

ХИМИЗМ И МЕТАЛЛОНОСНОСТЬ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ГАЗОВ И ПРОДУКТОВ ИХ РЕАКЦИЙ НА НОВЫХ ТОЛБАЧИНСКИХ ВУЛКАНАХ В 1975 г.

Толбачинское трещинное извержение, которое началось 6 июля 1975 г., явилось удобным объектом для изучения вулканических газов. В процессе извержения происходило образование шлаковых конусов и излияние жидких базальтовых лав в пределах Северного и Южного прорывов. В 1975 г. на Новых Толбачинских вулканах было опробовано более 30 газовых выходов, в результате удалось отобрать около 100 проб газов, 30 проб конденсатов, 200 образцов возгонов. В настоящей статье приводится только часть анализов и конденсатов, графики же построены по всем имеющимся в настоящее время данным.

Схема отбора газов и конденсатов (рис. 1) отвечала современному уровню (Sigvaldason, Ellison, 1968; Mizutani, Matsuo, 1959; Le Gem, 1972). В отборе возгонов применялась методика площадного опробования и разделения минералов в поле.

Пробы анализировались разными методами. Газы определялись методом хроматографии (Р.В. Гусева, А.М. Рожков) и масс-спектрометрии, водные растворы — методами "мокрой химии" (Н.А. Перетолчина, С.Н. Литасова), атомной абсорбции (Н.В. Резников, Л.П. Никитина, Г.Н. Аношин), полярографии (А.Н. Невзоров, Л.П. Никитина), фотометрии пламени (Ю.Д. Кузьмин, С.Н. Литасова), адсорбционно-комплексобразовательной хроматографии (Л.П. Никитина). Это позволило не только наиболее точно с большой чувствительностью определить состав экзгалазий, но и сравнить различные методы на одних и тех же очень специфичных и трудных для определения образцах, какими являются ультракислые сложные растворы вулканического происхождения.

Вулканические экзгалазии изучались на эксплозивно-эффузивном этапе извержения на Северном прорыве. Опробовались газовые выходы на лавовых потоках Первого конуса на стадии их консолидации и на лавовом потоке Второго конуса на стадии движения. На Южном прорыве изучение газов проводилось во время эффузивного этапа извержения. Газы и конденсаты отбирались из лавового потока на стадии излияния. Газы Южного прорыва относятся по происхождению к разряду магматических.

Магматические газы. Пробы магматических газов отбирались из трещин в тонкой корке (табл. 1, № 8, 9) или из-под козырька (табл. 1, № 10, 11) из застывшей лавы над истоками лавовых рек. Во время отбора пробы № 11 (см. табл. 1) исток лавовой реки продвинулся на 5–6 м вниз по рельефу, и газоотборная трубка была "закаптиврована" лавовой коркой так, что ее нижний конец оказался в лавовой реке значительно выше истока.

В некоторых из проб магматических газов, выделившихся из жидкой лавы на различных расстояниях от Южного конуса, определены максимальные для всех проб содержания HF , HCl , SO_2 , H_2S , H_2O . Некоторые образцы (см. табл. 1, № 9)

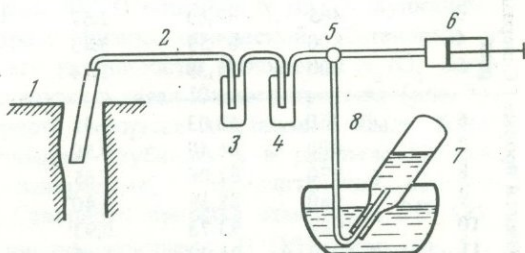


Рис. 1. Схема газоотборной системы

1 — керамическая трубка; 2 — фторпластовый шланг; 3 — барбатер с безметалловой водой; 4 — барбатер с раствором уксуснокислого кадмия; 5 — трехходовой кран; 6 — шприц; 7 — газоприемник с насыщенным раствором NaCl ; 8 — резиновый шланг

Таблица 1

Состав вулканических газов Толбачинского трещинного извержения (об. %) в 1975 г.

№	t, °C	Дата отбора	Вулканические газы без учета H ₂ O, O ₂ , N ₂					
			HF	HCl	SO ₂	H ₂ S	CO ₂	
Северный прорыв	1	500	16.VIII	0,94	2,55	0,03	0,29	89,19
	2	800	17.VIII	2,37	2,46	0,18	—	73,55
	3	485	26.VIII	1,71	4,42	0,01	—	87,10
	4	400	14.VIII	1,61	6,92	0,07	—	68,32
	5	900	22.VIII	2,61	4,84	0,02	—	36,12
Южный прорыв	6	750	18.X	0,69	3,17	0,38	—	90,57
	7	800	13.X	1,32	3,65	0,59	—	92,82
	8	990	15.XII	8,56	43,18	5,54	—	28,18
	9	980	16.XII	7,50	27,30	28,00	0,18	36,65
	10	1020	21.XII	0,04	21,00	5,32	0,54	30,51
	11	1020	22.XII	5,54	30,06	5,34	0,36	12,54

Таблица 1 (продолжение)

№	t, °C	Вулканические газы без учета H ₂ O, O ₂ , N ₂						
		CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	H ₂	NH ₃	
Северный прорыв	1	500	—	1,65	—	—	4,18	1,18
	2	800	2,10	12,08	0,48	—	1,75	5,08
	3	485	1,13	4,78	—	—	0,42	0,43
	4	400	3,42	14,10	—	—	3,62	1,94
	5	900	25,84	15,29	7,16	1,74	3,87	2,61
Южный прорыв	6	750	—	—	—	—	4,31	0,82
	7	800	—	—	—	—	—	0,29
	8	990	—	—	—	—	14,53	0,01
	9	980	—	—	—	—	0,30	0,05
	10	1020	—	—	—	—	42,56	—
	11	1020	—	—	—	—	46,16	—

Таблица 1 (окончание)

№	t, °C	Общий состав газов				N ₂ /O ₂	H ₂ O/H ₂ · 10 ⁻⁴	
		H ₂ O	Σ _B *	O ₂	N ₂			
Северный прорыв	1	500	81,83	4,30	0,04	13,83	345,5	0,04
	2	800	83,10	1,95	2,10	12,85	6,1	0,3
	3	485	87,63	2,62	0,48	9,27	19,1	0,9
	4	400	87,59	3,83	0,89	7,68	8,6	0,06
	5	900	75,39	2,54	1,40	20,67	14,1	0,07
Южный прорыв	6	750	66,03	0,42	4,03	29,52	7,3	0,3
	7	800	66,40	0,50	5,81	26,79	4,6	—
	8	990	82,06	1,65	2,57	12,82	4,6	0,03
	9	980	88,39	0,40	2,24	8,97	4,0	—
	10	1020	93,73	0,93	0,58	4,76	8,2	0,03
	11	1020	94,02	1,18	0,89	3,91	4,4	0,01

Примечание: 1, 2 — газы из фумарол на поверхности лавового потока из южной части подножия Первого конуса; 3, 4 — газы из фумарол на поверхности лавового потока из северной части подножия Первого конуса; 5 — газы из расселины между глыбами лавы на фронте движущегося лавового потока из Второго конуса; 6, 7 — газы из трещин в лавовом покрове над истоком лавовой реки (в 200 м от конуса); 8, 9 — газы из истока лавовой реки в 400 м от конуса; 10, 11 — газы из истока лавовой реки в 1000 м от конуса.

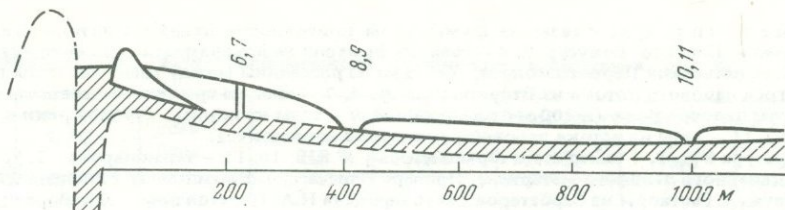
Температура № 1, 3, 4 замерялась термометром; № 8, 9, 10, 11 — термопарой; 2, 5, 6, 7 — по цвету раскаленного лавового материала. Прочерк означает, что компонент определялся, но не был обнаружен. Растворы из барбатов анализировала Н.А. Перетолчина. В отборе проб газов участвовал В.А. Ураков. Σ_B^* — сумма вулканических газов.

ответчали теоретически выведенному А. Эллисом (Ellis, 1957) составу при аналогичной температуре и давлении 1 атм., т.е. отвечали составу, в котором молекулярные отношения для системы $H_2O-CO_2-H_2-S_2$ равнялись 100 : 10 : 2 : 1. Как А. Эллис, так затем К. Краускопф (Krauskopf, 1957), С. Матсуо (Matsuo, 1960), В.П. Волков и Г.И. Рузайкин (1974) за основу равновесных расчетов принимали образцы, отобранные Шепердом и Т. Джаггаром из лавового озера Килауэа. Газы Южного прорыва и вулкана Суртсей в Исландии отличались от газов Килауэа повышенным содержанием водорода. Видимо, состав газов, выделившихся из жидких лав в удалении от жерла, как в случае Суртсея и Южного прорыва, должен отличаться от газов, выделившихся из жидкой лавы над жерлом (лавовые озера Килауэа, Нирагонго, Эрта-Але).

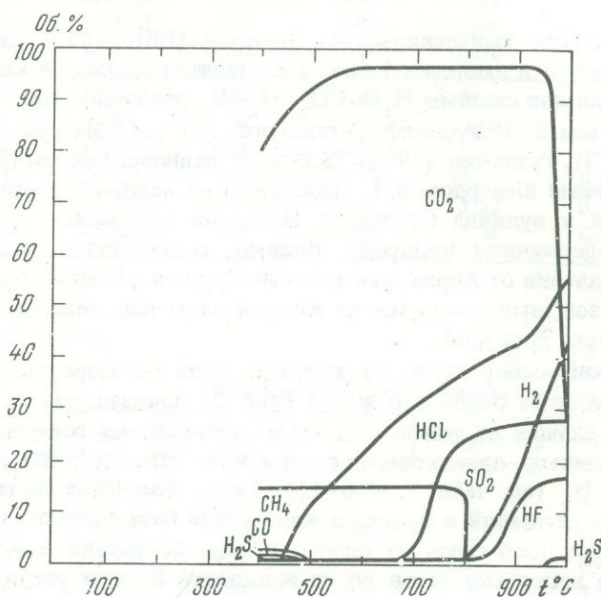
Систематический отбор газов из текущей лавы по мере миграции лавовых выходов все дальше от основного жерла (рис. 2) показал, что их средний состав изменялся: чем дальше от жерла — в газах уменьшалось содержание CO_2 , оставались приблизительно одинаковыми содержания HF , HCl , SO_2 , увеличивались H_2O и особенно H_2 (см. табл. 1, № 6–11). Такое изменение состава газов согласуется со схемой дегазации в процессе извержения базальтовых лав (Sigvaldason, 1974). При отборе проб газов из одного и того же истока лавовой реки было замечено, что за несколько часов до ее истощения в газах увеличивалось содержание H_2O , появлялся в значительных количествах H_2S (см. табл. 1, 8, 9), в конденсатах происходило образование коллоидной серы. Проба № 8 (см. табл. 1) была отобрана за двое суток, а № 9 — за несколько часов до истощения лавовой реки. Возможно, изменение состава газов было связано с уменьшением или увеличением интенсивности дегазации магмы в жерле, поскольку истощение одних и появление других лавовых рек в какой-то степени зависело от интенсивности извержения.

Фумарольные газы как на Южном, так и на Северном прорывах отличались от магматических меньшим содержанием HF , HCl , SO_2 , H_2S , H_2 , но большим содержанием H_2O , CO_2 , CO , CH_4 , (+ др. углеводороды; см. табл. 1). Состав газов новых Толбачинских вулканов является типичным для базальтовых вулканов Камчатки и Курильских островов, для которых установлен глубинный источник магмы (Меняйлов, 1976). Основным фактором, определяющим состав фумарольных газов, была температура. Колебания в составе фумарольных газов в зависимости от температуры (рис. 3) отвечали известным закономерностям (Башарина, 1963).

Однако состав газов зависел не только от температуры, но и от местоположения фумарол. При аналогичных температурах газы Северного и Южного прорывов отличались довольно заметно (рис. 4). Отношение N_2/O_2 в вулканических газах можно считать индикатором физико-химической обстановки в магматическом расплаве и показателем его глубинности. Отношение N_2/O_2 было высоким в газах Северного прорыва и низким в газах Южного прорыва (рис. 5), т.е. в магматическом расплаве Северного прорыва обстановка была более восстановительной, соответствующей большим глубинам, а в расплаве Южного прорыва, особенно на первых этапах извержения, — окислительной, соответствующей меньшим глубинам. В газах Северного прорыва отмечались CO , CH_4 (+ др. углеводороды), H_2 и высокие величины отношения H_2O/H_2 (см. рис. 5).



Р и с. 2. Схематический разрез Южного конуса; показаны условия отбора проб газов. Вертикальный масштаб не точен



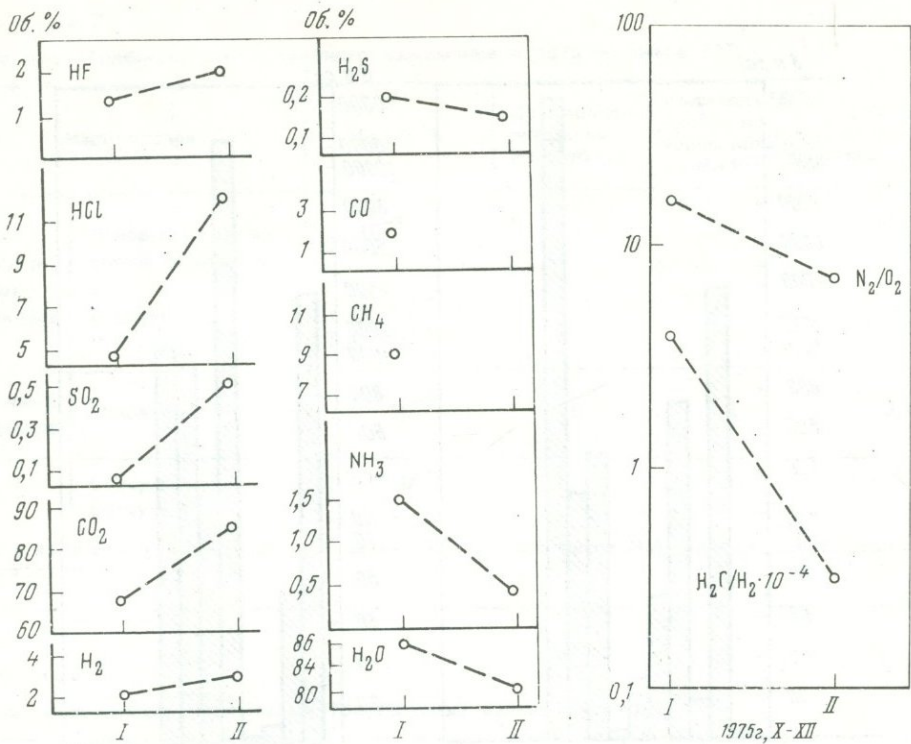
Р и с. 3. Зависимость между составом газов и температурой. Кривые проведены по максимальным концентрациям

Можно предположить, что магма Северного прорыва подошла к поверхности с большей глубины и с большей скоростью, чем магма Южного прорыва (Федотов и др., 1976).

Содержание Не в газах Северного прорыва было увеличено по сравнению с Южным прорывом (табл. 2), что подтверждает предположение о более глубинном источнике магмы Северного прорыва.

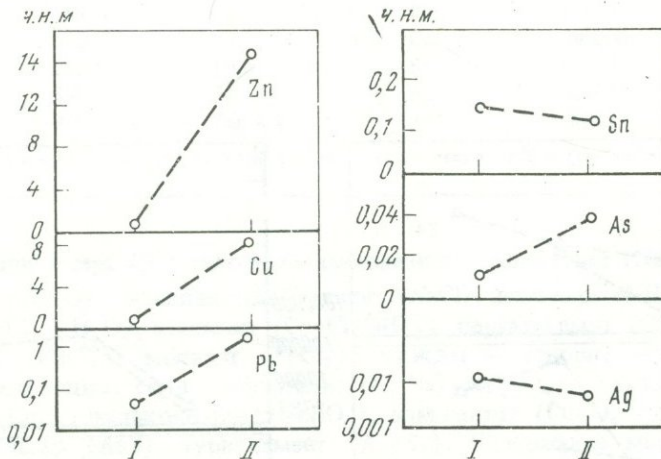
Конденсаты в вулканических газах. Отбор проб газов сопровождался отбором конденсатов. В конденсатах магматических газов определены: в десятках граммов на литр — хлор, в граммах на литр — фтор и сульфат, в сотнях миллиграммов — алюминий, натрий, калий, в десятках миллиграммов — кальций, магний, цинк (табл. 3). Молярное отношение вода: газы: металлы в пробках газов составляло 1000 : 63 : 0,1. Магматические газы Южного прорыва содержали в значительно больших количествах рудные элементы по сравнению с фумарольными газами Северного прорыва (рис. 6).

Фумарольные минералы. Состав возгонов на лавовых потоках Северного и Южного прорывов, интенсивность их образования и микроэлементный состав находились в тесной зависимости от состава газов и конденсатов. Если фумарольные газы на лавовых потоках Северного прорыва содержали относительно много HCl и NH₃, то около них происходило образование возгонов нашатыря и хлоридов Na, K, Fe. Основным фумарольным минералом возгонов около фумарол Северного прорыва был нашатырь. Микроэлементный состав возгонов показал обогащенность их медью, цинком, свинцом, серебром (рис. 7). Нашатыри и хлориды Cu, Na, K, Fe Южного прорыва были богаче микроэлементами, чем на Север-



Р и с. 4. Средний состав газов Северного (I) и Южного (II) прорывов по данным анализов 35 проб

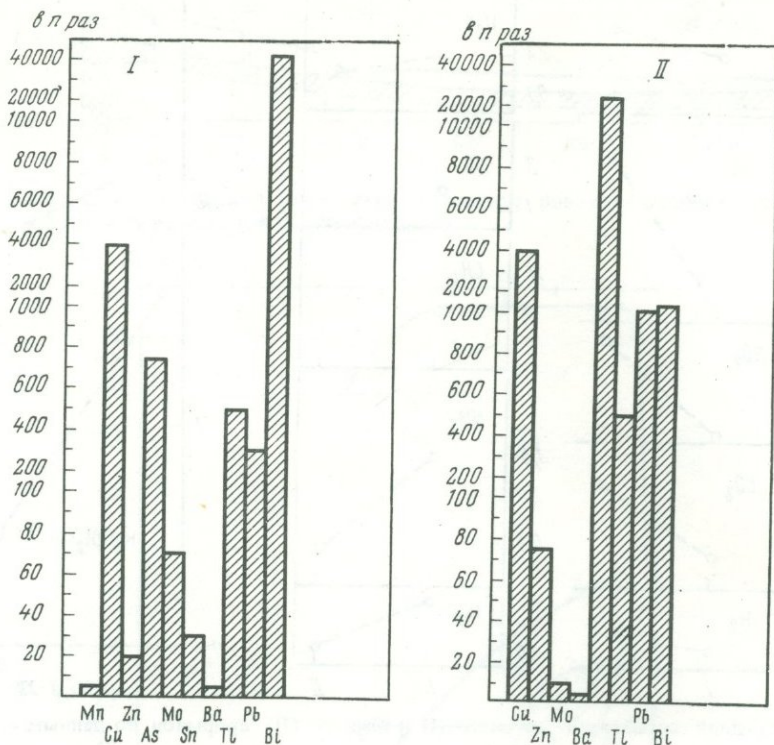
Р и с. 5. Средние величины отношения N_2/O_2 и H_2/H_2 в газах Северного (I) и Южного (II) прорывов по данным анализов 35 проб



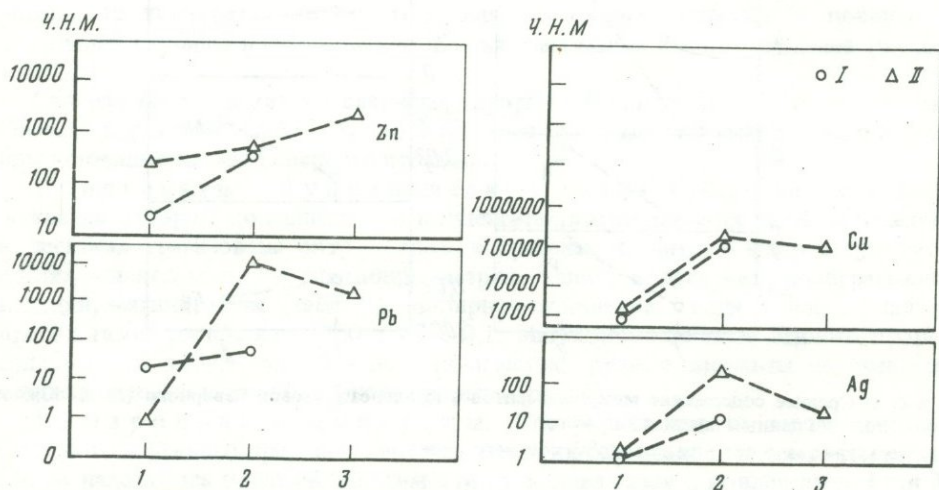
Р и с. 6. Среднее содержание микроэлементов в конденсатах газов Северного (I) и Южного прорывов по данным анализа 9 проб

Температура газов 485 и 980–1020°C, соответственно.

ном прорыве (рис. 8). Если в газах присутствовал сероводород (см. табл. 1, № 1), то около fumarol происходило образование самородной серы. Газы Южного прорыва в целом были значительно богаче по содержанию (см. табл. 1) SO_2 , и основным типом возгонив на Южном прорыве были высокотемпературные сульфаты, также обогащенные микроэлементами (см. рис. 8). Среди возгонив, отобранных на лавовых потоках Северного и Южного прорывов, были обнару-



Р и с. 7. Максимальные содержания микроэлементов в возгонах Северного (I) и Южного (II) прорывов по отношению к их кларкам в базальтах (по данным анализов 50 проб). По абсциссе указан кларк элемента по А.В. Виноградову (1962)



Р и с. 8. Средние содержания микроэлементов в возгонах Северного (I) и Южного (II) прорывов (по данным анализов 50 проб)

1 - нашатырь, t° в месте отбора - 150-350 $^{\circ}$ C; 2 - хлориды Na, K, Cu, Al, Fe, t° - 100- $<$ 500 $^{\circ}$ C; 3 - сульфаты Na, K, Cu, t° - 400-500 $^{\circ}$ C

Таблица 2

Не в газах Толбачинского трещинного извержения в 1975 — начале 1976 г.

Место отбора		He, об. %	Проанализировано на He проб	Количество проб, в которых обнаружен He	% в встречаемости He в газах
Северный прорыв	Лавовый поток из южной бокки, I конус	$1 \cdot 10^{-3}$	13	3	23,1
	II конус	$6,43 \cdot 10^{-3}$	—	—	—
	III конус	$5,45 \cdot 10^{-3}$	—	—	—
Южный прорыв	Лавовая река	$1,8 \cdot 10^{-3}$	26	1	3,8
—	Содержание в воздухе	$5,4 \cdot 10^{-4}$	—	—	—

Примечание. В отборе проб принимали участие также И.А. Марков, В.В. Пономарев, В.А. Ураков

Таблица 3

Состав конденсатов газов Новых Толбачинских вулканов (ч.н.м.)

Компоненты	1	2	Компоненты	1	2
pH	0,43	1,55	Fe	9,0	7,0
Cl	21347	2615	Al	202,5	24,3
F	2700	540	Zn	9,250	0,384
S	564	5,8	Pb	0,300	0,040
Na	700	29,2	Cu	14,000	3,500
K	240,5	10,2	Sn	0,030	0,013
Ca	3,4	7,8	Ag	0,002	0,006
Mg	9,3	7,5	As	0,020	0,010

Примечание. 1 — соответствует № 11; 2 — соответствует № 3 (см. табл. 1)

жены: самородная сера (S); галоидные соединения — ральстонит ($\text{Na}_x(\text{Mg}_x\text{Al}_{2x}) \cdot (\text{F}, \text{OH})_6 \cdot y(\text{H}_2\text{O})$), сильвинит (KCl), галит (NaCl), нашатырь (NH_4Cl), кремерзит ($\text{NH}_4\text{KFeCl}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$), атакамит ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$), параатакамит ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), меланоталлит (CuCl_2), молизит (FeCl_2); окислы — тенорит (CuO), гематит (Fe_2O_3); кислородные соли — афталит ($(\text{K}, \text{Na})_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$), эвхлорин ($\text{KNa}_2 \cdot \text{SO}_4 \cdot 2\text{CuSO}_4 \cdot \text{CuO}$), халькокианит (CuSO_4), халькантит ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$); сульфиды — реальгар (AsS), аурипигмент (As_2S_3). Содержание микроэлементов в возгонах было наиболее высоким по сравнению с конденсатами и водными вытяжками из пеплов (рис. 9).

Водные вытяжки из пеплов. Изучение водных вытяжек из пеплов дополняет сведения о составе эксгальций вулканов, особенно в эксплозивную стадию. Содержание микроэлементов в водных вытяжках из пеплов было минимальным по сравнению с возгонами и конденсатами (см. рис. 9), однако по характеру распределения микроэлементов они близки.

Таким образом, эксгальции Новых Толбачинских вулканов, судя по составу конденсатов, возгонов, водных вытяжек из пеплов, содержат в повышенных количествах Cu, Zn, Pb, Ag, Sn. В этом — сходство эксгальций Новых Толбачинских вулканов с эксгальциями и гидротермами активных вулканов Камчатки и

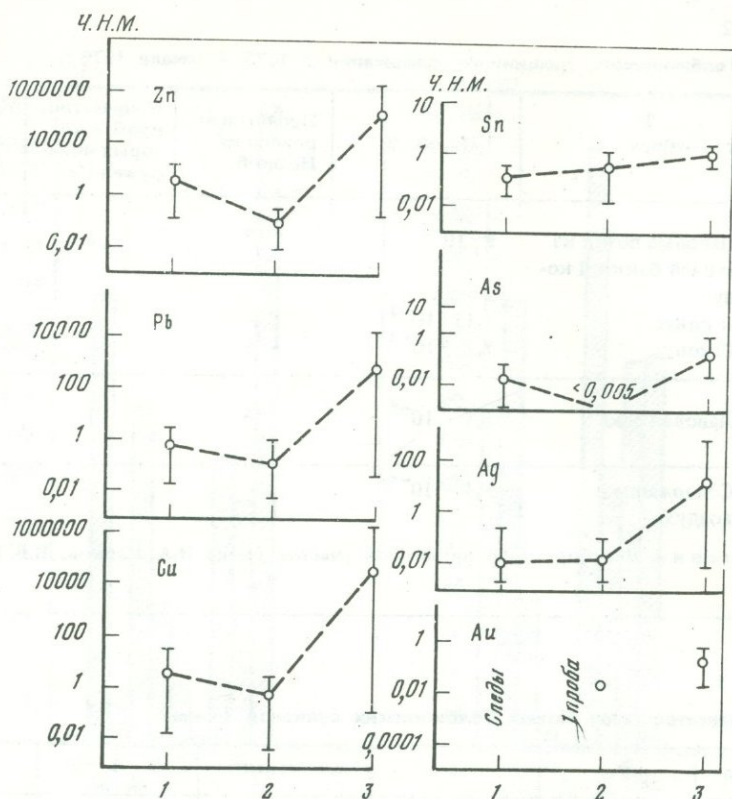


Рис. 9. Средние содержания и пределы концентраций микроэлементов
 1 – в конденсатах ($n = 9$); 2 – в водных вытяжках из пеплов ($n = 20$); 3 – в возгонах ($n = 4$); n – количество определений

Курильских островов, которые обогащены тяжелыми металлами (Меняйлов, Никитина, 1974; 1976).

В заключение нам хочется еще раз остановиться на основных выводах, к которым мы пришли при изучении эксгаляций и продуктов их реакций на Толбачинском трещинном извержении.

1. Обогащение газов Новых Толбачинских вулканов HF, HCl, H₂, CH₄, высокое отношение N₂/O₂ и H₂O/H₂ говорят о глубинном источнике магмы.

2. Характер отношений N₂/O₂ и H₂O/H₂ и содержаний H₂, CH₄ (+ др. углеводороды), CO, He в газах Северного и Южного прорывов предполагает более глубинный источник магмы Северного прорыва и менее глубинный – для магмы Южного прорыва.

3. Металлогеническая специализация эксгаляций Новых Толбачинских вулканов характерна для эксгаляций и гидротерм активных вулканов.

ЛИТЕРАТУРА

- Башарина Л.А. Эксгаляции побочных кратеров Ключевского вулкана на различных стадиях остывания лавы. – В сб.: Вулканизм Камчатки и некоторых других районов СССР. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 169–227.
- Волков В.П., Рузайкин Г.И. Математическое моделирование базовых равновесий в вулканическом процессе. М., "Наука", 1974. 150 с.
- Меняйлов И.А. Состав газов фумарол вулканов Ключевской группы в зависимости от состояния их активности. – В сб.: Глубинное строение, сейсмичность и особенности современной деятельности Ключевской группы вулканов. Владивосток, Дальневосточн. книжное изд-во, 15 с.
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П. Цинк и свинец в газах и водах вулкана Эбеко и Паужетского месторождения. – В сб.:

- Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма. Новосибирск, "Наука", 1974, с. 103–110.
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П.* Zn, Cu, Pb, Cd в фумарольном и гидротермальном паре. — Бюл. вулканол. станций, 1976, № 52.
- Федотов С.А. Горельчик В.И., Степанов В.В.* Сейсмические данные о магматических очагах, механизме и развитии базальтового трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. на Камчатке. — Докл. АН СССР, 1976, т. 228, № 6, с. 1407–1410.
- Ellis A.Y.* Chemical equilibrium in magmatic gases. — Am. J. Sci., 1957, v. 255, N 6, p. 416–430.
- Le Gern F.* Etudes dynamiques sur la phase gazeuse eruptive. — Rapport CEA-R4383. Paris, 1972, 169 p.
- Krauskopf K.B.* The heavy metals content of magmatic vapour at 600°C. — Econ. Geology, 1957, v. 52, p. 786–807.
- Matsuo S.* On the origin of volcanic gases. — J. Earth. Sci., Nagoya Univ., 1960, v. 8, N 2, p. 222–245.
- Mizutani Y., Matsuo S.* Successive observation of chemical components in the condensed water from a fumarole of volcano Showa-Shinzan. — Bull. Volcanol. Soc. Japan, 1959, v. 3, N 2, p. 119–127.
- Sigvaldason E., Ellison G.* Collection and analysis of volcanic gases at Surtsey, Iceland. — Geochim. et Cosmochim. Acta, 1968, v. 32, N 8, p. 797–805.
- Sigvaldason E.* Chemical composition of volcanic gases. — In: Phys. Volcanol. Amsterdam e.a., 1974, p. 215–240.