

ПЕТРОВ Л. Л., ВОЛЫНЕЦ О. Н., ФЛЕРОВ Г. Б.,
АНДРЕЕВ В. Н., АНДРЕЕВ В. И., БУДНИКОВ В. А.

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФТОРА, БОРА И БЕРИЛЛИЯ В ПОРОДАХ
ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ 1975—1976 гг.**

Исследование закономерностей распределения элементов в продуктах современных извержений вызывает особый интерес, поскольку несомненно важна важность подобной информации как в плане создания достоверной и полной модели поведения элементов в магматическом процессе, так и применения ее для модельных построений самого вулканического процесса. Сказанное тем более справедливо для Большого трещинного Толбачинского извержения 1975—1976 гг. на Камчатке, которое характеризуется как «крупнейшее базальтовое извержение исторического времени в Курило-Камчатском вулканическом поясе» (Федотов и др., 1977).

Данные о хронологии событий извержения, особенностях его динамики и первые результаты изучения вещественного состава твердых вулканических продуктов опубликованы (Федотов и др., 1977_{1,2}; Волынец и др., 1977, 1978). Необходимо лишь напомнить, что с 6 июля по 15 сентября 1975 г. действовали кратеры Северного прорыва, а с 18 сентября 1975 г. и до 9 декабря 1976 г.—кратеры Южного прорыва. Согласно данным С. А. Федотова с соавт. (1977_{1,2}) и О. Н. Волынца с соавт. (1977, 1978), деятельность Северного прорыва эффузивно-эксплозивная, вулканические продукты здесь представлены главным образом магнезиальными базальтами умеренной щелочности; деятельность Южного прорыва преимущественно эффузивная и вулканические продукты относятся в основном к глиноземистым субщелочным базальтам. Обе группы базальтов объединяются наличием лав промежуточного состава. Пробы твердых вулканических продуктов извержения анализировались на содержание F, B и Be количественным спектральным методом по методикам, подробно изложенным в специальном руководстве (Эмиссионный спектральный..., 1976). Здесь же отметим следующее. Граница обнаружения составляет: для Be — $2 \cdot 10^{-5}$, B — $2 \cdot 10^{-4}$, F — $8 \cdot 10^{-3}\%$. Воспроизводимости методик для интервалов концентраций Be, B и F в проанализированных пробах характеризуются следующими коэффициентами вариаций: для Be — 15, B — 15, F — около 20%. Правильность методик проверялась неоднократно в различных схемах независимого контроля при аттестационных анализах стандартных образцов и сопоставлением результатов анализа с данными других методов.

Средние содержания F, B, Be в преобладающем типе базальтов Северного прорыва заметно меньше (в 1,4, 1,8 и 2,2 раза соответственно), чем в преобладающем типе базальтов Южного прорыва (табл. 1). Заметим, что среднее содержание F в породах Южного прорыва очень близко к кларку F в базальтах — 400 г/т (Turekian, Wedepohl, 1961), а в породах Северного прорыва заметно ниже кларка. Содержание Be в базальтах Южного прорыва выше кларковых значений этого элемента в базальтах — 0,4 г/т (Turekian, Wedepohl, 1961) и 1,0 г/т (Виноградов, 1962), а в базальтах Северного прорыва лежит между указанными вели-

чинами. Наконец, среднее содержание В в продуктах извержения намного превышает кларк В в основных породах — 5 г/т (Виноградов, 1962). Региональное обогащение камчатских магматических пород В уже неоднократно отмечалось рядом исследователей (Леонова и др., 1971; Леонова, Кирсанов, 1974).

Вариации содержаний F, В и Ве в породах каждого прорыва существенны, причем для F практически идентичны, однако, как это видно на представленных гистограммах (рис. 1), наиболее часто встречающиеся (модальные) значения содержаний этих элементов в базальтах Северного и Южного прорывов уверенно отличаются. Из гистограмм также следует, что модальные содержания F, В, Ве в базальтах промежуточного этапа имеют промежуточные значения.

Сравнение данных о концентрациях F, В и Ве в преобладающих типах пород Толбачинского извержения с данными, полученными нами ранее для других вулканов, показывает (табл. 1, а также Петров и др., 1977), что содержания Ве и В существенно возрастают с ростом щелочности пород; несколько менее четко подобная связь фиксируется и для F. Указанные тенденции можно уловить на представленных (рис. 2) графиках корреляции F и В со щелочами (K, Na, Rb). Увеличение содержаний В от пород меньшей щелочности к породам большей щелочности выражено ясно; для F корреляции со щелочами менее отчетлива.

Поведение F, В и отчасти Ве не согласуется с поведением главных петрогенных и многих других редких элементов. Это достаточно убедительно выявляется при анализе характера изменения концентраций F и В в ходе извержения (рис. 3). Действительно, как было показано ранее (Волынец и др., 1977, 1978), содержание главных петрогенных и многих редких элементов (в частности, редких щелочей) в преобладающей массе пород каждого прорыва меняется весьма слабо и только в конце деятельности Северного и в начале действия Южного прорывов происходит резкое изменение их концентраций. Содержания F и В испытывают существенные колебания в ходе извержения для каждого прорыва, обнаруживая достаточно определенную связь с динамикой процесса.

Так, в базальтах Северного прорыва концентрация В непрерывно возрастает в среднем от 32 г/т в начальный период (7—22.VII.1975 г.) чисто эксплозивного этапа извержения до 41—43 г/т в период эффузивно-эксплозивной активности (29.VII—21.VIII.1975 г.). Затем в период относительного усиления эффузивной деятельности, раскрытия трещин, образования лавовых котлов и «минивулканчиков» (22—25.VIII.1975 г.) содержание В в породах резко уменьшается и остается низким до тех пор, пока в конце деятельности Северного прорыва не начинает меняться в сторону большей щелочности валовый состав лав и не появляются базальты промежуточного состава (11—15.IX.1975 г.). В этот период наблюдается максимальный разброс содержаний В (равно как F и Ве), а среднее содержание его снова резко возрастает — до 43 г/т (см. рис. 3).

В базальтах Южного прорыва от начала его деятельности вплоть до середины апреля 1976 г. концентрация бора меняется мало (в целом лишь чуть-чуть уменьшаясь в ходе извержения), несмотря на некоторое изменение валового состава пород, особенно значительное в первую неделю извержения. Однако с середины апреля 1976 г. после резкого усиления активности извержения (как эксплозивной, так и расходов лавы) содержание В в породах начинает возрастать, достигая в мае-июне 1976 г. в среднем 80—85 г/т против 50—60 г/т в предыдущий период (при постоянном уже с декабря 1975 г. валовом составе пород). В дальнейшем вплоть до конца деятельности Южного прорыва концентрация В в породах постепенно убывает.

Таким образом, повышение содержания В в породах происходит вслед за усилением эксплозивной активности (и расходов лавы?), несколько запаздывая по отношению к нему.

Таблица 1

Содержание F, B, Be в породах Толбачинского извержения, базальтах некоторых вулканов Камчатки и Курильских островов и средних типах базальтов этого региона, г/т

Извержение, зона, вулкан	Тип базальта	F	B	Be	
Северный прорыв	Магнезиальный умеренной щелочности	285 (65)*	34 (72)	0,67 (75)	
		150—560	19—55	0,30—1,30	
	Магнезиальный промежуточный последних дней извержения	350 (19)	43 (19)	1,40 (19)	
		190—680	20—57	0,70—1,90	
Южный прорыв	Глиноземистый промежуточный первых дней извержения (тип I)	345 (22)	57 (28)	1,35 (23)	
		180—540	20—85	1,0—2,2	
Толбачинская артельная зона	Глиноземистый промежуточный начала извержения (тип II)	305 (27)	56 (27)	1,30 (27)	
		250—500	45—66	0,90—1,70	
Толбачинская артельная зона и подножье Ключевского вулкана	Глиноземистый субщелочной	406 (147)	60,5 (167)	1,50 (167)	
		110—1000	40—100	0,80—2,6	
Толбачинская артельная зона и подножье Ключевского вулкана	Глиноземистый промежуточный (тип II)	305 (10)	59 (10)	1,30 (10)	
		180—390	46—85	1,0—1,60	
Толбачинская артельная зона и подножье Ключевского вулкана	Глиноземистый субщелочной	340 (11)	60 (1)	1,25 (9)	
		120—630		0,8—1,85	
Вулканы	Харчинский	290 (4)	—	0,65 (4)	
		170—400		0,60—0,75	
	Ключевской	То же	345 (9)	—	0,45 (10)
			180—570		0,3—0,85
	Ключевской	Глиноземистый умеренной щелочности	376 (60)	30 (22)	0,65 (62)
			200—710	13—77	0,2—1,3
	Большие Иголки Явинский	То же	290 (9)	19 (8)	0,64 (9)
			160—450	16—22	0,5—0,9
	Корякский	»	350 (5)	37 (5)	0,49 (5)
			300—520	15—46	0,4—0,55
	Малый Семячик	Глиноземистый пониженной щелочности	360 (8)	—	0,41 (8)
			230—550		0,25—0,55
	Кихпинч	То же	335 (5)	—	0,48 (5)
			200—530		0,35—0,60
	Ильинский	»	310 (4)	—	0,40 (4)
			260—330		0,3—0,6
	Немо (о-в Онекотан)	»	330 (7)	—	0,39 (7)
			160—450		0,25—0,6
Алаид (о-в Атласова)	Глиноземистый субщелочной	545 (84)	34 (50)	0,85 (72)	
		230—1100	15—43	0,2—1,9	
Средние типы базальтов для Камчатки**	Глиноземистый пониженной щелочности	338 (28)	—	0,46 (28)	
		200—610		0,20—0,95	
	Глиноземистый умеренной щелочности	367 (117)	28,5 (38)	0,60 (118)	
		160—710	13—77	0,20—1,30	
	Глиноземистый субщелочной	379 (217)	59,5 (233)	1,45 (236)	
		110—1000	20—100	0,8—2,6	
Магнезиальный умеренной щелочности	305 (97)	36 (91)	0,72 (111)		
	150—680	19—57	0,3—1,9		

* В числителе — среднее содержание (в скобках — количество анализов); в знаменателе — вариации содержания.

** Приведены с учетом данных по Толбачинскому извержению.

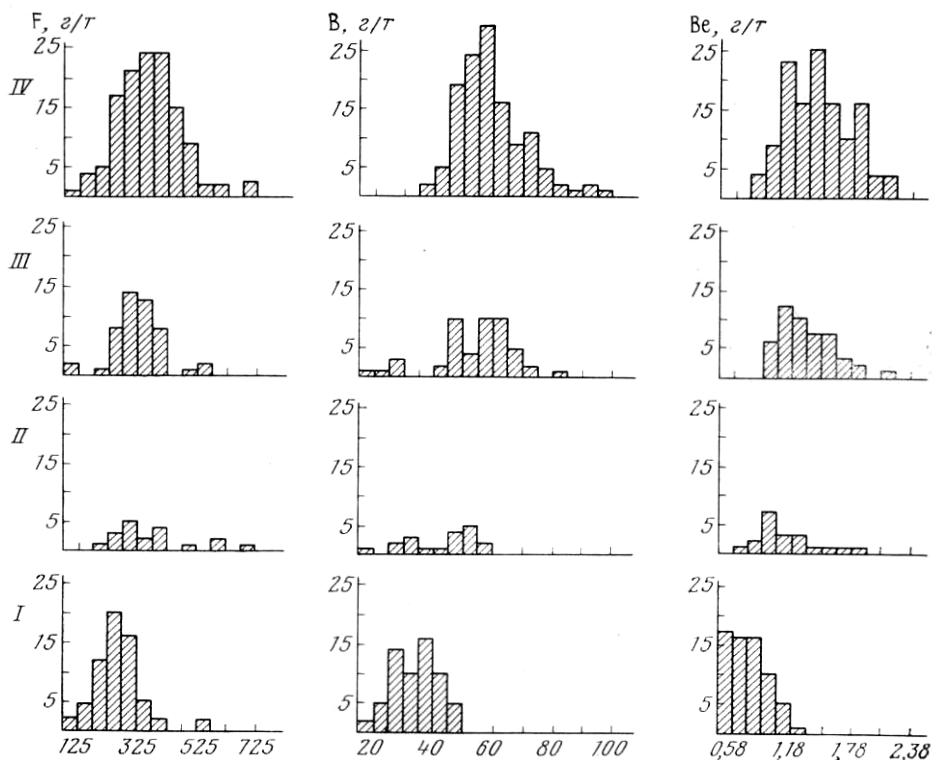


Рис. 1. Гистограммы распределения F, B, Be в породах извержения. По абсциссе — содержание, по ординате — количество анализов. I—II — Северный прорыв (I — преобладающий тип лав, II — промежуточный тип); III—IV — Южный прорыв (III — промежуточный тип лав, IV — преобладающий тип лав)

Разброс содержаний F в породах более значительный, чем для B, поэтому связь уровня концентраций его с динамикой извержения несколько менее отчетлива. Отметим однако, что наиболее высокие содержания его в лавах Северного прорыва наблюдались в период максимального усиления эффузивной деятельности — начало сентября 1975 г., время образования жидких лавовых потоков — 380—400 против 220—250 г/т в августе того же года. На Южном прорыве повышение концентрации F в лавах зафиксировано в периоды наиболее спокойного, почти чисто эффузивного протекания процесса извержения, когда происходило образование наиболее жидких и подвижных лав. С конца декабря 1975 г. по январь-февраль 1976 г. среднее содержание F составило 385 г/т против 200—300 г/т в октябре-ноябре 1975 г.; в сентябре 1976 г. — 550 г/т против 300—400 г/т в предыдущие месяцы*...

Изложенный материал доказывает, что, хотя уровни концентраций B и F в породах изменяются в зависимости от характера вулканической активности, поведение указанных элементов в ходе извержения нередко прямо противоположно.

Поведение Be менее определено: на Северном прорыве оно более сходно с поведением B, на Южном — с поведением F.

Тенденция к обратной связи F и B обнаруживается также при анализе характера корреляций этих элементов для частных анализов каждого прорыва (рис. 4). Что касается Be, то он прямо коррелируется с F. Связь Be с B менее отчетлива, причем, если рассматривать породы каж-

* Необходимо подчеркнуть, что речь идет только о лавах. Характер распределения F в бомбах и пеплах несколько иной (см. ниже). Так, на Южном прорыве максимальные концентрации F в пеплах зафиксированы в начальные этапы его деятельности.

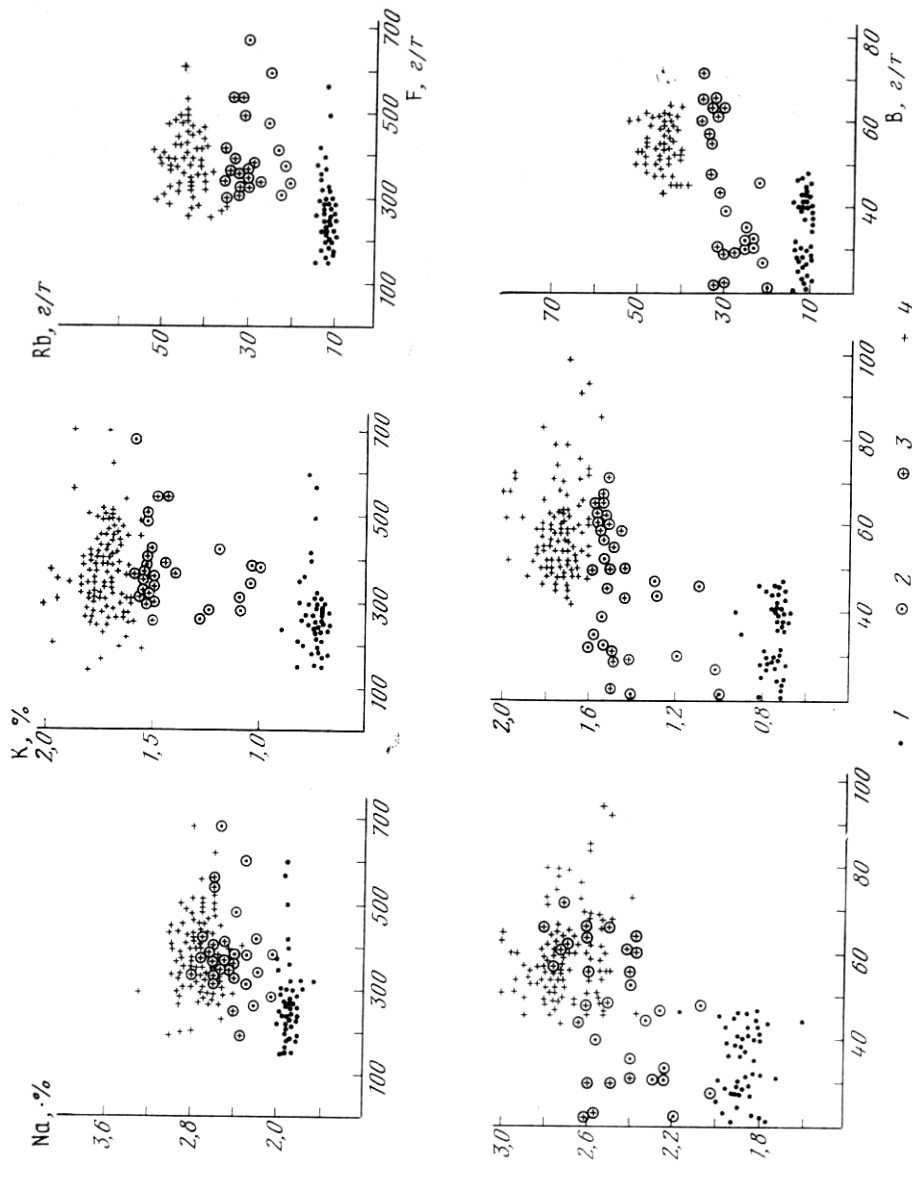


Рис. 2. Корреляция содержания F и V с содержанием Na, K и Rb.

1 — 2 — Северный прорыв (1 — преобладающий, 2 — промежуточный тип лав); 3 — 4 — Южный прорыв (3 — промежуточный, 4 — преобладающий тип лав)

дого прорыва отдельно, можно заметить тенденцию к обратной корреляции этих элементов.

Содержания V и V_e в различных по фацальной принадлежности продуктах извержения каждого прорыва (потоках, бомбах, шлаках, пеплах) в целом не отличаются ни по величине вариаций, ни по средним значениям. Что касается F, то пеплы характеризуются в целом более высоким его содержанием по сравнению с лавами и бомбами при заметно большей дисперсии содержаний. Однако для F, V и V_e такая общая оценка вряд ли может считаться достаточно объективной, так как содержание указанных элементов в ходе извержения заметно колебалось, а количество анализированных за разные периоды образцов лав, бомб и пеплов далеко не одинаково. Методически правильно сопоставлять аналитические результаты для синхронно образованных лав, бомб и пеплов, отобранных в один день, поскольку подобное сопоставление в значи-

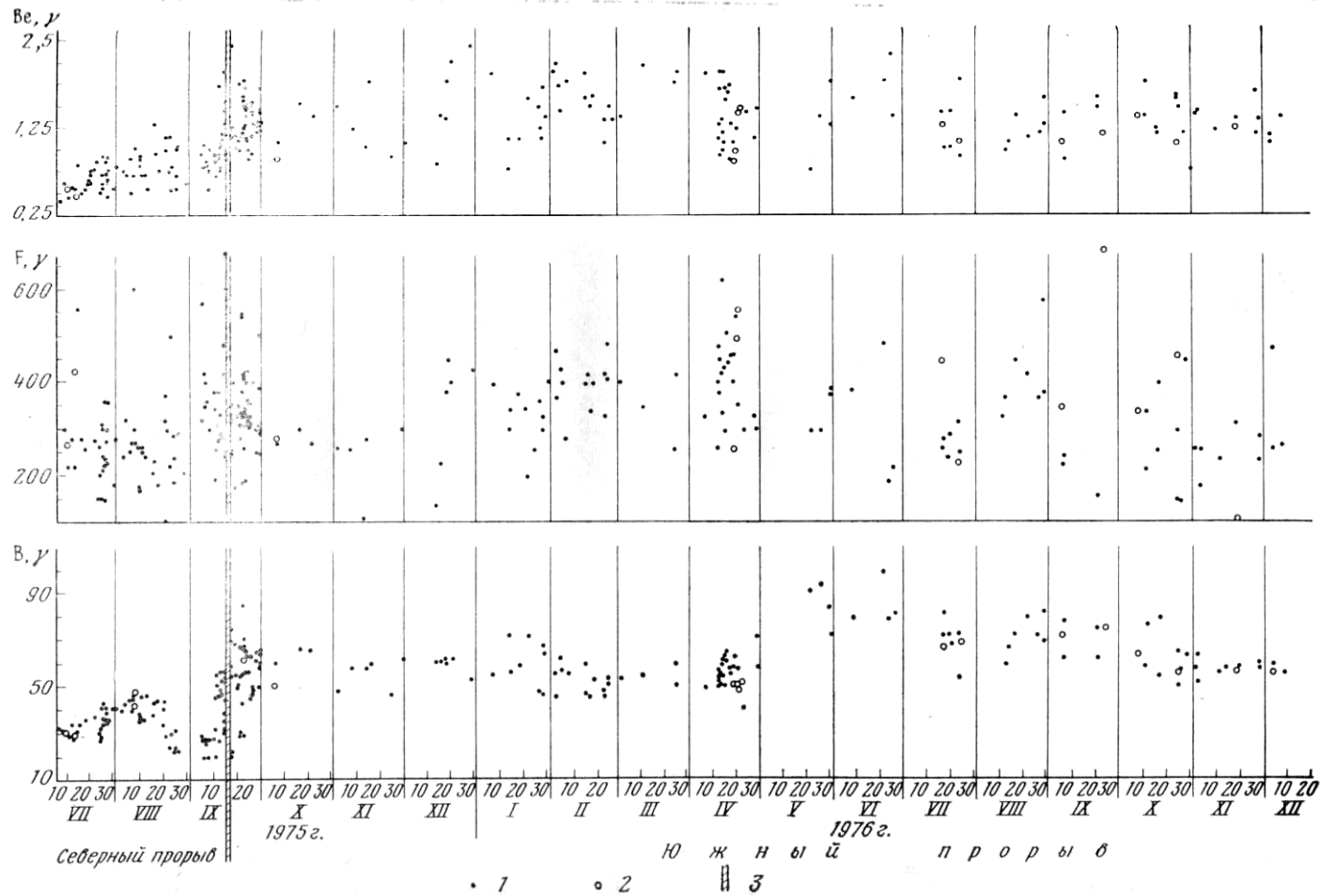


Рис. 3. Распределение содержания Be, F и B в вулканических продуктах в ходе извержения:
 1— лава, бомба, 2 — пепел, 3— перерыв во времени между Северным и Южным прорывами

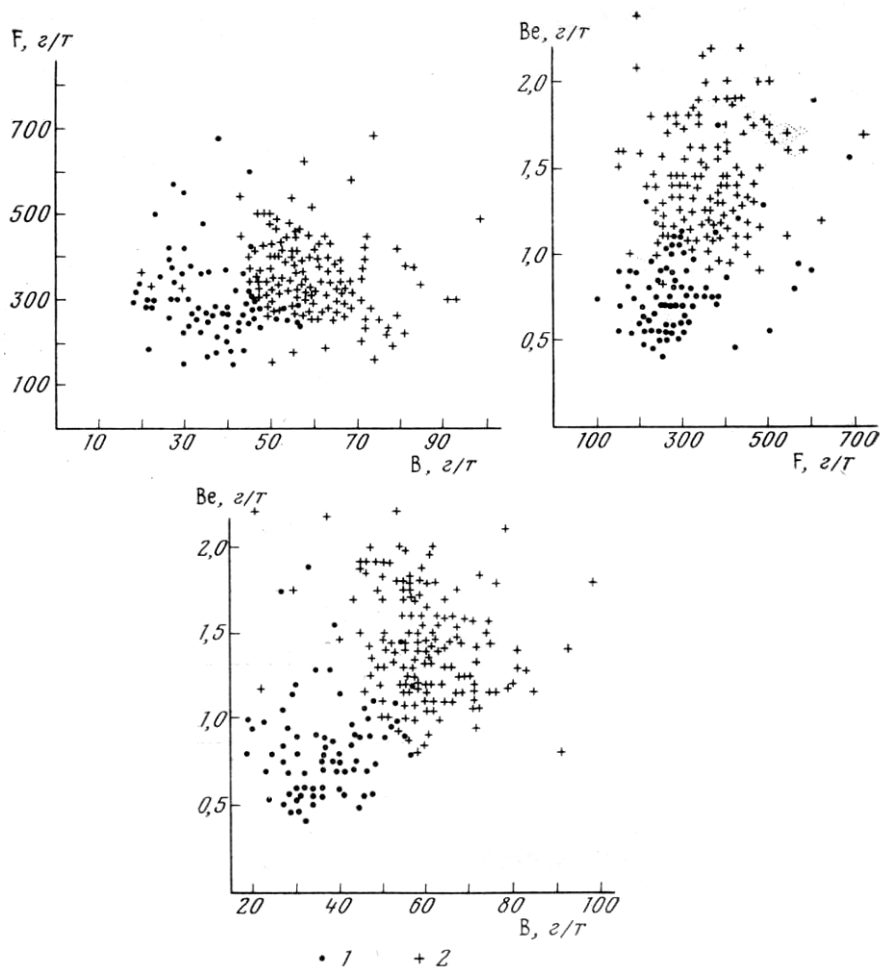


Рис. 4. Корреляция содержаний F, Be и V в породах извержения.
1 — Северный прорыв, 2 — Южный прорыв

тельной мере исключает влияние режима извержения и химического состава лав.

Анализ расположения точек относительно линии равных содержаний на графиках для синхронных лав и бомб (рис. 5) показывает примерно равную их группировку выше и ниже указанной линии для V и Be и некоторое увеличение содержаний F в бомбах относительно синхронных им лав. Отсутствие отличий между лавами и бомбами как по содержаниям Be, так и по содержаниям V подтверждается близостью средних концентраций этих элементов в синхронных продуктах (приводимые ниже средние значения вычислены по выборкам, которые использованы для построения графиков на рис. 5). Так, для Be среднее содержание в лавах составляет 1,30 г/т, а в бомбах — 1,26 г/т. Для V среднее по лавам — 52,6 г/т, среднее по бомбам — 52,4 г/т. Равенство приводимых средних, очевидно, не требует даже статистического обоснования. Для F соответствующие средние таковы: для лав — 304 г/т, для бомб — 358 г/т и их отличие или равенство надо обосновывать статистически. Вычисления по *t*-критерию показывают, что при уровне значимости 0,10 указанные средние статистически различимы (*t* табл. = 1,71; *t* расчетное = 1,87).

Сопоставление пар пеплы-бомбы и пеплы-лавы приводит к выводу об отсутствии заметных различий между этими фаціальными разновидно-

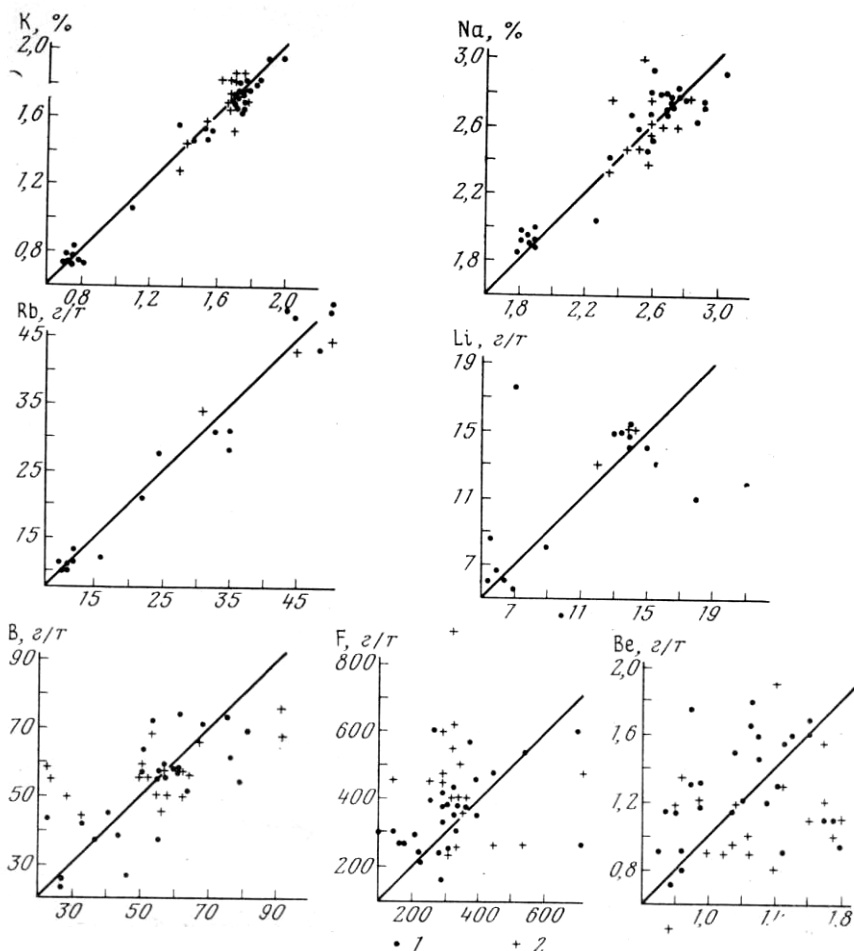


Рис. 5. Соотношение концентраций К, Na, Rb, Li, B, F, Be в синхронных образцах потоков (абсцисса) бомб и пеплов (ордината). 1 — корреляция поток-бомба, 2 — поток-пепел

стями как по содержаниям Be, так и по содержаниям B и о возможности равноценного использования каждой из разновидностей для характеристики содержаний Be и B в твердых вулканических продуктах в ходе извержения.

Для F такое сопоставление приводит к подтверждению сделанного вывода об отличии пеплов от лав и бомб, а следовательно, и к общему заключению о том, что по содержанию F пеплы, лавы и бомбы не могут рассматриваться в пределах единой однородной совокупности. Значит, при рассмотрении закономерностей изменения содержаний F в вулканиках за весь период извержения следует рассматривать каждую фациальную разновидность отдельно (рис. 6).

Из приводимых на рис. 6 данных отчетливо видно, что, во-первых, интервал колебаний содержаний F (дисперсия содержаний) значительно увеличивается при переходе от лав к бомбам и далее к пеплам и, следовательно, в таком же порядке возрастает информативность этих образований в отношении изучения поведения F в процессе извержения. Во-вторых, сравнивая характер распределения содержаний этого элемента в лавах в ходе процесса извержения (например, для Южного прорыва), можно заметить, что наибольшие различия между содержаниями F в пеплах и лавах отмечаются в начале прорыва, при максимальной эксплозивной деятельности. В эксплозивно-эффузивный период извержения

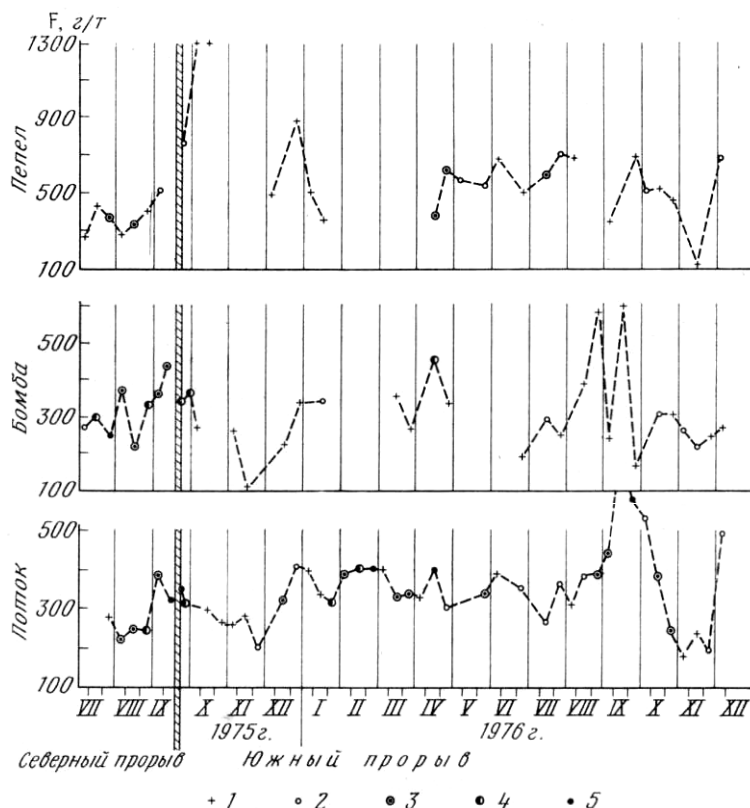


Рис. 6. Распределение содержаний F в потоках, бомбах и пеплах в ходе извержения.
 1—точка по одному образцу, 2—среднее для 2-х образцов, 3—среднее по 3—5 образцам, 4—среднее по 6—10 образцам, 5—среднее более чем по 10 образцам

различия в содержаниях F между пеплами и лавами весьма заметны, а в период существенно эффузивного течения процесса эти различия сглаживаются.

Повышение содержаний F в пеплах в сравнении с лавами, несомненно, связано с сорбцией этого элемента на частицах пепла в эксплозивном облаке. Следовательно, данные по содержаниям F в пеплах (рис. 6) интересны также тем, что они фиксируют его высокое содержание в эксплозивных газах Толбачинского извержения. Большой разброс значений концентраций F в пеплах подтверждает выдвинутое ранее (Петров, Хренов, 1977) предположение о пульсационном характере изменения содержаний F в эксплозивных газах.

Любопытно проанализировать с помощью сопоставления синхронных продуктов поведение других легко подвижных элементов, в частности щелочей. Как видно из рис. 5, только для Na наблюдается некоторое обогащение бомб и пеплов по сравнению с потоками, а содержания K, Rb, Li в изученных синхронных образцах не зависят от фациальной принадлежности пород. Некоторое сходство в распределении содержаний F и Na между продуктами различной фациальной принадлежности указывает, на наш взгляд, на их более заметную роль в эксплозивных газах, чем для тех элементов, для которых различие содержаний между пеплами, бомбами и лавами не фиксируется (K, Rb, Li, В и Be). Подтверждением подобного предположения являются данные о соотношении количеств воднорастворимых Na и K, а также F и В в пеплах Толбачинского извержения. Так, в водных вытяжках из пеплов Северного прорыва

величина отношения Na/K составляет в среднем 4,6, а F/B — 10 при соответствующих средних значениях этих величин в лавах $\leq 2,5$ и $\leq 8,4$. В водных вытяжках из пеплов Южного прорыва $Na/K=3,2$, а $F/B = 191$, в породах же $Na/K \leq 1,7-1,8$, а $F/B \leq 6,5-7,0$. Сходные данные о соотношении Na и K в продуктах извержения 1972 г. вулкана Алаид получены ранее В. А. Будниковым и Е. Ф. Малеевым (1977): величина Na/K в водных вытяжках из пеплов составляет в среднем 8,6 (из 9 анализов) против 1,6 в лавах. Резкое повышение значений величины Na/K -отношений в водных вытяжках из пеплов по сравнению с этими величинами в породах установлены также П. С. Тейлором и Р. Е. Стойбером (Taylor, Stoiber, 1973) для ряда активных вулканов Центральной Америки.

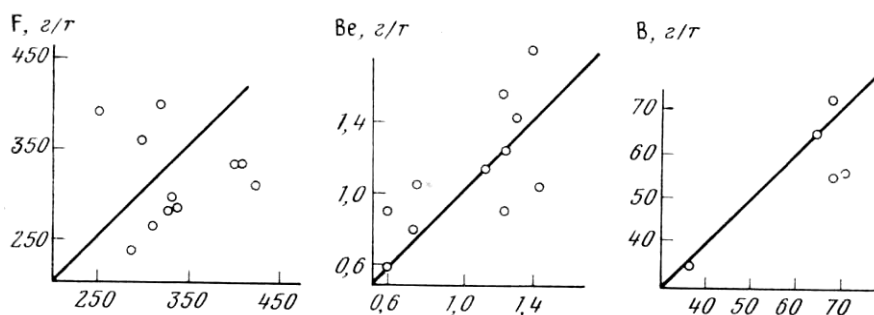


Рис. 7. Соотношение концентраций F , B и Be в разных по пористости зонах 1 образца.
По абсциссе — плотная зона, по ординате — пористая зона

Проанализированные на F , B и Be пеплы и шлаки Толбачинского извержения (всего 59 проб) охарактеризованы по крупности частиц и дальности их отбора от работающего конуса. Дальность отбора пеплов меняется от 0,1 до 80 км, крупность пеплов и шлаков (в целом по пробе) варьирует от 0—1 мм до 1—3 см. Сопоставление проб, отличающихся по указанным параметрам, показывает, что для Be и B не улавливается зависимость содержаний от дальности отбора и крупности пеплов. Четко разделяются (и для Be и для B) по величине содержаний пеплы Северного и Южного прорывов. Для F наряду с четко фиксируемым различием между пеплами Северного и Южного прорывов отмечается тенденция к увеличению содержаний этого элемента в пеплах, отобранных на меньшем удалении от работающего конуса. Достаточно определенно устанавливается, что содержание F в пеплах уменьшается с ростом крупности составляющих их частиц.

Проводилось сопоставление содержаний F , Be и B для разных по пористости частей одного образца и для не отличающихся по пористости, но различных по положению зон одного образца (центр, край). Так, при анализе краевых и центральных частей образца устанавливается сходное поведение F и Be (обр. 6062 (29.IX. 1975 г.), бомба: центр — F — 500 г/т, Be — 1,7 г/т; край — F — 250 г/т, Be — 1,2 г/т. Обр. А-618 (3.II.1976 г.) зачерпнут ковшем в истоке потока: центр — F — 470 г/т, Be — 2,0 г/т; край — F — 370 г/т, Be — 1,9 г/т). Поведение B неоднозначно: в первом образце он накапливается к краю (центр — 50, край — 61 г/т), а во втором — к центру (центр — 55, край — 45 г/т).

В разных по пористости зонах одного образца F и Be разделяются (рис. 7): содержания F выше в плотных зонах, а Be — в пористых (данных по B недостаточно, чтобы можно было делать какие-либо выводы). Если принять предположение о сходном геохимическом поведении F и Be , то можно допустить, что пористые различия пород были первично обогащены и F , но потеряли его при остывании. Сходное распределение F было обнаружено ранее в кислых лавах Камчатки и базальтах извер-

Распределение содержаний F, B и Be в пробах лав, характеризующих различные по удаленности от истока лавового потока зоны, г/т

Расстояния от подножия конуса, км (зоны потока)	Количество проб	F	B	Be
0—0,3 км (исток потока)	7	$\frac{670^*}{440-1000}$	$\frac{71,4}{54-98}$	$\frac{1,31}{0,8-1,8}$
0,3—1,0 км (вторичные выжимки на потоке)	6	$\frac{520}{230-640}$	$\frac{62,3}{54-77}$	$\frac{1,38}{0,8-1,75}$
1,0—2,0 км (вторичные бокки)	3	$\frac{403}{340-470}$	$\frac{57}{48-67}$	$\frac{1,6}{1,3-1,8}$
3,0—6,0 км (фронтальные части потоков)	1	260	63	1,1

* В числителе — среднее содержание, в знаменателе — вариации содержаний.

жения 1972 г. вулкана Алаид при сравнении плотных и пористых (пемзовидных) разностей пород (Петров и др., 1977; Петров, Хренов, 1977).

Интересным представляется вопрос о возможном изменении содержаний F, B и Be в лавах по мере движения лавового потока (т. е. идет ли дегазация движущегося расплава?). В связи с этим была подобрана небольшая коллекция проб за сентябрь 1976 г., характеризующих различные от истока потоков зоны. Аналитические результаты по данной коллекции проб приведены в табл. 2. Совершенно отчетливо наблюдается тенденция обеднения лав F и в меньшей степени B по мере их удаления от истока лавового потока. Для Be такая тенденция не фиксируется.

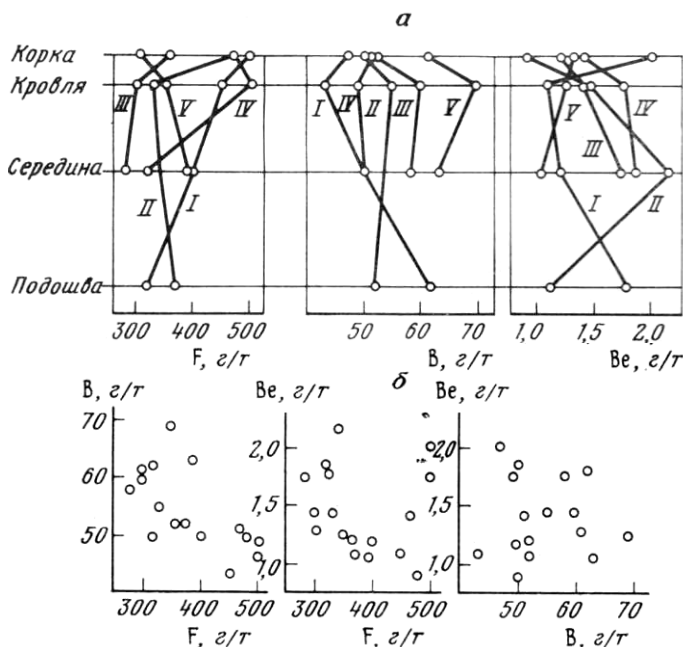


Рис. 8. Распределение F, B и Be в разрезах потоков глиноземистых субщелочных базальтов.

а — вариации в содержаниях F, B, Be; б — их взаимная корреляция по разрезам лавовых потоков; I—IV — потоки Южного прорыва, V — голоценовый поток Толбачинской аральной зоны

Изучение распределения F, В и Ве в вертикальных разрезах лавовых потоков Южного прорыва показывает, что содержания этих элементов могут заметно варьировать в зависимости от положения опробованных образцов в теле потоков, однако единой четкой закономерности поведения элементов не устанавливается (рис. 8, *а*). При сопоставлении содержаний этих элементов на графиках (рис. 8, *б*) наблюдается близкая к обратной тенденция в распределении F, с одной стороны, и В и Ве — с другой.

Таким образом, материалы о распределении F и В в продуктах извержения, включающие данные о связи их содержаний с динамикой извержения, характере их корреляций в парах синхронных образцов из бомб и потоков, вариациях их содержаний в вертикальных разрезах потоков и т. д., свидетельствуют о разном, часто противоположном поведении этих элементов в вулканическом процессе.

Соотношения F и Ве более сложные. В целом в ходе процесса извержения изменение содержаний этих элементов в породах идет сопряженно. Однако при более детальном рассмотрении продуктов кристаллизации конкретных магматических тел (разрезы потоков или разных по текстуре участков потоков и бомб) наблюдается разделение Ве и F. Указанная неоднозначность поведения F и Ве была отмечена ранее одним из авторов (Петров, 1969) при изучении поведения Ве и F в истории становления гранитных комплексов и может быть объяснена, по-видимому, изменением соотношения форм нахождения Ве (галоидной и окисной) в силикатном расплаве в процессе его кристаллизации.

ЛИТЕРАТУРА

- Будников В. А., Малеев Е. Ф. Пирокластика Олимпийского прорыва вулкана Алаид извержения 1972 г.— Бюл. вулканол. ст., 1977, № 53, с. 65—76.
- Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры.— Геохимия, 1962, № 7, с. 5—17.
- Вольнец О. Н., Хренов А. П., Флеров Г. Б., Ермаков В. А. Первые результаты изучения вещественного состава пород Толбачинского извержения.— Бюл. вулканол. ст., 1977, № 53, с. 13—26.
- Вольнец О. Н., Флеров Г. Б., Андреев В. Н., Пополитов Э. И., Абрамов В. А., Петров Л. Л., Щека С. А. Петрохимия, геохимия и вопросы генезиса пород Большого трещинного Толбачинского извержения 1975—(1976 гг.— Докл. АН СССР, 1978, т. 238, с. 940—943.
- Леонова Л. Л., Удальцова Н. И., Вольнец О. Н., Колосков А. В., Флеров Г. Б. К геохимии радиоактивных (U, Th), щелочных (Li, Rb, Cs) элементов и бора в интрузивных комплексах Центральной Камчатки.— Геол. и геофиз., 1971, № 1, с. 10—16.
- Леонова Л. Л., Кирсанов И. Т. Геохимия базальтов Ключевской сопки.— Геохимия, 1974, № 6, с. 875—884.
- Петров Л. Л. Геохимия бериллия в гранитоидах Восточной Сибири. Автореф. канд. дис., Иркутск, 1969, 24 с.
- Петров Л. Л., Вольнец О. Н., Леонова Л. Л., Хренов А. П. Некоторые закономерности распределения фтора в вулканических породах Камчатки и Курил.— В сб.: Магмообразование и его отражение в вулканическом процессе. М., «Наука», 1977, с. 140-148.
- Петров Л. Л., Хренов А. П. Бериллий, бор и фтор в продуктах извержения вулкана Алаид в 1972 году (прорыв Олимпийский).— В сб.: Ежегодник Института геохимии СО АН СССР, 1976. Иркутск, 1977, с. 34—42.
- Федотов С. А., Чирков А. М., Андреев В. Н., Гусев Н. А., Разина А. А., Хренов А. П. Краткое описание хода трещинного Толбачинского извержения в 1975 году.— Бюл. вулканол. ст., 1977, № 53, с. 3—12.
- Федотов С. А., Мархинин Е. К., Ковалев Г. Н., Цюрупа А. И., Слезин Ю. Б. Большое трещинное Толбачинское извержение на Камчатке. Южный прорыв 1975—1976 гг.— Докл. АН СССР, 1977, т. 237, с. 1155—1158.
- Эмиссионный спектральный анализ в геохимии. Под редакцией А. Д. Райхбаума. Новосибирск, «Наука», 1976, 279 с.
- Taylor P. S., Stoiber R. E. Soluble material on ash from active central American Volcanoes.— Geol. Soc. Amer. Bull., 1973, v. 84, p. 1031—1042.
- Turekian K. K., Wedepohle K. H. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust.— Geol. Soc. Amer. Bull., 1961, v. 72, p. 175—192.