

## ЭКСКАЛЯЦИЯ КИСЛЫХ ЛАВ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННОГО

Вулкан Безымянный расположен в Ключевской группе вулканов. До 1955 г. его считали потухшим. 22 октября 1955 г. впервые за историческое время началось его извержение, сопровождавшееся до конца года сильными взрывами с выбросом мощных пепловых туч. Пепел распространялся на сотни километров. 30 марта 1956 г., спустя почти полгода после начала извержений, произошел его наиболее сильный взрыв, в результате которого образовался большой, открытый к востоку кратер размером около 2 км. Кратер занял всю вершину и юго-восточные склоны вулкана. Позднее в нем началось выжимание экструзивного купола, рост которого сопровождался взрывами и небольшими раскаленными лавинами, скатывавшимися по склону вулкана. Агломератовый материал, выброшенный при извержении вулкана Безымянного, двигаясь в юго-восточном направлении к отрогам сопки Большая и Малая Зимина, заполнил долину р. Сухая Хапица. На поверхность агломератового потока поднимались тысячи струй пара и газа вторичных фумарол.

Агломератовый материал потока — это смесь пепла, песка, обломков свежей лавы этого извержения и обломков старых пород, слагавших старую восточную постройку вулкана.

По химическому составу старые и свежие лавы вулкана Безымянного представляют породы с некоторыми вариациями состава от андезитов до дацитов. (Богоявленская, 1960).

В первые месяцы деятельность вулкана носила вулканский характер. В это время из кратера почти непрерывно поднимался столб газа, нагруженного пеплом.

В период интенсивного роста купола продукты вулканической деятельности отбирались в 12—16 км от центра извержения. Изверженный рыхлый материал был сильно насыщен газами. В момент взрыва (30.III 1956 г.) в пос. Ключи, в 45 км от центра извержения, в пепловой туче определялись вулканические газы — хлористый водород, сернистый газ и двуокись углерода, количества которых значительно превышали допустимые концентрации в воздухе ( $\text{HCl}$  — свыше 0,1 мг/л,  $\text{SO}_2$  — около 0,3 мг/л,  $\text{CO}_2$  — 2,2 мг/л).

Изученные экскаляции эруптивных газопопелловых туч показали большое разнообразие в составе летучих вулкана Безымянного. Наряду с летучими соединениями серы и углекислым газом постоянно отмечались галоиды, причем в начальных эксплозиях соединений хлора было в 2—5 раз больше, чем в более поздних пеплопадах 1956—1962 гг.

Автором этой статьи исследовались экскаляция вулкана Безымянного с начала извержения — с октября 1955 г. по декабрь 1957 г., с октября 1958 по декабрь 1959 г., а также летом 1962 г.

Состав фумарольных газов вулкана Безымянного, объемн. %

№ фумарол	Время взятия пробы	Температура фумарол, °С	Газы (без паров воды и воздуха)								Фумарольные газы			Н <sub>2</sub> O, г/л
			HCl	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	COS	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Вулканические	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> и редкие	
1	9.IX 1956 г.	100	He обн.	0,21	12,86	He обн.	81,18	0,74	0,56	4,45	26,80	2,20	71,00	9,50
2	IV.1957 г.	90	—	—	0,85	—	97,15	0,85	1,15	—	17,40	12,60	70,00	He опр.
3	VIII	95	—	—	1,40	—	96,36	0,84	1,40	—	17,85	16,70	65,45	He опр.
4	8.V	100	—	0,15	0,77	0,77	81,59	0,46	—	16,26	32,50	6,50	61,00	4,93
5	23.VII	99	—	—	3,32	1,98	86,10	1,98	—	6,62	7,55	15,80	76,65	6,50
6	1959 г. 23.IV	90	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	46,83	1,00	6,35	45,82	14,95	2,05	83,00	4,50
7	21.VII	98	—	—	—	—	66,31	—	3,38	30,31	7,39	9,40	83,20	11,45
8	30.VII	96	—	—	—	—	74,76	—	2,91	22,33	5,15	13,25	81,55	9,30
9	23.IV	92	—	—	—	—	56,53	—	2,78	40,69	10,79	2,00	87,20	3,60
10	21.VII	92	—	—	—	—	77,27	—	3,41	19,32	4,40	12,65	83,60	9,40
11	30.VII	96	—	—	—	—	78,65	—	5,62	15,73	3,56	12,60	83,85	8,20
12	23.IV	96	—	—	—	—	54,57	2,21	—	43,22	6,78	12,80	80,40	3,80
13	21.VII	98	—	—	—	—	64,36	—	4,95	30,69	3,03	15,10	81,90	6,50
14	31.VII	95	—	—	—	—	64,29	—	7,14	28,57	2,80	16,50	80,70	5,85
15	29.VII	85	—	—	1,41	—	54,93	—	14,08	29,58	3,55	15,00	81,40	18,44
16	30.VII	90	—	—	2,26	—	69,55	—	—	28,19	2,66	16,60	80,75	18,50
17	29.VII	94	—	—	3,23	—	66,53	—	—	30,24	2,48	11,80	85,70	18,60
18	30.VII	95	—	—	2,70	—	81,08	—	—	16,22	1,85	16,85	81,30	16,50
19	30.VII	85	—	—	2,17	—	89,13	—	8,70	—	2,30	15,80	81,85	17,85
20	30.VII	85	—	—	4,13	—	66,51	—	—	29,36	2,18	14,75	83,10	18,40
21	30.VII	90	—	—	—	—	64,20	—	7,00	28,80	2,85	16,50	80,70	18,45
22	31.VII	86	—	—	3,23	—	96,77	—	—	—	2,48	16,85	80,60	17,80
23	30.VII	95	—	—	2,17	—	80,67	—	8,16	—	1,84	17,30	80,85	13,56
24	29.VII	90	—	—	3,35	—	90,15	—	—	6,50	5,38	14,05	80,60	12,20
25	30.VII	95	—	—	2,12	—	91,98	—	—	5,90	4,24	14,50	81,20	15,20

Таблица 1 (окончание)

№ фу- марол	Время взятия пробы	Темпера- тура фумарол, °С	Газы (без паров воды и воздуха)								Фумарольные газы			Н <sub>2</sub> О, г/л
			HCl	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	COS	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Вулкани- ческие	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> и редкие	
26	31.VII	98	—	—	0,19	—	97,76	0,38	—	1,67	52,58	4,10	43,30	8,60
27	31.VII	93	—	—	0,25	—	90,69	0,74	1,22	7,10	20,40	8,50	71,10	6,26
28	31.VII	98	—	—	0,30	—	85,80	—	1,18	12,72	16,90	10,20	72,95	6,54
29	31.VII	98	—	—	0,50	—	88,00	1,58	2,92	7,00	11,96	15,60	72,45	7,50
30	30.VII	92	—	—	—	—	81,25	2,08	—	16,67	7,20	10,65	82,25	5,40
31	21.VII	100	—	0,19	—	—	98,58	0,15	1,08	—	96,88	0,40	2,70	4,60
32	21.VII	190	11,20	27,80	—	—	46,20	5,55	9,25	—	0,54	16,50	82,96	0,20
33	9.IX	96	—	0,21	—	—	98,82	0,27	0,70	—	93,10	1,05	5,85	—
34	1960 г. 15.VIII	170	5,37	12,30	—	—	82,33	—	—	—	0,43	19,00	79,80	0,01
35	17.VIII 1962 г.	97	—	—	—	—	100	—	—	—	7,25	6,10	86,75	—
36	16.VII	194	17,70	29,40	—	—	41,20	—	11,7	—	0,85	18,80	80,35	0,17
37	16.VII	95	—	9,10	—	—	90,90	—	—	—	1,65	19,10	79,25	6,50

Примечания: 1. Место взятия пробы: 1, 2, 5, 14 — агломератовый поток в центральной части; 15—22 — район вулкана Зимина; 23 — воронка взрыва; 24,25 — термальная площадка; 26—30 — агломератовый поток юго-восточного направления; 3, 4, 31, 32, 35, 36, 37 — в кратере; 33, 34 — купол.  
2. Пробы газа от IV, VIII 1957 г. отобраны Г. С. Горшковым и Г. Е. Богоявленской; от IX 1959, 1960 гг. — О. Г. Борисовым; остальные отбирались и анализировались Л. А. Башариной.

## Состав конденсатов фумарольных газов кратера и нового купола вулкана Безымянного

Компоненты	157		158		159		160		161	
	105°		115°		194°		220°		450°	
	мг/л	мг·экв %	мг/л	мг·экв %	мг/л	мг·экв %	мг/л	мг·экв %	мг/л	мг·экв %
Катионы										
H <sup>+</sup>	0,16	2,86	0,63	11,30	1,60	17,60	100	80,00	272,80	88,50
Na <sup>1+</sup>	31,46	24,50	26,20	20,57	24,70	11,80	61,20	2,12	66,10	0,90
K <sup>1+</sup>	8,50	3,96	5,45	2,34	4,20	1,00	10,60	0,37	14,20	0,10
Mg <sup>2+</sup>	11,64	17,30	9,50	14,20	18,50	16,90	34,00	2,36	39,50	1,05
Ca <sup>2+</sup>	51,14	45,50	49,40	44,80	60,00	33,00	115,80	5,45	169,50	2,70
Fe <sup>2+</sup> + +Fe <sup>3+</sup>	1,20	10,8	1,58	1,44	8,20	4,95	52,00	2,20	96,00	1,75
Al <sup>3+</sup>	2,48	4,80	2,61	5,35	12,16	14,75	82,00	7,50	144,00	5,00
С у м м а	106,58	100,00	95,37	100,00	129,36	100,00	455,60	100,00	802,10	100,00
Анионы										
Cl <sup>-</sup>	62,45	31,50	48,20	25,00	127,00	49,50	1950,00	44,20	3778,00	34,20
F <sup>-</sup>	1,80	1,65	1,80	1,10	1,19	1,00	He опр.	—	He опр.	—
Br <sup>-</sup>	0,12	—	0,06	—	0,24	—	He опр.	—	He опр.	—
I <sup>-</sup>	He обн.	—	He обн.	—	0,01	—	He обн.	—	He обн.	—
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	172,80	65,00	190,08	73,00	214,00	49,50	850,00	14,00	3990,00	27,00
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	9,70	1,85	4,85	0,90	—	—	2100,00*	41,80	4880,00*	38,80
С у м м а	246,87	100,00	244,99	100,00	342,44	100,00	4900,00	100,00	12568,00	100,00
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	13,00		37,00		35,00		48,00		62,00	
H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub>	1,62		1,20		1,40		He опр.		He опр.	
Общая минерализация	368,07		378,56		508,20		5403,60		13432,10	
pH	3,85		3,20		2,80		1,00		0,50	
Cl/Br	522		803		530		—		—	

Примечания. 1. Дата и место взятия пробы: Обр. 157,158, 21.VII 1959 г. фумарола из кратера вулкана; Обр. 159—30.VII 1962 г.—на склоне нижней части купола; Обр. 160—25.VIII 1962 г., там же; Обр. 2.161—VIII 1962 г., там же.

2. Цифры со звездочкой относятся к SO<sub>3</sub>.

### ФУМАРОЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В КРАТЕРЕ И НА КУПОЛЕ

После кульминационного извержения в 1956—1957 г. вулкан Безымянный находился в состоянии умеренной фумарольной деятельности и только изредка отмечались взрывы с небольшими раскаленными лавинами.

В апреле и августе 1957 г. впервые были отобраны пробы газа и конденсата из фумарол, расположенных в нижней части купола на высоте 2300 м. В это время температура фумарол в этой части кратера не превышала 95° (табл. 1).

В газовой фазе, насыщенном водяным паром, преобладал углекислый газ (16,9—17,2%), сероводород, водород и окись углерода (до 0,2%).

В 1958 г. температура фумарол на склоне купола достигала 380°. Эти фумаролы выделяли почти сухой газ, который состоял из хлористого водорода (1,8%), сероводорода (1,95%), углекислого газа (4,7%) и водорода (1,3%) (Борисов, 1960).

Спустя более чем три года после начала выжимания экструзии (VII 1959 г.) большая часть кратера вулкана была заполнена свежим агломератовым материалом горячих лавин. В кратере наблюдались фумаролы с температурой до 300°. Газ выделялся из навалов глыб нового купола, погруженных в пепел и песок. Выделения газа из трещин лавы имели незначительный дебит. В газовой составляющей содержался HCl, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> в концентрации 0,1—0,5%. По мере остывания лавы дистилляция газа прекращалась. На остывших глыбах отлагались тонким налетом возгоны хлоридов и сульфатов. Фумаролы с температурами не более 100° располагались в юго-восточной части кратера, у старых экструзий. В газовой фазе их выделений преобладал углекислый газ, содержался сернистый газ и отсутствовал хлористый водород. Около таких фумарол отлагались возгоны сульфатов, которые составляли основную часть минерализации конденсатов газов — 50% (табл. 2.) Общая же минерализация их не превышала 0,3—0,7 г/л. Конденсаты имели кислую реакцию со значением pH от 3,2 до 3,8. В составе катионов преобладали ионы кальция, затем щелочных металлов (Na, K); железа и алюминия содержалось мало (см. табл. 2).

Летом 1962 г. в кратере исследовались фумаролы с температурой 170—194° в нижней части нового купола. В газовой фазе содержался CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, H<sub>2</sub>; они составляли 85%; углекислый газ преобладал. Такие фумаролы, вероятно, не отражали истинного состава газов нового купола; часть компонентов (SO<sub>2</sub>, HCl и др.) более растворимых уже была отфильтрована. Температура фумарол, расположенных на склоне купола, была 220°. В конденсатах с низким значением pH = 1 в составе анионов содержались ионы хлора 1,95 г/л, SO<sub>3</sub> — 2,1 г/л и SO<sub>4</sub> — 0,85 г/л. В газовой составляющей преобладал сернистый газ.

Температура фумарол, расположенных в центре купола, была 400—450°. Конденсаты газа этих фумарол с низким значением pH = 0,5 в составе анионов (как и на склоне купола) содержали Cl<sup>-</sup> — 3,78 г/л, SO<sub>3</sub> — 4800 г/л и SO<sub>4</sub> — 3,99 г/л, преобладала сера. Общая минерализация составляла 13,40 г/л (см. табл. 2). Таким образом, газовая составляющая фумарол, расположенных непосредственно на куполе, еще раз подтверждает, что фумаролы кратера, выделяющие большое количество углекислого газа (35—95%) не отражали состава эксгалций нового купола, а являлись отфильтрованными газами или газами более ранних этапов деятельности вулкана Безымянного.

#### ФУМАРОЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ НА АГЛОМЕРАТОВОМ ПОТОКЕ

Вскоре после образования потока, вся его поверхность была покрыта многочисленными фумаролами. Температура большинства фумарол колебалась в пределах 98—105°, иногда она достигала 200°. Такие фумаролы обычно были приучены к участкам агломератового потока наибольшей мощности. По характеру отложений и составу газа на потоке можно было выделить различные фумарольные поля.

1. Наиболее постоянные фумаролы располагались в центральной части потока, вдоль погребенного русла реки. Газ и пар пробивались из продольных трещин, образовавшихся на участках потока, где пепел хорошо сцементировался и способствовал естественному каптажу Фумарол. В них газовые составляющие были менее загрязнены воз-

духом и содержание сероводорода и метана было значительно выше. Устья фумарол были инкрустированы возгонами серы и сульфатов.

2. В юго-восточной части потока фумарольные поля были приурочены к невысоким холмам и отдельным площадкам и сохраняли активность в течение длительного времени. В 1959 г. такие фумаролы выделяли до 52,2% газа. Углекислый газ составлял 51,0%, остальную часть — метан, сероводород и окись углерода. Это было время максимального выделения углекислого газа с момента исследования вторичных фумарол потока.

3. Фумаролы, расположенные у отрогов вулкана Зимины, в течение почти пяти лет были активными. Следует отметить, что этот участок потока имеет своеобразный рельеф (рис. 1). В результате вторичных взрывов здесь образовалось несколько глубоких воронок диаметром до 300 м и небольших рытвин в виде котлов, способствующих скоплению атмосферных осадков и талых ледниковых вод.

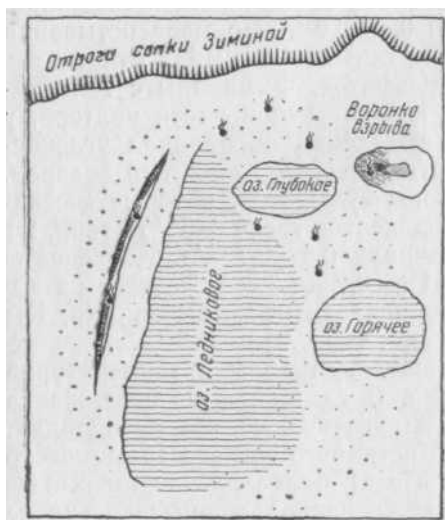


Рис. 1. Схема расположения фумарол на агломератовом потоке у подножия сопки Зиминой

В июле — августе 1959 г., в период наших наблюдений было отмечено интенсивное явление временного разогрева поверхностных слоев агломератового потока в районе отрогов вулкана Зимины. Здесь образовалось оз. Ледниковое, которое питалось, помимо атмосферных осадков, водами ледника Желтого. Температура воды в образовавшихся временных озерах была от 20 до 45°, а у берегов, где были сосредоточены выходы газов, она «кипела»; температура ее достигала 95—97°. На этом участке возникли сотни вторичных фумарол.

В мелких лужах с «кипящей» грязью и заливчиками действовало

множество грифонов с температурой 90—95°. Далеко слышно было бульканье выделяющихся газов и ощущался запах сероводорода. В газовой фазе, насыщенной водяным паром (до 21 г/л), содержался  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{COS}$ , в некоторых пробах —  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  (см. табл. 1).

Из результатов анализов (табл. 3) видно, что конденсаты паро-газовых струй в районе вулкана Зимины по составу и общей минерализации были близки к водам оз. Ледникового и горячих водоемов. На химический состав фумарольных конденсатов и вод оз. Ледникового оказывал влияние привнос растворимых компонентов из зоны алунитизации вулкана Зимины.

Фумарольная деятельность агломератового потока в 1959—1960 гг. продолжала ослабевать. Значительно сократилось количество фумарол, а их поля сохранились в местах наибольшей мощности агломерата. По сравнению с предыдущими годами изменился состав газа, хотя температура в среднем была на потоке около 80°.

Высокотемпературные фумаролы (до 440°) на боковом агломератовом потоке в истоках р. Сухая Хапица и верховьях р. Каменской, с мощностью агломерата до 60—65 м в течение 1957—1958 гг. сохраняли высокую температуру (440—340°). В горячем воздухе, почти лишенном воды, содержалось незначительное количество хлористого водорода. Возгонов было мало, хлориды тонким налетом покрывали остыв-

Состав конденсатов фумарольных газов потока вулкана Безымянного и вод талых ледников

Компоненты	151		152		153		154		155		156	
	90°		98°		92°		95°		20°		85°	
	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %
Катионы <sup>1</sup>												
H <sup>+</sup>	—	—	—	—	0,63	12,50	0,16	6,56	—	—	0,03	0,60
Na <sup>+</sup>	8,40	26,62	9,20	18,60	22,60	19,44	10,45	18,5	16,46	27,30	36,60	31,50
K <sup>+</sup>												
Mg <sup>2+</sup>	3,10	17,98	5,05	19,53	9,25	15,28	6,65	22,60	6,05	19,30	8,10	4,00
Ca <sup>2+</sup>	15,42	55,40	25,55	59,08	38,40	38,10	21,64	44,50	25,00	47,26	46,20	45,85
Fe <sup>2+</sup> +Fe <sup>3+</sup>	—	—	—	—	2,34	2,38	0,60	1,24	0,35	0,38	0,56	0,60
Al <sup>3+</sup>	—	—	—	—	3,96	8,73	0,85	3,34	0,68	2,70	0,85	1,85
Сумма	26,92	100,00	42,14	100,00	84,20	100,00	43,75	100,00	51,78	100,00	101,76	100,00
Анионы												
Cl <sup>-</sup>	12,80	25,00	19,60	26,19	21,26	13,07	14,56	17,54	12,60	14,71	29,50	24,00
Br <sup>-</sup>	He обн.	—	He обн.	—	Следы	—	He обн.	—	He обн.	—	He обн.	—
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	25,20	39,39	45,50	45,24	185,90	84,53	76,60	69,30	69,70	60,92	150,46	61,50
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	—	—	—	—	10,67	2,40	18,60	13,16	—	—	—	—
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	28,70	35,61	36,65	28,57	—	—	—	—	35,38	24,37	48,80	14,50
Сумма	66,70	100,00	101,77	100,00	217,86	100,00	109,78	100,00	117,68	100,00	228,79	100,00
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	5,48		10,13		18,00		9,00		8,85		37,40	
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	He обн.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Общая минерализация	99,10		154,04		320,06		162,53		178,31		367,95	
pH	6,0		4,85		3,2		3,8		5,8		4,5	
Cl/Br	—		980		708		728		—		983	

Примечание. Дата и место взятия проб: Обр. 151, 23.IV 1959 г. фумаролы центральной части потока; Обр. 152, 21.VII 1959 г., фумаролы юго-восточной части потока; Обр. 153, 29.VI 1959 г., фумаролы термальных площадок; Обр. 154, 30.VII 1959 г., фумаролы в районе сопки Зимина; Обр. 155, 30.VII 1959 г., воды оз. Ледникового; Обр. 156, 31.VII 1959 г., воды из горячего водоёма.

шую лаву. Со временем температура на этом участке непрерывно снижалась; 1957 г.—440°; 1958 г.—340°; 1959 г.—300°; 1960 г.—200°; 1961 г.—120°; 1962 г.—70°.

Определяя условия формирования фумарол агломератового потока, следует учитывать высокие температуры выброшенных пепловых туч и агломерата, наличие подстилающей растительной зоны, метеорных вод, старых пород, выветренных с повышенной известковистостью. Все это дает основание допускать, что газовую фазу фумарол потока представляли не только собственно вулканические эксгаляции, адсорбированные пеплом и агломератом во время извержения вулкана Безымянного; несомненно, некоторые газы были генетически чуждой примесью

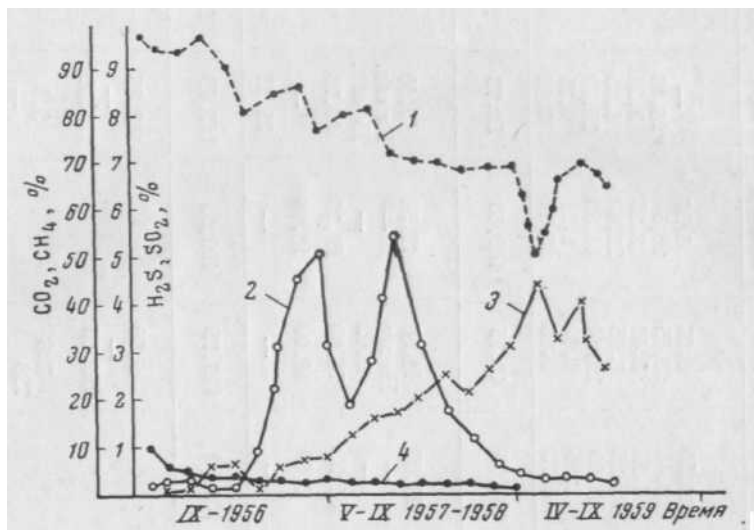


Рис. 2. График изменения содержания фумарольных газов центральной части потока во времени  
1 — SO<sub>2</sub>; 2 — H<sub>2</sub>S; 3 — CH<sub>4</sub>; 4 — CO.

вулканических эманации. Значительную часть составили газы термо-метаморфического происхождения.

Рассматривая в целом состав фумарольных газов агломератового потока, можно заметить, что они изменялись качественно и количественно во времени (рис. 2). Газовая составляющая фумарол потока на отдельных фумарольных полях изменялась в связи с происходящими химическими процессами, которые создавали окислительно-восстановительную среду. В начальный период фумарольной деятельности в составе газа отмечены максимальные количества соединений серы, в результате вторичных реакций наступала восстановительная среда, увеличивалось содержание метана и углекислого газа.

В общем виде эти изменения отображены треугольными диаграммами (рис. 3 и 4), на которых по данным 70 анализов нанесен средний состав фумарольных газов потока. На графике (рис. 5) содержания углекислого газа и метана в газах фумарол потока видно, что с уменьшением содержания метана увеличивается концентрация углекислого газа, и наоборот.

Эти изменения в составе газа показывают генетическую связь отдельных его компонентов с вторичными реакциями.

Как отмечалось, в составе фумарольных газов наряду с сероводородом и сернистым газом содержалась сероокись углерода. Учитывая, что при формировании потока вулкана Безымянного температура пиро-



пластического материала была настолько высокая, что древесина обугливалась, можно допустить, что сероокись углерода образовалась в результате вторичных реакций при участии органического углерода. Хартман (Беммелен, 1957), изучая газы извержения вулкана Мерапи

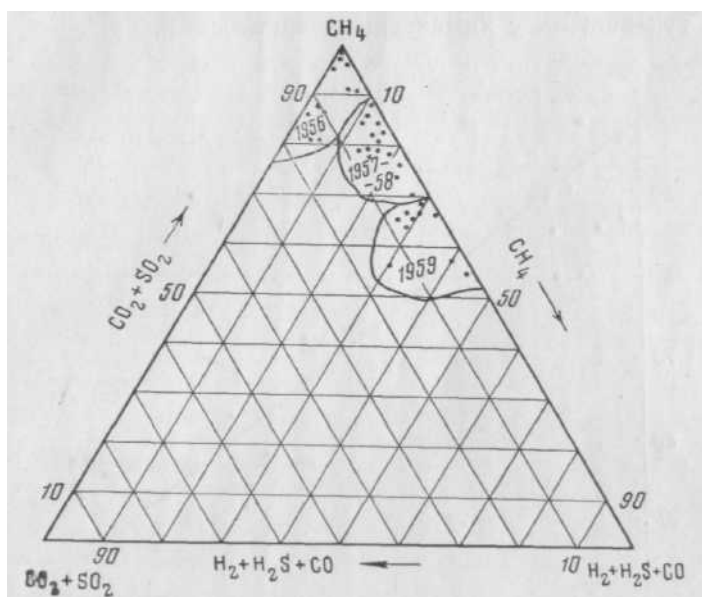


Рис. 3. Состав фумарольных газов потока вулкана Безымянного

в 1930—1931 г., отметил, что газы с температурой около  $100^{\circ}$  содержали в своем составе до 3,5% сероокиси углерода. Он считает, что сероокись углерода образовывалась в результате соприкосновения углерода с серными газами при температуре около  $450^{\circ}$  (температура обугливания дерева).

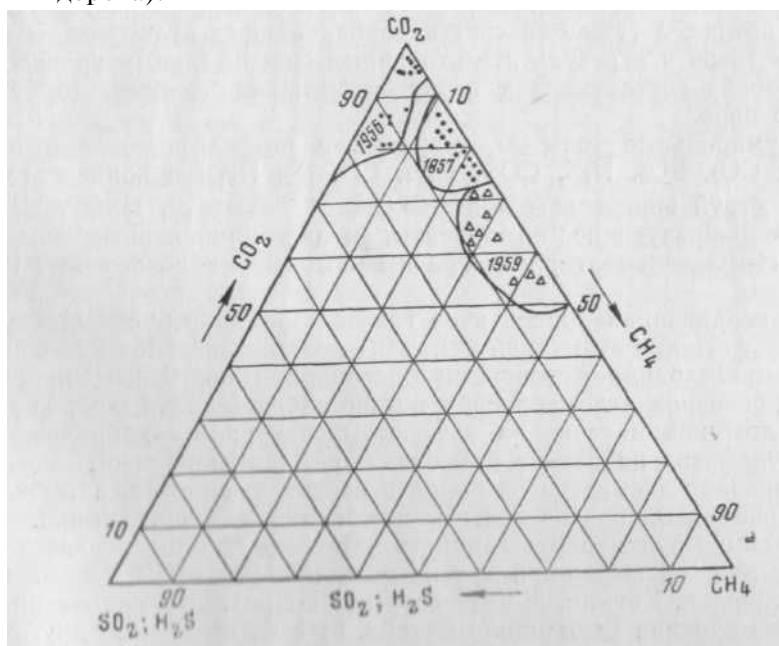


Рис. 4. Диаграмма состава фумарольных газов потока Безымянного

Систематические наблюдения за фумарольной деятельностью потока и полученный аналитический материал позволили сделать следующие заключения.

1. Длительная фумарольная деятельность на агломератовом потоке обусловлена вулканическими газами, аключированными агломератом, и газами, связанными с химическими процессами.

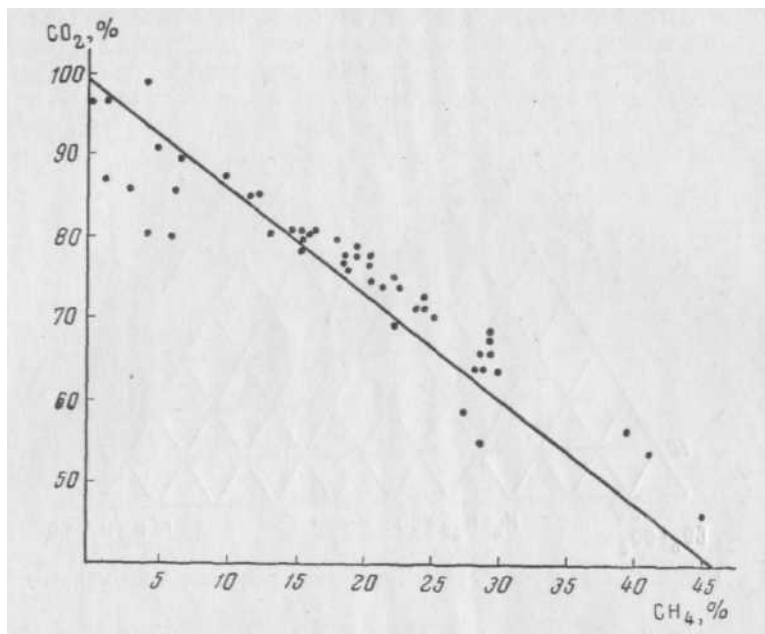


Рис. 5. Зависимость содержания углекислого газа в газах фумаролпотока от содержания  $\text{CH}_4$

2. Температурный режим фумарол основного тела агломератового потока сохранялся в пределах  $80\text{--}90^\circ$  за счет первоначального запаса тепла в потоке, а также за счет адсорбированных агломератом вулканических газов и в результате вторичных окислительных процессов.

3. Газовая составляющая потока содержала  $98\text{--}99\%$  (объемных) водяного пара.

4. Фумарольные газы агломератового потока содержали в виде молекул  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ; в конденсате газопаровых струй определены ионы  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и все породообразующие компоненты, недиссоциированные молекулы,  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , элементарная сера и некоторые микроэлементы Ba, Sr, Mo, Cu.

5. Минерализация конденсатов газопаровых струй была существенно сульфатной с величиной pH от 3,1 до 6,0 в пределах  $90\text{--}490$  мг/л, которая происходила в основном благодаря гипергенным процессам.

6. На основном агломератовом потоке наблюдались отложения сульфатных возгонов и серы, на высокотемпературном — хлоридов. Отложение сульфатов на потоке происходило главным образом вследствие выщелачивания элементов из пород и переотложения их, а также приноса серноокислых вод из зоны алунизации вулкана Зимина.

Экспериментальный вулкан Безымянного интересно сравнить с эксплозиями аналогичных извержений других вулканов (Шевелуч, Новый купол, Суелич, Мерапи, Катмай, Мон-Пеле, Лассен-Пик). При сравнении газов и возгонов вулкана Безымянного (табл. 5) с эксплозиями других вулканов, можно отметить их сходство и в то же время некоторое различие.

Состав эксгаляций различных вулканов, близких по типу извержения к вулкану Безымянному

Вулкан и температура фумарол	Состав газа	Возгоны
Безымянный, 100—450°	Водяной пар 90—99%. CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , COS, HCl, HF, H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , HF—мало	Сульфаты, квасцы, сера, пирит, хлориды
Шевелуч, купол Суелич, 100—500°	Водяной пар 80—98%. CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, HCl, SO <sub>3</sub> , CO, HF, H <sub>2</sub> , HF,— мало CH <sub>4</sub> и COS не было	Сульфаты, квасцы, сера, хлориды, сассолин, мышьяк
Мерапи, 100—450°	Около 90% водяного пара. CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, HCl, COS, CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> —преобладал, COS—до 3,5%; HF—мало	Квасцы, гипс, сульфаты Na и Fe, хлориды, сера, следы аммония
Катмаи, 100—650°	Водяной пар 98—99%. CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> , CO, HCl, HF, HF—много, иногда встречается CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub>	Хлориды, нашатырь, фториды (до 7%), сульфаты, мышьяк, сера, пирит
Мон-Пеле	Водяной пар до 99%. CO <sub>2</sub> —82%, H <sub>2</sub> —5%, CO—7,469%	Сульфаты
Лассен-Пик, 100—117,5°	Водяной пар до 90—95%. CO <sub>2</sub> —преобладает; H <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> —ничтожное количество	Квасцы, алюмо-натриевые сульфаты, сера

В газовой составляющей всех перечисленных вулканов преобладает водяной пар, который составляет 90—99% (объемных).

В составе кислых газов доминирует углекислый газ, затем газы группы серы; галогидные соединения отмечались в эксгаляциях на всех вулканах, иногда в незначительных концентрациях по отношению к другим компонентам. Не все перечисленные вулканы содержали в своих эманациях метан, аммиак и сероокись углерода. Состав эксгаляций отдельных вулканов одного и того же типа извержения интересно рассмотреть в связи с особенностями их извержений: условиями формирования агломератового потока, его мощностью, составом лав, силой и направленностью взрыва, температурой и др.

В составе эксгаляций вулкана Шевелуча не содержалось метана и сероокиси углерода, которые часто отмечались в газах потока вулкана Безымянного. Оба вулкана в результате эксплозий образовали агломератовые потоки. Маломощный агломератовый поток вулкана Шевелуч распространился не более чем на 3—4 км и в зоне, лишенной растительности. В течение нескольких месяцев он остывал. Агломератовые потоки вулканов Мерапи, Катмаи, как и Безымянного, захватили растительную зону, в агломератовых толщах встречалась обугленная древесина.

В отличие от вулкана Безымянного в составе возгонов вулканов Мерапи и Катмаи содержался нашатырь и наблюдались более высокие концентрации фтора, особенно это характерно для эксгаляций Катмаи. Для вулкана Катмаи свойственны также более высокие начальные температуры газов, выделявшихся из очень кислого состава риолитовых лав, богатых летучими компонентами.

Вулкан Безымянный по типу вулканической постройки и извержений имеет много общего с вулканами Мон-Пеле и Лассен-Пик, однако в составе газов мы находим больше различий, чем сходства. Газовая

составляющая вулканов Мон-Пеле и Лассен-Пик содержала в своем составе, наряду с водяным паром (до 98—99%), только  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и следы  $\text{H}_2\text{S}$ ; такие газы, как  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SO}_2$ , почти отсутствовали. Как известно,  $\text{HCl}$  и  $\text{HF}$  выделяются при высоких температурах. По-видимому, первоначальные температуры изверженного материала Мон-Пеле и Лассен-Пик были не достаточно высокими. Это до некоторой степени подтверждается тем, что при взрывах не было отмечено обугливания органики. Таким образом, по своему газовому составу вулкан Безымянный ближе всего стоит к вулканам Катмаи и Мерапи.

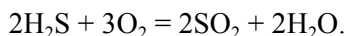
### ОБ ОТДЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТАХ В ЭКСТАЛИЦИЯХ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННОГО

1. Вода представляет один из преобладающих компонентов газовой фазы вулкана Безымянного. В основном она является атмосферной, в меньшем количестве—термометаморфической и собственно магматической. Исходя из того, что в фумарольных газах вода, кислород и азот атмосферного происхождения, мы пересчитали вулканические газы на 100% (без паров воды и воздуха).

2. Из анализов видно, что в газах вулкана Безымянного среди кислых компонентов преобладал углекислый газ, как в фумаролах основного (главного) агломератового потока, так и в первичных фумаролах нового экструзивного купола. Обычно углекислый газ преобладает в газах андезитовых вулканов, находящихся в стадии угасающего вулканизма. По-видимому, для данного этапа деятельности вулкана Безымянного углекислый газ наиболее характерен.

3. Метан в газах агломератового потока содержался от 0,2 до 7,8%. Учитывая условия формирования фумарол потока, мы допускаем, что метан генетически связан с термометаморфическими процессами.

4. Соединения серы весьма характерны для газов вулкана Безымянного. Сера обнаружена почти во всех известных газообразных формах ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{COS}$ ) при температурах фумарол около  $100^\circ$ . В газовой фазе некоторых проб одновременно содержался  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{COS}$ . При температурах  $220\text{--}450^\circ$  в газах фумарол купола сера содержалась только в виде  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ , а в конденсатах газа — в виде  $\text{H}_2\text{SO}_3$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Сероводорода в этих фумаролах практически не было. В условиях высоких температур и высокого парциального давления кислорода происходило интенсивное окисление сероводорода по реакции



5. Хлор в газах вулкана Безымянного в виде хлористого водорода был определен только в пепловых тучах и в высокотемпературных газах купола. В конденсатах газа с рН 0,5—1,1 хлора содержалось от 1,95 до 3,78 г/л. Окись углерода и водорода в газах вулкана Безымянного содержалась в количествах от 0,10 до 0,7%.

6. В конденсатах газа и вытяжках пеплов в небольших концентрациях (1,5—6 мг/л) были определены фтор, бром, йод и бор.

Рассматривая состав конденсатов газа (табл. 2, 3, 6), мы видим, что из андезитовых лав хлор, сера и пары воды выносили все породообразующие компоненты и многие микроэлементы.

Наиболее интенсивный вынос труднолетучих происходил при высоких температурах ( $220\text{--}450^\circ$ ) и более низких рН.

7. Железо и алюминий выносились в количестве до 40% от общей суммы металлов при высоких температурах и при значении рН 1—3. С повышением рН до 4—5 в конденсатах газа эти компоненты практически исчезли.

8. Натрий и калий интенсивнее выносились при высоких температурах, когда отношение Na/K было выше (4—6), чем в исходной андезитовой лаве (3). С понижением температуры и повышением рН (4—6) вынос калия и натрия продолжался, но менее интенсивно. Кальций

Таблица 15

*Спектральный анализ продуктов извержения вулкана Безымянного, %*

Элемент	Андезит	Дациг	Возгоны			Конденсат газа	
			кратеры	купола	агломератовый поток	кратеры	потоки
			194°	304°	96°	195°	95°
Be	—	—	0,0001	0,0002	—	—	—
Pb	—	—	0,001	0,1	—	0,003	—
Ga	0,002	0,002	0,003	—	0,001	0,005	—
Mo	—	—	—	0,0002	0,0001	0,001	0,0001
V	0,0003	0,0003	0,01	0,002	0,0001	0,01+	—
Cu	0,0003	0,0003	0,003	0,002	0,001	0,001	0,0003
Co	0,002	—	0,001	0,002	—	0,0002	—
Ni	0,005	—	0,01+	0,01+	0,0001	0,001	—
Zr	—	0,02	0,02	—	—	0,001	—
Cr	0,1	—	0,05	0,06	—	0,05	—
Sr	0,1	0,1	0,05	0,08	—	0,05	—
Ba	0,008	0,2	0,006	0,05	0,001	0,08	0,001

выносился из андезитовой лавы также интенсивно, в соединениях с хлором и серой, а магний в целом мигрировал значительно слабее. При остывании магмы и лавы из газовой среды первым исчезает хлор, позднее выносились соединения серы и углекислого газа. Последняя стадия характеризуется выделениями углекислого газа и паров воды. В переносе труднолетучих постепенно повышается роль водяного пара и углекислоты.

9. Как видно из анализов конденсатов с низким рН, хлор и сера при высоких температурах выносились в основном с водородом, кислоты составляли 85% от общей минерализации конденсата.

Вынос летучих из андезитовых лав хлором происходит вообще непродолжительно, в то время как при участии серы и водяного пара этот процесс занимает более длительный период.

Рассматривая данные спектрального анализа (табл. 6) сухого остатка конденсата и возгонов вулкана Безымянного, выделявшихся при различных температурах, можно отметить, что наиболее характерными микроэлементами эксгаляций андезита были ванадий, стронций и барий.

Медь содержалась во всех анализируемых конденсатах и возгонах, по более высокие ее концентрации отмечаются в высокотемпературных эксгаляциях.

Свинец определен только в эксгаляциях кратера и купола вулкана Безымянного, причем, как было отмечено и раньше (Башарина, 1960), в эксгаляциях вулкана Шевелуч свинец тоже встречался чаще там, где преобладали сульфаты. Возможно, свинец более интенсивно переносится с соединениями серы.

Многолетние систематические исследования вулканических газов на всех стадиях активности вулканов и остывания лавы показали, что в начальную высокотемпературную стадию (500 — 800°) независимо от состава лавы (базальты или андезиты) выделялась многокомплектная

газовая фаза. В тех или других соотношениях в ней содержались такие летучие, как  $H_2O$ ,  $HCl$ ,  $HF$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $H_2S$ ,  $COS$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$ , и менее распространенные соединения йода, брома, бора, мышьяка, а также труднолетучие породообразующие, рудные и многие микроэлементы.

Однако отделение летучих из андезитовой лавы по сравнению с базальтовой занимает более длительный период, продолжается столетиями, характеризуется при этом выделением паров воды, сернистого и углекислого газов. Базальтовая лава, наоборот, прекращает отделение летучих уже с понижением температуры примерно до  $100^\circ$ . Это согласуется с данными Н. И. Хитарова (1960), который экспериментально установил, что базальт стремится сбросить преобладающую часть воды еще на глубоких горизонтах, а на дневную поверхность основная магма поступает обедненная водой (летучими). Кислые расплавы, наоборот, большую часть растворенной воды сбрасывают в верхних горизонтах (стр. 40).

Изученный газовый режим вулканов с андезитовыми куполами, таких, как вулканы Безымянный и Шевелуч, показал, что кислые лавы (андезиты, дациты), доставляемые извержениями на поверхность Земли, более богаты летучими. В процессе продолжительного остывания лавы дистилляция летучих также происходит здесь более длительное время, чем в лавах базальтовых вулканов. По-видимому, этим и вызвано длительное сольфатарно-мофетное состояние вулканов Безымянного и Шевелуча.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Башарина Л. А. Водные вытяжки пепла и газы пепловой тучи вулкана Безымянного. Бюлл. вулканол. станции, 1958, № 27.
- Башарина Л. А. Фумарольная деятельность вулкана Безымянного в 1956—1957 гг. Бюлл. Вулканол. станции, 1961, № 29.
- Башарина Л. А. Вулканические газы на различных стадиях активности вулканов. Труды Лабор. вулканологии, вып. 19, 1961.
- Башарина Л. А. Фумаролы вулкана Шевелуч в сентябре — декабре 1953 г. Бюлл. Вулканол. станции, 1956/ № 24.
- Борисов О. Г., Никитина И. Б. Состояние фумарол вулканов Шевелуч и Безымянного в 1960 г. Бюлл. вулканол. станции, 1962, № 33.
- Борисов О. Г. Вторичные фумаролы агломератового потока вулкана Безымянного и основной источник их питания к концу 1958 г. Бюлл. вулканол. станции, № 29.
- Богоявленская Г. Е. Вулкан Безымянный на Камчатке и его агломератовый поток. Труды Лабор. вулканологии, вып. 18, 1960.
- Беммелен Р. В. Геология Индонезии. ИЛ, 1957.
- Горшков Г. С. Извержение сопки Безымянной. Бюлл. вулканол. станции, 1957, № 26.
- Мархинин Е. К., Башарина Л. А., Борисов О. Г. и др. Изучение состояния вулканов Ключевой группы и вулкана Шевелуч з 1958—1959 гг.
- Набоко С. И. Вулканические эксгалляции и продукты их реакции. Труды Лабор. вулканологии, вып. 16, 1959.
- Хитаров Н. И. Труды Лабор. вулканологии, вып. 19, 1961.
- Allen E. T. a. Zies E. G. A chemical study of fumaroles of the Katmai region. Nat. geogr. Congr. Techn. papers, 1, No 2, 1923.
- Allen E. T. Chemical aspects of volcanism with a collection of the analyses of volcanic gases. Journ. Franclin 193, 1922.