

ХАРЧИНСКИЙ И ЗАРЕЧНЫЙ ВУЛКАНЫ - УНИКАЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ БАЗАЛЬТОВ НА КАМЧАТКЕ: ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД

© 1999 г. | Ю. Н. Волынец^{*}, И. В. Мелекесцев^{*}, В. В. Пономарева^{*}, Дз. М. Ягодзински^{**}

^{*} *Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006*

^{**} *Дикинсон колледж. Геологический факультет, Карлайл, 17013-2896, США*

Поступила в редакцию 02.10.97 г.

подавляющая часть пород Харчинского и Заречного вулканов, а также Харчинской зоны шлаковых конусов принадлежит к магнезиальному типу. Судя по минералогическим данным, и базальтовые и андезитовые расплавы отличались высоким содержанием воды (>3-4 и >6-7 мас.% соответственно) и кристаллизовались при высокой (на 2.0-2.5 порядка выше буфера NNO) фугитивности кислорода. В этом отношении, а также по особенностям валового химического и редкоэлементного состава базальты и андезиты изученных вулканов весьма близки породам вулкана Шивелуч, также расположенного на северном фланге Северной группы вулканов Камчатки, но отличаются от таковых более южных вулканов группы. Магнезиальные базальты вулканов Харчинский, Заречный и Шивелуч по сравнению с аналогичными по магнезиальности базальтами Ключевского вулкана и Толбачинского дола имеют более высокие концентрации K, Ba, Sr, более низкие Ca, Sc, Yb при более высоких отношениях La/Yb, Ni/Sc и La/Ta, а исходные расплавы их были более водонасыщенными и окисленными.

Настоящая работа - продолжение работы [5], посвященной результатам исследования Харчинского и Заречного вулканов - уникальных для Камчатки объектов по объему изверженных магнезиальных базальтов. В работе [5] рассмотрены геологическое строение и история формирования этих вулканов и пересекающей их региональной зоны шлаковых конусов, а также особенности пространственного распределения и структурная позиция проявления магнезиальных базальтов и андезитов в пределах Северной группы вулканов Камчатки и зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островодужных систем. В настоящей работе приведены сведения о вещественном составе вулканических пород, включая данные об их петрографических, минеральных, химических и редкоэлементных особенностях. Полученный фактический материал использовался для оценки условий кристаллизации магнезиальных базальтовых и андезитовых расплавов, анализа возможных родственных связей ассоциирующих на изученных вулканах типов пород, а также для обсуждения причин вариаций составов магнезиальных базальтов Северной группы вулканов.

Вещественный состав вулканических пород. Петрографические особенности. Преобладающий тип пород изученных вулканов и зоны шлаковых конусов - магнезиальные базальты. Обычно это порфиритовые породы с крупными вкраплен-

никами оливина и клинопироксена (до 20 об.%) и редкими субфенокристами шпинели, к которым в лавах стратовулканов присоединяются более мелкие лейсты плагиоклаза. Реже встречаются породы, где во вкрапленниках один оливин. В базальтах вулкана Заречный обнаружены ксенокристы кварца с реакционными каймами клинопироксена и редкие вкрапленники амфибола, полностью замещенные тонкозернистым магнетит-пироксен-плагиоклазовым агрегатом. Вкрапленники оливина содержат включения шпинели, а вкрапленники клинопироксена из базальтов Заречного вулкана - ортопироксена. Обычны сростки зерен клинопироксена, в центральных частях которых встречаются неправильные выделения оливина, а также крупные вкрапленники клинопироксена, перекристаллизованные в мелкозернистый агрегат. Структура основных масс пород меняется от пилотакситовой до интерсерталной и долеритовой. Первая более характерна для лав шлаковых конусов, вторая - для лав стратовулканов (особенно Харчинского). Сложены основные массы пород плагиоклазом, оливином, клино- и ортопироксеном, пижонитом, титаномagnetитом и переменным количеством стекла, особенно обильным в туфах Харчинского вулкана. Породы в целом свежие, однако оливин иногда опацифицирован, а в обломках из туфов - и серпентизирован.

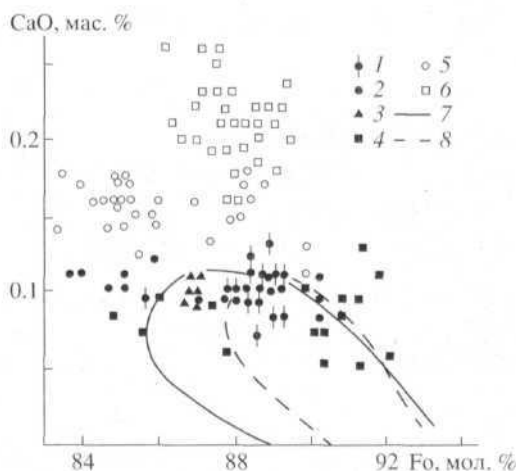


Рис. 1. Содержание CaO во вкрапленниках оливина магнезиальных базальтов Северной группы вулканов Камчатки: / - Харчинская зона шлаковых конусов; 2 - вулкан Заречный; 3 - лерцолитовое включение в базальтах Заречного вулкана; 4 - вулкан Шивелуч; 5 - вулкан Ключевской; 6 - Большое трещинное Толбачинское извержение (БТТИ); 7 - поле оливинов мантийных пород [19]; 8 - поле оливинов ультраосновных включений в лавах вулканов Камчатки. Кроме собственных материалов авторов здесь и на рис. 3 для вулкана Ключевской использованы также данные из работы [29], а для БТТИ - из работы [2].

Резко отличаются от других базальты "некка" из кратерной части Харчинского вулкана¹, впервые описанные в работе [14]. Здесь среди вкрапленников (15-20 об.%) преобладает зеленоватый амфибол, наряду с которым встречаются клинопироксен, замещенный серпентином оливин и слабоокрашенная слюда. В гиалопилитовой основной массе пород наряду с плагиоклазом, клинопироксеном и титаномагнетитом установлен и щелочной полевой шпат. По набору минералов-вкрапленников породы "некка" сходны с голоценовыми высококалийными магнезиальными базальтами вулкана Шивелуч, тогда как амфиболсодержащие базальты Заречного вулкана - с умеренно калиевыми магнезиальными базальтами Шивелуча [6]. Базальты "некка" содержат многочисленные мелкие ксенолиты гарцбургитов, лерцолитов, вебстеритов. Единичные включения лерцолитов встречаются и в базальтах Заречного вулкана.

Среди андезитов выделяются две группы пород. Андезиты экструзий в кратере Заречного вулкана - серийно-порфиновые породы, содержа-

В работе [5] генезис этой необычной вулканической формы обсуждался более детально. В работах [11, 14] она рассматривается как некк; по устному сообщению А.В. Колоскова, это дайка, по мнению И.В. Мелекесцева - туюя. Как что употребляемый в настоящей работе термин достаточно условен.

щие до 30-35 об.% вкрапленников и субфенокристов амфибола и плагиоклаза (в отношении ~1:1), редкие субфенокристы ортопироксена и титаномагнетита и единичные зерна оливина в гиалопилитовой или микрофельзитовой основной массе. Амфибол желто-бурый с высокими цветами интерференции и небольшим (до 10°) углом угасания, что указывает на заметную окисленность железа. Оливин всегда окружен реакционными каймами: внутренняя часть кайм, как правило, сложена ортопироксеном, внешняя - амфиболом. Породы обычно содержат небольшие (1-3 см) ксенолиты амфибол-клинопироксеновых сланцев, амфиболитов и амфиболовых габбро. Петрографически этот тип андезитов чрезвычайно близок к андезитам молодых экструзий на вулкане Шивелуч [6, 13].

Другой тип андезитов - субафирные оливин-клинопироксеновые породы - встречаются только среди лав шлакового конуса на западном склоне Заречного вулкана. Вкрапленники клинопироксена, содержащие включения ортопироксена (как и в базальтах этого вулкана), и субфенокристы оливина (всего 5-7 об.%) погружены в гиалопилитовую основную массу, состоящую из мелких микролитов плагиоклаза, клино- и ортопироксена, пижонита, титаномагнетита и стекла.

Андезитобазальты, обнаруженные среди лав шлаковых конусов северного фланга Харчинского вулкана, отличаются от других типов пород преобладанием среди вкрапленников плагиоклаза. Это порфиновые или серийно-порфиновые породы, содержащие кроме плагиоклаза вкрапленники и субфенокристы оливина, клино- и ортопироксена, а иногда и амфибол, полностью замещенный магнетит-пироксен-плагиоклазовым агрегатом. Вкрапленники ортопироксена часто окружены каймами клинопироксена или пижонита, а вкрапленники оливина - каймами ортопироксена с вростками магнетита. Структура основных масс пород меняется от гиалопилитовой до микрофельзитовой. В ней всегда присутствует некоторое количество бурого стекла. Петрографически породы весьма сходны с лавами одноактных вулканических центров на Байдарном отроге вулкана Шивелуч, которые по составу достаточно резко отличаются от преобладающих лав этого вулкана [6, 13].

Вариации составов породообразующих минералов. Состав вкрапленников оливина в базальтах независимо от значения коэффициента магнезиальности последних ($K_{mg} = 100Mg/(Mg + Fe^*)$) варьирует в пределах Fo_{84-91} при преобладающих значениях (~75% определений) Fo_{87-90} (табл. 1). В этом отношении они близки к оливинам магнезиальных базальтов Толбачинского дола [2] и большей части таких пород из побочных конусов Ключевского вулкана [20, 21, 29], однако в по-

Таблица 1. Представительные анализы минералов, основных масс и стекол вулканических пород (мас. %)

№ п. п.	Номер образца	Фаза	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	K _{ме} , %
1	1002-V	Ol, c	40.22	0.00	0.00	0.00	12.31	0.00	46.65	0.09	0.00	0.00	99.52	87.1
2	1023	Ol, c	40.34	0.00	0.00	0.05	10.27	0.17	48.29	0.11	0.01	0.00	99.23	89.3
3	1002/1	Ol, c	40.45	0.00	0.00	0.05	9.29	0.16	48.66	0.08	0.00	0.00	96.69	90.3
4	1004	Ol, c	38.59	0.00	0.00	0.04	21.76	0.33	39.42	0.1	0.00	0.02	100.26	76.4
5	1023	Sp, i	0.04	0.47	12.89	48.54	26.09	0.33	10.30	0.00	0.01	0.00	98.67	50.2
6	1002/1	Sp, i	0.01	0.49	16.01	46.34	21.87	0.26	12.76	0.00	0.00	0.02	97.76	60.8
7	1002/1	Sp, c	0.00	0.44	15.48	44.59	30.02	0.52	8.11	0.00	0.00	0.01	99.18	39.8
8	1002/1	CrMt, r	0.00	5.6	4.14	11.36	70.88	0.45	4.22	0.05	0.00	0.03	96.72	19.8
9	1004	Mt, c	0.00	3.15	3.80	0.09	82.09	0.39	4.97	0.00	0.00	0.00	94.50	9.1
10	1004	CrMt, i	0.32	4.40	2.62	18.12	65.12	0.40	3.36	0.46	0.00	0.03	94.83	16.7
11	1002-V	Cpx, c	54.21	0.15	1.20	1.25	4.80	0.00	17.91	19.12	0.30	0.00	98.97	87.0
12	1023	Cpx, m	52.70	0.27	1.44	0.09	7.26	0.25	17.43	17.84	0.05	0.01	97.32	81.0
13	1002/1	Cpx, c	53.41	0.15	2.73	0.51	5.01	0.17	16.61	19.58	0.32	0.00	98.54	85.5
14	1002/1	Opх, i	55.32	0.06	2.62	0.48	8.34	0.22	30.47	1.19	0.00	0.01	98.71	86.7
15	1002/1	Cpx, m	52.39	0.59	1.34	0.04	9.38	0.42	15.52	18.50	0.27	0.04	98.49	74.7
16	1002/1	Opх, m	54.58	0.38	0.94	0.00	14.57	0.48	26.29	1.9	0.00	0.01	99.15	76.3
17	1002/1	Pg, m	53.05	0.43	0.92	0.01	13.88	0.55	23.68	5.42	0.01	0.27	98.23	75.3
18	5612	Cpx, c	51.96	0.08	1.47	0.55	7.52	0.25	13.12	22.40	0.72	0.00	98.08	75.0
19	5612	Cpx, c	52.14	0.27	2.23	0.47	4.54	0.10	17.51	20.60	0.37	0.01	98.23	87.0
20	1004	Cpx, c	53.68	0.08	2.23	1.00	5.31	0.15	17.69	18.46	0.45	0.00	99.05	85.6
21	1004	Opх, c	57.27	0.03	1.51	0.64	7.03	0.22	32.19	1.37	0.00	0.01	100.26	89.1
22	1004	Cpx, m	49.83	0.71	4.06	0.00	9.59	0.21	13.80	19.81	0.25	0.06	98.67	73.1
23	1004	Opх, m	54.63	0.26	0.88	0.00	16.27	0.47	25.19	1.85	0.00	0.02	99.58	73.4
24	7700	Opх, m	54.35	0.03	0.28	0.01	16.78	2.32	24.97	1.28	0.00	0.07	100.08	67.4
25	5612	Phl, c	38.54	1.86	15.37	0.15	7.29	0.02	21.70	0.00	0.97	9.45	95.75	84.1
26	5612	Amp, c	43.13	1.53	11.47	0.22	9.78	0.11	15.63	11.51	2.85	1.08	97.32	73.8
27	7700	Amp, c	44.04	1.53	12.28	0.02	9.98	0.16	16.13	11.14	2.48	0.71	97.97	74.2
28	7700	Amp, c	41.99	1.70	13.65	0.08	12.44	0.18	13.00	11.71	2.61	0.66	98.03	65.0
29	1023	Pl, m	51.74	0.05	28.06	0.01	1.32	0.02	0.05	11.68	4.12	0.42	97.49	-
30	1002/1	Pl, m	52.76	0.03	28.97	0.00	1.17	0.00	0.03	11.66	4.40	0.27	99.29	-
31	5612	Pl, m	54.51	0.03	26.88	0.00	0.89	0.00	0.07	9.83	5.51	0.59	98.32	-
32	5612	Fsp, m	61.58	0.11	21.21	0.00	0.81	0.03	0.06	2.88	7.64	4.40	98.73	-
33	1004	Pl, m	52.74	0.01	29.62	0.00	0.85	0.00	0.02	11.99	4.13	0.29	99.66	-
34	7700	Pl, c	53.83	0.00	29.90	0.01	0.33	0.00	0.05	11.31	4.99	0.18	100.61	-
35	7700	Pl, r	56.64	0.00	27.35	0.00	0.31	0.00	0.03	8.74	6.50	0.28	99.05	-
36	7700	Pl, m	56.83	0.00	27.65	0.00	0.34	0.04	0.03	9.00	6.71	0.36	100.96	-
37	1023	Gl, i	55.70	0.22	18.26	0.27	4.12	0.10	7.83	6.47	4.34	0.47	97.77	77.2
38	1023	Gl, i	59.46	0.36	19.13	0.38	2.38	0.07	3.86	6.01	4.47	1.35	97.47	74.3
39	1023	Gm	57.61	0.57	16.07	0.03	4.29	0.10	4.53	8.76	3.61	1.71	97.29	65.3
40	1002/1	Gm	57.02	1.33	17.03	0.02	5.94	0.11	4.09	6.60	4.06	1.93	98.12	55.1
41	1004	Gm	60.47	0.29	21.53	0.01	2.95	0.07	2.00	6.63	4.58	1.81	100.33	54.7
42	1023	Gl, gm	70.22	1.02	13.63	0.00	0.86	0.03	0.30	2.40	1.98	5.16	95.59	38.7
43	1002/1	Gl, gm	72.96	0.00	15.04	0.00	0.22	0.00	0.10	1.27	2.13	5.04	96.76	44.0
44	1004	Gl, gm	74.07	0.14	12.73	0.01	0.86	0.02	0.16	0.82	3.37	4.54	96.72	25.0
45	7700	Gl, gm	74.48	0.15	12.54	0.01	0.81	0.02	0.12	0.84	3.15	4.63	96.45	20.4

Примечание. Обр. 1023 и 1002/1 – магнезиальные базальты; обр. 1002-V – включение лерцолита в базальте 1002/1; обр. 5612 – абсорбит; обр. 1004 и 7700 – магнезиальные андезиты. Химический состав пород и привязку образцов см. в табл. 2. Обозначения минеральных фаз: Ol – оливин, Sp – шпинель, CrMt – хромомagnetит, Cpx – клиношроксен, Opх – ортошроксен, Pg – пижонит, Phl – флогопит, Amp – амфибол, Pl – плагиоклаз, Esp – щелочной полевой шпат, Gl – стекло, gm – основная масса, c – ядро вкрапления, r – край вкрапления, i – включение во вкраплении, m – микролит. Количество замеров, использованных при оценке составов стекол и основных масс: № 37 – 5, № 38 – 6, № 39 – 7, № 40 – 1, № 41 – 4, № 42 – 1, № 43 – 1, № 44 – 8, № 45 – 8. Анализы выполнены в Институте вулканологии ДВО РАН на микроанализаторе Camebax. Аналитики Г.П. Пономарев, В.М. Чубаров, Т.М. Филоософова.

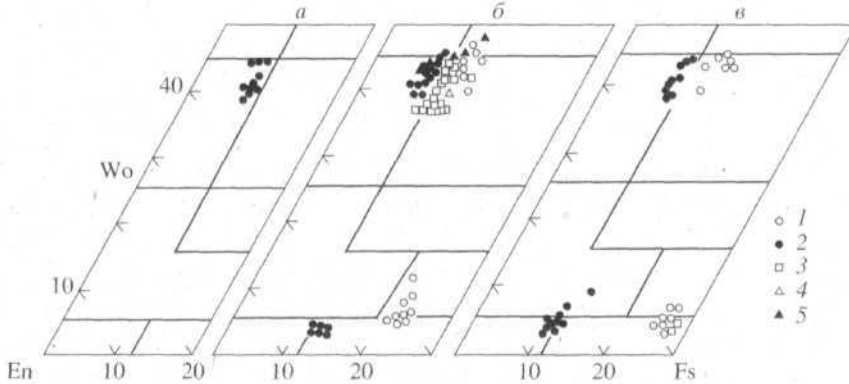


Рис. 2. Состав пироксенов из лав Харчинско-Заречной группы вулканов: а-лерцолит, включение в базальтах Заречного вулкана (образец 1002-V); б-базальты (/ , 2-обр. 1002/1.3-обр. 1023, 4, 5-обр. 5612); в-андезиты (обр. 1004). 2, 5 - ядра вкрапленников; /, 3, 4 - краевые каймы вкрапленников и микролиты (номер образца см. в табл. 2).

следних [21], а также в магнезиальных базальтах и андезитобазальтах вулкана Шивелуч [6] обнаружены и более магнезиальные оливины с содержанием Fo до 93 мол.%. Вместе с тем оливины изученных базальтов сходны с оливинами из аналогичных пород вулкана Шивелуч по низкому содержанию CaO (0.06-0.13 мас.%), чем существенно отличаются от оливинов магнезиальных базальтов Ключевского вулкана (0.12-0.17 мас.%) и особенно Толбачинского дола (0.16-0.26 мас.%) (рис. 1). Низкий уровень концентрации CaO зафик-

сирован в оливинах лерцолитового включения из лав вулкана Заречный, а также в оливинах ультраосновных ксенолитов из лав вулкана Шивелуч [6]. Краевые зоны вкрапленников оливина в базальтах, субфенокристы и микролиты заметно более железистые, чем ядра - Fo_{72-81} . Относительно высокой железистостью отличаются субфенокристы оливина из оливин-клинопироксеновых андезитов Заречного вулкана Fo_{70-76} (табл. 1).

Состав вкрапленников клинопироксена базальтов сходен с таковым в оливин-клинопироксеновых андезитах, а также лерцолитах из включения в базальтах Заречного вулкана и отвечает эндиопсидам по одной классификации [8] или магнезиальным авгитам - по другой [15], как и в магнезиальных базальтах других вулканов Северной группы [2, 6, 21]. Лишь в базальтах "некка" Харчинского вулкана наряду с эндиопсидами во вкрапленниках встречаются и салиты (рис. 2, табл. 1). Отличительная особенность клинопироксенов-вкрапленников в магнезиальных базальтах и андезитах Заречного вулкана (а также лерцолитового включения в базальтах) - пониженное содержание TiO_2 . В этом отношении они сходны с клинопироксенами магнезиальных базальтов вулкана Шивелуч, но заметно отличаются от таковых из соответствующих пород Ключевского вулкана и Толбачинского дола (рис. 3). Ортопироксены из включений в ядрах вкрапленников клинопироксена базальтов и оливин-клинопироксеновых андезитов Заречного вулкана отвечают по составу магнезиальным бронзитам ($K_{mg} = 85...89\%$). Сходные по составу ортопироксены обнаружены в виде включений в ядрах вкрапленников магнезиального оливина (Fo_{90-91}) и клинопироксена ($K_{mg} \sim 90\%$) в лавах Ключевского вулкана [1, 17].

Состав клинопироксенов краевых зон вкрапленников, а также микролитов смещается в сторону авгитов. В основных массах базальтов и андезитов присутствуют также ортопироксены (же-

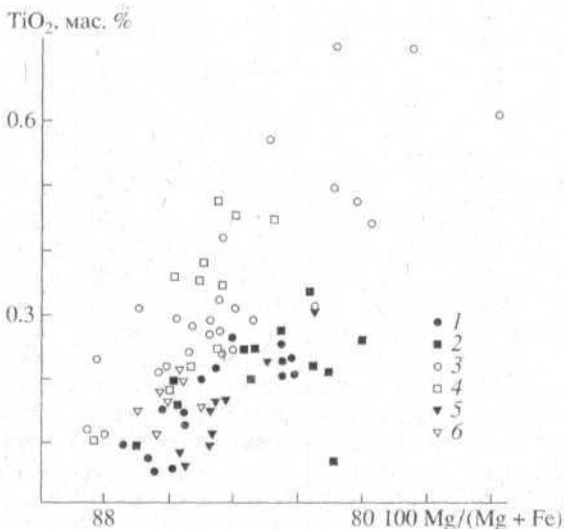


Рис. 3. Содержание TiO_2 во вкрапленниках клинопироксенов магнезиальных базальтов Северной группы вулканов Камчатки: 1-3 - вулканы Заречный, Шивелуч и Ключевской соответственно; 4 - БТТИ; 5 - оливин-клинопироксеновый андезит вулкана Заречный; 6 - лерцолит (включение в базальтах вулкана Заречный).

лезистые бронзиты с $K_{mg} = 73...77\%$) и более редкие пижониты (с 6—10 мол.% Wo-минерала). Концентрации Al_2O_3 в ортопироксенах из микролитов ниже, чем в бронзитах из включений в ядрах вкрапленников клинопироксена (соответственно 0.8-1.5 и 2.0-2.5 мас.%).

Шпинели изученных базальтов принадлежат Cr-Al-типу (44-48 мас.% Cr_2O_3 и 12-16 мас.% Al_2O_3) при вариациях коэффициента хромистости ($\phi = 100 Cr/(Cr + Al)$) от 65 до 72%, а величины K_{mg} - от 25 до 65%. В зональных субфенокристах состав краевых кайм смещается в область хромомагнетитов, хотя величина ϕ при этом фактически не меняется, несмотря на резкое уменьшение концентраций Cr и Al (табл. 1). Отметим, что хромомагнетиты обнаружены также в виде включений в краевых зонах вкрапленников оливинов из базальтов и во вкрапленниках клинопироксенов из оливин-клинопироксеновых андезитов. В целом хромистость шпинелей изученных пород ниже, чем шпинелей из магнезиальных базальтов вулкана Шивелуч ($\phi = 73...81\%$) и Толбачинского дола ($\phi = 69...73\%$), тогда как среди шпинелей магнезиальных базальтов Ключевского вулкана встречаются как более хромистые ($\phi = 71...76\%$), так и менее хромистые ($\phi = 58...66\%$) разности (см. также [29]). Миколиты рудного минерала в базальтах и андезитах - титаномагнетиты с низким содержанием TiO_2 (3-5 мас.%), Al_2O_3 (1-2 мас.%) и MgO ($K_{mg} = 3...9\%$).

Состав амфиболов из базальтов "некка" Харчинского вулкана и андезитов экструзий Заречного вулкана, по принятой классификации [16], отвечает гастингситам, хотя амфиболы базальтов несколько более магнезиальны, чем амфиболы андезитов, и имеют существенно более низкое отношение Na_2O/K_2O (рис. 4, табл. 1). Амфиболы из базальтов Харчинского вулкана по этим признакам сходны с амфиболами высококальциевых магнезиальных базальтов вулкана Шивелуч, а амфиболы андезитов Заречного вулкана - с амфиболами из андезитовых экструзий вулкана Шивелуч (рис. 4, [6]).

Слюды из базальтов некка Харчинского вулкана - низкотитанистые (~1.8 мас.% TiO_2) флогопиты с $K_{mg} = 82...85\%$ и содержанием 14.5... 15.5 мас.% Al_2O_3 (табл. 1). В целом они близки к флогопитам из высококальциевых магнезиальных базальтов вулкана Шивелуч [6], хотя последние чуть более железистые ($K_{mg} = 76...84\%$) и титанистые (1.8-2.4 мас.% TiO_2).

Микролиты плагиоклаза в базальтах и оливин-клинопироксеновых андезитах - андезин-лабрадоры и лабрадоры (An_{47-63}), а в амфиболовых андезитах - андезины (An_{41-48}). Ядра вкрапленников плагиоклаза в последних отвечают андезин-лабрадорам (An_{46-55}), а краевые зоны - андезинам (An_{41-43}). В основной массе базальтов "некка" Харчинского вулкана наряду с андезин-лабрадорами присутствуют К-олигоклазы и анортоклазы (табл. 1).

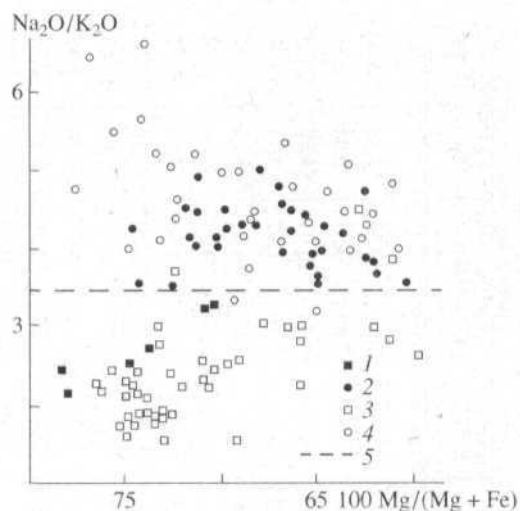


Рис. 4. Состав амфиболов из лав вулканов Харчинский (1), Заречный (2) и Шивелуч (3,4): 1 - абсарокиты, 2,4 - андезиты, 3 - высококальциевые магнезиальные базальты, 5 - разделительная линия между амфиболами базальтов и андезитов.

Состав основных масс пород исследовали в режиме сканирования участков $<100 \times 100$ мкм (размеры участков менялись в зависимости от степени раскристаллизации основных масс) с последующим осреднением результатов по серии измерений. Таким же способом, но с использованием существенно меньших по размерам площадок (до 5-10 мкм²) определяли состав стекол в интерстициях микролитов в основных массах пород и стекловатых ("расплавных") включениях в оливинах из вкрапленников в базальтах. Результаты, представленные в табл. 1, показывают, что состав расплавных включений в оливинах базальтов и состав основных их масс отвечают низкокремнеземистым магнезиальным андезитам. Состав основной массы оливин-клинопироксенового андезита также соответствует магнезиальному андезиту, хотя и более кремнеземистому, чем в предыдущем случае. Несмотря на общее сходство с андезитовыми лавами вулкана Заречный, полученные составы отличаются от андезитов повышенными концентрациями Al_2O_3 и пониженными - FeO и MgO. Состав интерстиционных стекол в базальтах и андезитах соответствует калиевым риодацитам и риолитам с K_2O/Na_2O от 1.35 до 3.15.

Особенности валового химического состава. Главная особенность лав изученных вулканов - повышенная магнезиальность большинства пород (см. также [11, 14]). Так, величина K_{mg} в базальтах варьирует от 62 до 73%, а в одном образце достигает даже 80% (табл. 2). При этом уровень концентрации SiO_2 в породах достаточно высокий (49-54 мас.% в пересчете на безводный оста-

Таблица 2. Представительные анализы валовых химических и редкоземельных составов лав вулканов Заречный, Харчинский и Харчинской зоны шлаковых конусов

Комп- нента	1002/4C	1002/4K	1002/1C	1002/2T	1004K	1004C	7700I	7701C	5605/2T	5606G	5601G	5612K	5612G	1023T	1007C	1006C
Породообразующие окислы, мас. %																
SiO ₂	52.30	52.30	52.54	51.64	56.10	57.49	59.00	59.81	49.8	49.52	50.78	53.14	52.54	50.76	52.35	52.60
TiO ₂	0.87	0.87	0.86	0.90	0.66	0.69	0.86	0.61	0.93	0.89	0.86	0.73	0.80	0.67	0.94	0.83
Al ₂ O ₃	12.53	12.53	12.37	12.36	14.74	14.40	15.20	16.04	13.35	13.96	13.89	14.05	14.42	10.61	14.98	13.789
Fe ₂ O ₃	3.45	3.45	3.08	4.32	2.57	2.55	3.80	6.07	4.39	4.00	4.92	4.74	5.46	1.97	3.77	3.30
FeO	5.44	5.44	5.70	4.90	4.84	5.04	1.89	—	4.98	5.20	4.18	2.42	2.07	6.39	5.24	6.54
MnO	0.16	0.16	0.16	0.16	0.13	0.15	0.11	0.12	0.16	0.18	0.17	0.12	0.16	0.23	0.16	0.14
MgO	11.88	11.88	11.48	11.20	7.39	6.88	5.07	4.58	12.32	12.05	11.03	8.38	8.47	18.68	9.66	9.52
CaO	8.62	8.62	8.50	8.74	7.87	6.92	6.74	6.24	8.75	9.26	8.86	7.75	7.92	6.50	6.94	8.90
Na ₂ O	2.69	2.69	2.84	2.76	3.48	3.35	4.05	4.55	2.82	2.85	2.87	3.55	3.72	2.13	2.97	2.44
K ₂ O	1.35	1.35	1.42	1.42	1.52	1.70	1.65	1.52	1.10	1.04	1.09	2.71	2.67	0.92	1.30	1.30
P ₂ O ₅	0.23	0.23	0.24	0.23	0.24	0.25	Н. о.	0.16	0.20	0.20	0.19	0.41	0.29	0.24	0.38	0.22
H ₂ O ⁻	0.20	0.20	0.20	0.24	0.18	0.26	0.09	0.33	0.18	0.24	0.12	0.49	0.44	0.00	0.28	0.12
H ₂ O ⁺	0.23	0.23	0.20	0.33	0.14	0.19	1.15	0.25	0.52	0.16	0.54	0.72	0.74	0.27	0.32	0.04
Сумма	99.95	99.95	99.59	99.20	99.86	99.87	99.84	100.03	99.50	99.55	99.50	99.20	99.70	100.10	99.34	99.73
Редкие элементы, ppm																
Cr	10.29	994	906	1068	506	518	198	442	862	826	636	393	311	1878	473	647
Ni	209	—	186	213	78	85	46.0	44.0	—	235	190	191	201	—	114	109
Co	46.6	45.3	45.9	40.0	32.0	32.1	20.0	19.6	48.1	47.6	44.1	35.0	34.7	59.9	41.6	45.6
Sc	28.9	28.0	29.9	29.9	25.0	25.8	—	16.4	31.4	36.0	37.0	24.0	26.0	24.2	32.4	37.9
V	—	—	—	—	250	—	175	150	—	225	250	208	200	—	—	—
Rb	—	16	14	—	26	19	22	21	11	11	10	33	32	15	—	—
Cs	0.42	0.41	0.53	0.56	—	0.58	—	0.59	0.23	0.12	0.40	0.46	0.50	0.41	0.45	0.38
Ba	726	675	756	816	483	462	771	950	301	362	375	1320	1374	353	383	381
Sr	696	—	710	707	474	527	610	663	—	488	472	1100	1186	223	443	429
Ta	0.14	0.11	0.09	0.08	—	0.11	—	0.15	0.09	0.07	0.07	0.14	0.10	0.09	0.13	0.03
Nb	—	—	3.0	—	2.1	2.0	3.0	2.0	—	—	—	2.2	—	2.0	—	—
Hf	2.00	2.22	2.03	2.11	—	2.29	—	2.47	1.96	2.10	1.70	3.34	3.70	1.64	2.17	1.87
Zr	—	—	79	—	76	83	98	100	—	112	—	144	198	73	—	—
Y	—	—	18	—	13	18	18	17	—	17	—	17	19	17	—	—

Таблица 2. Окончание

Компонента	1002/4C	1002/4K	1002/1C	1002/2T	1004K	1004C	7700I	7701C	5605/2T	5606G	5601G	5612K	5612G	1023T	1007C	1006C
Th	0.91	0.97	0.86	0.84	–	0.83	–	1.03	0.51	0.41	0.65	4.35	3.90	0.46	0.68	0.60
U	0.61	0.40	0.59	0.52	–	0.62	–	0.71	–	0.37	0.40	2.12	210	0.50	0.45	0.42
La	9.06	9.17	9.46	9.77	8.0	8.13	–	8.13	6.60	6.20	5.20	23.90	24.1	5.02	6.95	5.83
Ce	24.4	22.5	25.7	24.3	21.0	20.4	–	20.3	15.4	14.5	11.6	52.6	53.0	12.7	17.9	16.2
Nd	14.6	13.5	16.0	15.6	14.0	14.3	–	8.9	10.3	9.5	9.4	24.9	27.3	–	13.1	11.6
Sm	3.86	3.52	3.97	4.10	–	3.34	–	2.41	3.11	2.74	2.44	6.79	5.84	2.34	3.35	3.36
Eu	1.09	1.14	1.09	1.14	–	0.83	–	0.76	0.96	0.90	0.79	2.03	1.66	0.73	0.97	0.99
Tb	0.45	0.47	0.52	0.52	–	0.45	–	0.34	0.45	0.52	0.51	0.83	0.70	0.37	0.59	0.63
Yb	1.46	1.37	1.53	1.50	–	1.34	–	1.25	1.49	1.61	1.60	1.48	1.58	1.11	1.87	1.99
Lu	0.229	0.194	0.220	0.223	–	0.190	–	0.187	0.216	0.21	0.20	0.210	0.22	0.176	0.270	0.280
Расчетные величины																
$K_{mg}, \%$	71.3	71.3	70.7	69.4	64.8	62.6	63.0	59.9	71.1	70.9	69.6	69.1	68.4	80.3	66.6	64.1
La/Yb	6.2	6.7	6.2	6.5	–	6.1	–	6.5	4.4	3.9	3.3	16.1	15.3	4.5	3.7	2.9
La/Ta	65	83	105	122	–	74	–	54	73	89	74	171	241	56	53	194
Ni/Co	4.5	–	4.1	5.3	2.4	2.6	2.3	2.2	–	4.9	4.3	5.5	5.8	–	2.7	2.4
Ni/Sc	7.2	–	6.2	7.1	3.1	3.3	–	2.7	–	6.5	5.1	8.0	7.7	–	3.5	

Примечание. Образцы 1002/4C–7701C – вулкан Заречный; 5605/2T–5612G – вулкан Харчинский; 1023T–1006C – Харчинская зона шлаковых конусов (см. табл. 1). Химические анализы выполнены в ИВ ДВО РАН (кроме образцов 7700I и 7701C, анализированных в ИГЕМ РАН). Редкие элементы, за исключением Rb, Nb, Zr, V – во всех образцах, а также всех редких элементов в образцах 1004K и 7700I, определены методом ИНАА: в образцах с индексом "C" – в Корнелльском университете, Итака, США; с индексом "T" – в Институте горного дела и технологии, Сокорро, США; с индексом "G" – в ОИМГТ СО РАН; с индексом "K" – в Копенгагенском университете, Дания. Концентрации Rb, Nb, Zr, Y определены методом РФА; в большинстве образцов в ИГЕМ РАН, в образцах с индексом "K" – в Копенгагенском университете. Этим же методом определены содержания остальных редких элементов в образцах 1004K (в Копенгагенском университете) и 7700I (в ИГЕМ РАН).

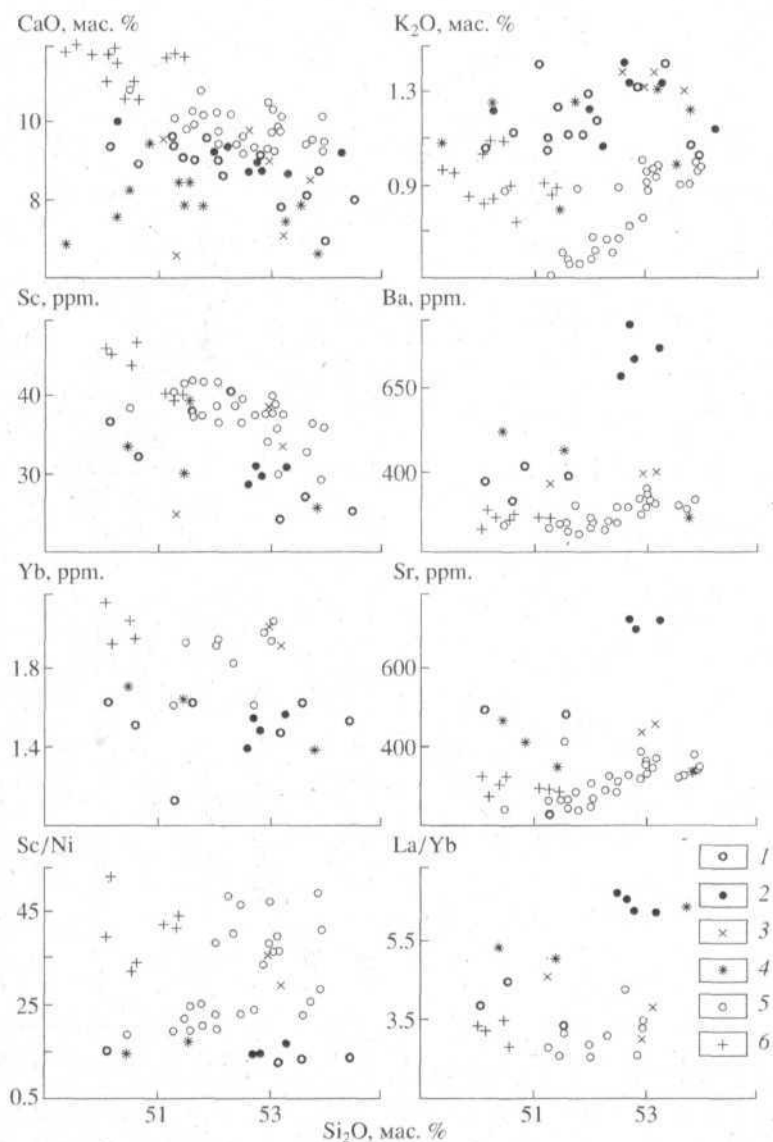


Рис. 5. Вариации содержания ряда главных и редких элементов в магнезиальных ($K_{mg} > 62$) умеренно калиевых базальтах Северной группы вулканов Камчатки; 1,2 - вулканы Харчинский и Заречный соответственно; 3 - Харчинская зона шлаковых конусов; 4,5 - вулканы Шивелуч и Ключевской соответственно; 6 - Толбачинский дол. Содержание SiO_2 пересчитано на безводный остаток. Для лав Ключевского вулкана кроме материалов авторов использованы данные работ [1, 29].

ток), так что некоторые образцы по формальным признакам могут быть отнесены к андезитобазальтам, а вся совокупность пород по соотношению FeO^*/MgO с SiO_2 - к известково-щелочной серии. Подчеркнем, что высокая кремнеземистость магнезиальных базальтов изученных вулканов сближает их с наиболее основными членами серии магнезиальных андезитов. Сильные известково-щелочные свойства обнаруживают и

андезиты Заречного вулкана, которые по величине K_{llmg} , как и базальты, соответствуют магнезиальному типу. Повышенная магнезиальность характерна и для андезитобазальтов из верхней части разреза Харчинского вулкана, химический анализ которых приведен в работе [11]: $K_{mg} = 60\%$ при 56.8 мас.% SiO_2 . Фактически все базальты и андезиты принадлежат породам умеренно калиевой серии, однако базальты "некка" Харчинского

Таблица 3. Химический состав глиноземистых андезитобазальтов Харчинской региональной зоны шлаковых конусов (I) и вулканических центров на Байдарном отроге вулкана Шивелуч (II)

Компонента	I			II			
	1005	1010	1014	5746/5	5722	5744	5742
Породообразующие окислы, мас. %							
SiO ₂	54.57	54.56	54.10	53.30	54.84	55.44	56.02
TiO ₂	0.97	0.89	0.97	0.89	0.92	0.87	0.81
Al ₂ O ₃	17.09	17.11	17.06	17.04	16.61	16.68	17.23
Fe ₂ O ₃	8.61	8.35	8.60	3.80	3.49	3.63	3.51
FeO	—	—	—	4.28	5.00	4.39	3.88
MnO	0.14	0.14	0.15	0.14	0.13	0.15	0.12
MgO	4.71	4.76	4.90	5.61	5.08	5.30	4.39
CaO	8.08	8.14	8.40	8.54	8.12	7.60	8.28
Na ₂ O	4.26	4.32	4.27	3.67	3.71	3.71	4.10
K ₂ O	1.30	1.26	1.41	1.24	1.20	1.30	1.31
P ₂ O ₅	0.25	0.24	0.27	0.08	0.21	0.21	0.20
H ₂ O ⁻	—	—	—	0.80	0.13	0.14	0.17
H ₂ O ⁺	0.11	0.39	0.03	0.54	0.31	0.58	0.39
Сумма	100.09	100.16	100.36	99.93	99.75	100.00	100.41
Редкие элементы, ppm							
Cr	—	—	—	—	86	86	56
Ni	—	—	—	34	25	29	22
Co	—	—	—	20	17	14	18
K _{mg} , %	52.0	53.1	53.0	56.5	52.7	55.3	52.7

Примечание. Обр. 1005 и 1010 – южный берег Харчинского озера; обр. 1014 – о-в Килунич в Харчинском озере; обр. 5746/5 и 5742 – обрыв правого борта р. Байдарная; обр. 5722 и 5744 – гребень Байдарного отрога. Обр. 5744 – некк, обр. 5746/5 – дайка, остальные – лавовые потоки.

вулкана имеют существенно более высокие концентрации щелочей (особенно калия) и должны быть отнесены к абсарокитам.

Высококалиевые магнезиальные базальты обнаружены на вулкане Шивелуч в тефре извержения 3600 ¹⁴C-лет назад, умеренно калиевые магнезиальные базальты – в тефре извержения 7600 ¹⁴C-лет назад, а магнезиальные андезиты являются преобладающим типом пород этого вулкана [6]. Умеренно калиевые магнезиальные базальты встречаются среди лав побочных конусов Ключевского вулкана [1, 12, 18, 20, 21, 29 и др.] и в региональной зоне шлаковых конусов Толбачинского дола, в частности среди продуктов последнего крупного извержения в этом районе [2]. Базальты изученных авторами вулканов сходны по составу с голоценовыми базальтами вулкана Шивелуч, но резко отличаются от магнезиальных базальтов Ключевского вулкана и Толбачинского дола более низкими концентрациями CaO при более высоких – K₂O в породах с близкими значениями K_{mg} (рис. 5).

Плагифиоровые андезитобазальты из зоны шлаковых конусов на северной периферии Харчинской зоны принадлежат к высокоглиноземистой серии и характеризуются пониженными по сравнению с описанными выше типами пород значениями K_{mg} и менее выраженными известково-щелочными свойствами. В отношении химического состава, как и петрографических особенностей, они весьма близки лавам вулканических центров Байдарного отрога на юго-западном фланге вулкана Шивелуч (табл. 3), а также соответствующим типам пород более южных вулканов Северной группы – Ключевского, Камня и др.

Распределение редких элементов. В соответствии с высокой магнезиальностью базальты и андезиты изученных вулканов обладают повышенными содержаниями Cr, Ni, Co и высокими значениями отношений Ni/Co, Ni/Sc, Cr/Sc (табл. 2). При этом в лавах Заречного вулкана концентрации указанных элементов, а также Sc и Sr от базальтов до андезитов закономерно убывают, а концентрации Rb и Cs возрастают. Однако содержания ряда других литофильных редких элемен-

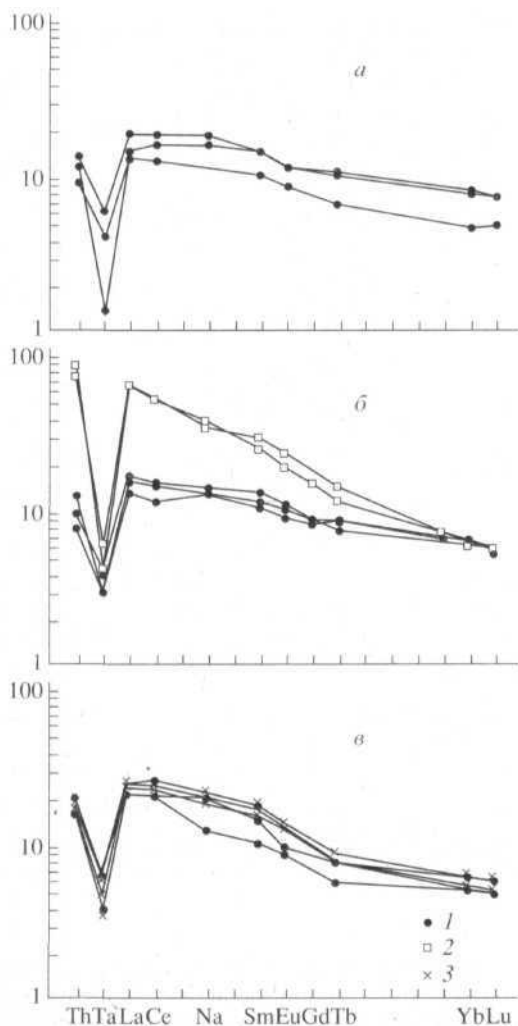


Рис. 6. Распределение Th, Ta, REE в магнезиальных лавах шлаковых конусов (а), вулканов Харчинский (б) и Заречный (в): 1 — умеренно калиевые базальты; 2 — абсарокиты "некка"; 3 — умеренно калиевые андезиты. Нормировано по хондриту Leedy.

тов, например Ba (кроме самых кислых разновидностей), U, Th, Ta, фактически не меняются, а легких редких земель (LREE) — даже немного убывают (рис. 6) при сходных величинах отношений La/Yb и Th/U.

Концентрации LREE, Th, U, Ba, Sr в базальтах Харчинского вулкана и Харчинской зоны шлаковых конусов существенно ниже, чем в базальтах Заречного вулкана при сходном и даже более низком значении величины K_{mg} (табл. 2, рис. 5 и 6). Однако абсарокиты "некка" Харчинского вулкана резко отличаются от всех других пород высокими концентрациями Rb, Ba, Sr, Zr, Hf, Th, U,

LREE, высокими значениями отношений La/Yb и особенно La/Ta при сходных содержаниях Ni, Ta, Y и тяжелых REE (табл. 2, рис. 6, см. также [26]). По особенностям редкоземельного состава они близки к абсарокитам Западной Камчатки [7, 36].

Несмотря на указанные различия, умеренно калиевые базальты Харчинско-Заречной группы вулканов в целом по особенностям редкоземельного состава сходны с магнезиальными базальтами вулкана Шивелуч [6], но заметно отличаются от таковых Ключевского вулкана и Толбачинского дола более низкими концентрациями Sc, Yb при более высоких концентрациях Ba, Sr, более низких значениях отношений Sc/Ni и более высоких — La/Yb и La/Ta (рис. 5). Вероятно, причина таких различий может быть связана с составом субстрата и особенностями процесса выплавления первичных магм. Тем не менее все изученные вулканические породы, как и лавы других вулканов Северной группы, объединяются принадлежностью к островодужной геохимической серии пород, характеризующихся в первую очередь дефицитом элементов группы титана (Ti, Nb, Ta), наличием минимумов Ta(Nb) на кривых распределения редких элементов (см., например, рис. 6), а также высокими значениями отношений La/Ta, La/Nb, Zr/Nb.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Условия кристаллизации расплавов. Ликвидусные фазы изученных базальтов — оливин и шпинель. Наиболее магнезиальный оливин, обнаруженный во вкрапленниках базальтов (обр. 1002/1, вулкан Заречный), отвечает $Fo_{90.3}$. Сходный состав ликвидусного оливина (Fe_{90-91}) зафиксирован в магнезиальных базальтах Ключевского вулкана [1]. Оливин такого состава мог бы находиться в равновесии с базальтовой жидкостью, отвечающей по химизму образцу 1002/1, при условии, что доля Fe_2O_3 в расплаве составляет 15% общего содержания железа. Достаточно обычно представление о том, что для мантийных базальтовых магм субдукционных зон указанная пропорция Fe_2O_3 и FeO типична (см., например, [25]). В этом случае температура кристаллизации оливина по геотермометру $\sim 1280^\circ C$ [33]. Чуть более низкие температуры ($1235-1275^\circ C$) получены по геотермометру для оливин-шпинелевых пар из этого образца [23]. Расчет фугитивности кислорода (по методу работы [30]) по валовому составу образца 1002/1 при принятом соотношении Fe_2O_3/FeO и $T = 1280^\circ C$ дает значение $lgfO_2 = 7.1$, что примерно соответствует буферу $FeO-NNO$.

Использование при таком расчете данных по соотношению Fe_2O_3 и FeO из химического анализа породы ($Fe_2O_3 = 0.32 FeO_{общ}^*$) дает значение $lgfO_2$ на 2.0-2.5 порядка выше буфера $FeO-NNO$. Этот

результат хорошо согласуется с данными, полученными по магнетит-ильменитовому сростку из основной массы базальта Харчинской зоны шлаковых конусов (обр. 1023; $T=1023^{\circ}\text{C}$; $\text{IgfO}_2 = 7, 8$; геотермометр [32]). Возможно, такая оценка фугитивности кислорода более достоверна, если учесть наличие в некоторых базальтах вулкана Заречный псевдоморфоз по вкрапленникам амфибола. Действительно, значения IgfO_2 на 2.0-2.5 порядка выше буфера NNO (как показывают расчеты по магнетит-ильменитовому геотермометру-геобарометру) характерны для амфиболосодержащих базальтов Курил [3]. Если принятая оценка справедлива, оливин, равновесный с расплавом, соответствующим по химизму образцу 1002/1, должен отвечать $\text{Fo}_{92.5}$. Оливины такого состава в базальтах Харчинского и Заречного вулканов, а также зоны шлаковых конусов авторами не обнаружены, однако встречаются в магнезиальных оливин-амфиболовых базальтах вулкана Шивелуч [6]. Оливины высокомагнезиального базальта Харчинской зоны (образец 1023) по магнезиальности не выше Fo_{89} , что позволяет предположить обусловленность высокого (80.3%) значения $K_{\text{тнг}}$ породы кумуляцией вкрапленников этого минерала. Оливин, равновесный с базальтовым расплавом такой магнезиальности, должен иметь состав Fo_{94-95} .

При описании минералогических особенностей пород отмечена существенная разница в содержании СаО в оливинах магнезиальных базальтов разных вулканов Северной группы: минимальные концентрации для вулканов Харчинский, Заречный и Шивелуч, промежуточные - для Ключевского, максимальные - для Толбачинского дола (см. рис. 1). Согласно экспериментальным данным (например, [31]), концентрация Са в оливине зависит от давления и температуры и низкие (≤ 1 мас.%) содержания Са свидетельствуют о высоких ("мантийных") глубинах кристаллизации оливинов и относительно пониженных температурах их кристаллизации. Исходя из приведенных данных, казалось бы, можно предполагать уменьшение глубины кристаллизации расплавов магнезиальных базальтов от первой группы вулканов к третьей. Однако наблюдаемые вариации концентраций СаО в оливинах магнезиальных базальтов коррелируются с содержаниями СаО в валовых составах пород (см. рис. 5), и, возможно, именно различия в химических составах базальтовых расплавов определяют уровень концентрации Са в оливинах.

Следующие во времени за высокомагнезиальным оливином и хромистой шпинелью кристаллические фазы изученных базальтов - клино- и ортопироксены, причем ортопироксены встречаются только в ядрах вкрапленников клинопироксена. Температуры их кристаллизации по двупирок-

сеновому геотермометру [37] лежат в пределах $1156-1207^{\circ}\text{C}$. Присутствие в некоторых образцах базальтов вкрапленников амфибол, хотя и замещенных магнетит-плаггиоклаз-пироксеновыми агрегатами, указывает, что температура расплава еще до подъема к поверхности понизилась по крайней мере до 1000°C - верхнего предела устойчивости амфибола в базальтовых расплавах при умеренном давлении воды [9]. Судя по температурам кристаллизации клинопироксен-ортопироксеновых и магнетит-ильменитовых пар из основных масс пород (соответственно $1010-1085$ и 1063°C), при излиянии расплавов на поверхность произошло некоторое разогревание их (может быть, вследствие декомпрессии при подъеме расплава), что и привело к разрушению амфибола. Наличие амфибола во вкрапленниках абсарокита из некка Харчинского вулкана также указывает на относительно низкие ($\leq 1000^{\circ}\text{C}$) температуры расплавов перед извержением. Оценка давления по содержанию А1 в амфиболе [27] дает значения $\sim 5.0-6.3$ кбар. По экспериментальным данным [9], кристаллизация амфибола в базальтовых расплавах возможна только при $P_{\text{H}_2\text{O}} \geq 1.4$ кбар, что

соответствует содержанию воды $\geq 3-4$ мас.%. Таким образом, концентрация воды в базальтах изученных вулканов, как и в голоценовых (также амфиболосодержащих) магнезиальных базальтах вулкана Шивелуч, должна быть существенно более высокой, чем в базальтах Ключевского вулкана. По существующим оценкам, содержание воды в родоначальных для лав Ключевского вулкана расплавах магнезиальных базальтов не превышает $1.0-1.5$ мас.% [10] или 2.0 мас.% [1, 17], а по прямым определениям в расплавах включения оливинов магнезиальных базальтов - лежит в пределах $1.2-2.5$ мас.% при среднем значении ~ 1.7 мас.% [34].

Ликвидусные температуры кристаллизации оливин-пироксеновых андезитов Заречного вулкана по двупироксеновому геотермометру составляют $1190-1210^{\circ}\text{C}$, а температура магмы перед извержением (по клино-ортопироксеновым парам в основной массе пород) $990-1000^{\circ}\text{C}$. Фугитивность кислорода, оцененная по валовому составу пород [30], соответствует подобным оценкам для базальтов (2.0-2.5 порядка выше буфера NNO). Что касается амфиболовых андезитов, то, согласно экспериментальным данным для вулкана Безымянный [10], кристаллизация амфибола в них происходит при температурах $< 875-925^{\circ}\text{C}$ при давлении $\geq 3-4$ кбар и содержании воды $> 6-7$ мас.%. Оценка давления по содержанию А1 в амфиболе [27] дает для изученных пород значение $5.4-6.6$ кбар, а оценка температур кристаллизации по амфибол-плаггиоклазовому геотермометру [35] - значение $825-865^{\circ}\text{C}$. Отметим также, что фугитивность кислорода в амфи-

боловых андезитах Камчатки и Курил, оцененная по магнетит-ильменитовому геотермометру-геобарометру, в среднем на 2.0-2.5 порядка выше буфера NNO [361].

Возможные причины вариаций составов магнезиальных базальтов Северной группы вулканов. Считается, что магнезиальные базальты ($K_{mg} = 65...75\%$) представляют собой разности вулканических пород, наиболее близкие к первичным (примитивным) магмам, так как только расплавы с подобными значениями K_{mg} , могут быть в равновесии с мантийным перидотитом. Представляется также, что составы таких примитивных магм, производные которых принадлежат к единой геохимической серии и проявлены на ограниченной территории, должны быть достаточно однородны. Вместе с тем, как показано выше, среди магнезиальных умеренно калиевых базальтов Северной группы вулканов по особенностям вещественного состава выделяются две географически разобщенные группы: лавы вулканов, расположенных к северу (вулканы Харчинский, Заречный, Шивелуч и Харчинская зона шлаковых конусов) и к югу (побочные конусы Ключевского вулкана, Толбачинский дол, отдельные потоки на вулкане Ушковский) от реки Камчатки. Магнезиальные базальты первой группы отличаются от таковых второй пониженными концентрациями Ca, Sc, Yb при повышенных содержаниях K, Ba, Sr и величинах отношений La/Yb, La/Ta и Ni/Sc. Кроме того, как показывает анализ минералогических данных, расплавы магнезиальных базальтов первой группы характеризовались также большей водонасыщенностью и повышенной фугитивностью кислорода.

Возможно, разница в составах магнезиальных базальтов связана с особенностями состава исходного мантийного субстрата. В таком случае, основываясь на геохимических особенностях пород, можно предположить, что базальты вулканов Харчинский, Заречный и Шивелуч выплавлялись из первично сильно деплетированного (дефицит Ca, Sc, Ta) вещества мантийного клина (гарцбургит?), подвергшегося интенсивному вторичному обогащению за счет метасоматического воздействия глубинных флюидов или частичных вылавок из субдуцируемой плиты с привнесом K, Ba, Sr и ряда других литофильных элементов. О проявлении такого процесса, в частности, могут свидетельствовать находки во многих ультраосновных включениях из лав вулкана Шивелуч хромистого магнезиального амфибола и флогопита [4]. Присутствие амфибола в рестите при генерации расплавов могло бы обеспечить дефицит Yb и Sc, наблюдаемый в базальтах этой группы вулканов, так как амфиболы отличаются повышенными коэффициентами распределения этих элементов (см., например, [22, 24]). Повышенная концентрация воды в расплавах магнезиальных базальтов

этой группы вулканов, возможно, связана с более интенсивной амфиболизацией исходного субстрата. Именно эта особенность, вероятно, обусловила относительно высокие концентрации SiO_2 в магнезиальных базальтах (до 53-54 мас.% в пересчете на сухой остаток), сближающие их с наиболее основными членами серии магнезиальных андезитов, и относительно пониженные температуры вылавок.

Подчеркнем наличие заметных вариаций вещественного состава умеренно калиевых магнезиальных базальтов даже для изученных вулканов, где лавы Заречного вулкана заметно обогащены LREE, Th, U, Ba, Sr при сходной магнезиальности. Это обстоятельство может, вероятно, указывать на еще большую гетерогенность первичных расплавов, связанную с мозаичным расположением участков мантии/подвергшихся разной степени метасоматической переработки.

О происхождении лав, ассоциирующих с магнезиальными базальтами. Ранее показано, что магнезиальные базальты на изученных вулканах ассоциируют с разными типами пород: на вулкане Заречный - с магнезиальными андезитами, подчиненными базальтам по объему; на вулкане Харчинский - с редкими андезитобазальтами (повышенной магнезиальности?) и еще более редкими абсарокитами; в Харчинской зоне шлаковых конусов - с глиноземистыми андезитобазальтами. Возникает вопрос, являются ли эти более редко встречающиеся типы пород продуктами разных путей фракционирования единой родоначальной магмы магнезиального базальта или представляют собой производные генетически независимых расплавов.

Расчеты по методу наименьших квадратов показывают, что магнезиальные андезиты Заречного вулкана могли быть получены из расплава, отвечающего по составу магнезиальному базальту этого вулкана при условии участия в кумулусе небольшого количества плагиоклаза (табл. 4). Добавим, что состав расплавных включений в оливинах магнезиальных базальтов, как и интегральный состав основных масс этих пород, отвечает низкокремнеземистым магнезиальным андезитам (см. табл. 1). Однако плагиоклаз встречается в базальтах изученных вулканов только в виде субфенокристаллов, явно более поздних по отношению к вкрапленникам оливина и клинопироксена, а составы магнезиальных андезитов из расплавных включений в оливинах и основных масс базальтов отличаются от составов андезитовых лав вулкана Заречный повышенными концентрациями Al_2O_3 и пониженными - FeO и MgO. Не согласуются с результатами расчетов и данные по редкоэлементному составу пород, в частности сходные в базальтах и андезитах концентрации LREE, Ba, U, Th, Ta. При фракционировании

Таблица 4. Результаты модельных расчетов формирования андезитов при кристаллизационной дифференциации базальтов Заречного вулкана

№ п.п.	Порода		Доля компонента, %					R
	исходная	конечная	Oi	Srx	Pl	Mt	M	
1	Базальт (1002/1С)	Андезит (1004К)	8.6	9.9	2.7	2.1	76.7	0.060
2	Базальт (1002/1С)	Андезит (1004С)	9.5	12.5	6.3	2.4	69.3	0.195
3	Базальт (1002/1С)	Андезит (7700I)	12.0	14.7	8.7	4.1	60.4	0.308
4	Андезит (1004К)	Андезит (7700I)	5.3	8.3	10.3	1.7	74.5	0.192

Примечание: Oi – оливин, Srx – клинопироксен, Pl – плагиоклаз, Mt – магнетит, M – расплав, R – сумма средних квадратичных отклонений. Состав минеральных фаз, удаляемых при фракционировании базальтов, отличается от состава фаз, удаляемых при фракционировании андезитов. В скобках – номер образца.

нии из базальтового расплава указанных в табл. 4 фаз, концентрации всех перечисленных элементов в остаточном расплаве должны были бы возрастать. Версия об участии во фракционировании небольшого количества апатита, которое могло бы обеспечить картину, наблюдаемую для LREE, отпадает, так как концентрации P_2O_5 в базальтах и оливин-пироксеновых андезитах фактически одинаковы (см. табл. 2).

Вместе с тем амфиболовые андезиты экструзий Заречного вулкана чрезвычайно близки по составу к андезитам экструзий Молодого Шивелуча [6, 13], также ассоциирующим с магнезиальными базальтами, хотя объемные соотношения базальтов и андезитов здесь прямо противоположны. Ранее, при изучении лав вулкана Шивелуч, высказано предположение, что магнезиальные андезиты возникли при АФК-процессах (ассимиляция-фракционирование-контаминация) взаимодействия глубинной магнезиальной базальтовой магмы с породами мантийного субстрата на малых глубинах по модели работы [28]. Возможно, что появление амфиболовых андезитов на вулкане Заречный связано с субрегиональным импульсом внедрения такой андезитовой магмы на северной периферии Северной группы вулканов Камчатка вдоль крупного дугового разлома, рассекающего фундамент вулкана Шивелуч и прилежащие территории.

По-видимому, с таким же региональным импульсом вулканической активности связано и проявление глиноземистых андезитобазальтов в Харчинской зоне шлаковых конусов. Именно такого рода породы, как уже упоминалось, слагают многочисленные одноактные вулканические центры на юго-западном склоне (Байдарном отроге) вулкана Шивелуч. Проявления глиноземистых андезитобазальтов в изученном районе находятся на юго-западном продолжении зоны указанных центров активности. Судя по данным математического моделирования, проведенного для Ключевского вулкана [1, 17], глиноземистые базальты и андезитобазальты могут быть получены при

полибарическом фракционировании расплава магнезиального базальта, содержащего ~2 мас.% воды. Сходство петрографического и химического составов этих пород с лавами вулканов Ключевской и Камень, а не Харчинского, Заречного и Шивелуча, позволяют предполагать проявление относительно менее водных ключевских магм и к северу от р. Камчатка. Добавим, что, по устному сообщению Камило Фергито из Университета Баффало (США), сравнение редкоэлементного состава глиноземистых андезитобазальтов Байдарного отрога с магнезиальными андезитами молодых экструзий вулкана Шивелуч, предпринятое по инициативе авторов настоящей работы, дало примерно тот же набор отличительных признаков, что получили авторы при сравнении магнезиальных базальтов северных и южных вулканов Северной группы.

Что касается абсарокитов "некка" Харчинского вулкана, то отрицательные результаты различных вариантов расчета модели фракционирования по методу наименьших квадратов не позволяют считать их продуктами простой кристаллизационной дифференциации умеренно калиевого магнезиального базальта. В любом случае необходим дополнительный привнос K, Rb, Ba, Sr, Th, U, Hf, Zr, легких и средних LREE. Большая часть указанных компонентов могла быть добавлена в расплав за счет флюидного переноса (эманационной дифференциации). Однако, учитывая данные по Zr и Hf-элементам, плохо переносимым в водном флюиде, - нельзя исключить гипотезы, что абсарокиты являются производными независимых расплавов, извлеченных из более обогащенного участка мантийного вещества, как это предполагалось для высококалиевых базальтов вулкана Шивелуч [6].

Выводы. 1. Подавляющая часть пород Харчинского, Заречного вулканов и Харчинской зоны шлаковых конусов принадлежит к магнезиальному типу и характеризуется повышенной магнезиальностью вкрапленников темноцветных минералов, среди которых в большинстве андези-

то и в некоторых базальтах наблюдается сочетание безводных (оливин, клинопироксен, редко - ортопироксен) и водосодержащих (амфибол, иногда флогопит) минеральных фаз. Судя по минералогическим данным, базальтовые и андезитовые расплавы отличались высоким содержанием воды ($>=3-4$ мас. % в базальтах и $> 6-7$ мас. % в андезитах) и кристаллизовались при высокой (на 2.0-2.5 порядка выше буфера NNO) фугитивности кислорода.

2. Магнезиальные базальты изученных вулканов близки по составу голоценовым магнезиальным базальтам вулкана Шивелуч, также приуроченного к северной периферии Северной группы вулканов Камчатки, но отличаются от соответствующих пород расположенных южнее вулканов этой группы (Ключевского, Толбачинской региональной зоны) более высокими концентрациями K, Ba, Sr, величинами отношений La/Yb, La/Ta и Ni/Sc при более низких содержаниях Ca, Sc, Yb. Исходные расплавы их были более водонасыщенными, окисленными и, по-видимому, менее нагретыми. Разница в составах базальтов, возможно, связана с разницей в степени деплетированности мантийного субстрата, из которого выплавлялись магмы, и разной степенью вторичного метасоматического обогащения его за счет глубинной флюидной фазы или частичных выплавов из субдуцируемой плиты (оба процесса интенсивнее проявились на северной периферии Северной группы вулканов).

3. Проявление магнезиальных амфиболовых андезитов на вулкане Заречный, а также глиноземистых андезитобазальтов в Харчинской зоне шлаковых конусов и на Байдарном отроге вулкана Шивелуч, возможно, связано с региональными импульсами внедрения самостоятельных расплавов по дуговому разлому, пересекающему фундамент вулкана Шивелуч и прилегающие территории. Предполагается происхождение расплавов магнезиальных андезитов при АФК-процессах взаимодействия магнезиальных базальтовых магм с веществом мантийного клина на малых глубинах по модели работы [28], а расплавов глиноземистых андезитобазальтов - при фракционировании относительно менее водных, чем заречно-харчинско-шивелучские, ключевских магм, проникших на северную периферию Северной группы вулканов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 96-05-65227). Авторы благодарны Е.Ю. Ждановой и С.А. Агееву (ИВГиГ ДВО РАН) за предоставленные образцы амфиболовых андезитов экструзий Заречного вулкана, Ф. Кайлу (институт горного дела и технологии, США) и Дж. Бейли (Копенгагенский университет, Дания) за определение в ряде образцов редких и редкоземель-

ных элементов, А.Д. Бабанскому (ИГЕМ АН РАН) за помощь в расчетах модели фракционирования и А.В. Колоскову (ИВГиГ ДВО РАН) за деловую критику при рецензировании статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арискин А.А., Бармина Г.С., Озеров А.Ю. Генезис высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана // Петрология. 1995. Т. 3. № 5. С. 496-521.
2. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975-1976 п., Камчатка)/Под ред. Федотова С.А. М.: Наука, 1984.637 с.
3. Волынец О.Н., Авдейко Г.П., Цветков А.А. и др. Минеральная зональность четвертичных лав Курильской островной дуги // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1990. № 1. С. 29-44.
4. Волынец О.Н., Ананьев ВВ. Хромистые амфиболы и слюды ультраосновных включений в четвертичных лавах Камчатки и Курил // Докл. АН СССР. 1989. Т. 307. № 5. С. 1203-1206.
5. Волынец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Дж.М. Харчинский и Заречный вулканы - уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4-5. С. 5-18.
6. Волынец О.Н., Пономарева ВВ., Бабанский А.Д. Магнезиальные базальты андезитового вулкана Шивелуч // Петрология. 1997. Т. 5. № 2. С. 206-221.
7. Волынец О.Н., Пузанков Ю.М., Аношин Г.Н. Геохимия неоген-четвертичных вулканических серий Камчатки // Геохимическая типизация магматических и метаморфических пород Камчатки. Тр. Ин-та геологии и геофизики СО АН СССР. Вып. 390. Новосибирск, 1990. С. 73-144.
8. Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж. Породообразующие минералы. Т. 2. Цепочечные силикаты. М.: Мир, 1965.406 с.
9. Йодер Г.С., Тилли К.Э. Происхождение базальтовых магм. М.: Мир, 1965. 248 с.
10. Кадык А.А., Максимов А.П., Иванов Б.В. Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов. М.: Наука, 1986. 398 с.
11. Кутыев Ф.Ш., Эрлих Э.Н. К петрологии базальтов Харчинской группы вулканов // Бюл. вулканол. станций. 1973. № 49. С. 83-92.
12. Леонова Л.Л., Кирсанов И.Т. Геохимия базальтов Ключевского вулкана (Камчатка) // Геохимия. 1974. № 6. С. 676-684.
13. Мелекесцев И.В., Волынец О.Н., Ермаков В.А. и др. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 84-92.
14. Меняйлов А.А. Вулканы Харчинских гор // Тр. Лаб. вулканологии. 1949. Вып. 6. С. 53-61.
15. Минералы. Т. 3. Вып. 2. М.: Наука, 1981.614 с.
16. Минералы. Т. 3. Вып. 3. М.: Наука, 1981. 398 с.
17. Озеров А.Ю., Арискин А.А., Бармина Г.С. К проблеме генетических взаимоотношений высокоглиноземистых и высокомагнезиальных базальтов-Ключевского вулкана (Камчатка) // Докл. РАН. 1996. Т. 350. № 1.С. 104-107.

18. *Пуйн Б.И.* Ключевская сопка и ее извержение в 1944-1945 гг. и в прошлом //Тр. Лаб. вулканологии. 1956. № 11.309 с.
19. *Соболев А.В., Никогосян И.К.* Петрология магматизма долгоживущих мантийных струй: Гавайские о-ва (Тихий океан) и о-в Реюньон (Индийский океан) // Петрология. 1994. Т. 2. № 2. С. 131-168.
20. *Хренов А.П., Антипин В.С., Чувашов Л.А., Смирнова Е.В.* Петрохимические и геохимические особенности базальтов Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1989. № 3. С. 3-15.
21. *Хубуная С.А., Богоявленский С.О., Новгородцева Т.Ю., Округина А.И.* Минералогические особенности магнезиальных базальтов как отражение фракционирования в магматической камере Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 46-68.
22. *Arth G.J., Barker F.* Rare-earth partitioning between hornblende and dacitic liquid and implication for the genesis of trondhjemitic-tonalitic magmas // Geology. 1976. V. 4. P. 534-536.
23. *Fabrics J.* Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes // Contrib. Mineral, and Petrol. 1979. V. 69. № 4. P. 329-336.
24. *Gill J.B.* Role of trace element partition coefficients in models of andesitic genesis // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1978. V. 42. № 6A. P. 709-724.
25. *Gorton M.P.* The geochemistry and origin of Quaternary volcanism in the New Gebrides // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1977. V. 41. № 9. P. 1257-1270.
26. *Hochstaeder A.H., Kepezhinskas P., Defani M.* Insights into volcanic arc mantle wedge from magnesian lavas from the Kamchatka arc // J. Geoph. Res. 1996. V. 101. № B1. P. 697-712.
27. *Johnson M.S., Rutherford M.J.* Experimental calibration of the aluminium-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks // J. Geology. 1989. V. 17. P. 837-841.
28. *Kelemen P.B.* Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic magma. 1. Phase relations, the origin of calc - alkaline magma series and the formation of discordant dunite // J. Petrology. 1990. V. 31. P. 51-98.
29. *Kersting A.B., Arculus R.J.* Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia: the role of high-flux recharged, tapped, and tract isolated magma chamber(s) in the genesis of high-Al₂O₃ from high-MgO basalt // J. Petrol. 1994. V. 35. P. 1-41.
30. *Kilink C, Cannichael I.S., Rivers M., Sack R.O.* The ferric-ferrous ratio of natural silicate liquids equilibrated in air // Contrib. Mineral, and Petrol. 1983. V. 83. № 1. P. 136-140.
31. *Kohler T.P., Brey G.P.* Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with application // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1990. V. 35. P. 2375-2388.
32. *Powell R., Powell M.* Geothermometry and oxygen barometry using coexisting iron-titanium oxides: a reappraisal // Mineral. Mag. 1977. V. 41. № 2. P. 257-263.
33. *Roeder P.L., Emslie R.F.* Olivine-liquid equilibrium // Contrib. Mineral, and Petrol. 1970. V. 29. № 4. P. 275-289.
34. *Sobolev A.V., Chaussidan M.* H₂O concentration in primary melts from suprasubduction zones and mid-oceanic ridges: Implications for H₂O storage and recycling in the mantle // Earth and Planet. Sci. Lett. 1996. V. 137. P. 45-55.
35. *Spear F.S.* Amphibole-plagioclase equilibria: an empirical model for the relation albite + tremolite = edenite + quartz // Contrib. Mineral, and Petrol. 1981. V. 77. № 4. P. 355-364.
36. *Volynets O.N.* Geochemical types, petrology and genesis of Late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island-arc system // Internat. Geol. Rev. 1994. V. 3. № 4. P. 373-405.
37. *Wood B.J., Banno S.* Garnet - orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems // Contrib. Mineral, and Petrol. 1973. V. 42. № 2. P. 109-124.

Kharchinskii and Zarechnyi Volcanoes, Unique Centers of Late Pleistocene Magnesian Basalts in Kamchatka: Rock Composition

[O. N. Volynets]*, I. V. Melekestsev*, V. V. Ponomareva*, J. M. Yagodzinski**

**Institute of Volcanic Geology and Geochemistry, Far East Division, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatskx, 683006, Russia*

***Dickinson College, Faculty of Geology, Carlisle, Pa., 17013-2896, USA*

Received October 2, 1997

Most of the Kharchinskii and Zarechnyi rocks as well as those of Kharchinskii cinder cones belong to magnesian type. Mineralogical data suggest that both basaltic and andesitic melts were rich in water (>=3-4 and >6-7 wt.%, respectively) and crystallized at high oxygen fugacity (2.0-2.5 orders of magnitude higher than the NNO buffer). These features coupled with geochemical characteristics of these basalts and andesites indicate that they are similar to the rocks of Shiveluch, a volcano also located on the northern flank of the Northern volcanic group, but differ from the rocks of other volcanoes of this group which are located further south. The Kharchinskii, Zarechnyi and Shiveluch magnesian basalts differ from those of Kliuchevskoi volcano and Tolbachik lava field by their higher K, Ba and Sr and lower Ca, Sc, and Yb contents at higher La/Yb, Ni/Sc, and La/Ta ratios, while their initial melts were more hydrous and more oxidized.