выделением множества газовых пузырьков (рис. 2г) происходит при 700–780°C за 15–30 секунд, что свидетельствует о низкой вязкости расплава. Такое поведение включений при термометрических экспериментах однозначно указывает на существенное содержание воды в расплаве, что и подтвердилось при их анализе на ионном микрозонде (от 5.0 до 6.7 мас. %, при среднем значении 5.6 мас. % из 4 определений, табл. 7). Эти расплавы по сравнению с кислыми расплавами Карымского вулканического центра отличаются также более высокими содержаниями Na_2O (4.1–5.8 мас. %), Cl (0.19–0.28 мас. %) и более низкими – K_2O (1.7–1.8 мас. %).

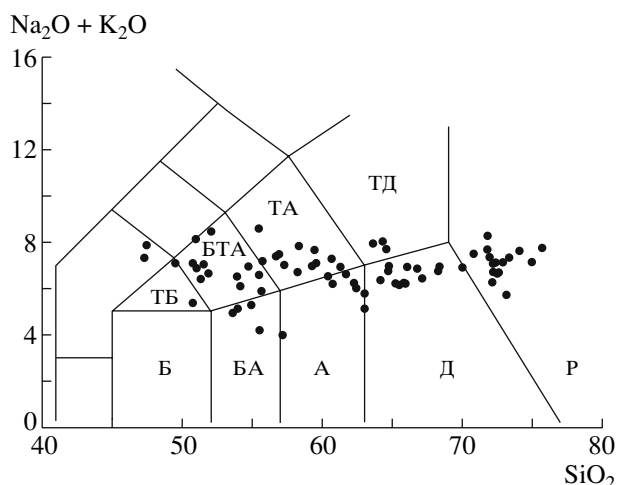


Рис. 3. Составы (мас. %) расплавных включений на классификационной диаграмме (Le Bas et al., 1986) SiO_2 –($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$).

Б – базальты, ТБ – трахибазальты, БА – базальтовые андезиты, БТА – базальтовые трахиандезиты, А – андезиты, ТА – трахиандезиты, Д – дациты, ТД – трахидациты, Р – риолиты.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Микрозондовый анализ стекол включений показал интереснейшие особенности составов расплавов Карымского вулканического центра. Если характеризовать их в координатах SiO_2 –($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), то большая часть расплавов попадает в щелочные разности – от тефрита до трахита, хотя представлены и расплавы с меньшей щелочностью (рис. 3). Причем породы (табл. 1) не обнаруживают повышенного содержания щелочей. Еще одна особенность: на графике тренд составов располагается субпараллельно оси абсцисс, т.е. при росте кремнекислотности расплавов сумма щелочей не увеличивается, в то время как кристаллизационная дифференциация предполагает рост щелочей в ходе повышения SiO_2 в расплаве.

Более полную картину эволюции расплавов можно видеть на рис. 4. Поведение различных петрогенных компонентов можно условно разделить на три типа.

1. Содержание Al_2O_3 , MgO , CaO с ростом SiO_2 закономерно падает, а содержание K_2O увеличивается. Тренды не имеют перегиба и характерны для процессов кристаллизационной дифференциации.

2. Содержания TiO_2 и FeO с ростом SiO_2 закономерно снижаются только при $\text{SiO}_2 > 57$ мас. %, что обусловлено осаждением рудных минералов в процессе кристаллизационной дифференциации. В более основных расплавах, обнаруженных во включениях в плагиоклазе образца К-2 (базальт извержения 1996 г. в кальдере Академии Наук), содержания TiO_2 даже немного увеличива-

ются (от 0.7 до 1.3 мас. %). Значительно более высокие содержания TiO_2 определены во включениях в плагиоклазах образцов К-4 и К-63 (андезиты извержений 1996 и 1997 гг. Карымского вулкана). Содержания TiO_2 более 1.3 мас. % зафиксированы в 17 расплавных включениях. Содержание FeO при $\text{SiO}_2 < 57$ мас. % почти постоянное – в пределах 7–9 мас. % (обр. К-2, рис. 4).

3. Неожиданное всего выглядит поведение натрия, содержание которого с ростом кремнекислоты снижается, причем на графике (рис. 4) можно выделить два тренда составов. Для одного из них при сравнительно небольшом диапазоне кремнекислотности (47–57 мас. %) содержания Na_2O изменяются от 7.5 до 3 мас. %, второй тренд более пологий – при увеличении SiO_2 от 57 до 73 мас. % содержания Na_2O изменяются от 6 до 3 мас. %. Первый тренд получен для образца базальта (К-2), второй – для образцов андезитов (К-4 и К-63) и дацитов (К-41 и К-31).

Базальтовые расплавы Карымского вулканического центра ($\text{SiO}_2 = 47$ –57 мас. %) кроме высоких содержаний натрия характеризуются и высоким отношением $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$, равным в среднем 8.0 (23 определения). Такие же высокие содержания натрия и сходные отношения $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ в расплавах были обнаружены ранее при изучении ксенолитов Монголии и Йемена (Ionov et al., 1994; Chazot et al., 1996). Стекла в перидотитовых ксенолитах из щелочных базальтов Монголии (Ionov et al., 1994) содержат 51.8–57.0 мас. % SiO_2 и 6.8–10.6 мас. % Na_2O , отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 4.5$ –17.2, при средней величине 8.6 (19 определений). Стекла, обнаруженные в шпинелевых лерцолитах из Йемена (Chazot et al., 1996), содержат 50.0–55.8 мас. % SiO_2 , 5.9–8.9 мас. % Na_2O , а отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 7.5$ –14.1, при средней величине 9.7 (15 определений). Генезис подобного рода расплавов авторам этих статей представляется проблематичным. Возможно, определенную роль здесь играл мантийный метасоматоз, обусловленный воздействием натрового мантийного флюида.

Сравнение полей составов расплавов (рис. 5) разных вулканов (Карымский вулканический центр, Безымянный и Шивелуч) демонстрирует, что именно в вулканитах Карымского вулканического центра представлен наиболее широкий спектр расплавов (в том числе основные разности, обогащенные железом, магнием и титаном). В то же время тренды составов этих расплавов на вариационных диаграммах более четкие, а парные корреляции петрогенных элементов более выражены, чем для вулканов Безымянный и Шивелуч.

Распределение несовместимых элементов в базальтовых и дацит-риолитовых расплавах Карымского вулканического центра и в риолитовых расплавах вулкана Головнина (рис. 6) указывает

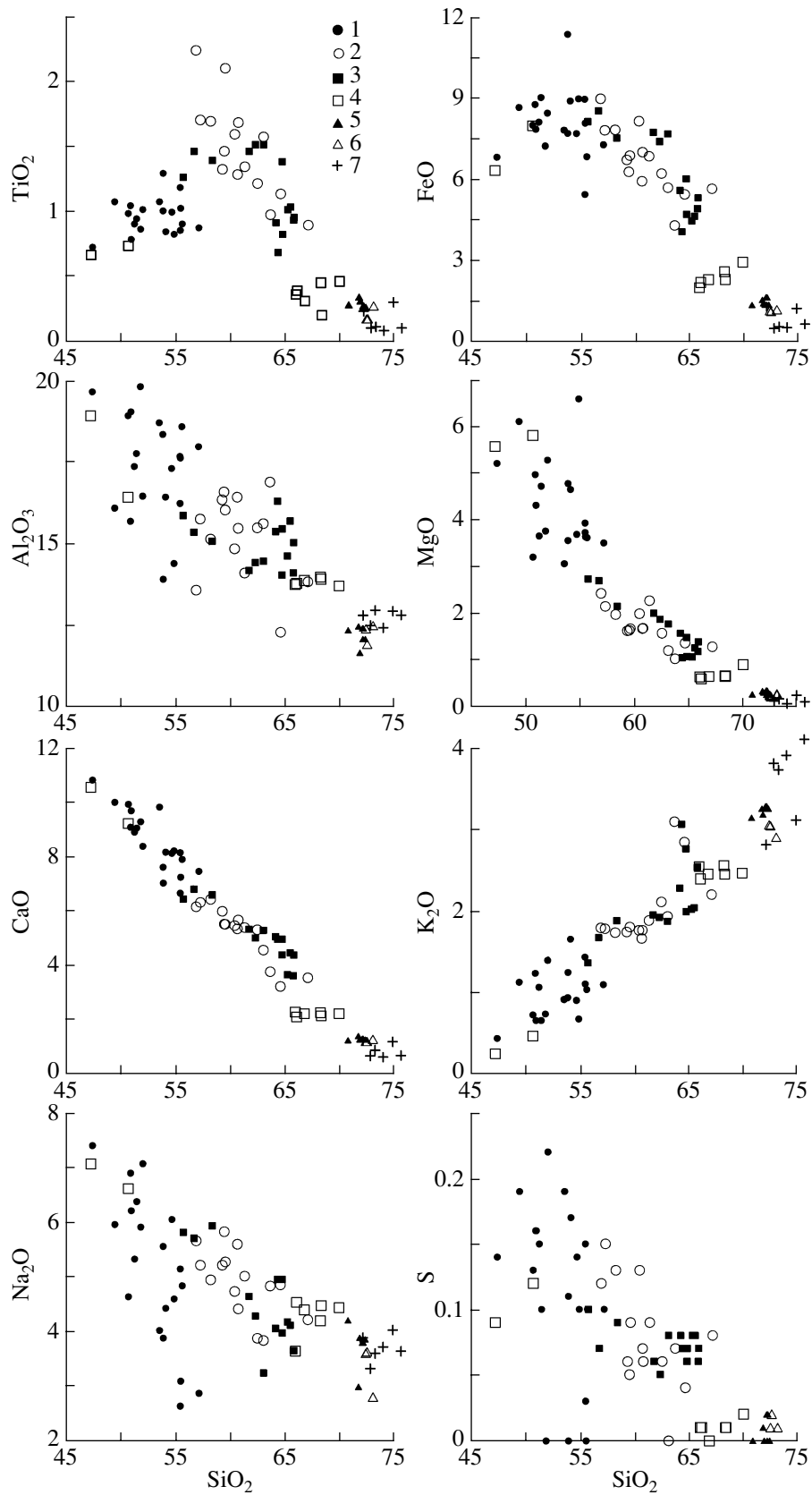


Рис. 4. Вариационные диаграммы SiO₂–петрогенные элементы, SiO₂–S, построенные по данным о составах расплавных включений в плагиоклазах (1–6) и кварце (7) Карымского вулканического центра (в мас. %). Номера образцов: 1 – К-2, 2 – К-63, 3 – К-4, 4 – К-41, 5 – К-31, 6 – К-23.

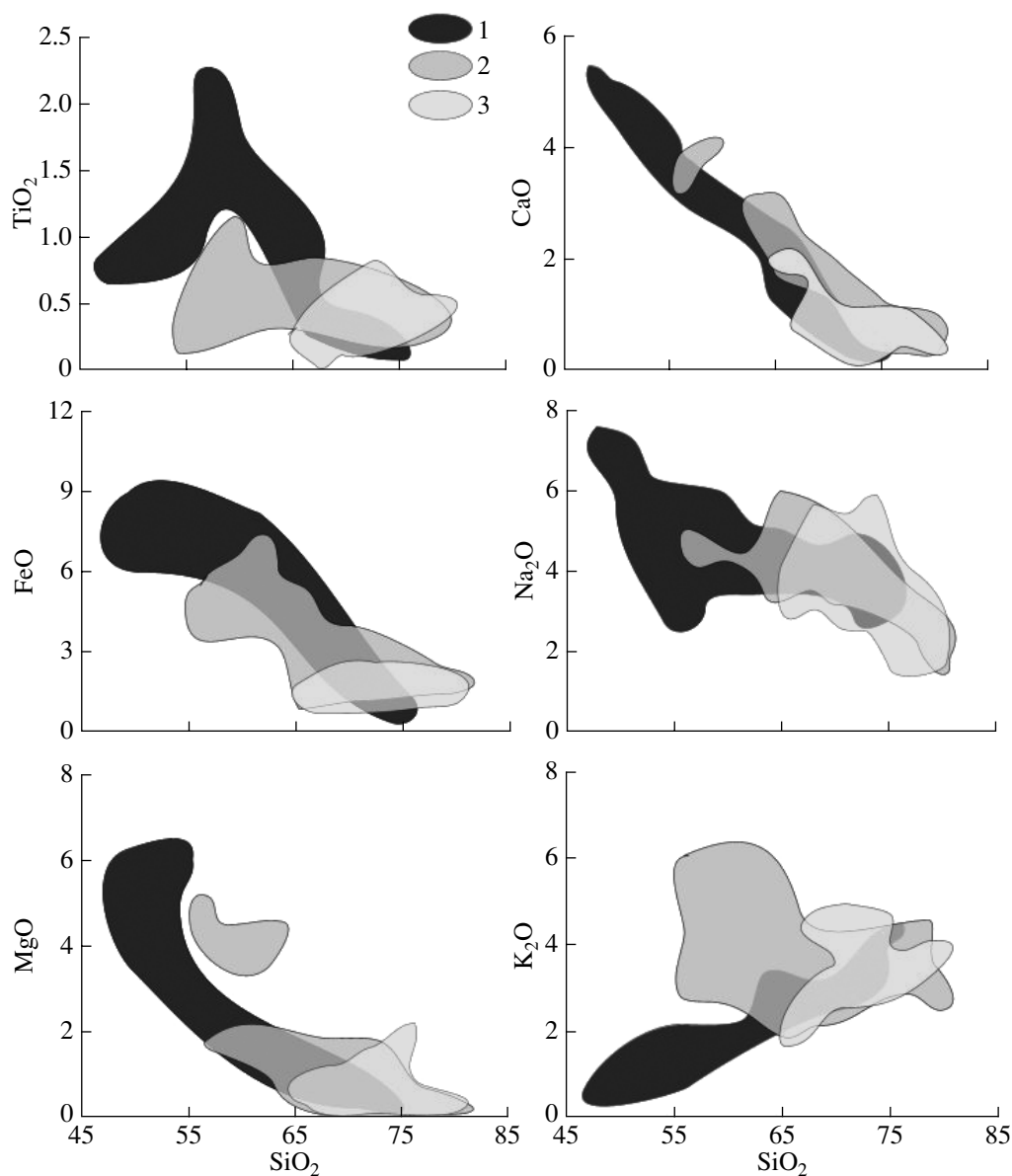


Рис. 5. Сравнение составов (в мас. %) расплавных включений во вкрапленниках вулканов Карымского вулканического центра (1), Безымянный (2) и Шивелуч (3).

Количество анализов расплавных включений для Карымского вулканического центра – 73, для вулкана Безымянный – 47, для вулкана Шивелуч – 38.

на островодужное происхождение всех расплавов. Поскольку наиболее несовместимые элементы при кристаллизации практически не фракционируют друг относительно друга, их валовое содержание может дать информацию о магматическом источнике вулканического центра. К островодужным характеристикам расплавов Карымского вулканического центра относятся, например, Nb минимум и высокие относительно MORB Ba/Th отношения. Эти характеристики присущи как самым примитивным, так и наиболее дифференцированным расплавам. Таким образом, речь может идти именно о состоянии мантийного ис-

точника, возможно метасоматизированного флюидным компонентом, обогащенным LREE и относительно обедненным Nb. Впрочем, у магматического очага, питающего Карымский вулканический центр, есть и свои особенности. Главная его отличительная черта – относительная обогащенность литием, особенно заметная при сравнении с расплавами вулкана Головнина. Необходимо отметить, что обогащенность литием относительно тяжелых REE и Y по сравнению с MORB характерна для многих основных островодужных магм (Portnyagin et al., 2007). Однако абсолютное содержание этого элемента обычно не превыша-

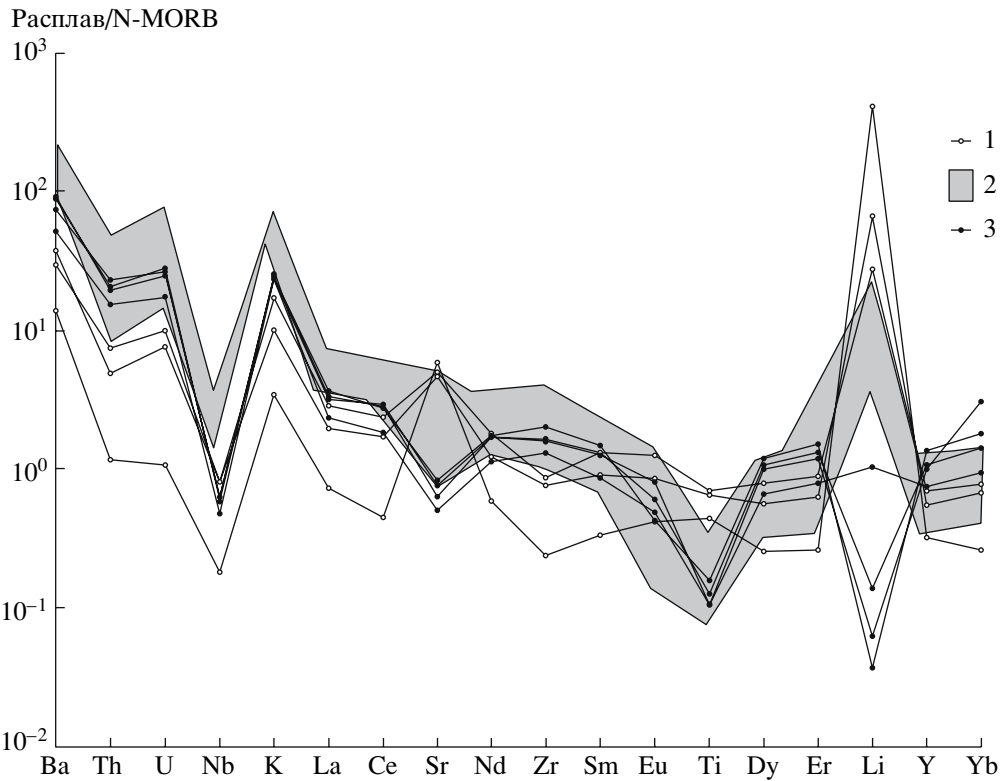


Рис. 6. График содержаний в расплавах включений элементов-примесей, нормированных к составу N-MORB (Sun, McDonough, 1989).

1, 2 – базальтовые (1) и дацит-риолитовые (2) расплавы Карымского вулканического центра, 3 – риолитовые расплавы вулкана Головнина.

ет 5–6 ppm, в то время как основные расплавы Карымского вулканического центра содержат в 19–290 раз, а кислые расплавы – в 2–12 раз больше лития. Если же говорить о кислых островодужных расплавах, то тут разница еще значительнее (рис. 6). Отметим, что богатые литием расплавы отличаются также и повышенным содержанием натрия (до 7.5 мас. %). Такие значения вообще не характерны для основных расплавов.

Интересно, что согласно результатам анализов, полученных в работе (Portnyagin et al., 2007), на вулкане Карымский в виде включений в оливинах присутствуют и основные расплавы со средним содержанием натрия 2.9 мас. % и концентрацией лития 5.23 ppm. При этом содержания некогерентных элементов, полученные нами и М. Портнягиным, анализировались на одном и том же оборудовании с использованием одних и тех же эталонов, что исключает вариант аппаратной ошибки. Таким образом, если говорить об относительно примитивных расплавах Карымского вулканического центра (основных, обедненных некогерентными элементами, в частности легкими РЗЭ), то они или часть из них отличаются от большинства сходных с ними основных магм, зафиксированных на других геологических объек-

тах, повышенными концентрациями натрия и лития. Причины этого обогащения неясны. Как один из вариантов объяснения может рассматриваться контаминация расплава коровыми минералами специфических составов, например цеолитами натролитовой группы, сформировавшимися на субстрате из древних базальтов вулканического центра. Отсутствие данных по этим минералам в настоящий момент затрудняет какие-либо выводы.

Отметим, что один из образцов, в котором были обнаружены расплавные включения с высокими содержаниями натрия и лития, отобран в стенке древней кальдеры, а два остальных взяты во время извержения 1996 г. Поэтому можно сделать вывод о том, что либо процессы ассимиляции корового вещества происходили многократно в течение длительного времени, либо жизнь вкрапленников, сформированных этим расплавом, чрезвычайно длительна в пределах приповерхностных очагов.

Затрудняет расшифровку процессов и то, что практически все минералы, содержащие литий в значимых количествах, либо вторичного происхождения (цеолиты), либо формируются из дифференцированных расплавов на завершающих

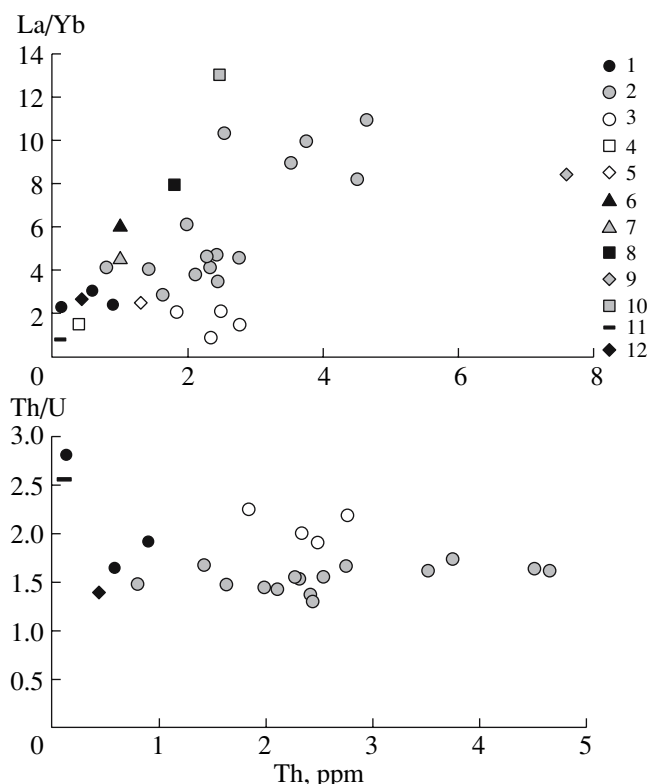


Рис. 7. График зависимостей Th–La/Yb и Th–Th/U по данным изучения расплавных включений в минералах вулканических пород Камчатки и Курильских островов. 1, 2 – Карымский вулканический центр (1 – базальты, 2 – андезиты и дациты); 3 – вулкан Головнина, о. Кунашир; 4 – кальдера Медвежья, о. Итуруп (Коваленко и др., 2004); 5 – вулкан Чикурачки, о. Парамушир (Gurenko et al., 2005); 6, 7 – вулкан Авачинский (6 – по данным (Толстых и др., 2003); 7 – по данным (Portnyagin et al., 2007)); 8 – вулкан Безымянный; 9 – вулкан Дикий Гребень; 10 – вулкан Шивелуч; 11 – N-MORB (Sun, McDonough, 1989); 12 – вулкан Ключевской (Portnyagin et al., 2007).

стадиях кристаллизации магматических тел (минералы пегматитов). Таким образом, исходя из имеющихся данных по минералогии, обогатиться этими элементами расплав мог только в приповерхностных условиях, перерабатывая коровый материал.

Вторичная природа фазы, обогащенной литием и натрием, исключена: во-первых, в силу первичного происхождения включений, которое подтверждается их морфологией; во-вторых, в силу того, что образцы 1996 г. были отобраны еще горячими и вторичным изменениям подвергнуться не успели; в-третьих, вышеперечисленные признаки “наследуются” и более кислыми (более дифференцированными) расплавами вулканического центра. Таким образом, относительная обогащенность литием характерна для всех расплавов Карымского вулканического центра.

Обсуждая природу поведения лития в расплавах Карымского вулканического центра, можно

назвать ее аномальной, поскольку этот элемент при классической схеме дифференциации должен накапливаться в расплавах. В данном же случае более кислые расплавы отличаются более низкими концентрациями лития по сравнению с основными расплавами. Не исключены поэтому процессы смешения основных расплавов, содержащих высокие концентрации лития, с кислыми расплавами, что привело к обогащению последних литием.

На рис. 7 представлены соотношения La/Yb–Th и Th/U–Th для разных вулканов Курило-Камчатской островной дуги и обедненных MORB. Видно, что по отношению La/Yb все расплавы отличаются разной степенью дифференцированности. В расплавах вулкана Головнина отношение La/Yb, равное 1.4, весьма близко к значению MORB (табл. 8, рис. 7). Близки к MORB на диаграмме (рис. 7) также расплавы вулканов Кудрявый и Меньшой Брат (о. Итуруп, Курильские острова) и базальтовые расплавы Карымского вулканического центра и Ключевского вулкана (Камчатка). Несколько дальше от N-MORB располагается часть андезит-дацитовых расплавов вулкана Карымский и вулкана Авачинский (включения в оливинах и плагиоклазах). Еще более дифференцированы дацитовые расплавы южного сектора Карымского вулканического центра, расплавы вулканов Безымянный, Дикий Гребень и Шивелуч.

Что касается отношений Th/U в расплавах Карымского вулканического центра (рис. 7), то они почти постоянны для всех составов и находятся в интервале 1.3–1.9. В то же время зафиксирован базальтовый расплав с существенно более высоким отношением Th/U, равным 2.8. Именно в этом расплаве определено самое высокое содержание Li (1750 ppm), а также очень высокое содержание Na₂O (7.1 мас. %) и самое низкое содержание K₂O (0.25 мас. %). В кислых расплавах вулкана Головнина отношения Th/U попадают в интервал от 1.9 до 2.2.

Итак, интерпретируя результаты анализов, можно сделать следующее заключение: формирование Карымского вулканического центра – результат довольно сложной эволюции расплавов. При этом наиболее примитивные расплавы демонстрируют аномально высокие содержания натрия и лития. Происхождение этих специфических расплавов требует дальнейшего уточнения. В качестве источников литий-натриевого комплекса могут рассматриваться цеолиты натролитовой группы или литиевые слюды. Очевидно лишь, что особенности расплавов связаны с контаминацией коровым материалом. В рамках дальнейшей работы по исследованию пород вулканического центра необходимо выяснить составы породообразующих расплавов во включениях из темноцветных минералов – пироксенов, оливи-

Таблица 8. Средние содержания (ppm) La и Yb и отношения La/Yb в расплавных включениях в минералах вулканических пород Курило-Камчатского региона

Вулкан	Порода	Минерал	<i>n</i>	La	Yb	La/Yb
Курильские острова						
Головнина (о. Кунашир)	дацит	кварц	4	7.8	5.5	1.4
Кудрявый (о. Итуруп)	андезитобазальт	плагиоклаз	2	4.9	4.0	1.2
Меньшой Брат (о. Итуруп)	андезитобазальт	плагиоклаз	2	9.4	5.3	1.8
Чикурачки (о. Парамушир)*	базальт	оливин	19	6.9	2.8	2.5
Камчатка						
Карымский	базальт	плагиоклаз	3	4.6	1.7	2.7
»	дацит	плагиоклаз	9	10.3	2.4	4.3
»	риодацит	кварц	6	12.3	1.7	7.2
Ключевской**	базальт	оливин	78	5.1	1.9	2.7
Авачинский***	авачит	оливин	5	6.9	1.5	4.6
Авачинский	андезит	плагиоклаз	2	7.3	1.2	6.1
Безымянный	андезит	плагиоклаз	3	11.8	1.5	7.9
Дикий Гребень	дацит	плагиоклаз	2	11.8	1.4	8.4
Шивелуч	андезит	плагиоклаз	7	9.1	0.7	13.0

Примечание. *n* – количество определений, * – данные (Gurenko et al., 2005); ** – данные (Миронов, Портнягин, в печати); *** – данные (Портнягин и др., 2005).

нов, амфиболов, а также исследовать микроэлементный состав вторичных минералов, развившихся по породам Карымского вулканического центра.

ВЫВОДЫ

1. Изучено более 80 расплавных включений во вкрапленниках базальта, андезитов, дацитов и риодацитов Карымского вулканического центра (Камчатка) и дацитов вулкана Головнина (о. Кунашир, Курильские острова). Содержания SiO₂ в расплавных включениях во вкрапленниках плагиоклаза из базальта Карымского вулканического центра изменяются от 47 до 57 мас. %, во вкрапленниках плагиоклаза из андезитов – от 56 до 67 мас. %, во вкрапленниках плагиоклаза из дацитов и риодацитов – от 66 до 73 мас. % и во вкрапленниках кварца из риодацитов – от 72 до 76 мас. %. Содержания SiO₂ в расплавных включениях в кварце из дацитов вулкана Головнина варьируют от 70 до 77 мас. %.

2. Установлено, что базальтовые расплавы Карымского вулканического центра значительно обогащены натрием (Na₂O = 2.9–7.4 мас. %, при среднем значении 5.1 мас. % из 23 анализов), причем самые высокие содержания Na₂O установлены в наиболее основных расплавах (SiO₂ = 47–52 мас. %). Эти расплавы также характеризуются очень высоким отношением Na₂O/K₂O, равным в среднем 8.0.

3. Определены содержания летучих в расплавах: в базальтовых расплавах Карымского вулканического центра они составили 1.6 мас. % H₂O, 0.14 мас. % S, 0.09 мас. % Cl и 50 ppm F, в дацито-

вых и риодацитовых расплавах 0.9–7.3 мас. % H₂O (среднее 4.5 мас. % из 15 определений), 0.15 мас. % Cl, 600 ppm F и 100 ppm S. Содержания H₂O в расплавных включениях в кварце из дацитов вулкана Головнина более высокие – от 5.0 до 6.7 мас. % (среднее 5.6 мас. %), содержания Cl также высокие – 0.19–0.28 мас. %, содержания F – 660 ppm.

4. Сравнение составов расплавов Карымского вулканического центра с ранее изученными нами расплавами вулканов Безымянный и Шивелуч показало их существенное различие. Первые, более основные, обогащены Ti, Fe, Mg, Ca, Na, P, но значительно беднее калием. Скорее всего, расплавы Карымского вулканического центра являются менее дифференцированными по сравнению с расплавами вулканов Безымянный и Шивелуч.

5. Концентрации 20 элементов-примесей были измерены на ионном микрозонде в стеклах 22 расплавных включений в плагиоклазе и кварце. Необычным явилось очень высокое содержание Li (наряду с высоким содержанием Na) в базальтовых расплавах Карымского вулканического центра – от 118 до 1750 ppm, тогда как в дацитовых и риолитовых расплавах содержание Li в среднем равно 25 ppm. Для риолитовых расплавов вулкана Головнина содержание Li значительно ниже – в среднем 1.4 ppm. По соотношению La/Yb, Th–La/Yb и Th–Th/U все расплавы отличаются разной степенью дифференцированности. Расплавы Карымского вулканического центра характеризуются относительными минимумами по Nb и Ti, максимумами по Ba, K, что типично для магм островных дуг.

Благодарности. Авторы благодарят А.А. Кадика (ГЕОХИ РАН) за предоставленные для исследования фенокристаллы кварца из дацита вулкана Головина и А.В. Соболева (ГЕОХИ РАН) и В.В. Ярмолюка (ИГЕМ РАН) за конструктивные замечания по рукописи статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 04-05-65123, 05-05-64730, 07-05-00497), Проекта ДВО РАН 06-III-A-08-329, Программы поддержки ведущих научных школ (2006-РИ-112.0/001/008) и Программы ОНЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Владавец В.И.* Вулканы Карымской группы // Труды Камчатской вулканостанции. 1947. Вып. 3. С. 3–48.
- Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура). Под ред. Масуренкова Ю.П. М.: Наука, 1980. 299 с.
- Горшков Г.С.* Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. С. 178–180.
- Гриб Е.Н.* Петрология продуктов извержения 2–3 января 1996 г. в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 71–96.
- Гриб Е.Н., Леонов В.Л.* Различные пути эволюции верхнекоровых магматических очагов кальдерных комплексов Восточной Камчатки. Часть I. Строение пирокластических потоков, сравнительная минералогия // Вулканология и сейсмология. 2001а. № 4. С. 3–17.
- Гриб Е.Н., Леонов В.Л.* Различные пути эволюции верхнекоровых магматических очагов кальдерных комплексов Восточной Камчатки. Часть II. Физико-химические условия кристаллизации игнимбритообразующих расплавов // Вулканология и сейсмология. 2001б. № 4. С. 18–28.
- Гриб Е.Н., Леонов В.Л.* Эволюция магматических очагов кальдер южного сектора Карымского вулканического центра. Часть I. Геология, строение и состав пирокластических потоков // Вулканология и сейсмология. 2004а. № 4. С. 21–40.
- Гриб Е.Н., Леонов В.Л.* Эволюция магматических очагов кальдер южного сектора Карымского вулканического центра. Часть II. РТГ-условия кристаллизации игнимбритообразующих расплавов, эволюция магматизма // Вулканология и сейсмология. 2004б. № 5. С. 23–37.
- Иванов Б.В.* Извержение Карымского вулкана в 1962–1965 гг. и вулканы Карымской группы. М.: Наука, 1970. 135 с.
- Коваленко В.И., Наумов В.Б., Толстых М.Л. и др.* Состав и источники магм кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) по данным изучения расплавных включений // Геохимия. 2004. № 5. С. 467–487.
- 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.
- Наумов В.Б., Портнягин М.В., Толстых М.Л., Ярмолюк В.В.* Состав магматических расплавов Южно-Байкальской вулканической области по данным изучения включений в оливинах трахибазальтов // Геохимия. 2003. № 3. С. 243–253.
- Носова А.А., Сазонова Л.В., Наркисова В.В., Симакин С.Г.* Элементы-примеси в клинопироксенах из палеозойских вулканитов Тагильской островной дуги Среднего Урала // Геохимия. 2002. № 3. С. 254–268.
- Озеров А.Ю.* Динамика извержения Карымского вулкана (Камчатка) в 1996 г. и состав его продуктов // Вестник ДВО РАН. 1997. № 3. С. 86–93.
- Портнягин М.В., Миронов Н.Л., Матвеев С.В., Плечов П.Ю.* Петрология “авачитов” – высокомагнезиальных базальтов Авачинского вулкана, Камчатка: II. Расплавные включения в оливине // Петрология. 2005. Т. 13. № 4. С. 358–388.
- Портнягин М.В., Симакин С.Г., Соболев А.В.* Фтор в примитивных магмах офиолитового комплекса Троодос (о. Кипр): методика определения и основные результаты // Геохимия. 2002. № 7. С. 691–699.
- Соболев А.В.* Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // Петрология. 1996. Т. 4. № 3. С. 228–239.
- Толстых М.Л., Наумов В.Б., Бабанкий А.Д. и др.* Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов, формировавших андезиты вулканов Курило-Камчатского региона // Петрология. 2003. Т. 11. № 5. С. 451–471.
- Толстых М.Л., Наумов В.Б., Кононкова Н.Н.* Три типа расплавов, участвовавших в формировании андезитобазальтов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Южные Курилы) // Геохимия. 1997. № 4. С. 391–397.
- 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. 3–37.
- Фролова Т.И., Бурикова И.А., Гуцин А.В. и др.* Происхождение вулканических серий островных дуг. М.: Недра, 1985. С. 99–103.
- Chazot G., Menzies M., Harte B.* Silicate glasses in spinel lherzolites from Yemen: origin and chemical composition // Chemical Geology. 1996. P. 159–179.
- Gurenko A.A., Belousov A.B., Trumbull R.B., Sobolev A.V.* Explosive basaltic volcanism of the Chikurachki volcano (Kurile arc, Russia): insights on pre-eruptive magmatic conditions and volatile budget revealed from phenocryst-hosted melt inclusions and groundmass glasses // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2005. V. 147. P. 203–232.
- Ionov D.A., Hofmann A.W., Shimizu N.* Metasomatism-induced melting in mantle xenoliths from Mongolia // J. Petrol. 1994. V. 35. P. 753–785.
- Le Bas M.J., Maitre R.V., Streckeisen A., Zannettin B.A.* A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram // J. Petrol. 1986. V. 27. P. 745–750.
- Portnyagin M., Hoernle K., Plechov P. et al.* Constraints on mantle melting and composition and nature of slab components in volcanic arcs from volatiles (H₂O, S, Cl, F) and trace elements in melt inclusions from the Kamchatka Arc // Earth Planet. Sci. Lett. 2007. V. 255. P. 53–69.
- Sun S.-S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the Ocean Basins. Eds. Saunders A.D., Norry M.J. Geological Society Special London Publication 42. 1989. P. 313–345.
- Tolstyykh M.L., Naumov V.B., Ozerov A.Yu., Kononkova N.N.* Composition of magmas of the 1996 eruption at the Karymskii volcanic center, Kamchatka: evidence from melt inclusions // Geochemistry International. 2001. V. 39. № 5. P. 447–458.