

УДК 550.42

© 1990 г.

*О. Н. ВОЛЫНЕЦ, А. М. АСАВИН, Л. Н. КОГАРКО***ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЩЕЛОЧНЫХ И СУБЩЕЛОЧНЫХ ВУЛКАНИТАХ КАМЧАТКИ**

Рассмотрена геохимия редких элементов в щелочных и субщелочных вулканитах Камчатки. На основе построенных ранее моделей образования серий лав в процессе кристаллизационной дифференциации рассчитаны тренды фракционирования элементов. В целом теоретические тренды совпадают с природными. Объяснение поведения ниобия, меди, рублидия требует привлечения ряда дополнительных механизмов.

В работе [1] была рассмотрена модель кристаллизационной дифференциации для лав двух вулканов срединного хребта Камчатки: Белоголовского (щелочно-оливин-базальт-трахит-комендитовая серия) и Уксичана (шошонит-латитовая серия). Расчеты проводились на основе данных о валовом химическом составе пород и минералов-вкрапленников по программе «Минерал» ГЕОХИ АН СССР. Установлено, что в каждом из рассмотренных вулканов можно выделить ряды пород, связанные процессами кристаллизационной дифференциации: латит — кварцевый латит — трахидацит — трахириодацит (Уксичан), трахиандезибазальт — трахиандезит — кварцевый трахит — трахириолит — комендит и трахиандезибазальт — трахит (Белоголовский). Наиболее примитивные породы этих вулканических систем (щелочные оливиновые базальты, вулк. Белоголовский; высококалиевые базальты и шошониты, вулк. Уксичан), согласно расчетам, не связаны с кислыми дериватами процессами кристаллизационной дифференциации. Показано также, что эволюция расплава вулканической системы Белоголовский по комендитовому или трахитовому пути может быть обусловлена разным давлением флюидной фазы. Цель настоящей работы — построение модели фракционирования редких элементов в ходе кристаллизационной дифференциации изученных вулканических серий.

Определение содержаний большинства редких элементов выполнено в Институте геохимии СО АН СССР. Рубидий определяли методом фотометрии пламени (аналитик Г. И. Селиванова), барий и медь — методом количественного спектрального или рентгеноспектрального анализа (аналитики С. Н. Ярошенко, А. Л. Финельштейн). Содержания Nb, Ta, Zr, редких земель и Y получены спектрохимическим методом (аналитики С. Н. Ярошенко, А. Д. Глазунова, Л. И. Чувашова, Е. А. Смирнова). Для лав вулк. Уксичан содержания Cu определены в ИГиГ СО АН СССР методом атомной абсорбции (аналитик Ф. М. Запорощенко). Здесь же методом нейтронной активации в семи образцах лав Белоголовского вулкана и пяти образцах вулк. Уксичан определено содержание редких земель (аналитик В. С. Пархоменко). Кроме того, в Центральной аналитической лаборатории ГЕОХИ АН СССР методом рентгенофлюоресцентного анализа часть проб анализирована на Sr, V, Nb (аналитик Н. А. Коровкина). Следует отметить, что рентгенофлюоресцентный метод обладает низкой чувствительностью на Nb, поэтому для пород серии вулк. Уксичан в табл. 1 приводятся данные, полученные спектрохимическим методом. Полученные данные по распределению редких элементов в породах щелочных серий приведены в табл. 1 и графически представлены на рис. 1.

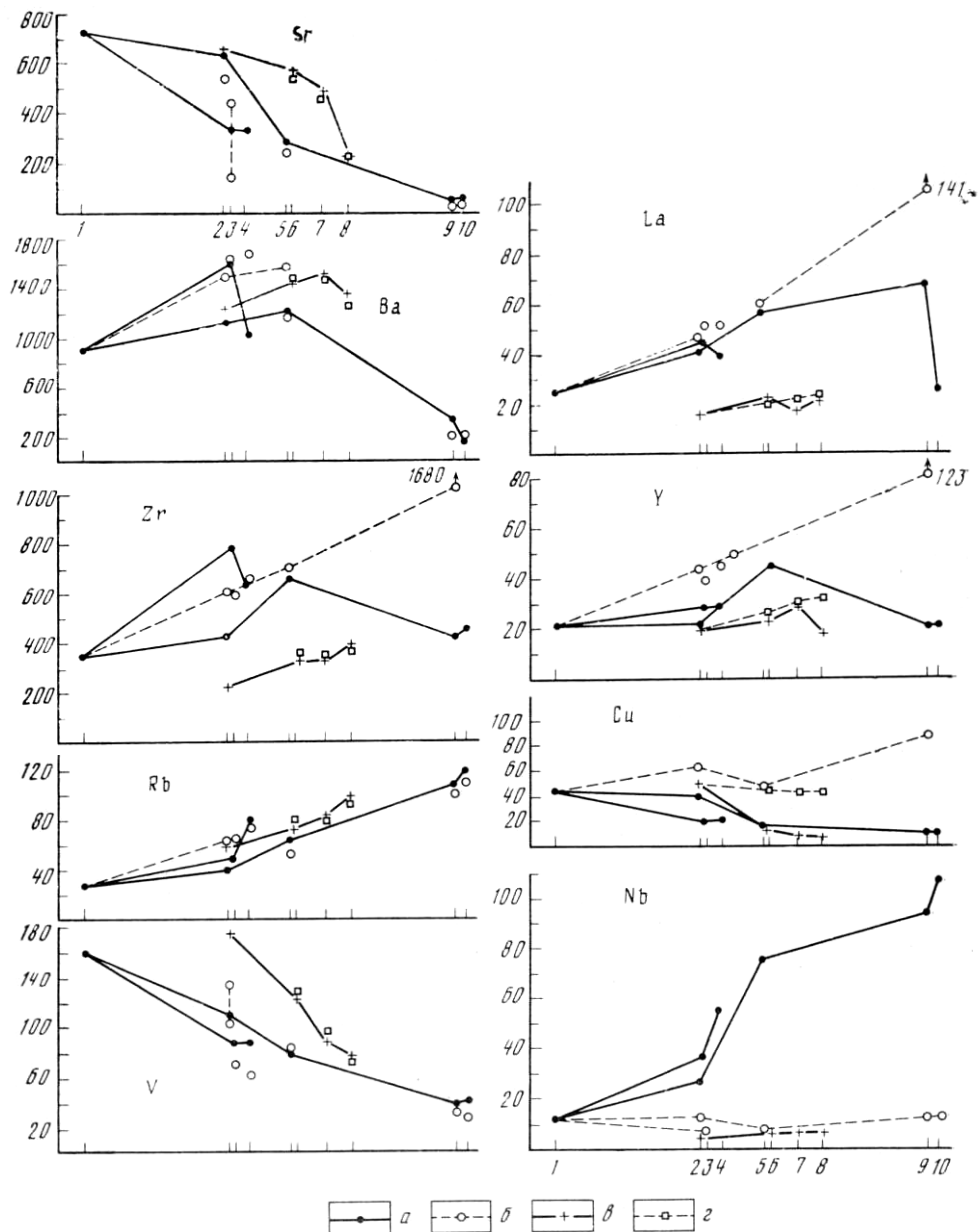


Рис. 1. Расчет фракционирования и изменение концентраций редких элементов в породах серии вулканов Белоголовский и Уксичан

Реальные концентрации и тренды: *a* — в серии вулк. Белоголовский, *b* — в серии вулк. Уксичан; расчетные концентрации и тренды: *v* — в серии вулк. Белоголовский, *z* — в серии вулк. Уксичан. По вертикальной оси концентрации редких элементов в 10^{-4} мас.%, по горизонтальной оси цифры обозначают: серия вулк. Белоголовский: 1 — трахиандезит-базальт, 2 — трахиандезит, 3 — трахит двуполовошпатовый, 4 — трахит биотитовый, 5 — кварцевый трахит, 9 — трахириолит, 10 — комендит; серия вулк. Уксичан: 2 — латит, 6 — кварцевый латит, 7 — трахидацит, 8 — трахириодацит. Расположение пород на оси согласно расчетной величине $(1-F)$ при их образовании (см. текст)

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВУЛКАНИТОВ

Сопоставление щелочнобазальт-комендитового ряда вулк. Белоголовский и шошонит-латитового вулк. Уксичан выявило много общего в их геохимии. Для пород этих серий отмечаются повышенные концентрации редких щелочных и щелочноземельных элементов Sr, Ba, Rb, а также высокие значения K/Na, Rb/Sr, Ba/Sr. Такие черты характерны в целом для серий повышенной щелочности, развитых в тыловых частях остров-

Распределение редких элементов в породах

Элемент	Вулк. Белоголовский						
	щелочной оливиновый базальт	трахиандезито- базальт	трахианде- зит	трахит двупо- левошпатовый	трахит биотитовый	кварцевый трахит	трахирио- лит
Rb	20 (4)	27 (3)	40 (6)	48 (10)	79 (8)	64 (7)	108 (3)
Ba	663 (9)	900 (2)	1117(3)	1650 (4)	1040 (5)	1235 (2)	350 (1)
Sr	857 (2)	727 (2)	640 (2)	334 (3)	342 (3)	282 (1)	52 (2)
V	240 (2)	163 (2)	110 (3)	86 (3)	88 (3)	78 (1)	38 (2)
Cu ^{3*}	64 (4)	44 (2)	41 (6)	19 (3)	23 (5)	15 (1)	12 (2)
Nb ^{1*}	20,7 (1)	12 (2)	27 (3)	37 (3)	55 (3)	76 (1)	95 (2)
Ta ^{2*}	1,2 (3)		1,5 (4)		3,3 (1)	1,7 (1)	5,4 (1)
Zr	281 (3)	350 (1)	431 (4)	780 (2)	631 (4)	663 (1)	420 (2)
La	25,7 (3)	25 (2)	40 ^{2*} (1)	45,0 (6)	39,8 (1)	57 (2)	67,2 (1)
Yb	2,57 (3)	2,4 (2)	3,0 ^{2*} (1)	3,0 (6)	3,38 (1)	3,7 (2)	4,94 (1)
Y ^{2*}	21 (1)	22,5 (2)	22 (1)	28,3 (6)	29 (1)	46,0 (2)	21 (1)

Примечание. В скобках указано количество усредненных анализов.

^{1*} Данные по Nb в породах вулк. Уксичан и щелочных оливиновых базальтах вулк. Белоголовский данные получены рентгенофлуоресцентным методом ГЕОХИ АН СССР (Москва).

^{2*} Данные по La и Yb в этих породах, а также все данные по Y получены с помощью спектрохимиче

^{3*} Данные по Cu в породах вулк. Уксичан получены атомно-абсорбционным методом в ИГИГ СО АН СО АН СССР.

ных дуг [2, 3]. Тренды фракционирования большинства редких элементов в обеих магматических системах близки. В то же время, как уже отмечалось в [3], серия вулк. Белоголовский резко отличается от типичных островодужных высококальциевых пород повышенными концентрациями Zr, Nb, Ta и LTR, приближаясь по этим признакам к породам континентальных рифтов [4]. Следует подчеркнуть, что наиболее основные породы, хотя и не связаны с более кислыми членами ряда процессами кристаллизационной дифференциации, о чем свидетельствуют проведенные ранее расчеты, обладают теми же геохимическими особенностями, что и остальные породы соответствующих серий. Так, щелочные оливиновые базальты Белоголовского вулкана, как и другие его лавы, при повышенной концентрации Nb, Ta, Zr и LTR отличаются низкими значениями Zr/Nb, La/Nb и высокими — La/Yb, Ta/Yb. Что касается вулк. Уксичан, то все породы, включая высококальциевые базальты и шошониты, при повышенных концентрациях рубидия и калия характеризуются невысокими содержаниями перечисленных элементов, низкими значениями La/Yb, Ta/Yb и высокими — Zr/Nb. Это позволяет говорить, что наименее дифференцированные породы, несомненно, родственны соответствующим кислым лавам, развитым в изученных вулканических сериях.

Остановимся более подробно на поведении элементов в ходе эволюции расплавов обеих магматических систем и особенностях изменения концентраций редких элементов в отдельных сериях. По типу фракционирования в ходе дифференциации можно выделить следующие группы редких элементов.

1. Элементы, которые накапливаются в ходе дифференциации: Rb, Nb, Ta, редкие земли (особенно цериевая группа). Накопление Nb относительно Ta и LTR относительно НТР при этом крайне незначительно, особенно это касается серии вулк. Уксичан. Изменение отношения Nb/Ta в серии вулк. Белоголовский в ходе эволюции незакономерно и колеблется от 20 до 40, по-видимому, эти вариации в большей степени связаны с недостаточной точностью анализов. По литературным данным [5, 6] известно, что величина Nb/Ta практически не меняется в ходе эволюции магм. Изменение величины La/Yb также невелико: в серии вулк. Белоголовский от 10 до 15, а в серии вулк. Уксичан от 5 до 7. Спектры распределения редкоземельных элементов в изученных сериях вулканитов существенно различаются (рис. 2). Для лав шошонит – латитовой серии

вулканов Белоголовский и Уксичан ($n \cdot 10^{-4}$ мас.%)

комендит	Вулк. Уксичан					
	высококалий- вый базальт	шошонит	латит	кварцевый латит	трахидацит	трахириодацит
120 (4)	24 (4)	51 (9)	61 (11)	72 (6)	84 (4)	99 (6)
175 (2)	742 (4)	1092 (9)	1227 (11)	1450 (6)	1500 (6)	1350 (6)
63 (3)	735 (1)	686 (2)	643 (2)	578 (2)	490 (2)	225 (2)
41 (3)	219 (1)	210 (2)	180 (2)	123 (2)	88 (2)	75 (2)
12 (2)	108 (4)	67 (9)	50 (11)	15 (7)	8 (3)	9 (6)
108 (3)	4,1 (3)	5,6 (4)	5,4 (4)	6,7 (4)	7,1 (4)	7,0 (4)
6,7 (2)	0,19 (2)			0,5 (1)	0,73 (1)	0,68 (1)
447 (3)	157 (3)	179 (4)	221 (4)	330 (4)	342 (4)	395 (4)
25,1 (1)	11,0 (2)	19 ^{2*} (2)	15,5 ^{2*} (4)	23,4 (1)	17,4 (1)	22,3 (1)
5,4 (1)	2,3 (2)	3,2 ^{2*} (2)	2,6 ^{2*} (4)	3,4 (1)	3,51 (1)	4,44 (1)
22,5 (2)	20 (3)	26 (2)	21 (4)	23 (2)	29 (1)	18(1)

получены с использованием спектрохимического метода в ГЕОХИ СО АН СССР (Иркутск), остальные -
Ского метода. Остальные данные по La, Yb, Ta получены нейтронно - активационным методом.
СССР, остальные данные по Cu, а также по Rb, Ba, Sr с помощью спектрохимического метода в ГЕОХИ

(вулк. Уксичан) характерны относительно пологие кривые распределения TR (известково-щелочной тренд), тогда как для лав щелочнооливин-базальт-комендитовой серии (вулк. Белоголовский) — значительно более крутые, что характерно для щелочных пород. Трахириолиты и комендиты Белоголовского вулкана отличаются резким европиевым минимумом, тогда как для кислых лав вулк. Уксичан он выражен значительно слабее.

2. Элементы, концентрация которых в расплаве в ходе дифференциации падает. К ним относятся ванадий, медь и стронций. В отношении стронция можно отметить, что если на начальных стадиях в обеих сериях характер фракционирования этого элемента аналогичен, то при образовании конечных членов дифференцированного ряда в серии вулк. Уксичан снижение концентрации Sr более резкое по сравнению с наблюдаемым на вулкане Белоголовский при переходе от трахиандезитов к комендитам (рис. 1).

3. Элементы, концентрация которых в ходе дифференциации проходит через максимум. К таким элементам для трахиандезит-базальт-комендитового дифференцированного ряда пород на вулк. Белоголовском относятся барий, цирконий, иттрий, содержания которых достигают максимума при образовании кварцевого трахита. В лавах вулк. Уксичан лишь концентрации бария и иттрия проходят через максимум (в трахидацитах), тогда как цирконий последовательно накапливается в ходе дифференциации.

В породах вулк. Белоголовский картина распределения редких элементов несколько усложняется. Так, в комендитах из различных экструзивных тел наблюдаются как высокие, сходные с отмеченными в трахириолитах, так и резко пониженные концентрации LTR и Y (рис. 1, 2), что, по-видимому, связано с гетерогенностью комендитовых расплавов. Отмечается также значительная разница уровня концентраций редких элементов в близких по степени дифференциации трахитах: в биотитовых трахитах по сравнению с двуполевошпатовыми понижены концентрации TR, Y и повышены Nb, Rb.

Представленная картина распределения редких элементов в породах изученных серий достаточно сложна. В моделях мы старались рассмотреть главные особенности распределения микроэлементов на основе использования механизма кристаллизационной дифференциации.

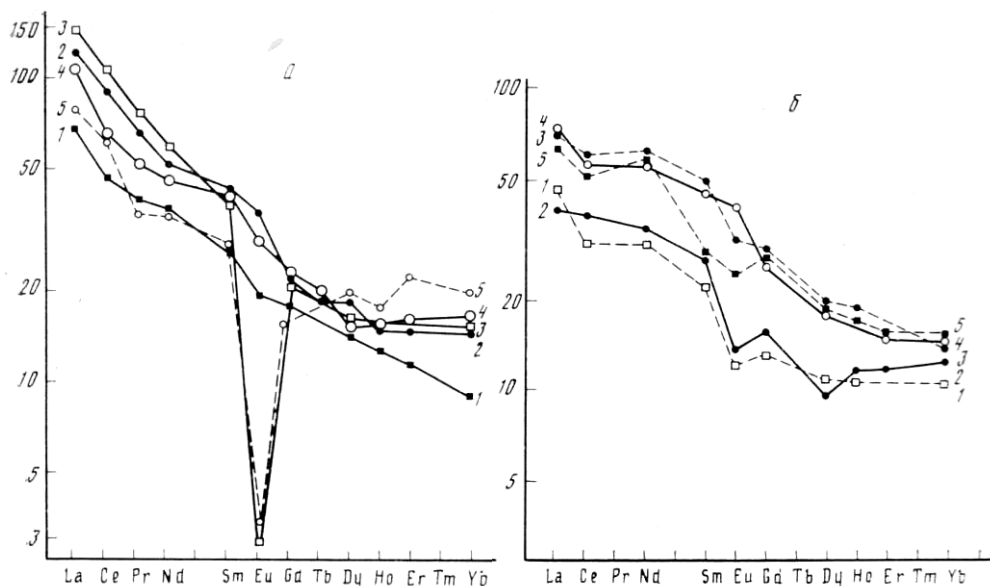


Рис. 2. Распределение редкоземельных элементов в породах вулканов Белоголовский (а) и Укичан (б)

Лавы вулк. Белоголовский: 1 — щелочной оливиновый базальт, 2 — трахиандезит, 3 — трахириолит, 4 — биотитовый трахит, 5 — комендит; лавы вулк. Укичан: 1 — риодацит, 2 — высококалийевый базальт, 3 — кварцевый латит, 4 — шошонит, 5 — латит

МОДЕЛЬ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Расчетные методы анализа распределения редких элементов в ходе дифференциации магматических расплавов последнее время широко используются в геохимии. Можно отметить ряд работ по щелочнобазальтовым сериям океанических островов (о-ва Южной Атлантики [7, 8], о-ва Реюньон, Бове, Родригес и др. [9—12]), континентальным базальтовым формациям (Афарский рифт, Австралийская Восточная провин-

Таблица 2

Модели формирования лав повышенной щелочности в процессе кристаллизационной дифференциации

Исходный расплав	Конечный расплав	F	Доля минералов в кумулусе *					
			оливин	клино-пироксен	титано-магнетит	ортопироксен	плаггиоклаз	калиевый полевой шпат
<i>Вулк. Белоголовский</i>								
Трахиандезит	Трахиандезит	0,42	5	11	7	0	77	0
»	Трахит двуполево-шпатовый	0,4	0	19	10	5	67	0
»	Трахит биотитовый	0,34	0	16	10	4	70	0
Трахиандезит	Кварцевый трахит	0,75	0	37	21	0	42	0
»	Комендит	0,34	0	17	11	0	29	43
Кварцевый трахит	Трахириолит	0,34	0	4	5	0	6	85
Трахириолит	Комендит	0,99	0	0	0	0	0	100
<i>Вулк. Укичан</i>								
Латит	Кварцевый латит	0,73	9	8	13	0	40	0
»	Трахидациит	0,66	3	21	14	0	62	0
Кварцевый латит	»	0,88	0	42	12	0	46	0
Трахидациит	Трахириодацит	0,9	0	0	15	0	85	0

* Содержания минеральных фаз в кумулусе приведены к 100%; F — доля конечного расплава в данном шаге фракционирования.

Использованные коэффициенты распределения редких элементов минерал — расплав

Элемент	Оливин	Клинопироксен	Ортопироксен	Магнетит	Плагиоклаз	Калиевый полевой шпат
Sr	—	0,12, щелочной базальт [33]; 0,19, андезит [0,17]; 0,25, трахиандезит [17]	—	0,13, латит [17]; 0,55, трахидацит [17]	1,7, базальт, вулк. Толбачик; 2,15, базальт, вулк. Белоголовский; 4,06—5,56, трахиандезит, вулк. Белоголовский; 9,44, латит [17]	2,98, кварцевый трахит [33]
Ba	0,05, базальт [17]	0,04, базальт, вулк. Уксичан; 0,13, трахит кварцевый [33]	—	0,1, латит [17]; 0,38, трахилипарит [17]; 0,86, трахидацит [17]	0,37, базальт, вулк. Белоголовский; 0,53, трахиандезит; 0,57, трахиандезит; 1,72, латит [17]	3,7, трахириолит, вулк. Белоголовский; 3,01, кварцевый трахит [33]; 5,19, комендит [17]
Rb	—	0,04 андезит [32]	—	—	0,07, базальт, вулк. Толбачик [34]; 0,03, трахиандезит, вулк. Белоголовский	0,43, трахириолит, вулк. Белоголовский; 0,8; риолит [16]
V	—	1,3[25]	4, андезиты [24]	15-20-30 [19]; 24, андезит [29]	—	—
Cu	0,2, базальт [25]	0,5, базальт [25]; 1,4, андезит [29]	2,2, бенморит [25]	7,1, андезит [29]	—	—
Zr	—	0,38, нефелиновый трахит [31]; 1,2, комендит [22]	0,2, кислые породы [30]	1,8, трахиты, риолиты [22]; 3,2, базальт [22]	—	—
La	—	0,19, трахиандезит [8]	—	0,34, фонолит [20]	0,23, андезит [18]; 0,58, риолит [18]; 0,66, дацит [18]	0,11, риолит [16]
Y	—	1,1, андезит [24]	0,8, андезит [24]	0,42, фонолит [20] *	0,1, кислые породы [30]	0,02, трахитовый фонолит [19]
Nb	—	0,03, нефелиновый трахит [31]; 0,38, риолит [22]	0,8, кислые породы [30]	10,7, риолиты, трахиты [22]; 13, базальт [22]	—	—

* Использовалось значение для иттербия.

ция [13, 14]), островодужным вулканитам (Антильские о-ва, Италия [15, 16]). Так же как и авторы перечисленных работ, для расчетов мы использовали уравнение Рэлея, описывающее поведение элемента-примеси в ходе фракционной кристаллизационной дифференциации:

$$C_2 = C_1 F^{D-1}, \quad (1)$$

где C_1 и C_2 — концентрации микрокомпонента в исходном и конечном расплавах; F — степень фракционирования; D — комбинированный ко-

эффициент распределения, определяемый как $\sum_{i=1}^n X_i K_i$, где X_i — доля

фазы в кумулусе, а K_i — коэффициент распределения редкого элемента между этой фазой и расплавом. Величины F и X_i были получены нами ранее [1] на основе расчета модели кристаллизационной дифференциации по макрокомпонентам (табл. 2). Использованные значения коэффициентов распределения частично взяты из литературных данных, а частично получены по собственным материалам (табл. 3). Результаты расчета представлены на рис. 1. Следует отметить, что при построении рис. 1 в качестве индекса дифференциации использовали значение $(1-F)$ (табл. 2). Эта величина определяет долю удаленных на данном этапе эволюции расплава кристаллов (долю кумулуса), что отражает степень дифференцированности системы. Применение в качестве индекса дифференциации содержаний SiO_2 , MgO или величин MI , AC , IF и т. п. не позволяет расположить породы в единый ряд согласно их реальной степени фракционирования, поскольку на разных этапах эволюции выделение из расплава одного и того же количества кумулуса приводило к неравномерному изменению этих параметров. Значение $(1-F)$ каждого шага дифференциации (табл. 2) откладывалось от точки положения исходного расплава (исключение представляет т. 10 рис. 1 — комендиты вулк. Белоголовский, которая из-за очень маленькой величины $(1-F)$ нанесена без соблюдения масштаба). Для сопоставления серии вулк. Уксичан и Белоголовский точки латита и трахиандезита на рис. 1 совмещены. В предыдущей работе показано, что латиты по химическому составу близки к трахиандезитам вулк. Белоголовский, кроме того, на диаграмме лейцит — фаялит — кварц точки этих пород расположены рядом [1].

Члены вулканических серий, которые, согласно расчетам, не связаны с остальными дифференциатами процессами кристаллизации (щелочные оливиновые базальты, шошониты, высококалийевые базальты), на рис. 1 не показаны.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Что показывает совпадение расчетных содержаний с реальными? С одной стороны, оно подтверждает правильность построенной по макрокомпонентам модели, а с другой — отвечает на вопрос: насколько поведение данного редкого элемента определяется процессами разделения расплава и кристаллизующихся фаз. С точки зрения проверки моделей эволюции расплавов наибольший интерес представляют собой расчеты фракционирования Sr, Rb, Ba, V, для которых данные по коэффициентам распределения достаточно надежны. Что касается остальных элементов, то отсутствие собственных данных и ограниченные литературные данные по их коэффициентам распределения заставляют нас рассматривать скорее вторую сторону вопроса сходимости реальных и расчетных концентраций. Обсудим результаты расчетов, представленные на рис. 1, более подробно по элементам.

Стронций, барий. В целом расчетные тренды этих элементов совпадают с реальным изменением их концентраций в ходе эволюции серий вулк. Белоголовский и Уксичан. Это подтверждает реалистичность построенных по макрокомпонентам моделей формирования лав в процессе кристаллизационной дифференциации. Вместе с тем расчетные кон-

центрации Ва в биотитовом и двуполевошпатовом трахитах вулк. Белоголовский близки, тогда как реально в биотитовом трахите содержание Ва значительно ниже, чем в двуполевошпатовом. Возможно, это связано с влиянием флюидной фазы (см. ниже). Модель объясняет наблюдаемую в природе большую степень рассеивания стронция при формировании трахитов по сравнению с трахиандезитом. Хотя содержания плагиоклаза в кумулусе при их образовании близки, однако учет изменения коэффициента распределения стронция в плагиоклазе в ходе фракционирования позволяет использовать более высокие величины K при расчете концентрации Sr в трахитах.

Согласно проведенным ранее расчетам (табл. 2), процессы фракционирования расплавов на вулк. Уксичан в отличие от таковых на Белоголовском протекали без участия в составе кумулуса калиевого полевого шпата. Это находит отражение в форме кривых фракционирования стронция и в особенности бария (рис. 1). Кристаллизация санидина при образовании трахириолита и комендита Белоголовского вулкана снижает $K_{комб}$ стронция и резко повышает $K_{комб}$ бария (при этом $K_{комб}$ становится >1). В латитовой серии вулк. Уксичан $K_{комб}$ стронция постоянно возрастает главным образом за счет повышения K плагиоклаза в ходе эволюции, при снижении анортитовой составляющей, что приводит к особенно сильному уменьшению концентрации Ва на конечных стадиях эволюции; $K_{комб}$ бария также возрастает за счет повышения K плагиоклаза, но он становится >1 только на заключительных стадиях фракционирования при образовании трахириодацитов. Соответственно расчетные и реальные концентрации Ва проходят через максимум в трахидацитах и несколько уменьшаются в трахириодацитах.

Ванадий. Расчетные тренды поведения ванадия, так же как и Sr, Ва, близки к реальным. При этом находит подтверждение существование «комендитового» и «трахитового» типов эволюции расплавов Белоголовского вулкана [1]. Кристаллизация во втором случае ортопироксена обуславливает высокий $K_{комб}$, что приводит к большему рассеиванию ванадия при формировании трахитов по сравнению с трахиандезитами. Более крутой наклон тренда фракционирования ванадия в латитовой серии вулк. Уксичан связан с повышенным содержанием магнетита в составе кумулуса при образовании пород этой серии (табл. 2).

Медь. Наши расчеты показывают, что процесс кристаллизационной дифференциации не может объяснить наблюдаемое снижение концентрации меди на поздних этапах эволюции расплава. Низкая доля темноцветных минералов в кумулусе (табл. 2) обуславливает близкую к единице величину $K_{комб}$. Из показанного на рис. 1 расчетного тренда видно, что концентрация в расплаве меди не только не должна снижаться, а даже может возрастать. Для объяснения этого расхождения необходимо привлечь добавочный фактор, обеспечивающий вывод меди из расплава. Отделение микроколичества сульфидной жидкости может сильно увеличить $K_{комб}$. Действительно, акцессорные сульфиды постоянно наблюдаются в протолочках проб кислых лав вулкана.

Редкие литофильные элементы Zr, La, Y, Yb. Расчетные тренды фракционирования элементов в серии лав вулк. Уксичан совпадают с реальными, тогда как для серии лав вулк. Белоголовский резко отклоняются от них. Из модели видно, что на всех этапах эволюции величина $K_{комб}$ этих элементов значительно ниже единицы. Это должно приводить к постоянному повышению их концентраций в остаточных расплавах. Однако реально в лавах со степенью фракционирования более высокой, чем для кварцевого трахита, концентрации Zr и Y убывают, а темп накопления La резко снижается, при этом в некоторых комендитах содержание La даже заметно уменьшается по сравнению с трахириолитами. Объяснение этого несоответствия, по нашему мнению, заключается в кристаллизации в расплавах на этом этапе циркона, а на самом позднем этапе (в трахириолитах)— ортита и участия этих минералов во фракционировании. Циркон встречается в трахитах, кварцевых трахитах и в

более кислых породах в виде достаточно крупных идиоморфных кристаллов, ортит отмечен в трахириолитах.

Экспериментальные исследования растворимости ZrO_2 в кислых расплавах показали, что концентрация насыщения, при которой наступает кристаллизация циркона, невелика [35, 36]. Расчетная концентрация ZrO_2 в трахириолитах составляет 0,23 мас.%, что с учетом низких температур остаточных расплавов, по-видимому, значительно превышает концентрацию насыщения. Это обуславливает кристаллизацию циркона в расплаве кварцевого трахита и обеднение остаточных расплавов ZrO_2 . Участие во фракционировании циркона должно привести к разубоживанию остаточных расплавов Y и снижению темпов накопления La, так как коэффициенты распределения La и особенно Y для циркона велики. Снижение же концентраций La в некоторых комендитах может быть связано с кристаллизацией ортита в трахириолитовых расплавах. Эту же роль может играть апатит, если он редкоземельный.

Нам не удалось также получить совпадение расчетных и реальных концентраций La, Y, Zr для трахиандезита, двуполевошпатового и биотитового (кроме Zr) трахита. Расчетные концентрации лантана и в особенности циркония, иттрия значительно выше природных. Фактором, обусловившим обеднение расплавов редкими элементами на этом этапе, могло послужить отделение от расплава флюидной фазы.

Расчет поведения элементов в латитовой серии вул. Уксичан дал хорошее совпадение с природными данными. Это, вероятно, подтверждает «сухой» характер эволюции латитовой серии, выявленный ранее при построении модели по макрокомпонентам.

Рубидий. Расчет концентраций рубидия позволил получить удовлетворительные результаты для всех членов дифференцированного ряда вулканов Уксичан и Белоголовский. Исключение составляют трахиандезиты и двуполевошпатовый трахит Белоголовского вулкана. В этих породах, как и для предыдущей группы элементов, наблюдаются значительные расхождения в концентрациях рубидия — расчетной и реальной. Нам представляется вероятным, что такие отклонения также могут быть объяснены экстракцией рубидия из расплавов при отделении флюидной фазы.

Ниобий. Судя по нашим расчетам, концентрация ниобия в расплавах на всех этапах их эволюции должна оставаться практически постоянной. В действительности же на вулк. Уксичан наблюдается слабое, а на вулк. Белоголовском весьма значительное увеличение концентрации ниобия в остаточных расплавах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог расчетам фракционирования редких элементов в лавах вулканов Белоголовский и Уксичан по модели кристаллизационной дифференциации, можно сделать следующие выводы.

Расчет фракционирования Sr, Ba, V, Rb подтвердил в целом реалистичность построенных ранее по макрокомпонентам моделей формирования лав вулканов Белоголовский и Уксичан за счет процесса кристаллизационной дифференциации. Выявленные расхождения расчетных и реальных концентраций Zr, Rb, La, Y, Ba в трахиандезитах и трахитах вулк. Белоголовский можно объяснить отделением в ходе кристаллизации от расплавов флюидной фазы, обогащенной этими элементами. Поведение меди в ходе эволюции, по-видимому, связано с появлением сульфидов в лавах вулканов Белоголовский и Уксичан. По всей вероятности, в ходе фракционирования расплава кварцевого трахита была достигнута концентрация насыщения цирконием, а на последних стадиях — и редкоземельными элементами. Это привело к кристаллизации в расплаве циркона и ортита, которые также участвовали во фракционировании, что обусловило появление перегиба на трендах фракционирования Zr, Y и снижение темпов накопления La (рис. 1).

В целом расчеты показывают, что характер фракционирования большинства редких элементов (за исключением ниобия) в латитовой серии

вулк. Уксичан сходен с таковым для комендитовой и трахитовой серий вулк. Белоголовский. Различия трендов изменения концентраций Rb, Sr, Ba (рис. 1) хорошо объясняются особенностями построенных для этих магматических систем моделей кристаллизационной дифференциации. Вместе с тем высокие содержания ванадия и пониженные Zr, La, Y, Nb в лавах латитовой серии относительно трахиандезит-базальт-комендитовой и трахиандезит-базальт-трахитовой серий связаны с разницей в уровне содержаний этих элементов в исходных расплавах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольнец О. Н., Асавин А. М., Козарко Л. Н. Вопросы генезиса щелочных и субщелочных вулканитов Камчатки // *Геохимия*. 1990. № 4. С. 506.
2. Лутц В. Г. Геохимия океанического и континентального магматизма. М.: Недра, 1980. 247 с.
3. Вольнец О. Н., Пополитов Э. И., Патока М. Т., Аношин Г. Н. // *Геохимия магматических пород и зон сочленения океан — континент*. Новосибирск: Наука, 1984. С. 108.
4. Белоусов В. В., Герасимовский В. И., Горячев А. В. и др. Восточно-Африканская рифтовая система. Т. 3. Геохимия. Сейсмология: Результаты исследований по меж-, дународным геофизическим проектам. М.: Наука, 1974. 180 с.
5. Cambon P., Joron J. L., Bougault H., Treuil M. // *Init. Rep. DSDP*. 1980. V. 55. P. 585.
6. Joron J. L., Bougault H., Wood D. A., Trull M. // *J. Bull. Soc. Geol. France*. 1980. V. 202. № 4. P. 521.
7. Козарко Л. Н., Барсуков В. Л., Асавин А. М. и др. // *Геохимия*. 1985. № 8. С. 1124.
8. Козарко Л. Н., Асавин А. М., Барсуков В. Л. и др. // *Геохимия*. 1984. № 5. С. 639.
9. Zielinski R. A. // *Geochim. et cosmochim. acta*. 1975. V. 39. № 5. P. 713.
10. Dickey J. S., Frey F. A., Hart S. R., Watson E. B., Thompson G. // *Geochim. et cosmochim. acta*. 1977. V. 41. P. 1105.
11. Upton B. C., Wadsworth, Newmann W. J. // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1967. V. 78. P. 1495.
12. Поляков А. И., Муравьева Н. С. // *Геохимия*. 1981. № 9. С. 1362.
13. Varbery F., Ferrara G., Santacroce R. et al. // *J. Petrol.* 1975. V. 16. P. 22.
14. Wass S. Y. // *Amer. J. Sci.* 1980. V. 280-A. № 2. P. 639.
15. Dostal J., Dupuy C., Carron J. R. // *J. Chem. Geol.* 1983. V. 47. № 3. P. 525.
16. Girard A., Dupuy C., Dostal J. // *Chem. Geol.* 1986. V. 57. P. 269.
17. Коваленко В. И., Антипин В. С., Рябчиков И. Д., Ярошенко С. К. // *Геохимия магматических пород и зон сочленения океан — континент*. Новосибирск: Наука, 1984.
18. Liotard J. M., Vermieres J., Dupuy C. // *Chem. Geol.* 1979. V. 25. P. 237.
19. Irving A. J. // *Geochim. et cosmochim. acta*. 1978. V. 42. № 6A. P. 743.
20. Wornor G., Beusen J. M., Duchateau N. et al. // *Contribs Mineral and Petrol.* 1983. V. 84. P. 152.
21. Schock H. H. // *Chem. Geol.* 1979. V. 26. № 1/2. P. 119.
22. Ewart C. A. // *J. Petrol.* 1982. V. 23. № 3. P. 325.
23. McCallum J. S., Charette M. P. // *Geochim. et cosmochim. acta*. 1978. V. 42. № 6A.
24. Ewart C. A., Taylor S. R. // *Contribs Mineral and Petrol.* 1969. V. 22. P. 127.
25. Marry R. C., Andreambololona R., Dupuy C. // *Geochim. et cosmochim. acta*. 1975. V. 39.
26. Mahood W., Hildreth H. // *Geochim. et cosmochim. acta*. 1983. V. 47. № 1. P. 11.
27. Leeman W. B. // *Contribs Mineral and Petrol.* 1978. V. 66. P. 429.
28. Leeman W. B. // *Contribs Mineral and Petrol.* 1978. V. 66. P. 269.
29. Ewart A., Bryan W. B., Gill J. B. // *J. Petrol.* 1973. V. 14. № 3. P. 429.
30. Pearce J. A., Norry M. J. // *Contribs Mineral and Petrol.* 1979. V. 69. P. 33.
31. Larsen L. // *Contribution to Mineralogy of Ilimaussaq*. 1979. № 56.
32. Schnetzler C. C., Philpotts J. A. // *Geochim. et cosmochim. acta*. 1970. V. 34. № 2.
33. Nagasawa H. // *Contribs Mineral and Petrol.* 1973. V. 39. P. 301.
34. Кравчук И. Ф., Чернышова И. В., Урусов В. С. // *Геохимия*. 1980. № 7. С. 966.
35. Watson E. B., Harrison T. M. // *Earth. and Planet. Sci. Lett.* 1983. V. 64. № 29. P. 295.
36. Watson E. B. // *Contribs Mineral and Petrol.* 1979. V. 22. P. 127.

Институт геохимии и аналитической химии
им. В. И. Вернадского АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
23.05.88

O. N. VOLYNETS, A. M. ASAVIN, L. N. KOGARKO

FRACTIONATION OF RARE ELEMENTS IN ALKALINE
AND SUBALKALINE VOLCANITES OF KAMCHATKA

Geochemistry of rare elements in alkaline and subalkaline volcanites of Kamchatka has been considered. On the basis of earlier developed models of formation of lava series in crystallization differentiation process the trends of fractionation of elements have been calculated. On the whole the theoretical trends coincide with natural ones. Explanation of behavior of niobium, copper and rubidium demands the involvement of a number of supplementary mechanisms.