

## ЭКСТАЛЦИИ БАЗАЛЬТОВЫХ И АНДЕЗИТОВЫХ ЛАВ КАМЧАТСКИХ ВУЛКАНОВ

Л. А. БАШАРИНА

*(Институт вулканологии СО АН СССР)*

Газы камчатских вулканов исследовались в различных условиях вулканической деятельности и из разного состава магм — базальтовой, андезито-базальтовой и андезитовой.

На первом, высокотемпературном этапе, независимо от состава магм (базальтовой или андезитовой), в различных соотношениях в ней содержались следующие летучие компоненты:  $H_2O$ ,  $HCl$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NH_3$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$ , инертные газы и менее распространенные соединения — бор, мышьяк, бром, йод, а также труднолетучие — петрогенные, рудные и многие микроэлементы.

Систематические наблюдения за фумарольной деятельностью показали, что активность фумарол проявлялась неодинаково. Лавы, излившиеся из различных кратеров, были в разной степени обогащены летучими. Побочные кратеры, образовавшиеся на низком гипсометрическом уровне, имели наибольшую основность, отвечающую оливиновым базальтам, а лавы, излившиеся на высоком уровне, по составу приближались к андезито-базальтам. Первые, более насыщенные газами, выделяли их в течение десятилетия, а вторые были обеднены газами, и их фумарольная деятельность продолжалась от одного до трех лет (рис. 1). Полученный большой фактический материал о газах на всех стадиях активности вулканов и остывания лавовых масс позволил установить определенную последовательность выделения эманации.

При эффузивной деятельности с изливанием базальта и андезито-базальта выделяются эманации, богатые галоидными соединениями (хлором и фтором) и обедненные газами серы.

Лавовые потоки длительное время дистиллируют окклюдированный хлористый водород, концентрации которого бывают значительно выше, чем в составе газа фумарол на шлаковых конусах.

Газы, выделяющиеся непосредственно из эксплозивных кратеров, имели резко выраженный сольфатарный характер. Среди преобладающих паров воды и углекислого газа наблюдалось повышенное количество газов серы ( $H_2S$ ,  $SO_2$ ). По мере остывания лавы состав фумарольных газов меняется. Сокращается количество галоидных газов, водорода и окиси углерода; при дальнейшем остывании лавы за счет умень-

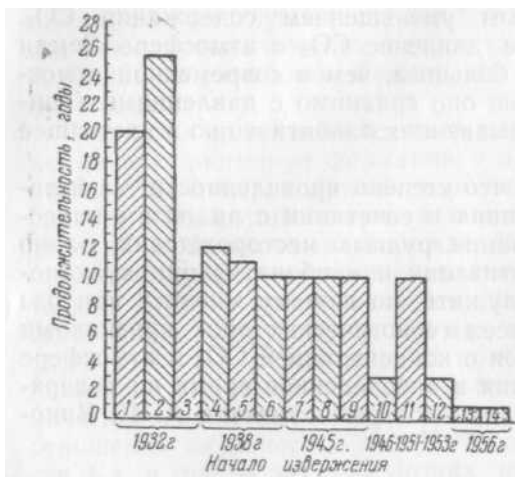


Рис. 1. Продолжительность остывания побочных кратеров Ключевского вулкана до  $100^\circ$ .

1— Туйла; 2— Киргуриг; 3— Биокось; 4— Билюкай; 5— Козей; 6— Тиранус; 7— Заварицкого; 8— Левинсона-Лессинга; 9— Обручева; 10— Апахончич; 11— Былинкиной; 12— Белякина; 13— Вернадского; 14— Крыжановского

шения концентраций сернистых газов газовая составляющая становится существенно углекислой. В последнюю стадию выделяются только пары воды. Наблюдения над извержениями Шивелуча (1945—1950 гг.) и Безымянного (1955—1961 гг.), с экструзиями андезита, сопровождающимся образованием раскаленных туч и каменных лавин, дали новые сведения о вулканических эксгалляциях. Эманации начальных эксплозий состояли в основном из паров воды, углекислого и сернистого газов. Что же касается галоидных соединений, то их в период пароксизма из андезитовых лав выделялось значительно меньше, чем газов серы. В процессе остывания андезитовых куполов в газовой составляющей увеличивается содержание галоидов (хлора, фтора). На более поздних этапах вулканической деятельности летучие значительно изменяются. Однако аналитический материал позволил установить некоторые отношения отдельных компонентов в вулканических эксгалляциях. Рассматривая отношения при одинаковых условиях (температуре и давлении), можно заметить, что постоянство или изменения их зависят от минералогического и химического состава магмы и стадии ее остывания.

Доступные изучению газы, выделяющиеся из кратера после извержения или из лавовых масс, доставленных на поверхность, даже в момент пароксизма, не отражают полностью состава летучих магмы. Кроме магматических, они также содержат газы, заимствованные из вмещающих пород и атмосферы, и газы, возникшие в процессах вторичных реакций.

Ниже приводятся компоненты газовой составляющей с учетом конденсата газа, после вычета содержания водяного пара, без всего азота и кислорода.

1. Водяной пар — основной компонент вулканических газов в пароксизмальный и длительный поствулканический период. Он составляет 70—99 объемн. % и играет огромную роль в происходящих химических процессах газовой и твердой фазы, является активным переносчиком труднолетучих.

2. В эксгалляциях камчатских вулканов определены все галоиды. Фтор и хлор являются элементами магмы, выделяются из нее при подъеме и в процессе остывания лавовых масс, характеризуют актив-

ный период жизни вулкана. Базальтовая магма Ключевского вулкана на данном этапе ее эволюции обогащена хлором и фтором. Среднее содержание в газах хлористого водорода составляет около 20%, а фтористого водорода в большинстве анализов в 10 раз меньше (табл. 1). В газовой составляющей из базальта при температуре выше 300° отношение HF : HCl находится в пределах 0,04—0,10. Газы из андезитовых экструзий содержали значительно меньше хлора и фтора. Отношение HF : HCl в них равно 0,01—0,03. С понижением температуры эти отношения заметно уменьшаются.

Наряду с хлором и фтором в эксгаляциях содержалось от 0,5 до 31 мг/л брома. Отношение Br : Cl находится в широких пределах (0,0009—0,007). В большинстве анализов оно значительно ниже, чем в морской воде. В эксгаляциях из андезита, в составе которых меньше хлора, эти отношения выше. Йода содержалось в конденсатах газа от 0,2 до 12 мг/л, в высокотемпературных эксгаляциях отмечалось незначительное его содержание или полное отсутствие, что, по-видимому, связано с термической неустойчивостью соединений йода.

3. Азот в вулканических газах является преобладающим компонентом, в основном как воздушное загрязнение.

Отношение N<sub>2</sub> : O<sub>2</sub> в фумарольных газах отличается от такового в воздухе; чаще всего содержится избыток азота, возникший, вероятно, в результате реакций окисления. В вулканических эксгаляциях азот в соединениях встречается в виде аммиака в газах, в растворах и инкрустациях — как соединение аммония.

Среди возгонов Ключевского вулкана характерен нашатырь. Его обильные отложения в лавовых потоках побочных кратеров обычно наблюдаются в растительной зоне, в интервале температур 160—300°. Однако наблюдения последних лет показали, что образование хлористого аммония происходит и там, где нет растительности. Так, на Корякском вулкане на высоте 3200 м у фумарол отлагался нашатырь; в вытяжках из эруптивных пеплов определен аммиачный азот.

Недавно изучены процессы дегазации изверженных пород и определен характер соединений азота в них (Виноградов и др., 1963). В породах основного состава — базальтах камчатских вулканов, по данным А. П. Виноградова и др., аммония (NH<sub>4</sub>) содержится ~10—10%. Многочисленные опыты показали, что аммиачный азот изверженных пород составляет более 50—90% всего азота, находящегося в породе. Ф. Влоцка (1961) отмечает, что почти все породы вулканического происхождения содержат аммиачный азот. Эти опыты и наши наблюдения последних лет дают основание считать, что некоторая часть азота, содержащегося в вулканических газах, может быть магматического происхождения.

4. В вулканических эманациях сера проявляется во всех известных формах (S<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, COS), указывающих на различную степень ее окисления. Сера и ее соединения в условиях атмосферного давления, температурных колебаний и высокого парциального давления кислорода легко подвергаются изменениям, и в вулканических газах трудно ожидать равновесного состояния.

Систематические наблюдения показали, что состав фумарольных газов одного и того же вулкана неоднократно изменялся. Увеличение активности фумарол сопровождается возрастанием отношения сернистого газа к углекислому и сероводороду. Так, на Шивелуче во время формирования купола Суелич в фумаролах старых куполов это отношение повысилось от 0,01 до 0,6 (табл. 2).

С повышением температуры отношение сероводорода к сернистому газу уменьшается. Сернистый газ более чувствителен к изменениям температуры и давления, чем другие вулканические газы; повышение его

Состав газов побочных кратеров Ключевского вулкана (в объемы. %)

Кратеры	Дата взятия проб	Температура, °С	Компоненты, пересчитанные на 100%							Фумарольные газы					
			HF	HCl	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	вулканические	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> и редкие	H <sub>2</sub> O	вулканические	HF : HCl
Кратер Заварицкого (извержение 1945 г.)															
Фумаролы кратера	Сентябрь 1945 г.	780	Не опред.	33,0	0,0	0,0	60,0	7,0	Не опред.	0,90	20,60	78,60	Не опред.	—	—
» »	Май 1949 г.	358	1,0	27,0	8,0	0,0	24,0	40,0	0,0	0,63	20,05	79,32	95,2	4,8	0,04
» »	Август 1949 г.	500	1,0	31,0	12,0	0,0	25,0	31,0	0,0	0,81	19,60	79,20	96,0	4,0	0,04
» »	Сентябрь 1953 г.	267	0,0	0,5	3,0	95,1	1,4	0,0	0,0	2,90	18,55	78,55	96,0	6,0	—
» »	Сентябрь 1957 г.	80	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,50	19,70	80,00	99,5	0,5	—
Фумаролы потока	Май 1949 г.	162	0,0	48,0	0,0	0,0	0,0	0,0	52,0	0,20	20,50	79,30	92,0	8,0	—
Кратер Былинкиной (извержение 1951 г.)															
Фумаролы кратера	Сентябрь 1953 г.	300	4,0	45,0	1,0	0,0	19,0	31,0	0,0	1,50	19,85	78,65	92,0	8,0	0,09
» »	То же	324	2,3	25,0	2,7	38,0	0,0	0,0	32,0	0,85	19,45	79,70	93,0	7,0	0,09
Кратер Белянкина (извержение 1953 г.)															
Фумаролы кратера	Сентябрь 1953 г.	680	3,5	35,0	0,0	0,0	26,0	35,5	0,0	3,30	14,20	82,50	76,0	24,0	0,10
» »	То же	520	3,1	32,0	2,0	23,0	14,9	25,0	0,0	4,20	12,80	83,00	75,0	25,0	0,10
» »	То же	480	4,0	45,0	0,0	19,0	16,0	16,0	0,0	1,88	16,20	81,92	93,0	7,0	0,09
Эксплозивные кратеры															
Левинсона-Лессинга	Сентябрь 1949 г.	490	0,5	5,4	47,0	0,0	7,7	39,0	0,40	0,70	20,00	79,3	98,0	2,0	0,09
» »	Сентябрь 1948 г.	99	0,0	0,0	26,5	73,50	0,0	0,0	0,0	0,40	20,00	79,6	99,0	1,0	—

концентрации в вулканических газах, по-видимому, может служить индикатором активности вулкана. Изученные конденсаты газа андезитовых куполов при 250—360° показали высокие содержания сернистой и серной кислот (5—7 г/л). Эти наблюдения подтверждают, что выходящие газовые растворы в приповерхностной зоне имеют высокий окислительный потенциал.

5. Соединения углерода (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) относятся к наиболее характерным компонентам вулканических газов, дистилляция их продолжается в течение очень длительного периода вулканической деятельности. Многочисленными анализами установлено, что высокотемпературные газы базальта (300—700°) содержат в среднем около 20% окиси углерода; в отдельных пробах газа концентрация его достигала 30—70%. В составе низкотемпературных газов (около 100°), сольфатах, мофеттах углекислый газ является преобладающим, составляет в сухом газе 70—98%.

С повышением температуры отношение углекислого газа к активным газам уменьшается главным образом за счет повышения концентрации сернистого газа. Химическая роль углекислого газа увеличивается на более поздних стадиях фумарольной деятельности.

Метан в многочисленных пробах камчатских вулканов не определен; в сольфатах и мофеттах его содержание не превышало 1%. Более высокое содержание метана наблюдалось в газах агломератового потока вулкана Безымянного. Однако наличие подстилающей растительной зоны, высокие температуры (выше 400°) пепловых туч и агломерата дают основания считать, что значительную часть составили газы термометаморфического происхождения.

6. Существенным компонентом вулканических газов является водород.

В газовой составляющей из базальта при температурах 500—700° характерно высокое содержание водорода и окиси углерода. Такие газы создают восстановительную среду.

7. Бор является характерным элементом эксгаляций андезитовой магмы. В эксгаляциях Швелуча в течение продолжительного времени (1953—1959 гг.) исследовался бор; одновременно определялись фтор и хлор. В конденсатах газа при температурах 100—360° бора содержалось от 5 до 74 мг. Отношение В : С1 находится в широких пределах — от 0,002 до 0,035, а отношение В : F — 0,06—0,92. В вытяжках эруптивных пепловых туч вулкана Безымянного отношение В : С1 от 0,002 до 0,016, а В : F — 0,11—0,66.

С понижением температуры фумарол до 100° концентрация фтора и хлора уменьшается в 4—5 раз, а бора — в 5—8 раз. Эти отношения указывают, что бор выносился вместе с хлором и фтором.

На графике (рис. 2) показана совершенно определенная прямая зависимость содержания бора от концентрации хлора и фтора. Чем выше концентрация хлора и фтора, тем больше бора. Интересно отметить, что в сассолине, кристаллизовавшемся из эксгаляций андезита при температуре 280—300°, содержались максимальные количества рудных элементов — свинца, меди, хрома, ванадия. Здесь прослеживается, несомненно, генетическая связь бора с элементами магмы.

8. Конденсаты газа представляют источник ценных сведений о составе летучих магмы и способе переноса их. Химический состав и степень минерализации конденсата находятся в прямой зависимости от изменения состава вулканических газов, отражающего определенную стадию остывания магмы.

Конденсаты высокотемпературной стадии обогащены кислыми газами (HF, HCl, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>), что обуславливает ультракислый характер конденсатов (рН ниже 1) и интенсивную миграцию труднолетучих — таких,

Состав газов вулканов Шивелуч и Безымянного (в объемн. %)

Вулканы	Дата взятия пробы	Температура, °C	Компоненты, пересчитанные к 100%									Фумарольные газы						
			HF	HCl	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	COS	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	вулкани- ческие	O <sub>2</sub>	редкие	H <sub>2</sub> O	вулкани- ческие	HF : HCl	SO <sub>2</sub> : CO <sub>2</sub>
<b>Вулкан Шивелуч</b>																		
Фумаролы старых куполов	Февраль 1947 г. . . . .	100	0,0	0,0	2,42	94,30	3,05	0,0	0,23	0,0	0,0	21,05	16,60	62,35	83,5	16,5	—	0,02
То же	Сентябрь 1948 г. . . . .	83	0,0	0,0	1,05	96,55	2,30	0,0	0,10	0,0	0,0	50,00	10,50	39,50	70,0	30,0	—	0,01
» »	Август 1949 г. . . . .	265	0,0	0,0	12,50	82,75	3,30	0,0	0,65	0,80	0,0	30,25	10,50	59,25	80,5	19,5	—	0,10
» »	Сентябрь 1953 г. . . . .	280	0,0	1,1	31,50	59,30	0,0	0,0	2,90	5,20	0,0	13,50	17,45	69,05	89,5	10,5	—	0,50
» »	Август 1954 г. . . . .	285	0,6	34,0	24,0	39,0	0,0	0,0	1,00	1,40	0,0	26,90	14,00	59,10	91,0	9,0	0,01	0,6
Купол Каран	Сентябрь 1947 г. . . . .	90	0,0	0,0	0,0	99,6	0,3	0,0	0,10	0,0	0,0	65,60	7,00	27,40	90,0	10,0	—	—
» »	Сентябрь 1959 г. . . . .	80	0,0	0,0	0,0	98,5	0,45	0,0	0,10	0,15	0,8	80,70	3,60	15,70	91,0	0,0	—	—
<b>Купол Суелич (извержение 1945 г.)</b>																		
Агломератовый поток	Сентябрь 1946 г. . . . .	149	0,0	0,0	13,0	85,0	2,00	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	19,00	79,8	92,5	7,5	—	0,15
» »	Сентябрь 1946 г. . . . .	266	0,0	15,0	25,0	45,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,45	20,10	79,45	80,0	20,0	—	0,3
Фумаролы купола	Май 1954 г. . . . .	360	0,3	25,0	25,0	37,7	0,0	0,0	10,0	2,0	0,0	2,45	18,4	79,15	89,5	10,5	0,01	0,6
» »	Сентябрь 1955 г. . . . .	265	0,4	23,0	27,6	48,0	0,0	0,0	1,0	2,0	0,0	19,3	14,7	66,0	93,0	7,0	0,01	0,6
<b>Вулкан Безымян- ный (извержение 1955 г.)</b>																		
Агломератовый поток	Сентябрь 1956 г. . . . .	100	0,0	0,0	1,12	98,0	0,20	0,0	0,7	0,0	0,0	22,25	8,75	69,00	94,5	5,5	—	0,01
Фумаролы кратера	Август 1959 г. . . . .	195	0,0	11,0	28,0	46,0	0,0	0,0	9,5	0,0	0,0	6,0	16,9	79,1	96,0	6,0	—	0,6
» »	Июль 1959 г. . . . .	240	0,5	18,0	19,0	58,0	0,0	0,0	0,5	4,0	0,0	2,90	18,0	79,10	98,0	2,0	0,03	0,3
» »	Июль 1962 г. . . . .	200	0,6	18	24,4	57,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,2	15,0	76,8	98,0	2,0	0,03	0,4

как железо, алюминий, щелочные металлы, кремний и многие микроэлементы (Си, Pb, Ag, Co, Ni, V, Be, Zr). Железо из базальтовой лавы выносилось хлором и фтором. Алюминий интенсивно выделяется с хлором. В кислых (рН 1–2) хлоридных конденсатах высокотемпературных газов алюминия содержалось более 30% общей массы металлов. В низкотемпературных конденсатах с рН выше 4 алюминий и железо уже не обнаруживаются. Щелочные металлы выносились в виде хлоридов и сульфатов. Отношение Na : К было выше (5–8), чем в исходной лаве (Башарина, 19636). По мере остывания лавы натрий и калий продолжали выноситься газами, но отношение их было уже близким к отношению их в исходной лаве. В эксгаляциях из андезита отношение Na : К еще более высокое (11, 20), чем в эксгаляциях базальта. Кальций и магний с хлором выносятся из лавы менее интенсивно, чем остальные петрогенные металлы. На более поздних этапах остывания лавы конденсаты представляли слабокислые растворы (рН 5). В этих условиях увеличивается

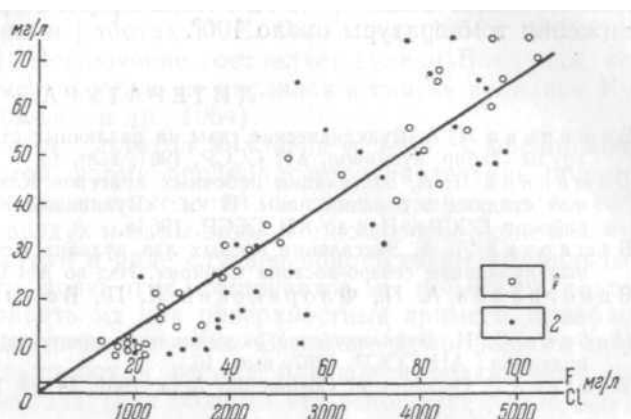


Рис. 2. Зависимость содержания бора в конденсатах газа вулкана Шевелуч от концентрации хлора и фтора.  
1 — фтор; 2 — хлор

роль углекислоты и водяного пара, изменяется состав катионов, преобладают щелочноземельные — кальций и магний.

Данные спектрального анализа конденсатов газа из различных побочных кратеров с близкими температурами (350–500°) показали, что количество микроэлементов в них неодинаково. В эксгаляциях кратера Былинкиной обнаружено 17 элементов: Mo, Be, Tl, Se, Pb, Bi, Sn, Ca, V, Cu, Ag, Co, Ni, Sr, Cr, Zn, Ba. В конденсатах газа кратеров Вернадского и Крыжановского (извержения 1956 г.) обнаружено только по 6 элементов. Базальтовая лава кратера Былинкиной была более насыщена легколетучими газами и микроэлементами, чем андезито-базальтовые лавы кратеров Крыжановского и Вернадского (Башарина, 1963а).

По мере остывания лавы изменялся состав легколетучих и сокращался вынос труднолетучих. В эксгаляциях остывающих кратеров на протяжении более 20 лет обнаружены только по два элемента (Си и Мо или Си и Zn). В эксгаляциях из андезито-базальтовой лавы Ключевского вулкана медь обнаружена на всех стадиях остывания. В высокотемпературную стадию медь переносилась в газовой фазе в виде хлоридов и сульфатов. Низкотемпературные газы побочных кратеров также содержали медь и цинк (десятые и сотые доли процентов), хотя на этой стадии фумарольной деятельности в газах не было уже ни хлора, ни серы. По-видимому, здесь в переносе металлов принимал участие водяной пар. Конденсаты в некоторой степени отражают особенности состава лавы.

Наиболее характерными микроэлементами эксгаляций из андезита вулкана Шевелуч являются ванадий, молибден, свинец, бор, мышьяк, из базальта — медь.

В эксгаляциях из андезита и базальта на различных стадиях их остывания содержание микроэлементов находилось в прямой зависимо-

сти от времени, прошедшего с момента начала извержения. Состав конденсатов свидетельствует о том, что галоиды и сера выносятся из магмы в основной своей массе совместно с водородом, а не с металлами. Таким образом, газовый перенос металлов, даже на первом этапе остывания лавы, ограничен.

Изучение газового режима вулканов показало, что отделение летучих из андезитовой лавы продолжается в течение более длительного периода, чем отделение их из базальтовой лавы (в течение столетий); при этом выделяются пары воды, углекислый и сернистые газы. В базальтовой лаве, наоборот, отделение летучих прекращается уже при понижении температуры около 100°.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Б а ш а р и н а Л. А. Вулканические газы на различных стадиях активности вулканов — Труды Лабор. вулканол. АН СССР, 1961, вып. 19.
- Б а ш а р и н а Л. А. Эксгаляции побочных кратеров Ключевского вулкана на различных стадиях остывания лавы. В кн.: «Вулканизм Камчатки и некоторых других районов СССР». Изд-во АН СССР, 1963а.
- Башарина Л. А. Эксгаляция кислых лав вулкана Безымянного. В кн.: «Современный вулканизм северо-востока Сибири». Изд-во АН СССР, 1963б.
- Виноградов А. П., Флоренский К. П., Волынец В. Ф.— Геохимия, 1963, № 10.
- Набоко С. И. Вулканические эксгаляции и продукты их реакций.— Труды Лабор. вулканол., АН СССР, 1957, вып. 16.
- Wlotzka F. Geochim. et Cosmochim Acta, 1961, 24, № 106.