

Л. А. Башарина

**ЭКСГАЛЯЦИИ ПОБОЧНЫХ КРАТЕРОВ
КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА
НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ОСТЫВАНИЯ ЛАВЫ**

Ключевской вулкан, один из самых активных вулканов п-ова Камчатки, изучен детально и систематически.

Б. И. Пийп (1956) считает, что эруптивная деятельность главного кратера Ключевского вулкана, складывающаяся из пароксизмальных и чередующихся с ними более частых и слабых межпароксизмальных извержений, близко напоминает деятельность Везувия. Однако по обилию побочных кратеров на его склонах он сходен с вулканом Этна. Эксгаляции Ключевского вулкана до некоторой степени имеют сходство с эксгаляциями Этны.

Среди старых побочных кратеров, возникших в недалеком прошлом на склонах Ключевского вулкана, находятся 15 кратеров, образовавшихся за последние 30 лет. Один из них в настоящее время уже почти окончательно остыл (температура 50—60°), а другие проявляют слабую или усиленную фумарольную деятельность.

Эксгаляции Ключевского вулкана изучались в различных условиях вулканической деятельности: в свежих лавах, потоках и их шлаковых конусах, в эксплозивных кратерах, газы которых выделялись из остывающей на глубине магмы и, проникая через толщу старых лав, претерпевали наибольшие изменения.

Фумарольные газы относятся к более поздним стадиям вулканического цикла, и изучение их представляет большой интерес для познания минеральных образований и рудных процессов, где участвуют главным образом не ювенильные газы, а продукты из реакций. Автору в течение нескольких лет работы на Камчатской вулканологической станции АН СССР удалось видеть извержения побочных кратеров и проследить весь ход остывания лавовых масс с отделением летучих из них, начиная от раскаленного состояния лавы до полного остывания ее.

В настоящей статье приводятся результаты изучения большого фактического материала по эксгаляциям побочных кратеров Ключевского вулкана за время наблюдений автора с 1946 по 1949 г.

и с 1953 по 1959 г. Всего собрано 672 образца газов и конденсатов. Компоненты газовой фазы, реагирующие между собой и подверженные окислению, разделялись непосредственно у выхода газа. Химический анализ газов производился в стационарной лаборатории Вулканологической станции АН СССР, а в летний период отдельные компоненты анализировались в полевых лабораториях по методикам, описанным ранее (Башарина, 1949; 1956). Цель настоящей работы заключается в том, чтобы на основании полученных данных дать характеристику газового и температурного режима побочных кратеров, показать соответствие во времени их режима и активности вершинного кратера Ключевского вулкана, а также оценить степень переноса труднолетучих компонентов газами, в том числе водяным паром.

Ниже описывается фумарольная деятельность различных кратеров и характер эксгаляций (от более активных кратеров к менее активным). Приводятся таблицы и графики газового состава и температурного режима.

Эксгаляция побочных кратеров

Кратер Былинкиной. После шестилетнего покоя 19 ноября 1951 г. началось извержение из вершинного кратера Ключевского вулкана, которое сопровождалось пеплопадом. 20 ноября, на восточном склоне Ключевского вулкана на высоте 950 м прорвался побочный кратер, названный в память научной сотрудницы Вулканологической станции АН СССР А. А. Былинкиной кратером Былинкиной. В первые два дня извержение проходило очень бурно. Из кратера выбрасывались на высоту 400 м фонтаны раскаленных бомб и пепла. В результате извержения, продолжавшегося 10 дней, образовался шлаковый конус и излился небольшой поток глыбовой лавы длиной около 1 км. В январе 1952 г. на поверхности лавового потока фумарол было мало. На конусе в местах мощного навала шлаков фумаролы были более сильные. В мае фумарольная деятельность усилилась. На лавовом потоке появились мощные газовые струи, вокруг них образовались корки чистого белого нашатыря. Увеличилось количество фумарол и на гребне кратера. Температура лавы доходила до 800°. Вблизи этих фумарол возгонялись фториды. На гребне конуса фумаролы выделяли газ с резким удушливым запахом. Температура газа колебалась в пределах 210—245° (Пийп, 1954). Химический анализ конденсатов газа первых дестиллятов показал, что в газовой фазе содержались весьма разнообразные компоненты, которые определены были в растворах как ионы (Cl^- , F^- , Br^- , J^- , SO_4^{2-} , NH_4^+), а также все породообразующие элементы и многие микроэлементы. В конденсатах газа после пяти месяцев (май 1952 г.) фумарольной деятельности значительно увеличилась минерализация конденсата: с 7,8 до 12,2 г/л (табл. 1). При этом конденсаты приобрели

Состав конденсатов фумарольных газов вершины конуса кратера Былинкиной
(извержение (1951 г.))

Таблица 1

	13.I 1952 г.		11.V 1952 г.		19.IX 1953 г.		19.IX 1953 г.		23.III 1954 г.		23.V 1954 г.		2.VIII 1954 г.		17.IX 1954 г.		20.III 1955 г.		8.V 1955 г.		19.IX 1955 г.		12.IX 1956 г.		13.V 1957 г.		26.V 1959 г.			
	360°		323°		300°		285°		285°		200°		230°		260°		280°		235°		312°		285°		260°		316°			
	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %		
Катионы																														
H ⁺	0,0960	53,70	0,2404	77,10	0,1630	69,90	0,0759	72,14	0,0258	64,98	0,0104	53,33	0,0414	76,80	0,0873	88,09	0,0619	88,50	0,0135	74,50	0,1149	89,75	0,2080	74,47	0,1943	76,10	0,1490	81,46		
NH ₄ ⁺	0,0350	1,09	0,0285	0,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Na ⁺	0,3792	9,12	0,3698	5,15	0,3800	7,05	0,1640	6,76	0,0945	10,25	0,0650	14,49	0,0860	6,80	0,0695	3,04	0,0360	2,46	0,0280	6,62	0,0860	2,93	0,3200	5,00	0,2864	4,80	0,1260	3,90		
K ⁺	0,0450	0,61	0,0600	0,49	0,0540	0,59	0,0420	1,02	0,0240	1,53	0,0180	2,46	0,0210	1,02	0,0150	0,38	0,0120	0,54	0,0090	1,32	0,0230	0,46	0,0960	0,88	0,0820	0,80	0,0450	0,82		
Mg ²⁺	0,0580	2,68	0,0150	0,39	0,0560	2,00	0,0120	0,95	0,0150	3,15	0,0160	6,84	0,0260	4,03	0,0180	1,51	0,0120	1,50	0,0080	3,65	0,0210	1,40	0,0340	1,00	0,0420	1,38	0,0260	1,54		
Ca ²⁺	0,1430	4,02	0,0680	1,09	0,1605	3,44	0,0770	3,66	0,0750	9,39	0,0610	15,58	0,0840	7,82	0,0950	4,78	0,0728	5,22	0,0440	12,02	0,0980	3,90	0,2485	4,50	0,3050	5,92	0,1050	3,70		
Fe ²⁺	0,2240	4,40	0,0715	0,86	0,0720	1,72	0,0510	8,70	0,0210	1,78	0,0120	2,15	0,0060	0,67	0,0100	0,35	0,0090	0,45	0,0040	0,77	0,0140	0,35	0,0700	1,38	0,1064	1,48	0,0180	0,72		
Fe ³⁺	0,0461	1,43	0,0740	1,33	0,0960	1,53	—	—	—	—	—	—	0,0100	0,66	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0390	0,56	—	—	0,0380	1,11		
Al ³⁺	0,3608	22,85	0,3650	13,03	0,2876	13,70	0,1200	12,73	0,0320	8,92	0,0290	5,15	0,0110	2,25	0,0163	1,85	0,0080	1,32	0,0020	1,12	0,0120	1,20	0,3074	12,20	0,2210	9,50	0,0860	6,75		
Mn ²⁺	0,0056	0,07	0,0025	0,06	0,0050	0,07	0,0015	0,04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,6020	0,01	0,0015	0,01	0,0015	0,02	—	—		
Сумма	1,3927	100,00	1,2947	100,00	1,2741	100,00	0,5434	100,00	0,2873	100,00	0,2114	100,00	0,2854	100,00	0,3111	100,00	0,2117	100,00	0,1085	100,00	0,3709	100,00	1,3370	100,00	1,2386	100,00	0,5930	100,00		
Анионы																														
F ⁻	1,0500	30,80	2,1911	36,04	0,8206	18,20	0,4100	21,32	0,3373	22,70	0,0850	22,99	0,2480	24,23	0,2895	15,39	0,1060	7,97	0,0760	2,15	0,0244	1,00	0,0560	1,05	0,0640	1,32	0,0240	0,89		
Cl ⁻	4,2030	66,25	6,9845	63,90	6,5310	80,05	2,7600	74,69	0,9500	67,09	0,4500	65,04	1,3500	72,39	2,9300	83,82	2,2268	89,67	0,5020	79,50	4,4500	98,23	9,5800	96,70	8,7500	96,30	4,2600	85,00		
Br ⁻	0,0120	0,03	0,0156	0,06	0,0050	0,08	0,0038	0,03	0,0008	0,02	0,0004	—	0,0020	0,03	0,0066	0,03	0,0022	0,01	0,0005	—	0,0035	0,03	0,0056	0,02	0,0032	0,02	0,0009	—		
I ⁻	0,0002	—	0,0010	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0006	—	0,0012	—	0,0005	—	0,0002	—	—	—	0,0008	—	0,0012	—	—	—		
SO ₄ ²⁻	0,2500	2,92	—	—	0,1800	1,67	0,2000	3,96	0,1945	10,19	0,1120	11,97	0,0870	3,35	0,0645	1,36	0,0780	2,35	0,1620	18,35	0,0460	0,74	0,3000	2,23	0,2920	2,36	0,9600	14,11		
Сумма	5,5152	100,00	9,1822	100,00	7,5366	100,00	3,3738	100,00	1,4826	100,00	0,6474	100,00	1,6876	100,00	3,2918	100,00	2,4127	100,00	0,6816	100,00	4,5239	100,00	9,9424	100,00	9,1134	100,00	5,2449	100,00		
H ₂ SiO ₃	0,9200		1,6950		0,7700		0,5026		0,4610		0,4100		0,5140		0,541		0,325		0,1650		0,1240		0,3110		0,1500		0,2320			
Общая минерализация	7,8279		12,1719		9,5817		4,4198		2,2309		1,2688		2,4870		4,1439		2,9494		0,9551		5,0888		11,5904		10,5020		6,0699			
pH	1,01		0,62		0,78		1,12		1,60		1,98		1,33		1,03		1,2		1,87		0,95		0,68		0,81		0,95			

более кислую реакцию, значение рН понизилось с 1 до 0,62. В газовой составляющей наряду с хлором и фтором было определено значительное количество брома (до 30 мг в 1 л), йода (до 12 мг в 1 л), а также соединения серы. Для эксгаляций из потока характерным и преобладающим был нашатырь (в возгонах и конденсатах). В конденсатах аммония содержалось до 2,8 $\frac{г}{л}$, что составляло 80% от общей суммы катионов (табл. 2)

Ко времени наших наблюдений в сентябре 1953 г. кратер Былинкиной проявлял усиленную фумарольную деятельность. Характерным для фумарол было обильное отложение возгонов. При этом около фумарол, приуроченных к вершинам кратера, осаждались почти исключительно фторсодержащие минералы, а на лавовом потоке преобладающим и характерным был нашатырь различных оттенков: от светло-желтого до оранжевого и чисто белого цветов. Наиболее активные фумаролы были сосредоточены на вершине конуса на высоте приблизительно 950 м в юго-восточной его части, где они локализовались вдоль трещины. Около фумарол отлагались фтористые возгоны светло-желтого цвета, плохо растворимые в воде. Судя по количественному анализу, они были смесью фторидов с незначительным содержанием хлоридов и других галоидов (см. далее табл. 28). На вершине конуса систематически исследовались три фумаролы.

В сентябре 1953 г. температура газа колебалась в пределах 200—300°. В газовой составляющей с температурой 300° содержалось 0,6% кислотных компонентов, 0,65% составляли СО и Н₂, остальную часть — кислород и азот воздуха (табл. 3). В составе конденсата газа были определены все галоиды; однако хлор представлял основную часть минерализации (более 70%). В составе катионов были определены все породообразующие элементы, причем алюминий и щелочные металлы преобладали. Конденсаты имели кислую реакцию со значениями рН 0,78—1,1. На поверхности лавового потока в сентябре 1953 г. температура наиболее активных фумарол была 190—240°, и они располагались в истоках потока к северу от кратера. В центральной части потока сохранились фумаролы с температурой 60—80°, а в краевых частях его фумарольная деятельность прекратилась. Фумарольные поля на потоке были обильно покрыты возгонами нашатыря от светло-желтого до оранжевого цвета, а на отдельных участках — белоснежного. В отложениях нашатыря были определены хлориды Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Al³⁺ и в незначительном количестве сульфаты. Совместно с нашатырем встречены фториды: они покрывали лаву как бы первым слоем, а на них отлагался нашатырь. Интересным оказался образец темно-оранжевого нашатыря, обладающего запахом элементарных брома и йода. В таком образце определено 0,158% брома и 0,003% йода (см. ниже табл. 28). В сентябре 1953 г. из фумарол потока, имеющих температуру 220°, интенсивно выделялись плотные белые пары. В составе газовой фазы определены HCl, CO₂, H₂ и NH₃,

Состав конденсатов газов лавового потока кратера Былинкиной (извержение 1951 г.)

Таблица 2

	14. I 1952		11. V 1952		19. IX 1953		2. VIII 1954		17. IX 1954		9. V 1955		19. IX 1955	
	320°		250°		220°		220°		220°		190°		160°	
	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %
Катионы														
H ⁺	0,0063	3,42	—	0,01	0,0136	7,00	0,0185	18,52	0,0220	40,15	0,0276	38,75	0,1666	55,00
NH ₄ ⁺	1,8300	64,70	2,4842	70,50	2,7973	80,45	0,8200	67,20	0,4200	42,80	0,6300	49,25	1,8990	35,00
Na ⁺	0,4587	12,30	0,5930	13,00	0,1850	4,16	0,0450	2,88	0,0560	4,56	0,0620	3,68	0,1580	2,20
K ⁺	0,0550	0,93	0,1150	1,50	0,0600	0,80	0,0160	0,59	0,0190	0,88	0,0260	0,84	0,0892	0,80
Mg ²⁺	0,0540	2,80	0,0436	1,84	0,0240	1,07	0,0140	1,72	0,0122	1,85	0,0140	1,64	0,0729	2,20
Ca ²⁺	0,1075	3,30	0,0940	2,40	0,1620	4,20	0,0752	5,55	0,0640	5,96	0,0605	4,25	0,1820	3,10
Fe ³⁺	0,0500	1,10	0,0503	1,36	0,0200	0,36	0,0095	0,48	0,0082	0,53	0,0092	0,45	0,0270	0,38
Al ³⁺	0,1710	11,70	0,1694	9,64	0,0340	1,94	0,0186	3,06	0,0160	3,27	0,0075	1,14	0,0355	1,32
Mn ²⁺	0,0020	0,05	0,0028	0,05	0,0015	0,02	—	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	2,7345	100,00	3,5523	100,00	3,2974	100,00	1,0108	100,00	0,6174	100,00	0,8365	100,00	2,6212	100,00
Анионы														
F ⁻	0,3890	32,10	0,1600	8,42	0,0440	1,20	0,0208	1,70	0,0065	0,62	0,0025	0,18	0,0065	0,11
Cl ⁻	4,5976	83,40	5,7015	160,60	6,6650	97,00	2,2000	92,60	1,8500	95,30	2,4820	98,60	10,650	99,63
Br ⁻	0,0107	0,08	0,0160	0,21	0,0310	0,20	0,0045	0,08	0,0035	0,08	0,0060	—	0,0140	0,05
J ⁻	0,0046	0,01	0,0021	0,04	0,0128	0,05	0,0010	—	0,0015	—	0,0015	—	0,0060	0,01
SO ₄ ²⁻	0,2000	3,30	1,0524	21,93	0,1480	1,55	0,1960	5,62	0,1053	4,00	0,0410	1,82	0,0290	0,20
Сумма	5,2019	100,00	6,9320	191,20	6,9008	100,00	2,4223	100,00	1,9668	100,00	2,5330	100,00	10,7050	100,00
H ₂ SiO ₃	0,6590		0,4680		0,2950		0,2750		0,1940		0,2100		0,2240	
Общая минерализация	8,5954		10,9523		10,4932		3,7081		2,7782		3,5795		13,3336	
pH	2,2		4,55		1,86		1,87		1,65		1,55		0,78	

Состав газа побочного кратера Былинкиной (извержение 1951 г.), объемные %

№ фумароля	Дата	Температура газа, °С	Вулканические газы без учета воздуха						Фумарольные газы					
			HCl	H ₂ F	SO ₂	CO ₂	CO	H ₂	NH ₃	Сумма вулканических газов	O ₂	N ₂	H ₂ O мг/л	N ₂ O ₂
Вершина конуса														
1	19. IX 1953 г.	300	44,00	4,00	0,00	0,00	20,00	32,00	0,00	1,25	19,85	78,90	145	4,00
1	28. III 1954 г.	285	36,10	2,40	7,20	0,00	24,20	30,10	0,00	0,83	19,80	79,37	185	4,00
1	23. V 1954 г.	200	31,70	0,00	12,80	0,00	31,70	23,80	0,00	0,63	20,00	79,37	256	3,90
1	2. VIII 1954 г.	210	27,30	0,00	9,10	0,00	27,30	36,30	0,00	0,55	19,55	79,90	120	4,00
1	17. IX 1954 г.	230	28,20	1,40	7,00	14,10	28,20	21,20	0,00	0,71	19,65	79,74	196	4,00
1	20. III 1955 г.	280	16,70	He опр.	0,00	25,00	33,30	25,00	He опр.	0,60	18,85	80,55	He опр.	4,00
1	8. V 1955 г.	235	7,00	0,00	17,50	46,40	17,50	11,60	0,00	0,86	19,45	79,70	190	4,10
1	19. IX 1955 г.	312	14,10	1,40	7,00	14,10	28,20	35,20	0,00	0,71	18,65	80,64	176	4,30
1	20. III 1956 г.	280	18,75	0,00	12,50	25,00	18,75	25,00	0,00	0,80	19,25	79,95	He опр.	4,10
1	12. IX 1956 г.	285	12,40	0,90	6,00	31,10	24,80	24,80	0,00	0,81	18,80	80,40	110	4,20
1	13. V 1957 г.	260	21,00	—	14,00	29,40	21,00	14,00	0,00	0,70	19,25	80,05	65	4,00
1	26. IV 1959 г.	316	7,10	0,00	22,40	35,20	14,20	21,10	0,00	0,71	19,30	79,99	21	4,00
2	19. IX 1953 г.	220	35,20	1,40	0,00	0,00	28,20	35,20	0,00	0,71	19,60	79,70	86	4,00
2	23. V 1954 г.	244	10,70	0,00	17,90	26,80	17,80	26,80	0,00	0,56	19,40	80,04	126	4,10
2	2. VIII 1954 г.	230	16,40	1,60	8,20	0,00	32,80	41,00	0,00	0,61	19,85	79,65	65	4,00
2	17. IX 1954 г.	210	22,20	0,00	4,50	17,80	33,30	22,20	0,00	0,45	20,00	79,65	84	4,00
2	8. V 1955 г.	200	4,00	0,00	36,00	40,00	20,00	0,00	0,00	0,50	19,95	79,55	80	4,00
2	18. IX 1955 г.	260	7,70	0,00	15,40	23,10	23,10	30,70	0,00	0,65	19,80	79,55	110	4,00
2	20. III 1956 г.	220	0,00	0,00	0,00	69,20	30,80	0,00	0,00	0,65	19,75	79,60	He опр.	4,00

Таблица 3 (окончание)

№ фумарола	Дата	Температура газа, °С	Вулканические газы без учета воздуха							Фумарольные газы				
			HCl	H ₂ S	SO ₂	CO ₂	CO	H ₂	NH ₃	Сумма вулканических газов	O ₂	N ₂	H ₂ O мг/л	N ₂ O ₂
2	12. IX 1956 г.	230	4,50	0,00	27,30	34,10	0,00	34,10	0,00	0,44	20,00	79,60	84	4,00
2	13. V 1957 г.	220	12,30	0,00	16,30	40,80	30,60	0,00	0,00	0,49	19,80	79,65	65	4,02
2	26. IV 1959 г.	300	2,60	0,00	15,60	23,50	25,90	32,40	0,00	0,77	18,90	80,45	18	4,20
2	23. III 1954 г.	244	23,00	0,00	0,00	38,50	0,00	0,00	38,50	0,26	18,80	80,94	29	4,30
3	19. IX 1953 г.	260	36,10	2,35	2,40	11,90	35,75	11,50	0,00	0,42	19,20	80,15	115	4,20
3	23. III 1954 г.	180	19,00	0,00	26,60	41,80	12,60	0,00	0,00	0,79	19,50	79,75	120	4,10
3	23. V 1954 г.	198	16,30	2,00	21,90	27,20	16,30	16,30	0,00	0,92	19,20	79,90	154	4,26
3	2. VIII 1954 г.	200	10,00	0,00	30,00	20,00	20,00	20,00	0,00	1,00	19,10	79,90	120	4,20
3	17. IX 1954 г.	200	19,80	1,30	26,30	32,90	19,70	0,00	0,00	0,76	19,35	79,90	150	4,00
3	20. III 1955 г.	180	8,30	0,00	41,70	50,00	0,00	0,00	0,00	0,60	19,50	79,90	110	4,10
3	8. V 1955 г.	205	16,70	0,00	25,00	33,30	25,00	0,00	0,00	0,60	19,40	80,00	160	4,10
3	19. IX 1955 г.	250	17,30	2,30	23,00	28,70	11,50	17,20	0,00	0,87	18,80	80,30	135	4,30
3	12. IX 1956 г.	200	7,10	0,00	28,60	42,90	21,40	0,00	0,00	0,70	19,20	80,10	125	4,26
3	13. V 1957 г.	165	4,80	0,00	35,70	59,50	0,00	0,00	0,00	0,42	19,55	80,03	86	4,10
Лавовый поток														
4	19. IX 1953 г.	220	21,10	0,00	0,00	39,40	0,00	0,00	39,50	0,38	19,25	80,37	46	4,20
4	9. V 1954 г.	195	29,40	0,00	11,80	0,00	0,00	0,00	58,80	0,17	19,85	79,95	35	4,00
4	2. VIII 1954 г.	220	6,20	0,00	12,50	25,00	0,00	31,30	25,00	0,32	19,65	80,05	45	4,10
4	17. IX 1954 г.	220	42,10	0,00	0,00	31,60	0,00	0,00	26,30	0,19	18,55	81,25	40	4,3
4	9. V 1955 г.	190	13,30	0,00	13,30	66,80	0,00	0,00	6,58	0,26	18,10	81,75	32	4,40
4	19. IX 1955 г.	160	26,50	0,00	5,90	58,80	0,00	0,00	8,80	0,34	19,40	80,25	61	4,10
4	12. IX 1956 г.	180	10,00	0,00	0,00	90,00	0,00	0,00	след.	0,28	19,80	80,05	10	4,04
4	13. V 1957 г.	80	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,20	20,00	79,80	5	4,09

и пары воды. Конденсаты газа оказались существенно хлоридными, хлора свыше 90 мг-экв,%; среди катионов преобладали аммоний. Конденсаты имели рН=1,8—4,5.

В марте 1954 г. фумарольная деятельность кратера несколько ослабела. В газовой фазе уменьшилась концентрация С1 и F, появился сернистый газ и увеличилось содержание паров воды. Соответственно минерализация конденсатов газа уменьшилась до 2,02 г/л. Значение рН повысилось до 1,6. Температура газа изменилась мало: с 300° в сентябре 1953 г. до 285° в марте 1954 г. К маю того же года активность фумарол снизилась; максимальная температура была только 200°. В газовой фазе уменьшилось содержание хлористого водорода и исчез фтор, а количество сернистого газа увеличилось. В этот период была отмечена усиленная газовая деятельность вершинного кратера Ключевского вулкана. 28 мая началось новое извержение Ключевского вулкана, которое продолжалось до середины сентября. С 28 мая по 6 июня вершина кратера по ночам освещалась пульсирующим отблеском раскаленной лавы и взрывами светящихся бомб. С 7 июня по 20 июня отмечались частые и более интенсивные пепловые взрывы, и, наконец, с 20 июня по 18 сентября наблюдались более слабые, исключительно пепловые взрывы. Высота выбросов этих взрывов не превышала 500 м, но туча пепла и газов часто простиралась на десятки километров в сторону.

Извержение Ключевского вулкана на характере фумарольной деятельности кратера Былинкиной отразилось незначительно. Температура газа в августе повысилась с 200° до 230°. В составе фумарольных газов кислая часть не изменилась, несколько уменьшилось содержание водяного пара (по сравнению с мартом 1954 г.). По-прежнему фумаролы продолжали отлагать инкрустации фторидов. Фумаролы потока сохранили температуру до 220°, в местах мощного навала шлаков температура достигала 244°. Состав фумарольных газов почти не менялся. В конденсате газа общая минерализация уменьшилась с 10,5 г/л в сентябре 1953 г. до 3,7 г/л в августе 1954 г. Вокруг фумарол продолжалось осаждение нашатыря. К концу извержения Ключевского вулкана (в сентябре) фумарольная деятельность кратера Былинкиной несколько усилилась. Максимальная температура достигала 260°. Увеличилось содержание кислых газов. Наряду с HCl и SO₂ снова появился HF. На лавовом потоке температура оставалась равной 180—220°. В газовой составляющей содержались по-прежнему HCl, NH₃, CO₂.

В продолжение 1955 г. в газовом и температурном режиме фумарол наблюдались колебания; в марте максимальная температура была 280°, а в мае снизилась до 235°. В составе кислой части газа уменьшилось содержание HCl, а SO₂ увеличилось, появился CO₂. Минерализация конденсата по сравнению с мартом сократилась более чем на 30% (до 0,95 г/л). Значение рН увеличилось от 1,2 до 1,87. В сентябре температура газа поднялась до 312°. В кис-

лой части газа количество HCl восстановилось до прежней величины, а содержание CO_2 и SO_2 уменьшилось. В это время в составе фумарольных газов содержалось 0,71% вулканического газа, остальную часть представляли воздух и пары воды. Общая минерализация конденсатов увеличилась более чем в пять раз (до 5 г/л). Основную часть минерализации представлял Cl — до 4,5 г/л; соответственно изменился и pH: от 1,87 до 0,95.

В общем в течение 1955 г. на лавовом потоке температура газа постепенно понижалась: с 220° в сентябре 1954 г. до 190° в мае и 160° в сентябре 1955 г. В газовой составляющей в мае наблюдалось уменьшение содержания HCl и увеличение CO_2 , а в сентябре того же года отмечен обратный процесс: увеличилось содержание HCl и аммиака, а в конденсате газа увеличилась концентрация ионов Cl и NH_3 (хлора — с 2,3 до 10,65 г/л, а аммония — с 0,63 до 1,89 г/л). В отличие от конденсатов конуса конденсаты потока содержали больше брома и йода. В это время были отмечены особенно обильные отложения нашатыря у выходов фумарол. По-видимому, нашатырь выносился с газами и конденсировался вместе с парами воды. Из табл. 2 видно, что конденсаты потока были существенно хлоридно-аммонийными с небольшими примесями других хлоридов и сульфатов.

В дальнейшем фумарольная деятельность кратера Былинкиной все время понижалась. Хотя температурные колебания были незначительными, резко изменился состав газов. Содержание CO_2 увеличилось (с 14% в сентябре 1955 г. до 31% в сентябре 1956 г.), концентрация хлористого и фтористого водорода уменьшилась. Однако резко увеличилась общая минерализация конденсата (до 11,6 г/л, т. е. более чем на 50% по сравнению с 1955 г.), причем содержание хлора увеличилось более чем в два раза, а сульфатов в шесть раз. Следует отметить, что в это время (март 1956 г.) произошел сильный взрыв вулкана Безымянного, который сопровождался мощным пеплопадом. Слой пепла мощностью несколько сантиметров покрыл окрестности вулкана. Фумарольные поля на кратере Былинкиной с обильными отложениями фторидов были покрыты пеплом, на котором появились отложения преимущественно сульфатных возгонов. Вероятно, частичное повышение минерализации конденсатов фумарольных газов и образование сульфатов произошло вследствие экстракции парами пеплов вулкана Безымянного, окклюдивовавших летучие. В сентябре 1956 г. на лавовом потоке фумаролы сохранились только в его истоках, в местах мощных навалов шлаков. Отложение нашатыря заметно сократилось, были отмечены только налеты его прозрачных кристаллов под глыбами лавы. Температура газа была в пределах 140—160°. В составе фумарольного газа содержался практически сухой воздух с незначительной примесью кислых компонентов, среди которых преобладал CO_2 . В 1957 г. температура фумарол вершины конуса была 210—260°. В газовой фазе преобладал CO_2 , увеличилось содержа-

ние сернистого газа по сравнению с предыдущим годом более чем в два раза. Конденсаты имели $pH=0,81$, в составе анионов преобладал Cl^- , среди катионов преобладал H^+ .

В мае 1957 г. фумарольная деятельность потока резко сократилась. Фумаролы сохранились только у его истоков, и то они едва парили. Газовая смесь состояла из воздуха и незначительного количества паров воды с температурой не более $40-60^\circ$. Возгонов уже не осадилось. Спустя год, в мае 1958 г. температурный режим фумарол вершины конуса мало изменился. Максимальная температура была 240° . В составе газов преобладал хлористый водород (Борисов, 1960). В 1958 г. лавовый поток совершенно остыл. В апреле 1958 г. на вершине конуса температура газа была в пределах $220-316^\circ$. Несмотря на то что это была самая высокая температура за весь период наших наблюдений, в кислой части газа значительную роль все же занимали CO_2 и SO_2 . Соответственно в конденсатах газа было повышенное содержание сульфат-иона, из катионов преобладал водород, составляя свыше $81 \text{ мг. экв.}\%$. Заметно сократилось количество труднолетучих компонентов. В конденсатах с $pH=0,95$ железа и алюминия содержалось уже меньше, чем при более высоком pH .

Многолетние наблюдения за фумарольной деятельностью кратера Былинкиной показали, что в первый год после извержения наи-более высокие температуры сохранялись на отдельных участках лавы. Б. И. Пийп отмечает в январе 1952 г. протяженные зияющие трещины, внутри которых ярко светились раскаленные процессом послезеруптивного окисления шлаки с температурой до 780° . Спустя четыре месяца температура светящихся обломков шлака в этих трещинах не снизилась, а, наоборот, повысилась до 835° . В сентябре 1953 г. температура фумарол вершины конуса резко снизилась до 300° . Затем в течение 8 лет она сохраняется в пределах $250-300^\circ$. На потоке температура отдельных участков лав в течение первых четырех лет сохранялась в пределах $190-220^\circ$. Как показали многолетние наблюдения, не все излившиеся лавовые массы при одинаковых условиях сохраняли температуру в течение длительного времени. Некоторые из них остывали уже в течение года (Апохончич, Белянкина, Вернадского, Крыжановского). По-видимому, чем больше лава была обогащена газами и чем большую мощность имел остывающий материал, тем более длительное время сохранялась высокая температура газа.

Химический состав эксгалаций кратера Былинкиной

Исследованные продукты фумарольной деятельности побочного кратера Былинкиной показали, что в составе вулканических эксгалаций содержатся весьма разнообразные компоненты. В форме газовых молекул определены HCl , HF , SO_2 , CO_2 , H_2 , CO , NH_3 ,

H_2O , в фумарольных конденсатах — ионы Cl^- , F^- , Br^- , J^- , SO_4^{2-} , HSO_4^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , недиссоциированные молекулы H_2SiO_3 и многие микроэлементы. В табл. 3 представлен состав газа кратера Былинкиной. Компоненты вулканического газа пересчитаны на 100% после вычета воздуха с избытком азота и водяного пара. Из таблицы видно, что в течение первых трех лет после образования кратера газовая фаза оставалась существенно галоидной: HCl —33,4%, HF —2,6%, SO_2 —7,2% (фумарола № 1). Фтора в газовой фазе всегда меньше, чем других компонентов, или он вовсе не определяется; из-за большой активности фтор энергично соединяется с металлами, поэтому задерживается в продуктах вулканической деятельности в виде плохо растворимых фтористых минералов и меньше рассеивается в атмосфере. В газовой фазе фтор выносит из магмы и лавы в первую очередь кремний и железо (обладающие более низкими температурами кипения). Фтор и кремний летят в виде четырехфтористого кремния (SiF_4). В парах воды SiF_4 подвергается гидролизу до кремнефтористой кислоты (H_2SiF_6), которая активно участвует в разложении пород. В конденсатах с высокими концентрациями фтора (свыше 1 г/л) кремний содержался в виде кремневой кислоты в количестве свыше 1 г/л. На кратере Былинкиной под воздействием газов HCl и HF базальт перерождался. В измененных лавах по сравнению со свежей наблюдается обеднение кремнеземом, железом и обогащение алюминием, фтором и хлором (табл. 4).

Таблица 4

Химический состав измененного и неизмененного базальта кратера Былинкиной

Компоненты	Базальт	
	Неизмененный	Измененный
SiO_2	51,46	7,64
TiO_2	1,04	—
Al_2O_3	17,84	23,06
Fe_2O_3	3,65	1,42
FeO	5,60	—
CaO	10,12	15,64
MgO	5,98	4,86
Na_2O	2,75	1,79
K_2O	1,51	0,72
F	—	23,86
Cl	—	8,24
H_2O	0,31	12,82
Сумма	100,26	100,00

Температура фумарол на вершине конуса в течение 8 лет сохранялась около 200—300° (рис. 1). Однако состав газа к этому времени значительно изменился, содержание HCl уменьшилось в 4—7 раз, HF исчез, т. е. изменение состава газовой фазы было связано с длительностью остывания лав и не зависело от колебаний температуры. На графике видно, что температура фумарол лавового потока сохранялась около четырех лет в пределах 220—

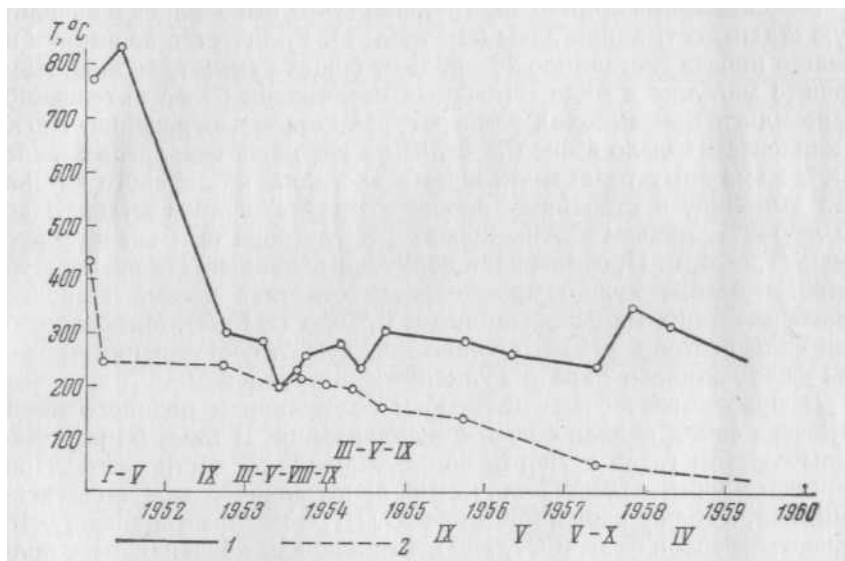


Рис. 1. Изменение температуры газа кратера Былинкиной во времени.

1 — температура вершины кратера, 2 — температура лавового потока

190°; состав же газа резко менялся. Так, в мае 1955 г. в газах содержалось хлористого водорода 13,3%, а в сентябре того же года концентрация его увеличилась вдвое; содержание аммиака увеличилось с 6,5 до 8,8%. Эти изменения составов особенно заметны в конденсатах газов: в мае 1955 г. в конденсатах хлора было 2,4 г/л, аммиака — 0,63 г/л. При одинаковых условиях отбора проб в сентябре того же года концентрация хлора увеличилась до 10,65 г/л, а аммония — до 1,89 г/л. Такое резкое увеличение концентрации ионов в конденсате, несомненно, обусловлено изменением состава фумарольного газа. По-видимому, здесь происходила не свободная дистилляция газа при остывании лавы, а принужденная, или насильственная (Пийп, 1956), в процессе окисления и вторичного разогрева рыхлых масс. Возможно, этот участок фумарольного поля сообщался с глубокими раскаленными трещинами потока. Надо отметить, что в это время у выхода фумарол наблюдалось особенно обильное отложение нашатыря. Весьма вероятно, что с газами выносились и возгоны нашатыря, которые способствовали

повышению минерализации конденсатов в части ионов хлора и аммония. В конденсатах газа наряду с хлором и фтором были определены бром и йод. Бром содержали все исследованные конденсаты газов кратера Былинкиной в количествах от 0,4 до 30 мг/л. Йода содержалось значительно меньше (0,2—12,0 мг/л), и отдельные пробы конденсатов, особенно высокотемпературных газов, совсем его не содержали.

Максимальные количества труднолетучих выносились в начальную стадию остывания лавы (см. табл. 1). Количество алюминия и железа иногда составляло 20—30% от общей суммы катионов. Щелочные металлы в виде галоидных соединений более интенсивно выносились при высоких температурах, причем отношение Na/K в конденсатах было выше (5—8), чем в исходной базальтовой лаве (3). Весьма характерным катионом в эксгаляциях лавового потока был аммоний, в отдельных пробах конденсатов он составлял до 80 мг экв%, причем в этих пробах рН раствора был значительно выше (1,9—4,5). Просматривая полученные данные состава конденсатов в целом, нужно прежде всего отметить весьма широкое колебание в них минерализации (от 0,95 до 12,1 г/л). Минерализация конденсатов и рН несомненно зависела от соотношения в газовой фазе водяного пара и вулканических газов.

В пробах газа с максимальным содержанием водяного пара отмечена самая низкая общая минерализация. В табл. 5 представлены составы газов с учетом конденсированной части газов. При пересчете учитывалось количество пропущенного при конденсации газа, а также нерастворимые (СО, Н₂) и малорастворимые компоненты газовой фазы (СО₂, Н₂С). Эти анализы дают наиболее полное представление о составе вулканических эксгаляций. Здесь представлены в заметных количествах такие компоненты, как НJ, НВг, НF и НН₃, из которых НJ и НВг непосредственно в газовой фазе не удавалось определить. В сухом остатке конденсата газа кратера Былинкиной спектральным анализом был определен ряд микроэлементов (табл. 6 и 7). В базальтах кратера Былинкиной в начальную стадию остывания лавы в конденсатах обнаружены Ве, Тl, Pb, Се, Sn, Bi, Мо, V, Си, Ag, Zn, Со, Ni, Zr, Cr, Ва. Спустя пять месяцев после излияния потока, из перечисленных элементов уже не были обнаружены Ве, Тl, Bi, Мо, Zn, через два года остались только Pb, Sn, Ga, V, Си, Со, Ni, Zr, Sr, Ва. При дальнейшем остывании содержание микроэлементов в эксгаляциях базальта стояло в прямой зависимости от времени, прошедшего с момента излияния лавы. Спустя пять лет после излияния лавы в конденсатах газа было обнаружено только пять элементов: Са, Си, Cr, Sr, Ва, а через семь лет, несмотря на то, что температура в эксгаляциях сохранилась до 316°, — всего три элемента: Са, Си, Sr. Рассматривая данные спектрального анализа возгонов кратера Былинкиной (см. табл. 7), видим, что в возгоне нашатыря спустя четыре месяца после излияния лавы обнаружено было от 8 до 13 микроэлементов.

Состав газа кратера Былинкиной с учетом конденсатов
(без воздуха и паров воды, объемные проценты)

Компо- ненты	Фумаролы вершины конуса					Фумаролы потока			
	19. IX 1953	17. IX 1954	19. IX 1955	12. IX 1956	13. V 1957	26. IV 1959	19. IX 1953	17. IX 1954	19. IX 1955
	300°	260°	312°	285°	260°	316°	244°	220°	160°
HF	4,45	2,15	1,40	1,22	0,0650	0,0050	0,0700	0,0500	0,013
HCl	45,00	31,40	20,50	19,27	24,80	7,55	28,80	43,00	35,50
HBr	0,00150	0,00185	0,0020	0,00180	0,00130	0,00008	0,00190	0,0015	0,0054
HJ	0,00040	0,00045	—	0,00015	0,00016	—	0,00067	0,0005	0,6016
SO ₂	0,53	7,05	6,65	5,85	13,80	23,16	0,47	0,0240	5,48
CO ₂	—	13,20	13,25	28,66	27,10	34,60	37,36	30,13	54,64
NH ₃	—	—	—	—	—	—	39,30	26,80	4,36
CO	19,03	26,40	26,20	22,50	20,54	13,86	—	—	—
H ₂	31,20	19,80	32,00	22,50	13,70	20,83	—	—	—

Данные спектрального анализа сухого остатка конденсата
газа кратера Былинкиной
(Аналитик А. М. Сапожникова)

Элементы	1952 г.	1952 г.	1953 г.	1954 г.	1955 г.	1956 г.	1957 г.	1958 г.
	332°	300°	300°	385°	312°	285°	218°	316°
Be	0,000п	—	—	—	—	—	—	—
Se	0,00п	—	—	—	—	—	—	—
Sc	0,00п ⁺	0,000п	—	0,00п	—	—	—	—
Pb	0,000п ⁺	0,000п	0,000п	—	—	—	—	—
Sn	0,00п	0,00п	0,000п	0,00п	0,000п	—	—	—
Ga	0,00п ⁺	0,000п ⁺	—	0,00п ⁻	—	0,000п	—	0,000п
Bi	0,000п	—	—	—	—	—	—	—
Mo	—	—	—	—	0,000п	—	—	—
V	0,00п	0,000п	0,00п	0,00п	0,000п	—	—	—
Cu	0,0п ⁺	0,0п ⁺	0,0п ⁻	0,00п	0,00п	0,000п	0,000п	0,000п
Ag	0,00п	0,000п	—	—	—	—	—	—
Zn	0,000п	—	—	—	—	—	—	—
Co	0,000п	0,000п	0,000п	—	—	—	—	—
Mn	0,00п	0,000п	0,000п	0,000п	0,000п	—	—	—
Zr	0,0п	0,000п	0,000п	—	0,000п	—	0,000п	—
Cr	0,00п ⁺	0,00п ⁻	—	0,000п	0,000п	0,000п	—	—
Sr	0,0п	0,00п	0,000п	0,0п	0,00п	0,00п	0,000п	0,000п
Ba	0,0п	0,00п	0,00п	0,0п ⁺	0,00п	0,00п	0,000п	—

В отличие от конденсатов того же времени отбора в возгонах не содержалось Se, Ti, Ag, Zn. Спустя три года в возгонах было обнаружено только шесть элементов: V, Si, Co, Ba, Mn, Ti, тогда как в конденсатах этого же времени — девять элементов. В возгонах фторидов по сравнению с нашатырем содержалось 14 микроэлементов: Be, Se, Pb, Ga, Mo, Bi, V, Cu, Zn, Co, Zr, Sr, Ba, Ti, но по сравнению с конденсатами того же времени отбора фториды не содержали Ti, Sn и Ni (см. табл. 7).

Кратер Белянкина. Задолго до образования побочного кратера Белянкина (с ноября 1952 г.) возросла деятельность самого Ключевского вулкана. Из вершинного кратера усиленно выделялись газы. В отдельные дни марта, апреля и мая 1953 г. наблюдались выбросы насыщенных пеплом газов. Начиная с 10 июня из вершинного кратера непрерывно выделялись плотные массы газа на высоту до 1000 м над кратером. Вся активность была сосредоточена в восточной половине кратера (Пийп, 1954). 13 июня 1953 г. на восточном склоне Ключевского вулкана на высоте 1350° прорвался побочный кратер, названный в память акаде-

Данные спектрального анализа возгонов побочных кратеров Ключевского вулкана

(Аналитик А. М. Сапожникова)

Температура	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Нашатырь					Фторизм			
	1952 г.	1953 г.	1954 г.	1955 г.	1956 г.	1953 г.	1953 г.	1952 г.	1952 г.
	332°	244°	220°	190°	160°	680— —500°	300°	250°	350°
Be	0,00п	0,00п	—	—	—	—	—	0,00п	0,000п
Sc	—	—	—	—	—	0,00п ⁻	—	0,00п	—
Pb	0,00п	—	—	—	—	—	—	0,0п ⁺	0,0п
Sn	—	—	—	—	—	—	—	—	0,00п
Ga	0,00п	—	—	—	—	0,00п	0,00п	0,00п	—
Mo	—	—	—	—	—	—	—	0,00п ⁺	0,000п
Bi	0,00п	—	—	—	—	—	—	0,000п	0,000п
V	0,00п	0,000п	0,000п	—	—	0,п	0,000п	0,000п	0,0п ⁺
Cu	0,00п	0,000п	0,00п	0,000п	—	0,00п	0,000п ⁺	0,00п	0,00п
Ag	—	—	—	—	—	—	—	—	0,000п ⁺
Zn	—	—	—	—	—	—	—	0,00п	—
Co	0,000п	—	0,000п	—	—	0,00п	—	0,000п	0,000п
Ni	0,000п	0,000п	—	—	—	0,00п ⁺	—	—	—
Zr	0,000п	—	—	—	—	0,0п	0,00п	0,0п ⁻	0,0п
Sr	0,00п	0,00п	—	0,000п	—	0,0п ⁻	0,00п	0,0п	0,00п
Ba	0,00п	0,000п	0,000п	—	—	0,0п ⁺	0,00п	0,0п ⁺	0,0п
Mn	0,п	0,0п ⁺	0,0п	0,0п	0,00п	0,1	0,0п	0,0п	0,0п ⁺
Ti	0,00п ⁺	0,00п	0,0п	0,00п	0,000п	0,п ⁺	0,п ⁺	0,0п	0,0п

Примечание. 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9 — номер проб из кратера Былинкиной; 6, 7 — из кратера Белянкина.

мика Д. С. Белянкина кратером Белянкина. Извержение этого кратера протекало в течение 12 дней спокойно, почти не сопровождаясь сейсмическими явлениями. В результате извержения образовался шлаковый конус высотой около 70 м. В юго-восточном направлении из кратера излился поток, образовав несколько рукавов длиной до 4 км. Вскоре после излияния лавы были отобраны пробы конденсатов газа, температура которого была 830°. Общая минерализация конденсатов достигала 4,7—6,9 г/л, рН 1,1—2,17. В период наших исследований (сентябрь 1953 г.) кратер Белянкина проявлял усиленную фумарольную деятельность. На гребне конуса и на поверхности лавового потока в местах мощного навала шлаков и глыб лавы были обнаружены глубокие трещины с раскаленной лавой. Температура лавы, измеренная платино-платинородиевой термопарой на глубине около 0,5 м, достигала 680°.

Во время осмотра кратера на вершине конуса был слышен сильный гул; по-видимому, происходило оседание кратера. Из высокотемпературных участков лавы (500—680°) наблюдалась слабая эмиссия газов: ощущался резкий запах HF и HCl. В газовой составляющей без воздуха и H₂O содержалось от 35 до 50% HCl и от 3 до 4% HF. Эти газы были богаты окисью углерода и водородом. Воздух в пробах газа был сильно обеднен кислородом. Отношение N₂/O₂ = 5,8 вместо нормального 3,7 в атмосфере (табл. 8).

Характерным для фумарол кратера Белянкина было незначительное количество возгонов. На черном фоне глыб и шлака наблюдались тонкие налеты зеленовато-желтых фторидов. Более интенсивными оказались фумаролы с температурой 460—520°, около них наблюдалось заметное отложение инкрустаций. Газовая фаза лавовых масс, в отличие от газов вершины конуса, в своем составе содержала незначительное количество аммиака. Причем по сравнению с газами потока кратера Былинкиной концентрация аммиака была меньше в 10 раз. Такая разница была отмечена и в конденсатах газа. Первые дистилляты потока Белянкина содержали катионов аммония не более 0,25 г/л (табл. 9), тогда как конденсаты кратера Былинкиной — до 2,8 г/л. Следует отметить, что и образование нашатыря на потоке Белянкина почти не происходило. Среди фторидов и хлоридов нашатыря было не более 3—5%. По-видимому, слабую фумарольную деятельность и отсутствие заметных отложений возгонов можно объяснить ничтожным содержанием газов в лаве. Подобное отсутствие эксгаляций нашатыря мы наблюдали на лавовых потоках побочных кратеров, излившихся так же, как и кратер Белянкина, выше зоны растительности. Спустя приблизительно год, фумарольная деятельность кратера Белянкина еще более ослабела. В марте 1954 г. лавовый поток почти совсем остыл. Только в центральной части его в нескольких местах из трещин поднимались слабые струйки пара с температурой 30—40°. За год после извержения конус кратера Белянкина сильно изменился. Под напором надвигающегося ледника шлаковый конус осел и расширился, а гребень кратера раскололся на две части. При этом образовались новые трещины, над которыми поднимался горячий воздух, нагретый до 400—420°. Этим же объясняется и появление большого количества паровых струй у подошвы конуса, соприкасающегося со льдом. К этому времени (март—май 1954 г.) на конусе сохранились фумаролы только на гребне кратерной насыпи в зоне бывших раскаленных трещин. Температура фумарол была в пределах 290—360°. Заметных осадений новых возгонов не наблюдалось, только сохранились ранние налеты фторидов. В газовой фазе уменьшилось содержание галоидов, появился сернистый газ: фтористый водород сохранился только в газах с температурой 360°. Концентрация фтористого водорода снизилась в 4—5 раз по сравнению с начальным составом газа. В эксгаляциях конца 1954 г. фтора уже не было, содержание хлора

Дата	Компоненты (без H ₂ O и воздуха)								Фумарольные газы				
	Темпера- тура	HCl	HF	SO ₂	CO ₂	NH ₃	CO	H ₂	Вулкани- ческие газы	O ₂	N ₂ и др.	H ₂ O мл/л	N ₂ :O ₂
Вершина конуса													
17. IX 1953	680	35,00	3,00	—	—	—	25,80	36,20	3,30	14,20	82,50	86	5,8
То же	650	50,00	4,00	—	—	—	20,00	26,00	2,50	14,50	82,50	50	5,8
»	480	45,03	3,70	—	8,55	—	26,65	16,05	1,88	16,20	81,92	69	5,0
22. III 1954	360	31,45	1,20	—	11,25	—	31,10	25,00	0,86	17,60	81,54	45	4,6
То же	320	24,85	—	1,15	18,00	—	31,00	25,00	0,81	17,95	81,25	69	4,5
26. V 1954	295	11,30	—	5,70	25,00	—	29,00	29,00	0,52	18,80	80,73	He опр.	4,3
1. VIII 1954	240	7,60	—	7,50	30,00	—	25,50	29,40	0,33	19,95	79,72	90	4,0
16. IX 1954	285	5,45	—	13,00	68,55	—	13,00	—	0,38	19,00	80,60	65	4,2
18. III 1955	210	4,15	—	9,50	78,20	—	8,15	—	0,37	18,90	80,73	85	4,2
8. V 1955	305	9,55	—	14,35	71,50	—	4,60	—	0,42	18,00	81,58	93	4,5
18. IX 1955	220	5,00	—	10,00	85,00	—	—	—	0,40	18,20	81,40	61	4,5
13. IX 1956	285	1,00	—	1,50	97,50	—	4,70	—	0,21	18,50	81,30	46	4,3
14. V 1957	155	—	—	—	0,05	—	—	—	0,50	20,05	79,95	26	3,95
Лавовый поток													
17. IX 1953	650	40,50	2,00	6,90	3,75	2,25	18,50	25,60	1,35	15,05	83,60	42	5,5
17. IX 1953	500	48,00	0,65	5,26	6,51	3,28	19,70	16,60	1,52	16,05	82,60	36	5,1
17. IX 1953	350	22,00	—	7,35	12,20	4,85	31,60	22,00	2,05	18,40	79,75	44	4,3
22. III 1954	50	—	—	—	0,35	—	—	—	0,35	19,95	79,70	180	4,0
1. VIII 1954	50	—	—	—	0,25	—	—	—	0,25	20,00	79,75	46	3,9
8. IX 1954	45	—	—	—	0,10	—	—	—	0,1	20,00	79,65	49	3,9
18. IX 1955	20—25	—	—	—	0,08	—	—	—	—	20,05	79,85	51	3,9

Примечание. Анализы за 1954—1955 гг. являются средними из 3—4 проб газа.

Состав конденсатов газа лавового потока кратера Белянкина

	25. VII 1953		17. IX 1963		17. IX 1963	
	830°		640°		500°	
	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %
Катионы						
H ⁺	0,0067	7,25	0,1265	62,35	0,1744	71,84
NH ₄ ⁺	0,2582	15,40	0,0360	1,00	0,0750	1,67
Na ⁺	0,3840	17,90	0,4540	9,64	0,3424	6,13
K ⁺	0,0490	1,35	0,0640	0,86	0,1540	1,62
Mg ²⁺	0,0460	4,11	0,0860	3,60	0,0810	2,77
Ca ²⁺	0,2260	12,12	0,2420	5,95	0,2691	5,53
Fe ³⁺	0,1040	3,98	0,0890	1,55	0,0546	0,80
Al ³⁺	0,3174	37,80	0,2838	15,00	0,2120	9,61
Mn ²⁺	0,0025	0,09	0,0030	0,05	0,0020	0,03
Сумма	1,3938	100,00	1,3843	100,00	1,3645	100,00
Анионы						
F ⁻	0,2310	13,04	0,3050	7,88	0,2037	4,40
Cl ⁻	2,8760	86,92	6,6560	92,02	8,1456	95,50
Br ⁻	0,0066	0,03	0,0160	0,10	0,0184	0,09
J ⁻	Не обн.	—	—	—	0,0040	0,03
Сумма	3,1136	100,00	6,9770	100,00	8,3717	100,02
H ₂ SiO ₃	0,2160		0,2490		0,2960	
Общая минерализация	4,7234		8,6103		10,0322	
pH	2,17		0,90		0,76	

продолжало снижаться. К сентябрю 1955 г. температура газа снизилась до 220°, концентрация хлора сократилась в 10 раз, а концентрация CO₂ увеличилась более чем в 10 раз. В сентябре 1956 г. температура газа снова повысилась с 220° до 285°. В составе газа в основном уже содержался углекислый газ, а количество хлористого водорода и сернистого газа было незначительно. С изменением состава газа менялся и состав конденсатов. Значительную роль в образовании ионного состава конденсатов приобретает растворенный углекислый газ. В связи с этим меняется катионный состав конденсатов: в них увеличивается содержание кальция, магния, уменьшается — железа и алюминия (табл. 10). На графике (рис. 2) приводятся данные по изменению температуры и содержа-

ния отдельных компонентов в газах кратера Белянкина с течением времени. Наиболее интенсивная дистилляция летучих происходила на первом этапе остывания базальтов (680—360°), который длился у кратера Белянкина меньше года. В этот период максимальная концентрация вулканических газов в среднем (из десяти анализов) составила около 0,5%. В течение последующих двух лет концентрация их непрерывно снижалась и достигала в среднем (из восьми

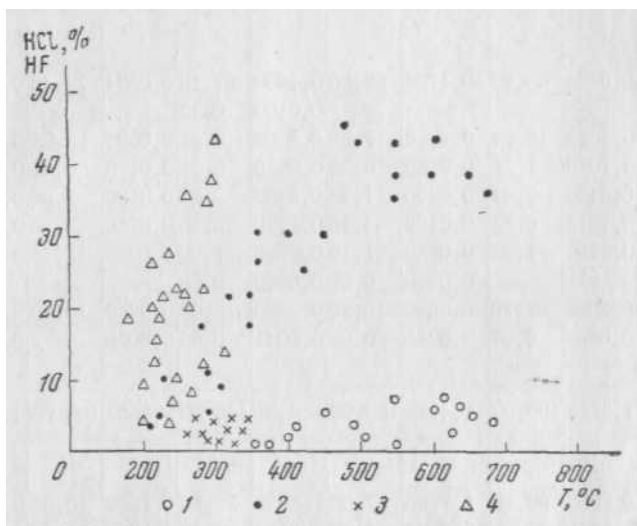


Рис. 2. Зависимость содержания хлора и фтора от температуры.

Кратер Белянкина: 1 — фтор, 2 — хлор Кратер Былинкиной:
3 — фтор; 4 — хлор

анализов) 0,02%. Спектральный анализ сухого остатка конденсатов газов кратера Белянкина показал, что наряду с породообразующими элементами выносились и микроэлементы. Причем в начальную стадию остывания базальта были обнаружены Be, Se, Te, Pb, Ga, Bi, Mo, V, Cu, Ag, Co, Ni, Sr, Cr, Zr, Ba. При дальнейшем остывании лавы (400—500°) из упомянутых элементов не обнаружены Be, Te, Ag, Zr. После двухлетнего остывания лавы (220°) остались только Pb, Ga, Mo, V, Si, Sr и Zn. При температуре 100—102° в сухом остатке конденсата обнаружены лишь 5—6 элементов (Башарина, 1961). В высокотемпературных возгонах фторидов кратера Белянкина по сравнению с конденсатами тех же fumarol не обнаружены Be, Te, Pb, Sn, Ag, Bi, Mo (см. табл. 7).

Кратеры Вернадского и Крыжановского. После длительной умеренной fumarольной деятельности 27 июня 1956 г. из вершины Ключевского вулкана произошел выброс пепла, а в конце июля прорвались два новых побочных кратера. Прорыв произошел на восточном склоне Ключевского вулкана

Состав конденсатов газа вершинного конуса кратера Белянкина

	28. VII 1953		17. IX 1953		18. III 1953		22. III 1954		IX 1955	
	830°		520°		460°		360°		220°	
	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %
Катионы										
H ⁺	0,0734	48,85	0,1724	68,20	0,1630	67,10	0,0584	74,46	0,0073	62,00
NH ₄ ⁺	—	—	—	—	0,0100	0,22	—	—	—	—
Na ⁺	0,5650	16,34	0,4250	7,35	0,4800	8,41	0,0690	3,94	0,0290	10,05
K ⁺	0,1010	1,74	0,0760	0,75	0,0910	0,91	0,0190	0,61	0,0060	0,60
Mo ²⁺	0,0450	2,47	0,0450	1,48	0,0600	2,00	0,0130	1,38	0,0075	5,40
Ca ²⁺	0,1915	6,33	0,2100	4,16	0,1720	3,50	0,0780	4,96	0,0320	13,50
Fe ²⁺	0,0650	1,53	0,0850	1,16	0,0680	1,00	0,0320	1,45	0,0050	1,42
Fe ³⁺	—	—	0,0310	0,65	0,0360	0,80	—	—	—	—
Al ³⁺	0,3096	22,70	0,3650	16,20	0,3850	16,00	0,0940	13,20	0,0075	7,03
Mn ²⁺	0,020	0,04	0,0035	0,05	0,0041	0,06	0,0025	—	0,0010	—
Сумма	1,3525	100,00	1,4129	100,00	1,4691	100,00	0,3659	100,00	0,0953	100,00
Анионы										
F ⁻	0,9850	34,49	1,7760	37,00	1,5650	33,50	0,1580	10,58	0,0220	9,75
Cl ⁻	3,4500	64,65	5,4800	61,10	5,5900	64,40	2,3700	85,04	0,3430	82,00
Br ⁻	0,0053	0,04	0,0106	0,05	0,0080	0,04	0,0025	0,03	0,0005	—
J ⁻	—	—	—	—	0,0015	—	0,0005	—	—	—
SO ₄ ²⁻	0,0600	0,82	0,2250	1,85	0,2460	2,06	0,1640	4,35	0,0470	8,25
Сумма	4,5003	100,00	7,4916	100,00	7,4105	100,00	2,6950	100,00	0,4125	100,00
H ₂ SiO ₃	1,0850	—	1,2140	—	0,9100	—	0,3050	—	0,1240	—
Общая минерализация	6,9378	—	10,1185	—	9,7896	—	3,3659	—	0,6318	—
pH	1,13	—	0,76	—	0,78	—	1,20	—	2,10	—

в районе Юбилейной группы кратеров, образовавшихся в 1945 г. Извержение было очень слабым и продолжалось не более пяти дней. В результате эффузивного извержения на уровне 1200—1450 м излились два небольших лавовых потока; формирования шлаковых конусов не произошло.

Первый кратер, названный кратером Вернадского, образовался вблизи взрывной воронки кратера Обручева, из него излился поток лавы размером 350х350 м. Второй кратер, названный име-

нем Крыжановского, образовался непосредственно на гребне кратера Обручева. Из него излился поток лавы длиной 700 м и шириной 200 м. Оба потока распространились на 1 км (Горшков, 1958). Через месяц (8 сентября) после извержения нами была исследована их фумарольная деятельность. К этому времени поток был изрезан глубокими трещинами, на его поверхности возвышались шлаковые и глыбовые нагромождения. Фумаролы в краевой части потока Вернадского сильно парили, температура их была 280—320°. Эти фумаролы были приурочены к местам, где под лавовый поток подтекали талые воды (рис. 3). Выделяющийся газ состоял на 92% из паров воды, 0,20% CO , 0,35% H_2 , 0,25% углекислого газа, остальную часть газа (7,2%) представлял воздух, обедненный кислородом.

В центральной части потока, в местах навала глыб и шлака, а также из глубоких трещин поднимался разогретый воздух. Температура, измеренная в трещинах, на глубине около 1 м, достигала 500°. Запах газа (галогеноводородов) ощущался только вблизи. Возгонов было мало. Отдельные глыбы лавы и поверхность трещины были покрыты тонким налетом зеленовато-желтого цвета в основном фторидов с небольшими примесями хлоридов. Ниже по потоку кратера Крыжановского были встречены возгоны фторидов с белым налетом сульфатов и хлоридов: Na, K, Ca, Mg, Fe и NH_4 . Интересно, что образование чистого нашатыря на этих потоках не происходило, несмотря на то, что нижний поток захватил часть альпийской зоны. Фумаролы центральной части представляли трещины среди навала глыб и шлака. Температура пробивающегося газа была 360—420°. В табл. 11 представлены результаты анализа газа кратеров Вернадского и Крыжановского. Газ был существенно галоидный; хлористый и фтористый водород составляли 0,2—0,4%; окись углерода и водород — 0,45%; углекислый газ — до 0,25%; остальное был воздух (99,1%). На потоке кратера Крыжановского фумаролы исследовались в двух пунктах на участках, прилегающих к гребню кратера Обручева; мощные струи газа были насыщены парами воды. По-видимому, они питались снеговой

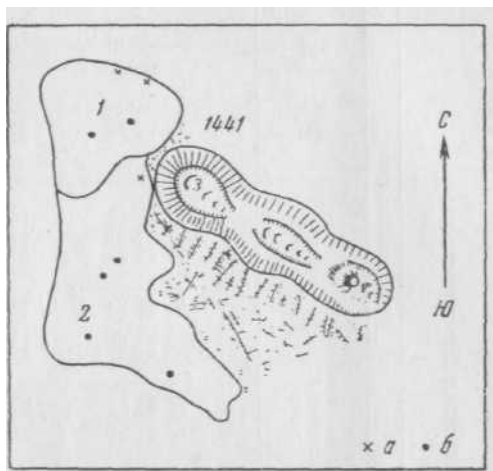


Рис. 3. Схема расположения фумаролов на кратерах Вернадского и Крыжановского.

1 — кратер Вернадского, 2 — кратер Крыжановского, 3 — кратер Обручева; а — паровые фумаролы; б — высокотемпературные фумаролы

Состав фумарольных газов и температура кратеров Вернадского и Крыжановского
(извержение 1956 г.), объемные %

Дата	Температура газа, °С	Газы без воздуха и паров воды							Фумарольные газы				
		HCl	HF	SO ₂	CO ₂	NH ₃	CO	H ₂	Сумма вулканических газов	O ₂	N ₂ и другие редкие газы	H ₂ O, мг/л	N ₂ O ₂
Кратер Вернадского													
8. IX 1956	420	38,90	5,50	—	16,60	—	16,70	22,30	0,90	18,45	80,05	141	4,3
То же	360	25,00	3,90	—	13,40	—	33,30	25,0	0,60	18,65	80,75	210	4,3
	280	—	—	—	42,00	—	26,40	31,60	0,76	19,05	80,20	820	4,2
Фумарола паровая													
8. IX 1956	300	—	—	—	35,40	—	29,50	35,10	0,85	18,85	80,30	1080	4,2
11. V 1957	195	3,70	—	1,96	19,94	—	46,60	27,80	0,54	19,15	80,30	145	4,1
То же	170	—	—	7,40	55,5	—	37,10	—	0,27	19,45	80,25	185	4,1
19. VII 1959	28	—	—	—	0,06	—	—	—	—	20,20	79,74	Не опр.	3,9
Кратер Крыжановского													
8. IX 1956	400	26,00	1,10	2,1	21,50	—	34,00	15,30	0,89	18,00	81,10	210	4,2
То же	380	15,40	—	7,6	38,40	—	38,50	—	0,26	18,40	81,34	195	4,2
»	280	5,20	—	11,00	56,00	—	27,80	—	0,18	18,80	81,02	285	4,2
11. V 1957	120	—	—	—	83,50	—	16,50	—	0,60	19,00	80,40	360	4,1
19. VII 1959	25	—	—	—	0,08	—	—	—	—	20,00	79,92	Не опр.	3,9

**Состав конденсатов фумарольных газов кратеров Вернадского
и Крыжановского**

	8.IX 1956		8.IX 1956		11.V 1957		11.V 1957	
	1		2		3		4	
	420°		360°		120°		195°	
	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %	г/л	мг-экв %
Анионы								
P ⁻	0,4560	19,54	0,2620	14,30	0,0040	3,50	0,0060	5,30
Cl ⁻	3,4506	79,66	2,7650	80,10	0,0840	41,50	0,1775	73,90
Br ⁻	0,0045	0,04	0,0039	0,04	0,0002	—	0,0004	0,73
J ⁻	0,0011	—	0,0007	—	—	—	—	—
SO ₄ ²⁻	0,0450	0,76	0,2610	5,56	0,1480	55,00	0,0660	20,07
HCO ₃ ⁻	—	—	—	—	—	—	0,0420	—
Сумма	3,9572	100,00	3,2926	100,00	0,2362	100,00	0,2919	100,0
Катионы								
H ⁺	0,0794	65,35	0,0631	65,50	—	—	—	—
NH ₄ ⁺	0,0170	0,78	0,0654	3,85	0,0150	15,00	0,0070	6,00
Na ⁺	0,3680	13,17	0,2420	10,90	0,0380	29,50	0,0250	16,30
K ⁺	0,0790	1,67	0,0397	1,05	0,0090	4,10	0,0040	1,55
Mg ²⁺	0,0280	1,92	0,0214	1,85	0,0100	14,80	0,0120	15,50
Cu ²⁺	0,1650	6,79	0,1029	5,35	0,0410	36,60	0,0520	39,55
Fe ²⁺	0,0123	0,35	0,0210	0,78	—	—	0,0020	1,07
Fe ³⁺	0,0176	0,79	0,0341	1,96	—	—	0,0040	3,33
Al ³⁺	0,0995	9,18	0,0742	8,66	—	—	0,0100	16,70
Сумма	0,8658	100,00	0,6638	100,00	0,1130	100,00	0,1160	100,00
H ₂ SiO ₃	0,3560	—	0,1920	—	0,0220	—	0,0190	—
Общая минерализация	5,1790	—	4,1484	—	0,3712	—	0,4269	—
pH	1,10	—	1,20	—	4,8	—	4,20	—
Cl/Br	722	—	709	—	420	—	—	—

Примечание. 1,4 — фумаролы кратера Вернадского; 2,3 — фумаролы кратера Крыжановского.

водой (возле истоков потока трещины были забиты снегом, сохранившимся под пеплом слоем вулкана Безымянного). Температура фумарол не превышала 280° ; в газовой фазе наряду с большим количеством водяного пара (до 90%) вулканические газы составляли 0,54—0,89%; в состав их входил углекислый газ, наряду с большим количеством водяного пара (до 90%) вулканические газы составляли 0,54—0,89%; в состав их входил углекислый газ, сернистый газ, окись углерода и водород. Фумаролы в юго-восточном направлении от кратера Обручева представляли трещины у лавового нагромождения. Они едва заметно парили. В отличие от газов кратера Вернадского здесь содержался сернистый газ и значительно меньше была концентрация галоидных газов. Наиболее отчетливые различия в составе эксгаляций указанных кратеров проявляются в составах конденсатов газа. Из табл. 12 видно, что конденсаты верхнего кратера (Вернадского) содержат фтора больше почти в два раза, а сульфатов меньше в пять раз, чем конденсаты нижнего кратера (Крыжановского). В последнем заметно больше было аммония. Сравнивая состав эксгаляций кратеров извержения 1956 г., можно подметить, что они до некоторой степени отражают состав эксгаляций кратеров извержения 1945 г. Фумаролы верхней линии прорыва кратера Обручева характеризовались существенно фтористыми эманациями, а фумаролы гребня наряду с галоидами содержали сульфаты. Фумаролы дна эксплозивных кратеров отличались резко выраженным сольфатарным характером. Это подтверждает высказанное Г. Е. Богоявленской и другими (Богоявленская, 1956) предположение, что извержение 1956 г. является продолжением и завершением побочного извержения 1945 г.

Менее чем через год (май, 1957) кратеры почти остыли, только из отдельных глубоких трещин поднимался пар с ничтожной примесью вулканических газов (CO_2 , CO , SO_2). В апреле 1959 г. оба кратера целиком были покрыты снегом, а в июле в местах шлаковых нагромождений мы наблюдали только едва заметные выделения пара с $t=55-80^{\circ}$. Таким образом, фумарольная деятельность кратеров прекратилась в течение года. Такое быстрое остывание не наблюдалось ранее на других кратерах.

Кратер Киргурич. На северо-восточном склоне Ключевского вулкана в 1932 г. возникли три побочных кратера: Киргурич, Туйла и Биокось. В настоящее время эти кратеры проявляют слабую фумарольную деятельность. К моменту наших наблюдений (1946—1949 гг.) на кратере Киргурич фумаролы сохранились только на гребне шлакового конуса; из трещин выделялся воздух, нагретый до 155° . В газовой фазе ощущался едва ощутимый запах сернистого газа. По наблюдениям Б. И. Пийпа (Пийп, 1954) в 1950 и 1951 гг. температура фумарол колебалась в пределах $130-200^{\circ}$. В 1952 г. в тех же местах температура достигла 161° , а в мае — только 59° . В газовой смеси ощущался слабый запах

сернистого газа. Присутствие сернистых газов, по-видимому, препятствовало появлению мха, так как на других участках кратерной насыпи уже появилось его довольно много. На протяжении последних семи лет (1953—1959 гг.) на вершине конуса в продольной трещине отмечалось слабое парение газа с температурой 276°. В газовой составляющей содержалось 0,19 кислых компонентов (HCl, SO₂ и CO₂). В 1954 г. температура повысилась до 294°, газ представлял воздух, обедненный кислородом; слабо ощущался сернистый газ. Затем в сентябре 1955 г. температура снизилась до 240°. С 1956 г. она непрерывно понижалась: 208° в 1956 г., 128° в 1957 г., 69° — в 1959 г. В газовой фазе содержался сухой воздух с незначительной примесью углекислого газа, от 0,1 до 0,25% (табл. 13). В конденсатах газа 1954 и 1955 гг. определены все породообразующие компоненты, pH равнялся 3,8. В 1956 г. общая минерализация конденсатов повысилась от 187,5 до 271 мг/л, а pH понизился до 2,7 (табл. 14). В связи с сильным пеплопадом вулкана Безымянного в конденсате газа увеличилось содержание ионов хлора и сульфатов. Такое повышение минерализации

Таблица 13

Состав газа и температура кратера Киргурич, объемные %

Дата	Температура газа, °	Компоненты воздуха					Фумарольные газы				
		HCl	SO ₂	CO ₂	N ₂	CO	Сумма вулканических газов	O ₂	N ₂	H ₂ O, мг/л	Na ₂ O ₂
1934	408	He опр.	He опр.	—	—	—	—	—	—	—	—
1935	365	»	»	—	—	—	—	—	—	—	—
1936	250	2,30	—	—	68,70	29,00	0,78	21,30	77,90	21,2	3,7
1937	250	7,30	—	—	17,70	75,00	0,62	18,95	80,47	26,0	4,4
1939	150	0,10	—	—	—	—	0,10	20,00	79,99	40,0	4,0
1946—1947	100	—	Следы	—	—	—	—	—	—	—	—
1946—1947	200	—	»	—	—	—	—	—	—	—	—
1951	130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1952	161	—	»	—	—	—	—	—	—	—	—
1953	276	Следы	»	0,28	—	—	0,28	19,85	79,87	66,00	3,9
1954	294	—	2,00	98,00	—	—	0,20	19,70	80,10	81,00	4,1
10.V 1955	261	—	Следы	0,20	—	—	0,15	19,60	80,15	29,00	4,1
21.V 1955	260	—	3,00	97,00	—	—	0,26	19,75	80,00	61,00	4,1
24.IX 1955	240	—	—	0,25	—	—	0,25	19,80	79,95	84,00	3,9
13.IX 1956	208	Следы	Следы	0,25	—	—	0,25	19,90	79,85	68,00	4,0
17.IV 1957	128	—	—	0,15	—	—	0,15	19,85	80,00	41,00	4,0
2.X 1959	69	—	—	0,10	—	—	0,10	19,90	80,00	29,00	4,0

Состав конденсата пара кратера Киргурич

	IX.1954 г.		1956 г.	
	294°		208°	
	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %
Катионы:				
H ⁺	0,16	5,50	1,60	34,00
NH ₄ ⁺	—	—	—	—
Na ⁺ +K ⁺	13,45	20,16	16,45	16,00
Mg ²⁺	6,65	19,50	7,20	12,80
Ca ²⁺	22,40	40,04	24,50	26,80
Fe ³⁺	1,40	4,95	1,60	1,70
Al ³⁺	2,80	9,85	3,40	8,70
Сумма	46,86	100,00	54,75	100,00
Анионы:				
Cl ⁻	46,20	45,00	70,00	42,50
SO ₄ ²⁻	75,84	55,00	126,00	57,50
HCO ₃ ⁻	—	—	—	—
Сумма	122,04	100,00	196,00	100,00
H ₂ SiO ₃	18,60	—	21,00	—
CO ₂ (общ.)	—	—	—	—
Общая минерализация	187,50	—	271,75	—
pH	3,80	—	2,70	—

конденсатов было отмечено на всех остывающих побочных кратерах, которое несомненно связано с эксгалляциями в пеплах вулкана Безымянного.

Кратер Туйла. В сентябре 1946 г. фумаролы были приурочены только к трещине юго-восточного направления на внутренней части конуса. Температура фумарол колебалась в пределах 200—440°. В газах еще содержались NO—0,006%, CO—0,02% и H₂—0,2%. За год (1946/47) температура понизилась с 440 до 187°. В газах увеличилось количество водного пара (табл. 15). В 1949 г. температура газа снова повысилась до 305° (Былинкина, Горшков, 1954). В феврале 1950 г. она снизилась до 252°. Состав газа оставался без изменения; газ состоял из воздуха с незначительной примесью хлористого водорода и окиси углерода. В 1951 г., спустя 19 лет после образования, кратер Туйла продолжал сохра-

Состав газа и температура кратера Туйла, объемные %

Дата	Компоненты без воздуха и паров воды								Фумарольные газы с воздухом			
	Т° газа	HCl	SO ₂	HF	CO ₂	CO	H ₂	NH ₃	Сумма вулканических газов	O ₂	N ₂ и др.	H ₂ O, ме/л
1935	380	14,7	He опр.	He опр.	7,30	55,00	23,00	He опр.	0,550	18,50	80,95	He опр.
1936	340	22,70	»	»	—	41,30	36,00	»	1,910	19,24	78,85	52,70
1936	400	0,30	»	»	—	78,00	21,70	»	1,926	19,10	78,99	48,9
1937	400	4,75	»	»	—	83,50	11,75	»	3,24	19,23	77,53	9,2
1937	420	6,95	»	»	—	56,20	36,85	»	1,44	19,72	78,84	19,2
1938	475	8,60	»	»	—	91,40	—	»	0,97	18,68	80,35	23,0
1946	440	50,00	»	»	—	50,00	—	»	0,10	20,10	79,80	31,0
1947	404	4,30	»	»	—	13,50	82,20	»	0,18	20,20	79,62	51,0
XII 1947	187	Следы	Следы	—	—	0,02	—	»	0,02	20,15	79,83	140,5
1948	270	»	»	—	—	60,00	40,00	»	0,25	19,65	18,10	150,0
1949	305	»	—	—	—	—	—	»	—	Воздух и пары воды		
1950	252	»	—	He опр.	—	Следы	—	»	0,04	Воздух и пары воды		
1951	130	—	Следы	»	—	—	—	»	—	Воздух и пары воды		
1952	161	—	»	»	—	—	—	»	—	Воздух и пары воды		
V 1952	59	—	»	»	—	—	—	»	—	Воздух и пары воды		
1953—1954	43	—	—	»	0,25	—	—	»	0,25	20,05	79,70	26,0
1955—1956	40	—	—	»	0,30	—	—	»	0,30	19,70	80,00	31,0
1957—1959	39	—	—	»	0,18	—	—	»	0,18	19,90	79,95	20,0

13* Примечание. Анализы за 1935—1938 гг. даны по И. З. Иванову, температуры за 1950—1952 гг. — по данным Б. И. Пийпа.

нять фумарольную деятельность; слабо парили фумаролы с температурой 131° и ощущался незначительный запах сернистого газа, воздух был обеднен парами воды. Образования возгонов уже не происходило. В 1952 г. заметное парение было отмечено только вдоль одной из трещин на внешнем гребне. Температура газа была 161° ; газ, состоявший из паров воды, сохранял все еще слабый запах сернистого газа. В мае этого же года температура снизилась до 59° (табл. 15).

С сентября 1953 г. мы снова продолжали наблюдение за фумарольной деятельностью побочных кратеров. Конус кратера Туйлы в настоящее время уже разрушен. Фумаролы кратера сохранились вдоль одной трещины на внешнем гребне кратерной насыпи. Газ состоял из паров воды с небольшой примесью углекислого газа ($0,2-0,25\%$), температура его была 43° . Через год, в октябре 1954 г., она сохранялась в пределах $44-45^{\circ}$. Такое слабое фумарольное состояние кратера продолжается уже восемь лет. В 1959 г. наблюдались едва заметные парения с температурой 39° . В составе газа содержался почти сухой воздух с незначительной примесью углекислого газа. В табл. 16 представлены конденсаты пара. Конденсаты (1953—1954 гг.) имели низкую минерализацию (до 211 мг/л), натрово-кальциево-сульфатно-гидрокарбонатный состав. Кратер Туйла почти прекратил фумарольную деятельность, находился на грани окончательного остывания.

В феврале 1938 г. на восточном склоне Ключевского вулкана возникли эффузивные и взрывные кратеры.

Кратер Билюкай прорвался на высоте 900 м . В результате извержения, продолжавшегося в течение года, образовался шлаковый конус и излился поток лавы длиной 15 км . Кратер состоял из трех жерл: Основного, Лавового и Соседа.

В начальную стадию остывания лавы фумарольные эксталяции кратера Билюкай изучались при температурах $500-800^{\circ}$. Газ состоял из HCl , CO , большого количества водяного пара (до 1 г/л). В настоящее время сохранилось только основное жерло, сложенное сильно измененным базальтом.

В сентябре 1946 г. лавовый поток кратера Билюкай был совершенно остывшим. В кратере сохранились фумаролы в четырех участках. Максимальная температура к этому времени была 170° . В газовой фазе содержались HCl , CO , H_2 , H_2O (табл. 17). Среди возгонов преобладали фториды, состоящие из ральстонита и флюорита. В течение 1947—1948 гг. температура фумарол сохранялась в пределах $150-160^{\circ}$. В газовой фазе сократилось количество HCl и увеличилась концентрация SO_2 и CO_2 . К маю 1949 г. фумаролы были только на внутренних стенках кратера; температура газов снизилась до $80-85^{\circ}$. В газовой фазе продолжалось увеличиваться содержание SO_2 и CO_2 . В мае 1952 г. слабые фумаролы сохранились в краевой части кратера и на склонах конуса. Фумаролы склонов были существенно паровыми, слабосернистыми, с температурой

Состав конденсатов пара кратера Туйла

	4.X 1953		1.X 1954		24.IX 1955		13.X 1956	
	43°		42°		40°		40°	
	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %
Катионы								
Na ⁺ +K ⁺	11,35	25,40	10,40	25,00	88,10	23,50	14,65	29,50
Mg ²⁺	6,20	26,60	5,20	22,50	4,60	21,50	5,40	20,00
Ca ²⁺	19,60	48,00	18,40	52,50	16,60	55,00	22,20	50,00
Fe ³⁺	—	—	—	—	—	—	—	—
Al ³⁺	—	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	37,55	100,00	34,00	100,00	29,30	100,00	42,25	100,00
Анионы								
Cl ^{-j}	28,00	41,53	21,00	33,50	16,40	31,00	24,00	30,00
SO ₄ ²⁻	23,00	35,00	28,00	33,00	22,0	39,50	46,00	42,50
HCO ₃ ⁻	28,80	23,50	36,00	33,50	27,00	52,50	38,50	27,50
Сумма	88,80	100,00	85,00	100,00	65,40	100,00	108,50	100,00
H ₂ SiO ₃	8,6		9,20		7,60		14,50	
CO ₂ общ.	28,4		29,60		22,00		46,00	
Общая минерализация	162,95		157,20		124,30		211,25	
pH	6,0		6,2		6,5		5,4	

не свыше 65°, без отложения возгонов. Температура фумарол кратера была несколько выше 200°. Здесь на глыбах тонким налетом осаждались желтовато-розовые возгоны. Газ со слабым дебитом характеризовался резким запахом SO₂. В мае 1952 г. фумаролы сохранились только на вершине конуса с температурой 50—60° (Пийп, 1954). В сентябре 1953 г. наблюдались слабые выходы пара на двух участках вершин Основного конуса. На гребне с температурой не свыше 50° и у стенки кратера среди навала глыб лавы эти фумаролы также были существенно паровыми с температурой не свыше 69°. В газовой-паровой смеси содержался CO₂ от 0,45 до 0,85%. Остальную часть газа представляли воздух и пары воды. По краям выхода пара наблюдался зеленый мох, как и в других, уже остывших местах. В течение 1954—1955 гг. паровые фумаролы

Состав газа (в объемных %) и температура кратера Билукай

Дата	Компоненты без паров воды и воздуха						Фумарольные газы с воздухом			
	Температура газа, °С	HCl	SO ₂	CO ₂	H ₂	CO	Сумма вулканических газов	O ₂	N ₂ и редкие	H ₂ O, мг/л
938	800	0,50	He опр.	He опр.	—	—	0,50	—	—	1000
938	250	5,51	He опр.	He опр.	—	1,00	6,51	18,34	79,94	He опр.
939	350	80,00	—	—	—	20,00	3,00	17,30	79,69	250
946	170	33,50	25,00	—	—	41,50	0,60	20,00	79,95	110,0
947	150	12,00	48,00	—	—	40,00	0,125	19,85	80,03	240,0
948	154	2,62	7,45	83,00	4,65	2,28	1,14	19,95	78,92	365,0
949	85	Следы	14,00	86,00	—	—	0,35	19,95	79,70	1550,0
950	200	—	Следы	He опр.	—	—	—	Воздух и пары воды		
951	78	—	—	—	—	—	—	Воздух и пары воды		
952	60	—	—	—	—	—	—	Воздух и пары воды		
953	69	—	—	0,85	—	—	0,85	19,15	80,00	450,0
954	70	—	—	0,15	—	—	0,15	19,65	80,20	240,0
955	79	—	—	0,15	—	—	0,15	19,80	80,05	190,0
956	65	—	—	0,15	—	—	0,15	19,85	80,00	105,0
957	60	—	—	0,15	—	—	0,15	20,00	79,85	108,0
958	75	—	—	—	—	—	—	Воздух и пары воды		
959	66	—	—	0,18	—	—	0,18	19,90	79,92	68,0
960	72	—	—	—	—	—	—	Воздух и пары воды		

Примечание. Анализы с 1938 по 1939 г. проводятся по данным И.З. Иванова и С. И. Набоко; температура за 1950—1952 гг. — по данным Б. И. Пийпа, за 1958—1960 гг. — по данным О. Г. Борисова.

сохранили температуру в пределах 70—79°. В сентябре 1956 г. максимальная температура на вершине конуса составляла только 65°. В газовой фазе заметно сократилось содержание водяного пара (до 105 мг/л). В основном был воздух с незначительной примесью CO₂. В течение 1957—1959 гг. фумарольная деятельность кратера Вилукай стала сокращаться; к апрелю 1959 г. заметно парили выходы только на одном участке с температурой 66°. Исследованные конденсаты пара 1952—1953 гг. по составу растворенных эксгалций представляли смешанные сульфатно-хлоридные воды, в 1954—1957 гг. — сульфатно-гидрокарбонатные (в табл. 18 представлен состав конденсатов пара кратера Билукай).

Эксплозивный кратер Козей. В феврале 1938 г. одновременно с кратером Билукай на высоте 1800 м образовался эксплозивный кратер Козей. Кратер представлял воронку взрыва, вытянутую с востока на запад глубиной около 30 м. Фумарольная деятельность эксплозивных кратеров по сравнению с эффузивными

Состав конденсата пара кратера Билюкай

Дата	V 1952 г.		IX 1953 г.		X 1955 г.		IX 1956 г.	
	60°		69°		79°		65°	
	мг/л	мг·экв %	мг/л	мг·экв %	мг/л	мг·экв %	мг/л	мг·экв %
Катионы								
Hг ⁺	—	—	—	—	—	—	—	—
Na ⁺	9,60	20,00	9,50	18,20	8,10	21,65	9,06	18,50
K ⁺	2,80	3,25	2,40	2,80	2,70	4,35	3,20	3,80
Mg ²⁺	6,46	25,70	5,05	19,00	3,40	17,40	6,54	26,00
Ca ²⁺	21,40	51,05	26,60	60,00	18,25	56,60	21,64	51,70
Fe ³⁺	—	—	—	—	—	—	—	—
Al ³⁺	—	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	39,86	100,00	43,55	100,00	32,45	100,00	40,44	100,00
Анионы								
Cl ⁻	40,15	53,50	19,60	24,80	14,56	25,40	36,00	49,00
So ₄ ²⁻	28,00	27,50	36,20	33,60	21,40	28,00	42,00	42,00
HCO ₃ ⁻	24,00	19,00	56,10	41,60	45,75	46,62	11,60	9,00
Сумма	92,15	100,00	111,90	100,00	81,71	100,00	89,60	100,00
CO ₂ общ.	47,10	—	28,00	—	18,40	—	18,40	—
H ₂ SiO ₃	10,50	—	9,40	—	11,60	—	14,60	—
Общая минерализация	149,75	—	192,85	—	144,16	—	163,14	—
pH	6,0	—	5,8	—	5,8	—	5,6	—

Примечание. Представлены средние из 3—4 проб соответствующих fumarol; анализы 1952 г., сборы Б. И. Пийпа.

более продолжительная. Отличительной особенностью этих fumarol является резко выраженный сольфатарный характер. Газы взрывных кратеров в своем составе содержали сероводород, сернистый газ с преобладанием паров воды. Спустя 11 лет после образования кратера Козей, на дне у перемычки воронок сохранились fumarolы с температурой до 100°, отлагающих гипс (Горшков, 1953). В 1951—1952 гг. наиболее сильными fumarolами среди прорыва 1938 г. оставались fumarolы в кратере Козей, выделяв-

Состав газа (в объемных %) и температура кратера Козей

Дата	Температура газа, °С	Компоненты без воздуха и воды (в объемных %)					Состав газа с воздухом			Н ₂ O, мг/л
		HCl	SO ₂	CO ₂	H ₂	CO	Сумма вулканических газов	O ₂	N ₂ и другие инертные газы	
1938	250	He опр.	He опр.	—	—	—	—	—	—	—
1950	88	—	—	1,45	—	—	1,45	19,15	74,40	He опр.
1953	90	—	—	1,50	—	—	1,50	19,65	78,85	1500
1954	92	—	—	3,10	—	—	3,10	19,50	77,40	2100
1955	88	—	—	3,65	—	—	3,65	19,25	77,00	1150
1956	90	—	—	3,20	—	—	3,20	19,70	77,10	1560
1957	94	—	—	94,70	5,30	—	3,80	19,15	77,05	1462
1958	92	—	—	75,30	24,70	—	4,05	16,70	79,25	He опр.
1959	90	—	—	3,25	—	—	3,25	19,35	77,40	1600

Примечание. Температура за 1958 г. приведена по данным О. Г. Борисова.

шие с большим напором струи пара с температурой до 90°. Фумарольная деятельность кратера в 1953—1959 гг. оставалась приуроченной к агломератовой перемычке. В табл. 19 представлены состав и температура газа. Вокруг выхода пара на горячем агломерате расстилались зеленые корки термофильных водорослей и мха. Из трещин пар вырывался с температурой 90—92°. Газовая фаза, насыщенная водяным паром, содержала углекислый газ с незначительными колебаниями в пределах 3,1—3,25%. В пробах газа 1956 г. увеличилось содержание CO₂ до 3,6%; в газах 1957 г., кроме CO₂, содержался H₂ до 0,2%. В 1958 г. CO₂ оставался в тех же концентрациях, а содержание водорода увеличилось до 1% (Борисов, 1960). В табл. 20 представлены конденсаты пара кратера Козей. Как видно из данных анализа, конденсаты представляли слабо минерализованные растворы. Однако они имели концентрацию выше (313 мг/л), чем на кратере Билукай, и рН ниже (3,8).

Кратеры Юбилейного прорыва. В июле 1945 г. на юго-восточном склоне Ключевского вулкана на высоте 1000—1440 м произошел прорыв новых кратеров, названный Юбилейным. В верхней части прорыва линейно вытянулись четыре эксплозивных кратера. В каждом кратере образовалось по несколько воронок взрыва. Последний (самый нижний), пятый, эффузивный кратер назван именем академика Заварицкого.

Кратер Заварицкого прорвался на высоте 1000 м с образованием шлакового конуса высотой 55 м и левого потока

Состав конденсата пара кратера Козей

Дата	1952 г.		1954—1955 г.		IX 1956 г.	
	90°		90—93°		90°	
	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %
Катионы						
H ⁺	—	—	—	—	0,16	—
Na ⁺	6,56	17,80	8,50	20,80	12,95	14,35
K ⁺						
Mg ²⁺						
Ca ²⁺	5,20	27,20	6,26	29,00	9,45	20,00
Fe ²⁺	17,40	55,00	16,52	46,85	32,46	42,50
Al ³⁺	—	—	—	—	1,80	2,55
	—	—	—	—	6,32	18,30
Сумма	29,16	100,00	33,68	100,00	66,94	100,00
Анионы						
Cl ⁻	14,65	24,50	18,54	29,00	32,40	22,25
SO ₄ ²⁻	50,00	64,50	32,60	38,45	151,00	77,75
HCO ₃ ⁻	11,00	11,00	35,40	32,55	—	—
Сумма	75,65	100,00	86,54	100,00	183,40	100,00
CO ₂ общ.	40,20		175,00		—	
H ₂ SiO ₃	21,00		18,40		33,00	
Общая минерализация	166,01		313,62		283,34	
pH	6,0		6,0		3,8	

Примечание. Пробы 1952 г.; сборы Б. И. Пийпа.

длиной 5 км. На лавовом потоке характерным и преобладающим возгоном был нашатырь. Фумаролы потока часто были связаны с раскаленными трещинами, в которых долго сохранялась высокая температура (820°). В состав газов потока входили пары воды, хлористый водород, углекислый газ, окись углерода и водород. На внешнем склоне шлакового конуса фумаролы были приурочены к трещине, вытянутой вдоль линии прорыва. Газ выделялся с резким удушающим запахом (HF) и был богат парами воды. Исследованные газы с температурой 320—780° состояли из HCl, CO, CO₂, H₂, H₂O (табл. 21).

Состав газа (в объемных %) и температура кратера Заварицкого (извержение 1945 г.)

Дата	Компоненты (без воздуха и воды)								Фумарольные газы с воздухом			
	Температура газа, °С	HCl	SO ₂	HF	CO ₂	CO	H ₂	NH ₃	Сумма вулканического газа	O ₂	N ₂ и др.	H ₂ O, мг/л
1945	320	14,50	—	—	85,5	—	—	—	11,20	15,60	73,20	Не опр.
1945	780	33,00	—	—	—	67,00	—	—	0,90	20,60	78,60	Не опр.
1946	232	25,00	12,50	—	—	20,50	42,00	—	0,24	19,65	80,11	260,0
1947	186	19,00	9,50	—	—	24,00	47,50	—	0,21	19,92	79,87	305,0
1948	238	36,00	49,50	—	—	14,50	—	—	0,17	20,38	79,45	86,9
V 1949	358	27,00	7,90	1,26	—	23,70	39,83	0,31	0,63	20,05	79,32	101,0
VIII 1949	500	20,50	8,40	0,80	—	28,60	36,80	4,90	1,22	19,60	71,19	150,0
1950	280	—	Следы	—	Не опр.	—	—	—	Воздух, пары воды			
1951	418	—	»	—	Не опр.	—	—	—	Воздух, пары воды			
1952	346	—	»	—	—	—	—	—	Воздух, пары воды			
1953	267	Следы	3,06	—	95,90	1,40	—	—	2,90	18,55	78,55	665
III-V 1954	80—70	—	Следы	—	1,51	—	—	—	1,51	19,50	79,00	92,0
IX 1954	250	—	3,51	—	91,15	5,34	—	—	1,71	18,40	79,90	182,0
III-V IX 1955	80	—	Следы	—	0,35	—	—	—	0,35	19,75	79,90	80,0
1956	85	—	3,22	—	96,78	—	—	—	0,31	19,60	80,10	85,0
1957	70	—	—	—	0,25	—	—	—	0,25	19,80	79,95	84,0
1958	65	—	—	—	Не опр.	—	—	—	Воздух, пары воды			
1959	60	—	—	—	0,07	—	—	—	0,07	20,00	79,90	62,0

Примечание. Температура за 1958 г. приведена по данным О. Г. Борисова; анализы 1945 г.—сборы Б. И. Пийп. Анализы производились в газовой лаборатории в Ленинграде под руководством Черепенникова.

Состав возгонов конуса был более разнообразным, чем на потоке; они состояли из сульфатов, хлоридов, фторидов, реже встречались нашатырь и сера.

Спустя год после извержения на конусе Заварицкого фумаролы существовали на внешнем северо-западном склоне, на продольной трещине, совпадающей с осью прорыва и протянутой от вершины до подножия. К этому времени вокруг фумарол базальт был уже перерожден во фтористые минералы. Газ с температурой 232° выделялся по всей трещине, которая в течение 1946—1947 гг. была постоянной. К 1948 г. лавовый поток почти остыл и только у подножия конуса мы обнаружили несколько выходов газа. Под глыбами и трещинами в лаве отлагался нашатырь в виде прозрачных, бесцветных и желтых кристаллов. Начиная с мая 1949 г. наблюдалось усиление активности фумарол конуса. Температура от 232° повысилась в мае до 358°, а в августе поднялась выше 500°. Одновременно увеличилась концентрация газа (HCl , SO_2 , CO , H_2), достигнув максимума за весь период наблюдения. Возгоны продолжали образовываться и состояли в основном из фторидов и хлоридов. Среди них реже встречались сульфаты Na^+ , Al^{3+} , K^+ , Ca^+ , Fe^{3+} .

Усиление активности фумарольной деятельности кратера Заварицкого совпало с усилением сейсмичности, а также активности вершинного кратера Ключевского вулкана. В 1950 г. на внешнем склоне конуса температура повысилась до 280°, а в 1951 г. до 418°. В это время фумарольные эксгаляции были существенно сульфатные. По всей трещине продолжали отлагаться инкрустации квасцов, гипса, алунита и других сульфатов. На лавовом потоке в двух местах вдоль линии прорыва отмечены слабые фумаролы с температурой 210°, осаждавшие тонкие налеты сухих сульфатов (Пийп, 1954). В 1953 г. на внешнем склоне конуса температура оставалась еще высокой (346°); продолжали отлагаться алуноген, квасцы и гипс. На внешнем северо-западном склоне конуса на одном участке наблюдались слабые фумаролы с температурой 267°. Газ состоял из паров воды с незначительной примесью сернистого газа (0,09%), окиси углерода (0,05%) и CO_2 (2,75%). Фумарольное поле было покрыто светло-желтой измененной породой, на которой заметно выступали выцветы гипса и алунита. Интересно отметить, что через год на этих участках температура резко понизилась с 267 до 80—70°. В газовой составляющей почти исчез сернистый газ, который определялся только в следах. В сентябре 1954 г. на этих же участках температура в газовой фазе опять поднялась до 250°, наряду с углекислым газом появились сернистый газ и окись углерода (см. табл. 21). Как видно из многолетних наблюдений, фумаролы внешнего склона конуса Заварицкого в отдельных участках в течение девяти лет сохраняли температуру в пределах 418—250°, которая, по-видимому, и способствовала генерированию остаточных газов лавы. Б. И. Пийп считает, что

подъем температуры на этих участках вызван образованием нового газового канала через плотную, трудно проницаемую почву fumarольного поля, а не подходом более горячих газовых масс из глубины, так как тогда повысилась бы температура всего fumarольного поля (Пийп, 1956). На кратере Заварицкого в течение последних лет отмечается заметное затухание fumarол. Температура в течение 1955 и 1960 гг. составляет не свыше 80°. Состав газов приближается к составу воздуха с незначительной примесью углекислого газа. До 1957 г. в газовой фазе наблюдались еще следы сернистого газа, но отложения возгонов уже не происходило. По-видимому, в ближайшие годы кратер Заварицкого окончательно остынет. Изученные fumarольные конденсаты кратера Заварицкого уже на стадии остывания лавы содержали в переменных количествах породообразующие элементы и анионы хлора, сульфата и гидрокарбоната (табл. 22).

Кратер Левинсон-Лессинга. Кратер Левинсон-Лессинга представляет взрывную воронку глубиной около 80 м, сильно вытянутую, с крутыми стенками. Он образовался в 1945 г. одновременно с кратером Заварицкого. Fumarолы на эксплозивных кратерах отличались резко выраженным сольфатарным характером. В газовой составляющей содержались сероводород, сернистый газ и пары воды с температурой 97—290°. Возгоны состояли из сульфатов гипса, алуногена, кали-натровых квасцов, аморфного афтиталита, а также встречались элементарная сера и фториды. Спустя год после прорыва (1946 г.), по нашим наблюдениям, fumarолы располагались на дне кратера в двух воронках: на южной внутренней стенке и на перемычке двух воронок. Наиболее активные fumarолы были на дне кратера, из-под глыб лавы с силой вырывался газ с температурой 460°. В составе газа содержались SO₂, HCl, CO, H₂ и пары воды. Температура в мае 1948 г. снизилась до 386°, а в августе 1949 г. заметно усилилась fumarольная деятельность, температура достигла 490°, а концентрация газа была максимальная за весь период наблюдения (табл. 23). Fumarолы с температурой 99 и 100° проявляли сольфатарный характер, в газах содержались H₂S и SO₂ в переменных отношениях, а также пары воды. На fumarолах сольфатарного характера образовывались выцветы сульфатов; в отдельных местах, где интенсивно выделялся газ, лава была превращена в цветные глины. В 1950 г. fumarольная деятельность эксплозивных кратеров наиболее сильная была в кратере Левинсон-Лессинга. В мае большие клубы пара поднимались с температурой до 120°. На стенках кратера было много парящих участков. В средней бокке наблюдались отложения гипса и квасцов. В мае 1951 г. fumarолы заметно ослабели, стали преимущественно паровые с температурой до 70° (Пийп, 1956). В сентябре 1953 г. fumarолы в кратере Левинсон-Лессинга сохранились (по нашим данным) только на двух участках с южной стороны склона воронки. Эти fumarолы едва заметно парили с темпе-

Состав конденсата пара кратера Заварицкого

	V 1952 г.		V 1953 г.		IX 1953 г.		IX 1954 г.		III, V, IX 1955 г.		IX 1956 г.	
	346°		80°		267°		250°		80°		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												
H ⁺	0,07	1,58	—	—	0,25	10,10	—	—	—	—	0,08	1,60
NH ₄ ⁺	2,30	1,58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Na ⁺	26,60	15,20	9,86	18,30	8,61	15,00	10,46	21,50	9,20	22,40	18,20	16,00
K ⁺	5,20	1,72	3,20	3,38	2,40	2,44	1,92	1,90	2,30	3,30	3,15	1,60
Mg ²⁺	8,50	9,36	5,86	20,30	5,20	17,40	5,64	22,50	4,68	21,80	6,20	10,40
Ca ²⁺	50,60	33,20	22,60	48,00	19,65	40,00	18,64	44,50	18,65	52,60	38,60	39,00
Fe ³⁺	2,21	1,56	—	—	0,91	2,16	—	—	—	—	1,85	3,00
Al ³⁺	24,50	35,80	2,20	10,02	3,25	13,00	1,86	9,60	—	—	12,90	28,40
Сумма	119,98	100,00	43,72	100,00	40,27	100,00	38,52	100,00	34,83	100,00	80,98	100,00
Анионы												
Cl ⁻	126,00	46,50	25,00	33,00	40,05	49,00	28,50	39,00	21,25	32,50	71,00	39,00
SO ₄ ²⁻	196,00	53,50	52,00	48,60	56,10	51,00	33,60	33,00	28,12	31,50	144,10	61,00
HCO ₃ ⁻	—	—	24,40	18,40	—	—	35,30	28,00	40,00	36,00	—	—
Сумма	322,00	100,00	101,40	100,00	96,15	100,00	96,40	100,00	89,40	100,00	215,10	100,00
CO ₂ общ.	—	—	76,00	—	—	—	—	—	31,00	—	—	—
H ₂ SiO ₃	21,60	—	6,80	—	18,25	—	16,40	—	9,20	—	14,60	—
Общая минерализация	462,98	—	227,92	—	154,67	—	151,32	—	164,43	—	310,68	—
pH	4,1	—	5,2	—	3,6	—	4,6	—	5,9	—	4,0	—

Примечание.
сборы Б. И. Пийпа.

Анализы конденсатов пара с IX 1953 г. (средние из 3—4 проб); анализы V 1952 г., V 1953 г.—

Состав газа (в объемных %) и температура кратера Левинсон-Лессинга
(извержение 1945 г.)

Дата	Температура газа, °C	Компоненты без воздуха и паров воды								Фумарольные газы с воздухом			
		HCl	SO ₂	H ₂	HF	CO ₂	CO	H ₂	NH ₃	Сумма вулканических газов	O ₂	N ₂ и др.	H ₂ O, мг/л
1946	460	27,00	—	—	—	—	10,50	62,50	—	0,25	19,75	80,00	110
1946	264	7,80	47,00	—	—	—	14,00	31,20	—	0,32	19,95	79,73	130
1947	262	32,00	65,00	—	—	—	3,00	—	—	0,10	19,85	80,05	140
1948	240	10,00	40,00	—	—	—	30,00	20,00	—	0,50	20,40	79,10	956
1948	99,5	—	31,50	68,50	—	—	—	—	—	0,22	20,55	79,23	1560
1949	100	—	26,50	73,50	—	—	—	—	—	0,38	20,50	79,12	1305
1949	490	5,50	47,00	—	0,30	—	7,70	39,03	0,47	0,64	20,05	79,28	315
1950	120	—	Следы	Следы	—	—	—	—	—	—	Воздух, пары воды		
1950	70	—	Следы	—	—	—	—	—	—	—	Воздух, пары воды		
1951—1952	70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Воздух, пары воды		
1953	83	—	Следы	—	—	2,05	—	—	—	2,05	18,55	79,35	1400
1954	93	—	—	—	—	1,50	—	—	—	1,50	19,55	78,95	3600
V—IX/1955	90	—	—	—	—	0,15	—	—	—	0,15	20,05	79,80	1050
1956	96	—	—	—	—	0,35	—	—	—	0,35	19,60	80,05	1400
1957	96	—	—	—	—	0,34	—	—	—	0,34	19,75	79,90	1160
1958	75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Воздух, пары воды		
1959	80	—	—	—	—	0,10	—	—	—	0,10	19,90	80,00	980

Примечание. Температура за 1950—1952 гг. приведена по данным Б. И. Пийпа; за 1958 г. — по данным О. Г. Борисова.

Состав конденсата пара кратера Левинсон-Лессинга

	V 1952 г.		IX 1953 г.		1955 г.		IX 1956 г.	
	95°		90°		96°		96°	
	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %
Катионы								
H ⁺	—	—	—	—	—	—	0,07	2,30
N ₄ ⁺	—	—	—	—	—	—	—	—
Na ⁺	9,10	20,50	10,12	23,50	8,64	19,30	12,40	17,70
K ⁺	2,20	2,60	2,80	3,80	3,00	3,65	3,50	2,95
Mg ²⁺	4,30	19,40	4,10	18,50	5,44	13,60	6,45	17,70
Ca ²⁺	22,15	57,50	19,96	54,20	20,40	53,45	36,00	59,35
Fe ³⁺	—	—	—	—	—	—	—	—
Al ³⁺	—	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	37,75	100,00	36,98	100,00	37,49	100,00	58,42	100,00
Анионы								
Cl ⁻	30,00	42,00	24,10	36,80	26,20	36,00	31,45	28,00
SO ₄ ²⁻	48,00	50,00	36,40	41,20	36,85	39,50	78,00	52,50
HCO ₃ ⁻	10,20	8,00	24,40	22,00	34,00	29,50	37,80	19,50
Сумма	88,20	100,00	84,90	100,00	92,05	100,00	147,25	100,00
CO ₂	—	—	52,00	—	38,00	—	—	—
H ₂ SiO ₃	7,80	—	9,65	—	11,40	—	18,30	—
Общая минерализация	133,75	—	183,53	—	141,45	—	223,97	—
pH	5,6	—	5,6	—	5,4	—	4,1	—

Примечание. Пробы за 1952 г.; сборы Б. И. Пийпа.

ратурой 70°, газ представлял водяной пар и воздух. Наиболее интенсивные фумаролы находились на перемычке воронок. Здесь температура достигала 93°. В газовой смеси среди водяного пара содержался сероводород и углекислый газ. Осаждения возгонов не наблюдалось. В марте и мае 1955 г. температура сохранялась в пределах 80—93°. Газовая составляющая сократилась. В составе кислой части исчезли газы серы, а концентрация углекислого газа снизилась до 1,5%. В 1956 и 1957 гг. газ состоял из воздуха и паров воды с незначительной примесью углекислого газа (0,35—0,5%). Температура составляла 96°. В 1958 и 1959 гг. темпе-

ратура снизилась до 75—80°, газ состоял из воздуха и паров воды. В табл. 24 представлены конденсаты пара. Конденсаты были слабо минерализованы (от 0,133 до 0,224 мг/л). В состав анионов входили хлор, сульфаты и гидрокарбонаты в переменных количествах, по-видимому, связанных с эксгалляциями извержений вулкана Безымянного.

Кратер Апахончич. Побочный кратер Апахончич образовался в октябре 1946 г. на юго-восточном склоне Ключевского вулкана на высоте 1600 м. В результате извержения Апахончича, которое продолжалось около месяца, образовался шлаковый нус высотой 100 м и излился лавовый поток длиной около 10 км. Спустя месяц после извержения лавовый поток в трещинах еще был раскален до 800°. Температура исследованных фумарол потока в местах выхода газа была до 500°. Газ пробивался из ещин с резким удушающим запахом, состоял из HCl, HF, CO, H₂S и паров воды. Лавовый поток быстро остыл и через год в местах мощных навалов шлака на его поверхности наблюдались слабые парения с температурой не выше 50°. Характерным для кратера Апахончич был незначительный дебит газа. Лава была обеднена газом, возгонов почти не образовывалось. Фумаролы в краевой части потока были более интенсивные, хотя температура их была 147—160°. В отличие от высокотемпературных фумарол наряду с HCl они содержали и HF, SO₂ (табл. 25). Здесь было заметно больше возгонов. Среди хлоридов и фторидов встречались сульфаты. К концу 1947 г. фумаролы потока с температурой 500° почти остыли. В мае 1948 г. сохранились фумаролы только с температурой не выше 40—50°. На шлаковом конусе при температурах 256—460° из трещин слабо выделялся газ с резким запахом HF. Стекло, помещенное в фумаролы, разъедалось фтористым водородом. Лава под действием фтористого газа была изменена: на поверхности шлаков образовался тонкий желтый налет фтористых минералов. В течение двух лет (1947—1948 гг.) фумарольная деятельность конуса непрерывно снижалась. К маю 1949 г. температура была не выше 296° и состав газа продолжал меняться; уменьшилась концентрация HCl и увеличилось содержание сернистого газа. В 1950—1951 гг. кратер Апахончич уже проявлял слабую фумарольную деятельность, значительно слабее, чем кратер Туйла, образовавшийся на 19 лет раньше. Температура слабых струек пара с ничтожным содержанием сернистого газа была 69—58°. В 1962 г. наблюдались едва заметные струйки пара, лишенные запаха, с температурой 65°. К сентябрю 1953 г. конус кратера Апахончич сильно был разрушен, изрезан многочисленными трещинами и сохранилась только часть стен конуса с западной и южной стороны. На гребне кратера все еще наблюдались едва заметные выходы пара с незначительной примесью углекислого газа. Температура этих фумарол составляла 76°. В мае и сентябре 1955 г. температура колебалась в пределах 60—80°.

Состав газа (в объемных %) и температура побочного кратера Апахончич
(извержение 1946 г.)

Дата	Температура газа, °С	Компоненты без паров и воды и воздуха						Фумарольные газы с воздухом			
		HCl	HF	SO ₂	CO ₂	CO	H ₂	Сумма вулка- ниче- ских газов	O ₂	N ₂ и др.	H ₂ O, мг/л
Поток 1946	500	7,40	Не опр.	—	—	23,10	69,50	1,08	19,58	79,34	46
Конус 1947	460	34,50	»	—	—	19,50	46,00	1,30	19,85	78,85	856
1948	268	12,00	»	20,00	—	8,00	60,00	0,25	20,50	79,25	102
1949	296	20,50	6,00	6,50	—	16,50	50,50	0,30	20,20	79,50	194
1950	69	—	Следы	—	—	—	—	—	Воздух и пары воды		
1951	58	—	»	—	—	—	—	—	Воздух и пары воды		
1952	65	—	—	—	—	—	—	—	Воздух и пары воды		
1953	76	—	—	—	1,09	—	—	1,09	19,50	79,41	65
1954— 1956	60—80	—	—	—	0,07	—	—	0,07	19,95	79,98	80
1957— 1959	15—60	—	—	—	—	—	—	—	Воздух и пары воды 20—40, мг/л		

но количество углекислоты резко упало и было равно содержанию ее в воздухе. Газ состоял из воздуха (85%) и из паров воды (15%). В 1957—1959 гг. температура еще сохранялась в пределах 60—65°, но уже газ на 90% представлял собой воздух и 10% составляли пары воды. Конденсаты пара низкотемпературных фумарол (60—65%) кратера Апахончич были слабоминерализованными растворами с общей минерализацией не выше 170 мг/л при рН = 5,8—6,5. Состав анионов и катионов конденсата пара приближался к составу атмосферных осадков этого района (табл. 26).

Характер фумарол побочных кратеров

За последнее двадцатилетие на побочных кратерах Ключевского вулкана изучалась фумарольная деятельность эффузивных и эксплозивных кратеров. С 1932 по 1956 г. в результате эффузивных извержений на склонах Ключевского вулкана образовалось восемь шлаковых конусов с лавовыми потоками: Туйла, Биокось, Киргу-

Состав конденсата пара кратера Апахончич

	1953 г.		1955 г.	
	мг/л	мг-экв %	мг/л	мг-экв %
Катионы				
Na ⁺	8,20	21,00	9,00	21,80
K ⁺	2,10	2,80	2,20	2,75
Mg ²⁺	4,30	21,00	5,00	22,80
Ca ²⁺	18,40	55,20	18,45	52,65
Сумма	33,00	100,00	34,65	100,00
Анионы				
Cl ⁻	15,40	26,10	17,20	26,00
SO ₄ ²⁻	20,10	26,00	26,00	29,00
HCO ₃ ⁻	50,00	48,00	52,50	45,00
Сумма	85,50	100,00	95,70	100,00
CO ₂ общ.	46,00	—	14,00	—
H ₂ SiO ₃	6,2	—	6,8	—
Общая минерализация	170,70	—	151,15	—
pH	5,8	—	6,5	—

рич, Билукай, Заварицкого, Апахончич, Былинкиной, Белянкина, Вернадского и Крыжановского; последние два не образовали шлаковых конусов. Исследовать газы в момент извержения кратеров не представляется возможным. Мы изучали фумарольные газы, начиная от раскаленного состояния лавы до полного ее остывания. Фумаролы побочных кратеров в большинстве случаев каптировать было невозможно, так как газы выбиваются из навалов крупных обломков и глыб лавы или выходят из открытых раскаленных трещин. На лавовых потоках фумаролы располагались среди пористого шлака. При таких условиях выхода газа все попытки создать каптаж были бесполезными и к вулканическим газам неизбежно подмешивался воздух. Фумаролы на шлаковых конусах и лавовых потоках возникали после прекращения извержения. Обычно фумаролы были приурочены к трещинам на внутренних и внешних склонах конуса. Часто фумаролы вытягивались вдоль продольных трещин по оси прорыва. Трещины были открытые и закрытые; последние обнаруживались по скоплению возгонов и выделению газов. Отдельные газовые струи пробивались из навала

крупных обломков и глыб лавы. Как правило, в начальной стадии остывания лавы высокотемпературные фумаролы отличались низким дебитом газа и незначительным отложением возгонов. Температура наиболее интенсивных фумарол с более обильными отложениями возгонов была 450—500°.

Начальный период остывания базальта характеризуется галоидными эксгаляциями. Со временем при понижении температуры шлаковых конусов фумаролы сосредоточивались около трещин, на агломератовых скоплениях и на гребнях. Температура обычно колебалась в пределах 260—350°. В эксгаляциях наряду с галоидами появляются соединения серы. При дальнейшем остывании шлаковых конусов наступает слабая фумарольная деятельность ($t=90-70^\circ$) и увеличивается содержание водяного пара и углекислого газа; а галоидные и сернистые газы перестают выделяться. Особенностью фумарол шлаковых конусов является их относительно длительное существование в сравнении с фумаролами потоков: первые располагаются над выводными каналами вулканов.

Фумаролы на лавовых потоках проявлялись вскоре после излияния лавы. Вначале они сосредоточивались в краевых частях потока. Затем, в процессе остывания лавы фумаролы приурочивались к трещинам, навалам шлаков и скоплениям агломератов. На шлаковых валах и буграх у подножия кратера газы пробивались сквозь агломерат, здесь образовывались площадные рассеянные фумаролы. Характерным и преобладающим возгоном на лавовых потоках был нашатырь. Он осаждался при температуре 170—220°. Обильные отложения нашатыря обычно наблюдались на потоках, излившихся в зоне растительности (Туйла, Биокось, Киргурич, Заварицкого, Былинкиной, Билюкай), и почти отсутствовали на потоках, излившихся выше растительной зоны (Апахончич, Белянкина, Вернадского и Крыжановского). В начальной стадии фумарольной деятельности при температурах раскаленной лавы, равных (830—680°), на потоках был также характерен возгон медных хлоридов. Фумаролы на потоках обычно были недолговечны. Особенно на лавовых потоках, излившихся на более высоком уровне (существовали меньше года).

Фумаролы взрывчатых кратеров

С 1932 г. на склонах Ключевского вулкана образовалось восемь взрывчатых кратеров с воронками взрыва. В этих кратерах фумаролы обычно располагались на дне кратерной воронки, на перемычках, на внутренних и внешних склонах. Фумарольная деятельность в кратерах, расположенных гипсометрически выше, была более длительной, чем в кратерах, прорвавшихся ниже. Так, в взрывчатом кратере Левинсона-Лессинга через четыре года после извержения температура фумарол достигала 490° и концентрация газа была максимальной за весь период наблюдения.

В кратере Козей спустя 11 лет после его образования температура фумарол была равна 100°, а в нижних кратерах одного и того же прорыва фумарольная деятельность прекратилась в первый год. Отличительной особенностью этих фумарол является их резко выраженный сольфатарный характер. Эксгаляции эксплозивных кратеров поступали из глубины через толщу старых лав, вступали в реакции с породами и первоначальный состав их изменялся. При излиянии лавы на поверхность газы выделяются непосредственно из свежих лав, имея существенно галоидный характер.

Температурный режим фумарол и фумарольная активность побочных кратеров

Температурный режим для большинства побочных кратеров Ключевского вулкана в настоящее время сохраняется в пределах 60—90°. Исключение составляют фумаролы шлакового конуса кратера Былинкиной, где максимальная температура в 1959 г. достигла 316°.

Многолетние наблюдения показали, что активность фумарольной деятельности побочных кратеров проходила неодинаково; одни кратеры действовали в течение двадцатилетия, другие не более одного года. На отдельных участках лавовых масс и шлаковых конусов одна и та же температура сохранялась длительное время, на других наблюдаются резкие изменения.

Мы проследили на кратере Заварицкого повышение температуры с 232° до 500°, а на Туйле — с 243 до 440°. Этот период совпал с усилением сейсмичности и активности вершинного кратера Ключевского вулкана. По мнению С. И. Набоко, фумаролы шлаковых конусов остывают более длительно, чем на потоках, в результате большой мощности остывающего материала; даже если связь с очагом нарушена, лава продолжает выделять остаточное тепло и газы. Однако обращает на себя внимание то, что длительность определяется не только мощностью шлакового материала. Так, высота конуса Апахончич 100 м, а Белянкина — 70 м, т. е. Апахончич значительно выше Туйлы (25 м) и конуса Заварицкого (55 м). Несмотря на это, фумарольная деятельность на них продолжалась менее трех лет, в то время как на Туйле — около 20 лет, на конусе Заварицкого — около 10 лет. Кратер Былинкиной при высоте конуса около 30 м проявляет активность более 10 лет с температурой фумарол до 300°.

Лава, излившаяся из различных кратеров Ключевского вулкана, несколько различалась по составу, была неодинаково обогащена летучими компонентами. Это, несомненно, определяло характер фумарольной деятельности и ее длительность. Как известно, все побочные кратеры Ключевского вулкана, образовавшиеся на более низком гипсометрическом уровне, имели наибольшую

основность (оливиновые базальты), а лавы, излившиеся на более высоком уровне, по составу приближались к андезито-базальтам. Первые были более насыщены газами и выделяли их в течение десятилетия, а лавы кратеров Апахончич, Белянкина, Вернадского и Крыжановского, наоборот, были обеднены газами и их фумарольная деятельность продолжалась не более 1—3 лет (рис. 4).

Перрет придает большое значение газам в переносе тепла. Он считает, что газы могут повышать температуру лавы на несколько сот градусов и вызывать ее плавление (Perret, 1914). По представлениям Б. И. Пийпа, вторичный нагрев лавы происходит вследствие окислительных процессов, которые могут длиться очень долго. Мы наблюдали длительное сохранение температур фумарол на лавовых потоках в пределах 160—220°. Так, температура фумарол шлаковых конусов Заварицкого и Былинкиной длительно сохранялась в пределах 250—300°. По-видимому, такое постоянство можно объяснить не только процессами окисления лавы и газов. Здесь совершенно очевидно, что фумарольная деятельность обусловлена наличием газов в лаве и неравномерностью обогащения ими.

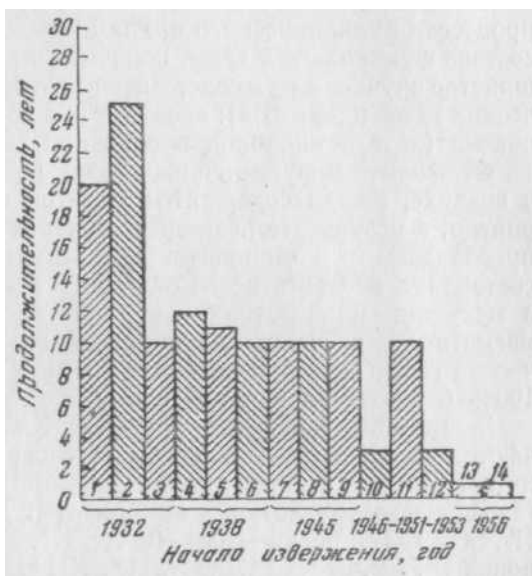


Рис. 4. Продолжительность остывания побочных кратеров Ключевского вулкана (до 100°) 1 — Туила; 2 — Киргурич; 3 — Биокось; 4 — Биюккай; 5 — Козей; 6 — Тиранус; 7 — Заварицкого; 8 — Левинсон-Лессинга; 9 — Обручева; 10 — Апахончич; 11 — Былинкиной; 12 — Белянкина; 13 — Вернадского; 14 — Крыжановского

Об отдельных компонентах газовой фазы

Исследованные газы побочных кратеров даже в момент пароксизма не отражают полностью состава летучих магмы. Помимо магматических, они также содержат газы, заимствованные из пород и атмосферы, и газы, возникшие в результате вторичных реакций. Все попытки многих исследователей (Шепард, Дей, Джаггар, Аллен, Брен и др.) собрать газы непосредственно в момент извер-

жения, не дали положительных результатов. Дей и Шепард собирали газы на вулкане Килауэа (1912 г.) в момент их выделения, когда вулканические газы, казалось бы, не успевали смешиваться с воздухом. Однако и эти газы рассматривались ими, как окисленные. Тем более газы, наблюдаемые нами, относятся к более поздним процессам вулканического цикла и наиболее изменены. Из таблиц состава фумарольных газов побочных кратеров видно, что в большинстве случаев в них содержится ничтожное количество вулканических газов (0,02—6%); воздух в них составляет 94—99,8% всего объема (азот и кислород в основной своей массе атмосферные).

Отношение в фумарольных газах N/O отличается от такового в воздухе; всегда содержится избыток азота, возникающий, вероятно, в результате реакций окисления. Вода является одним из преобладающих компонентов среди вулканических газов и часто составляет 80—96% всего объема. В основном вода атмосферная, в меньших количествах — термометаморфическая и собственно магматическая. Исходя из изложенного, мы пересчитали вулканические газы, если они состояли из двух и более компонентов, на 100% без воздуха и паров воды.

Эксталяции побочных кратеров Ключевского вулкана отличаются самым разнообразием. Непосредственно в газовой фазе химическими и физико-химическими методами определены в виде газовых молекул летучие компоненты: HCl, HF, HBr, HI, H₂S, H₂, SO₂, CO₂ и редкие газы He, Ar, Kr, Xe, а в конденсатах в виде ионов I⁻, F⁻, Br⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, H⁺, NH⁺. В конденсатах и возгонах химически определены все петрогенные элементы и спектроскопически многие микроэлементы. Состав выделяющихся на поверхность газов зависит от характера эксталяции магмы и ее проявлений на поверхности в виде эффузивных и эксплозивных образований, а также от физико-химических свойств отдельных компонентов (упругости паров, растворимости, температур). Базальтовая и андезитово-базальтовая лава Ключевского вулкана богата хлором и фтором. Хлор и фтор, как наиболее активные компоненты газовой фазы, первыми теряются (вступают в реакции с породой, растворяются в воде). На поверхности определяются газы группы серы и углерода. Многочисленные анализы эксталяций базальтовой лавы показали, что высокотемпературная стадия всегда была богата окисью углерода и водородом (рис. 5). По мере остывания лавы в газах появлялся углекислый газ, который присутствовал в течение более длительного периода фумарольной деятельности. Химическая роль углекислого газа увеличивалась на более поздних низкотемпературных стадиях фумарольной деятельности.

Судя по анализам газов побочного кратера Ключевского вулкана, водород и окись углерода являются существенными компонентами вулканических газов. В начальную высокотемпературную стадию остывания лавы (500—830°) водород составлял 40—60% вулканических газов. Возможно, в этих условиях создавалась

восстановительная обстановка. Действительно, некоторые конденсаты высокотемпературных газов (см. табл. 11) содержали в своем составе исключительно закисное железо. Что касается инертных газов, то для Камчатских вулканических газов очень мало данных.

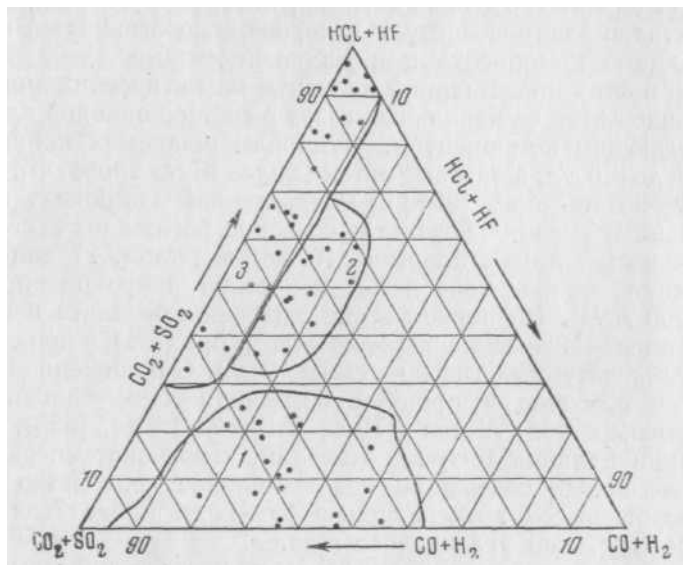


Рис. 5. Состав фумарольных газов побочных кратеров Ключевского вулкана на различных стадиях остывания лавы

Газы с температурой: 1 — 400—330°; 2 — 200—400°, 3 — 80—100°

Исходя из нескольких анализов редких газов побочных кратеров Ключевского вулкана, отношение Ar/N приблизительно такое же, как и в воздухе—1,18 (Пийп, 1956).

Аллен, изучая газы Катмаи, нашел, что азот и аргон содержатся в них в той же пропорции, как и в воздухе. Средний процент аргона в газе был 1,25 (Allen, 1922).

Шепард исследовал образцы газа Килауэа и нашел в большинстве случаев, что отношение Ar/N гораздо выше, чем в атмосфере (1,96—1,94).

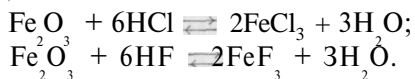
В вулканических газах многие легколетучие (Br, J, V, As) и труднолетучие компоненты не удается определить непосредственно в газовой фазе. Мы определяли их, применяя способ искусственной конденсации газа. Химический состав и степень минерализации конденсата стоят в прямой зависимости от изменения вулканических газов, отражающих определенную стадию осты-

вания магмы. Конденсаты высокотемпературной стадии представляют сложные растворы, обогащенные кислыми газами (HCl, SO₂, HF), которые обуславливают их ультракислый характер (pH>1) и интенсивную миграцию труднолетучих. Такие растворы обычно содержат свободные кислоты, которые в природных условиях активно взаимодействуют с породами, обогащаются породобразующими компонентами и микроэлементами.

Хлор и фтор представляют элементы магматических эманаций.

В конденсатах фумарольных газов в составе анионов хлор был преобладающим компонентом. Фумаролы шлаковых конусов содержали до 9,5 г/л, а лавовые потоки более 10 г/л хлора, что составляло 70—95 мг экв%. Фтор — характерный компонент начальной стадии остывания базальта; особенно богаты им эксгалляции верхних частей линий прорыва. Из данных табл. 27 видно, что содержание фтора колеблется в весьма широких пределах (2,5—2200 мг/л). На первом этапе остывания базальта в газовой фазе отмечено максимальное количество фтора (4%), в конденсатах высокотемпературных газов — свыше 2 г/л. С понижением температуры и особенно в процессе остывания лавы концентрация фтора уменьшается. Аллен и Цисс (Allen and Zies, 1923), изучая эксгалляции вулкана Катмаи, отметили, что низкотемпературные фумаролы всегда содержали незначительное количество фтора. И наоборот, высокотемпературные фумаролы иногда содержали фтора больше, чем углекислого газа.

Авторы предполагают, что галоиды являются глубинными эманациями. Они допускают, что окись железа взаимодействует с галоидами по реакции:



Обе реакции идут справа налево с поглощением тепла. Чем выше температура, тем сдвиг равновесия будет больше в сторону образования HF и HCl. Несмотря на то что фтор по количеству уступает многим газам, роль его в переносе металлов в вулканическом процессе значительна. В газовой фазе фтор выносит из магмы и лавы в первую очередь кремний и железо, которые обладают более низкими температурами кипения. Фтор и кремний летят в виде четырехфтористого кремния (SiF₄). Из графика (рис. 6) видно, что количество кремния находится в прямой зависимости от содержания фтора. Кремний продолжает выноситься и в фазе пара, конденсат которой имел более низкие концентрации водородных ионов (pH=3—6). В этом случае, вероятно, перенос осуществлялся перегретыми парами воды. Отдельные пробы конденсата (pH=3—5) содержали H₂SiO₃ свыше 300 мг/л.

Наряду с хлором и фтором, в эксгалляциях побочных кратеров в больших или меньших количествах всегда содержался бром. В конденсатах газа (табл. 27), наблюдаются весьма широкие коле-

бания в содержании брома (от 0,5 до 31 мг/л). Среднее содержание брома в конденсатах газа составляет 7,8 мг/л и йода (1,2 мг/л). Коэффициент отношения Cl/Br также подвергнут сильному колебанию (92—4733).

Рассматривая график (рис. 7), видим, что отношение Cl/Br в эксгаляциях изменяется в зависимости от температуры (обратная зависимость) и времени остывания лавы (прямая зависимость).

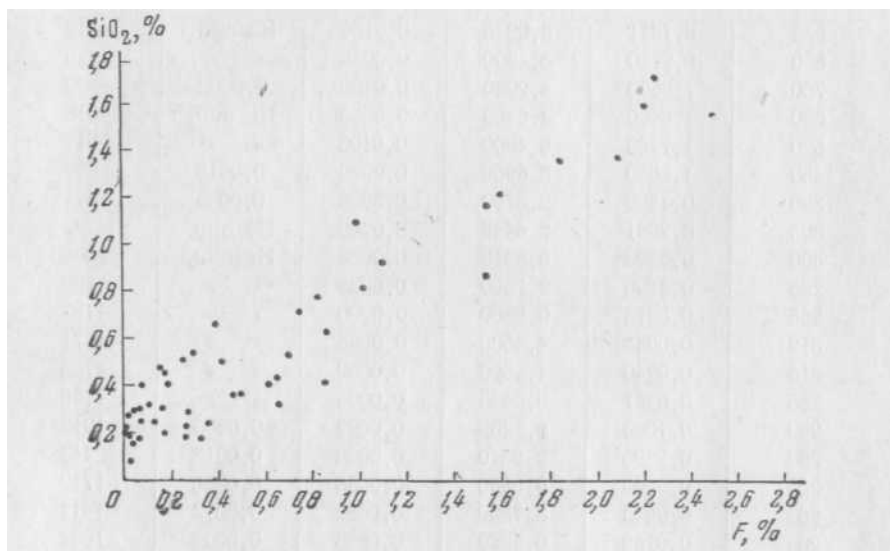


Рис. 6. Зависимость содержания SiO_2 от F в фумеральных газах

Незначительное содержание или полное отсутствие йода в высокотемпературных конденсатах газа, по-видимому, связано с термической неустойчивостью йодистоводородной кислоты, которая заметно распадается на элементы уже при температуре 300° (Некрасов, 1955).

Для более подробного выяснения содержания галоидов в эксгаляциях побочных кратеров, мы предприняли ряд количественных определений их в свежих возгонах. Все образцы возгонов были собраны одновременно с конденсатами газа и из тех же фумарол. Исследованный материал представлял собой нашатырь и фтористые минералы. Из табл. 28 видно, что большинство образцов в больших или меньших концентрациях содержало все галоиды. Наиболее высокие коцентрации брома и йода были отмечены в возгонах нашатыря. В одном из образцов нашатыря (анализ 1) лавового потока кратера Былинкиной содержалось брома 0,158%, а йода — 0,003%. Следует отметить, что в конденсате газа этой фумаролы были также максимальные концентрации брома (30 мг) и йода

**Содержание галоидов в конденсатах газа побочных кратеров
Ключевского вулкана (г/л)**

Температура газа, °С	F	Cl	Br	I	Cl, Br
Фумаролы конуса					
835	2,1911	6,9845	0,0156	He обн.	448
830	0,9850	3,4500	0,0053	» »	650
780	1,0500	4,2030	0,0120	0,0002	350
680	1,5400	4,9450	0,0080	He обн.	618
520	1,7760	5,4800	0,0106	» »	517
460	1,5650	5,5900	0,0080	0,0015	698
360	0,1580	2,3700	0,0025	0,0005	948
305	0,9861	2,6449	0,0260	He опр.	92
300	0,8206	6,5310	0,0050	He обн.	1306
285	0,4100	2,7600	0,0038	» »	726
285	0,3373	0,9500	0,0000	» »	1187
312	0,0244	4,4500	0,0035	» »	1271
316	0,0240	4,2600	0,0009	» »	4733
285	0,0221	0,3430	0,0005	» »	1156
280	0,1060	2,2268	0,0022	0,0005	1012
260	0,2895	2,9310	0,0066	0,0012	443
285	0,0560	9,5800	0,0056	0,0008	1712
260	0,0640	8,7500	0,0062	0,0012	1411
235	0,0760	0,5020	0,0005	0,0002	1004
Фумаролы потока					
830	0,2310	2,8760	0,0066	0,0024	434
640	0,3050	6,6560	0,0160	He обн.	416
500	0,2037	8,1456	0,0184	0,0040	442
332	0,3890	4,5976	0,0107	0,0046	429
250	0,1600	5,7015	0,0160	0,0021	356
220	0,0440	6,6650	0,0310	0,0120	215
220	0,0208	2,2000	0,0045	0,0010	488
220	0,0065	1,8500	0,0035	0,0015	538
190	0,0025	2,4820	0,0060	0,0015	413
160	0,0065	10,6500	0,0140	0,0060	760

(12 мг/л). В возгонах нашатыря среднее содержание брома составляет 0,093%, йода — 0,0021%, во фторидах брома — 0,026%. Для сравнения приведем данные по бромю и йоду в возгонах кратера Билюкая (Селиванов, 1947). Среднее количество брома в хлоридах — 0,064%, во фторидах — 0,024%; йода — 13,10. Из изложенного видно, что хлориды кратера Былинкиной содержали брома

Содержание галоидов в возгонах побочных кратеров Ключевского вулкана, весовые %

Характеристика возгона	Место и дата взятия пробы	Температура фумарол, °С	F	Cl	Br	I	Cl/Br
Нашатырь, плотный оранжевый, с запахом галоидов (брома, йода)	Кратер Былинкиной, поток; IX 1953 г.	220	0,120	68,80	0,1584	0,0036	435
Нашатырь, чистые белые кристаллы	То же	190	0,091	67,60	0,1020	0,0019	662
Нашатырь желтый	Кратер Былинкиной, поток; VIII 1954 г.	200	0,064	66,86	0,0640	0,0004	1044
Нашатырь, оранжевые и желтые кристаллы	Кратер Былинкиной, поток; IX 1955 г.	160	0,040	66,72	0,0500	0,0025	1334
Фтористый, светло-желтого цвета	Кратер Былинкиной, вершина конуса; IX 1953 г.	300	43,60	6,85	0,0200	0,0004	342
Фтористый, смешанный желтый и зеленый	То же	300	40,01	9,14	0,0400	0,0002	228
Фтористый — корочки желто-зеленого цвета	Кратер Белянкина, вершина конуса; IX 1953 г.	600	42,09	1,85	0,0051	He обн.	362
Фтористый, желтый	То же	450	32,50	2,14	0,0090	» »	237
Хлориды и фториды (NH ₄ , Na, Fe, Ca)	Кратер Белянкина, поток; IX 1953 г.	420	18,60	26,50	0,0075	0,0002	353

в полтора раза больше, чем хлориды Билюкая. Во фторидах количества брома были близкими. Йода в возгонах Билюкая содержалось незначительно. Л. С. Селиванов отмечает, что для йода дается только нижний предел его содержания; он предполагал, что свежий материал содержал его больше. Потере части йода несомненно способствовала высокая температура фумарольных эксгаляций, слабокислая среда всех возгонов, а также содержание окислителей в виде солей железа.

Рассматривая данные анализа конденсатов газа побочных кратеров Ключевского вулкана, видно, что с хлором, фтором,

серой и парами воды летели все петрогенные и многие микроэлементы.

Из базальтовой лавы и магмы при высоких температурах (830—500°) с хлором выносились в первую очередь натрий и калий. В конденсате газа они составляли 25—40% от суммы катионов. Отношение Na/K было выше (5—8), чем в исходной лаве (3). По мере остывания лавы натрий и калий продолжали выноситься газами, но отношение их было уже близким к исходной лаве.

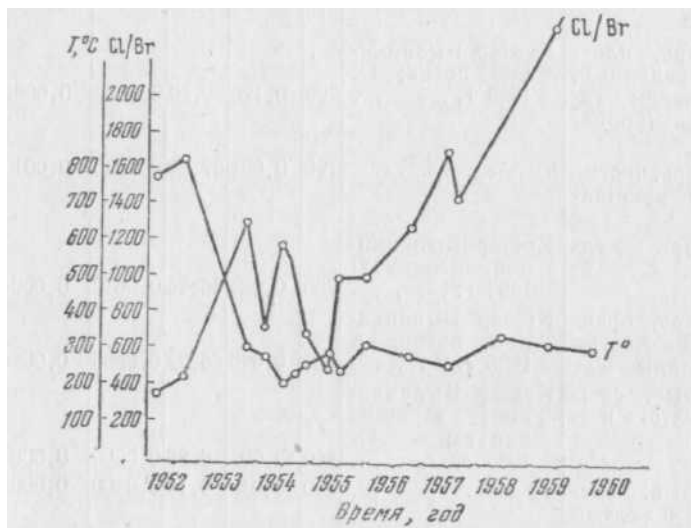


Рис. 7. Зависимость отношения Cl/Br от температуры и времени остывания лавы

Железо. Железо из базальтовой лавы выносится хлором и фтором. На первом этапе состояния лавы, когда в газовой фазе создавалась восстановительная обстановка (H_2 , CO), в конденсатах железо частично было в закисной форме; в условиях свободного кислорода оно быстро окислялось.

Алюминий. В высокотемпературных газах он интенсивно выносился с хлором. В конденсатах газа количество его было более 25% от суммы всех катионов. С изменением среды в конденсатах (рН выше 3) алюминий и железо выносятся уже в незначительных количествах. При рН раствора больше 3 обычно алюминий и железо в растворах не встречаются. В продуктах прямого возгона алюминий почти не наблюдается. В областях низкотемпературных fumarol происходит обильное образование алунитов.

Кальций и магний. Рассматривая состав конденсатов газов, видим, что при высоких температурах кальций и магний выносятся менее интенсивно, чем на более поздних этапах остывания.

вания базальтовой лавы. В низкотемпературных конденсатах с рН = 4—6, обычно уже лишенных хлора, всегда преобладают щелочноземельные металлы, составляя иногда более 50% от суммы катионов. По-видимому, в переносе металлов принимали участие водяной пар, соединения серы, а возможно, в этих условиях увеличивалась и роль углекислого газа. Изученные конденсаты газа андезитовых лав показали, что вынос кальция в сернистых соединениях был более интенсивным, чем в соединениях с хлором. Магний как с хлором, так и с серой из свежих андезитовых масс выносился сравнительно незначительно (Башарина, 1961).

Судя по спектральному анализу сухого остатка конденсатов газов базальта и андезито-базальта, наряду с породообразующими выносились и многие микроэлементы. Рассматривая данные спектрального анализа конденсатов газов из различных побочных кратеров (табл. 29) с близкими температурами (332—450°), видим,

Таблица 29

Данные спектрального анализа сухого остатка конденсата газа побочных кратеров Ключевского вулкана начальной стадии остывания базальта

(Аналитик А. М. Сапожникова)

Элементы	Кратер				Элементы	Кратер			
	Былинкиной	Белянкина	Вернадского	Кржижановского		Былинкиной	Белянкина	Вернадского	Кржижановского
	332°	450°	420°	360°		332°	450°	420°	360°
Be	0,000п	—	—	—	Cu	0,0п+	0,00п	0,000п	0,000п
Sc	0,00п+	0,00п	—	—	Ag	0,000п	—	0,000п	—
Tl	0,00п	—	—	—	Co	0,000п	0,00п	—	0,000п
Pb	0,000п+	0,00п	—	—	Ni	0,000п	—	—	—
Bi	0,00п	—	—	—	Zr	0,000п	0,0п	—	—
Sn	0,00п	0,00п	—	—	Cr	0,00п	0,00п	0,000п	—
Mo	—	0,00п	—	0,000п	Sr	0,00п	0,00п	0,00п	0,000п
Ga	0,000п	0,00п	0,000п	—	Ba	0,00п	0,00п	0,00п	0,00п
V	0,000п	0,00п	—	—	Zn	—	—	—	0,000п

что количество микроэлементов в них неодинаковое. В конденсатах газа кратера Былинкиной обнаружено 16 элементов: Zr, Be, Tl, Se, Pb, Bi, Sn, Ga, V, Cu, Ag, Co, Ni, Cr, Sr, Ba; в конденсате кратера Белянкина — 12 элементов. По сравнению с конденсатами Былинкиной в них не содержался Be, Tl, Bi, Ag, Ni. В конденсате кратеров Вернадского и Кржижановского обнаружено по шесть элементов: в первом Ga, Cu, Co, Sr, Zn, Ba; во втором Ga, Si, Sr, Ba, Ag, Co.

Выше отмечалось, что лавы, излившиеся из различных кратеров Ключевского вулкана, были неодинаково обогащены легколетучими компонентами. Базальтовая лава кратера Былинкиной была более насыщена легколетучими газами и микроэлементами, чем андезито-базальтовые лавы кратеров Белянкина, Кржижановского, Вернадского. В дальнейшем, по мере остывания лавы изменялся состав легколетучих и сокращался вынос труднолетучих.

Интересно проследить состав микроэлементов в конденсатах побочных кратеров на более поздних этапах остывания лавы (90—60°). В низкотемпературных конденсатах пара (табл. 30) из

Таблица 30

Данные спектрального анализа сухого остатка низкотемпературных побочных кратеров Ключевского вулкана извержения 1932—1946 гг.

(Аналитик А. М. Сапожникова)

Элементы	1954	1957	1955	1955	1957	1955
	Кратер					
	Киргурич и Туйла	Билюкай	Козей	Завариц-кого	Левинсон-Лессинга	Апахон-чич
Mn	0,000п	0,00п	0,00п	0,000п+	0,00п	0,000п
Sn	—	—	—	0,00п	—	—
Mo	0,00п	—	0,01	0,000п	0,00п	—
Cu	0,000п+	0,00п	0,000п	0,00п	0,000п+	0,000п+
Zn	—	0,0п	—	0,п	—	—
Ti	0,00п+	0,00п+	0,00п+	0,0п	0,0п ⁻	0,00п+
Cr	—	—	—	0,00п	—	—
Sr	—	—	—	0,0п	—	—
Ba	—	—	—	—	0,0п ⁻	—

базальта кратеров Туйлы и Киргурича, остывающих в течение 22 лет, обнаружены только Си и Мо, в конденсате пара из базальта Билюкай, остывающего в течение 19 лет, обнаружены Си и Zn. В конденсате андезито-базальта кратера Козей, образовавшегося одновременно с Билюкаем, обнаружены Мо и Си, а в конденсате кратера Заварицкого, остывающего в течение 10 лет, содержалось шесть микроэлементов: Sn, Mo, Si, Zn, Cr, Sr. В конденсатах газа взрывчатого кратера Левинсон-Лессинга, остывающего в течение 10 лет,— Mo, Si, Ba. В конденсате газа из андезито-базальтовой лавы Ключевского вулкана медь обнаружена на всех стадиях остывания ее. Около высокотемпературных фумарол лавовых потоков образовывались медные минералы. В высокотемпературную стадию медь в газовой фазе переносилась в виде хлоридов и сульфатов. Низкотемпературные газовые паровые струи побочных кратеров также содержали медь, 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 (возможно, образовывались сложные комплексные соединения). В многочисленных анализах конденсатов газа базальтовых и андезитовых лав цинк чаще присутствовал в сульфатных эксгалляциях. Характерным является наличие цинка в конденсатах низкотемпературных парово-газовых струй из базальта побочных кратеров (в десятых и сотых долях процента). Интересно отметить, что цинк содержался в возгонах, сульфатных эксгалляциях; в хлоридных возгонах цинк не был обнаружен (Набоко, 1959). Олово было найдено в 11 образцах конденсатов газа из 52 анализированных, причем в 10 — в конденсатах высокотемпературных галоидных газов и только в одном — в конденсате низкотемпературного газа кратера Заварицкого. Свинец обнаружен в конденсатах газа базальтовых лав только в высокотемпературную стадию во фторидных возгонах кратеров Былинкиной и Белянкина — только в одном образце (в нашатыре); в низкотемпературную — только в двух из 18 анализированных образцов (Башарина, 1961).

Никель, кобальт и серебро обнаружены только в эксгалляциях высокотемпературных газов базальтовой лавы, богатой хлором и фтором. Во возгонах нашатыря кратера Былинкиной Ag не было, а во фторидах из четырех анализированных образцов обнаружено только в одном высокотемпературном.

Молибден встречен в конденсатах газа на всех стадиях остывания базальта и андезита. Из 52 анализированных образцов Mo определен в 31 образце. Во возгонах кратеров Былинкиной и Белянкина из девяти образцов Mo отмечен только в двух образцах фторидов (см. табл. 7). В конденсатах газа наблюдается более высокое содержание Mo в андезито-базальтовых и андезитовых лавах.

Va и Sr присутствуют в конденсатах газа как базальтовых, так и андезитовых лав. Причем в эксгалляциях базальтовых лав оба элемента содержались в начальную стадию остывания лавы, в низкотемпературных конденсатах из 18 анализированных проб они обнаружены только в четырех (кратер Юбилейного прорыва).

Галлий встречен в газовых растворах из базальтовых и андезитовых лав, причем в эксгалляциях побочных кратеров Ga был больше приурочен к высокотемпературным, а в андезитах (Шевелуча и Безымянного) содержался как в высокотемпературных, так и низкотемпературных конденсатах. По-видимому, галлий переносился в газовой фазе с галоидами и сульфатами; в эксгалляциях паровых фумарол базальтовой лавы галлий не был обнаружен.

Выводы

Многолетние систематические наблюдения за фумарольной деятельностью побочных кратеров Ключевского вулкана и большой аналитический материал позволяют сделать следующие выводы.

1. Лава, излившаяся из эффузивных побочных кратеров Ключевского вулкана, неравномерно обогащена летучими компонентами.

2. Базальтовая лава этих кратеров, расположенных на более низком гипсометрическом уровне (Туйла, Билюкай, Былинкиной) больше обогащены летучими, и их фумарольная деятельность более длительна (10—20 лет).

3. Андезито-базальтовая лава кратеров, расположенных на более высоком гипсометрическом уровне (Апахончич, Белянкина, Вернадского, Кржижановского) бедна летучими, и их фумарольная деятельность кратковременна (1—3 год).

4. Температурный режим и характер фумарольной деятельности побочных кратеров Ключевского вулкана определялся составом лавы и ее обогащенностью летучими. Взаимоотношения между активностью вершинного кратера вулкана, сейсмичностью и повышением фумарольной деятельности неясны. Длительное сохранение температуры фумарол обусловлено наличием газов в лаве, которые способствуют переносу тепла и поддерживают окислительные процессы, вызывая вторичный разогрев лавы.

Периодическое повышение температуры фумарол на кратерах Заварицкого и Туйла совпало с усиленной сейсмичностью и активностью Ключевского вулкана (1948—1949 гг.). Извержение из вершинного кратера в 1954 г. значительных изменений в температурном и газовом режиме не оказало. Оно не сопровождалось сейсмическими явлениями.

5. Состав вулканических газов зависит от характера магматических эксгаляций и проявлений магмы на поверхности Земли в виде эффузивных и эксплозивных образований. При излиянии лавы на поверхность газы выделяются непосредственно из свежей лавы и имеют существенно галоидный характер. Эксгаляций эксплозивных кратеров поступают из глубин через толщу старых лав, вступают в реакции, и первоначальный состав их изменяется. Эксгаляции эксплозивных кратеров имеют резко выраженный сольфатарный характер.

6. В составе вулканических газов пароксизмального и поствулканического периодов преобладает водяной пар—65—98% объемных).

7. Из других газовых компонентов первое по количеству место занимают газы группы углерода; в высокотемпературную стадию количество окиси углерода достигает 30—40%, в поствулканический период CO_2 - 80—95%.

8. Существенным компонентом вулканических газов является водород, который в высокотемпературных газах составляет 30—60%.

В связи с преобладанием H_2 и CO высокотемпературные газы приобретают восстановительный характер.

9. Газы группы серы в эксгаляциях андезито-базальтовой лавы

побочных кратеров определены в виде S, H₂, SO₂, SO. Соотношение H₂S/SO₂ переменное и меняется вследствие окислительно-восстановительных процессов.

10. Базальтовые и андезито-базальтовые лавы Ключевского вулкана обогащены хлором и фтором в виде HCl, HF, SiF₄.

11. Наибольшие количества галоидов выделяются в момент пароксизма; эти газы выносятся с лавой за пределы кратера. Лавовые массы потоков длительное время дистиллируют HCl.

12. Аналитические данные показали, что для лавовых потоков характерен хлор, причем количество HCl в газах и ионов Cl⁻ в конденсатах часто значительно выше, чем в эксгаляциях шлаковых конусов (см. табл. 1, 2, 3, 8, 9, 10).

13. Состав эксгаляций одного и того же вулкана меняется по мере остывания лавы и активности вулкана. На первых этапах состояния лавы происходит наиболее интенсивная дистилляция летучих. Эти эксгаляции обогащены галоидными газами, водородом и окисью углерода.

14. При дальнейшем остывании лавы (300—420°) сокращается количество галоидных газов, в газовой составляющей увеличивается роль сернистых и углекислых газов.

15. Затем уменьшается содержание газов серы, и состав газа становится существенно углекислым.

16. В последнюю стадию остывания лавы (60—40°) выделяются пары воды, уступающие место воздуху, почти лишенному их.

17. Химический состав и степень минерализации конденсатов газов зависит от изменения вулканических газов, отражающих определенную стадию остывания лавы.

18. Конденсаты высокотемпературной стадии представляют сложные растворы, обогащенные кислыми газами (HCl, HF, SO₂), которые обуславливают их ультракислый характер (pH > 1) и интенсивную миграцию труднолетучих. Общая минерализация при pH ниже 1 достигает величины выше 12 г/л.

19. По мере остывания лавы сокращаются выделения HCl, HF, уменьшается кислотность и минерализация конденсата, при pH=2 общая минерализация составляет 0,6—1,2 г/л, обуславливая хлоридно-сульфатный состав с незначительным содержанием железа и алюминия.

20. На более поздних этапах остывания базальтовой лавы — конденсаты газа представляют слабокислые растворы (pH=5—6). В этих условиях увеличивается роль углекислого газа, меняется состав катионов, преобладает кальций и магний. Конденсаты слабо минерализованы (0,2—0,3 г/л).

21. Таким образом, состав конденсатов фумарольных газов побочных кратеров Ключевского вулкана позволяет выявить в газовой фазе закономерности миграции из лавы и магмы труднолетучих.

22. Вынос летучих из базальта наиболее интенсивно происходит

на первом высокотемпературном этапе состояния лавы, и, вероятно, состав их близок к составу магматических летучих.

23. Многочисленные анализы газовой фазы показали, что вынос летучих из базальта осуществляется главным образом при участии хлора, причем даже в начальный период, обычно непродолжительный (1—2 года), галоиды выносятся в основной своей массе с водородом. В конденсате газа катионы водорода составляют 50—90 мг-экв %.

24. В более длительный поствулканический период вынос летучих осуществляется соединениями серы и парами воды.

25. На основании изложенного аналитического материала по вулканическому эксгаляциям участие галоидов в выносе труднолетучих, в отличие от взглядов Феннера и других авторов, нам представляется незначительным.

26. В результате пересчета петрогенных летучих элементов были получены весовые доли, которые составили десятые и сотые доли процента, хотя они представляют собой основную массу труднолетучих, а микроэлементы присутствуют в составе летучих в ничтожно малых количествах.

ЛИТЕРАТУРА

- Б а ш а р и н а Л. А. Исследование газообразных продуктов вулканов Ключевского и Швелуча. Бюлл. Вулканол. станции, 1949, № 16.
- Б а ш а р и н а Л. А. Исследование газообразных продуктов вулканов Ключевского и Швелуча в 1946—1947 гг. Бюлл. Вулканол. станции, 1953, № 18.
- Б а ш а р и н а Л. А. Наблюдения за состоянием фумарол побочных кратеров вулканов Ключевского и Швелуча в 1948—1949 гг. Бюлл. Вулканол. станции, 1953, № 19.
- Б а ш а р и н а Л. А. Фумарольные газы вулканов Ключевского и Швелуча. Труды Лабор. вулканол., вып. 13, 1958.
- Б а ш а р и н а Л. А. Вулканические газы на различных стадиях активности вулканов. Труды Лабор. вулканол., вып. 19, 1961.
- Б о р и с о в О. Г. Состояние фумарол действующих вулканов Ключевской группы и вулкана Швелуч за период с августа 1957 г. по октябрь 1958 г. Бюлл. Вулканол. станции, 1960, № 30.
- Б ы л и н к и н а А. А., Г о р ш к о в Г. С. Состояние вулканов Ключевской группы во второй половине 1949. Бюлл. Вулканол. станции, 1954, № 20.
- Б ы л и н к и н а А. А., Г о р ш к о в Г. С. Состояние Ключевского вулкана в январе — апреле 1950 г. Бюлл. Вулканол. станции, 1954, № 21.
- В л о д а в е ц В. И. Химический облик изверженных пород Камчатки. Бюлл. Вулканол. станции, 1939, № 5.
- И в а н о в И. З. Газы и температура фумарол Киргурич, Туйла и Биокось. Бюлл. Вулканол. станции, 1938, № 3.
- И в а н о в И. З. Исследование газообразных продуктов побочных вулканов Ключевской сопки и Швелуч. Бюлл. Вулканол. станции, 1938, № 4.
- И в а н о в И. З. Газы и возгоны побочных вулканов Ключевской сопки. Бюлл. Вулканол. станции, 1941, № 9.
- К у л а к о в В. С. Паразитные кратеры, возникшие в 1932 г. у подножия Ключевского вулкана на Камчатке. Зап. Ленингр. горного ин-та, вып. 8, 1934.

- Н а б о к о С. И. Газы и температура fumarol Туйлы в 1938 г. Бюлл. вулканол. станции, 1939, № 7.
- Н а б о к о С. И. Извержение Билукая, побочного кратера Ключевского вулкана, в 1938 г. Труды Лабор. вулканол. и камч. станции, вып. 5, 1947.
- Н а б о к о С. И. Новый побочный кратер Ключевского вулкана, прорвавшийся в октябре 1946 г. Бюлл. Вулканол. станции, 1949, № 16.
- Н е к р а с о в Б. В. Общая химия, 1955.
- П и й п Б. И. Состояние действующих вулканов Северной Камчатки с мая 1950 по октябрь 1951 г. Состояние действующих вулканов Северной Камчатки с ноября 1951 по октябрь 1952 г. Бюлл. Вулканол. станции АН СССР, 1954, № 21.
- П и й п Б. И. Образование нового побочного кратера Белянкина. Бюлл. Вулканол. станции, 1954, № 22.
- П и й п Б. И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944—1945 гг. и в прошлом. Труды Лабор. вулканол. вып. 11, 1956.
- С е л и в а н о в Л. О происхождении хлора и брома в соляной массе океана. Бюлл. Вулканол. станции, 1947, № 11.
- Т р о ц к и й А. Н. О химической природе продуктов возгона паразитических кратеров Ключевского вулкана. Изв. Гос. русск. геогр. об-ва, т. 69, вып. 3, 1937.
- A l l e n E. T. and Z i e s E. G. A chemical study of the fumaroles of the Katmai region — Nat. geogr. Congr., Techn. papers. 1, No. 2, 1923.
- A l l e n E. T. Chemical aspects of volcanism with a collection of the analyses of volcanic gases. Journ. Franclin Inst. v. 193, 1922.
- D a u A. L. and S h e p h a r d E. S. Conclusions a tirer de L'analyse des gas du cratere du Kilauea. Compt. rend., T. 157, 1913.
- P e r r e t E. The volcanic eruption at Teneriffe in the eutomn 1909. Zeit. L Vulkan», Bel. 1, H. 1, 1914.