

О ВЛИЯНИИ ИЗВЕРЖЕНИЯ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД (на примере района извержения Толбачинских вулканов на Камчатке)

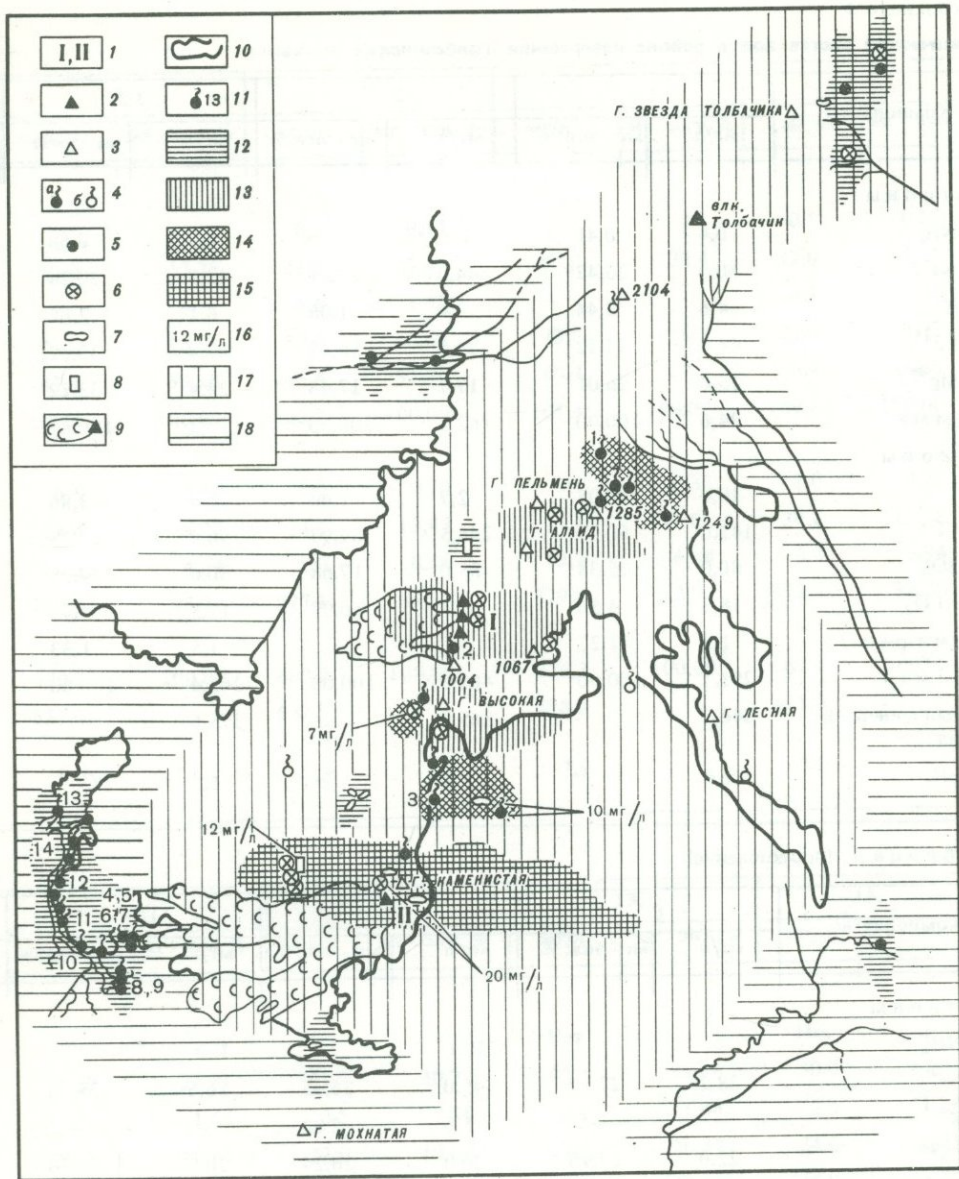
Крупное трещинное извержение Толбачинских базальтовых вулканов продолжалось с 6 июля 1975 г. по 10 декабря 1976 г. Первая группа из трех вновь образованных шлаковых конусов Северного прорыва действовала до 16 сентября 1975 г. Извержение было существенно эксплозивным. 17 сентября 1975 г. образовался второй — Южный прорыв, действовавший до 10 декабря 1976 г. Здесь преобладала эффузивная деятельность. Общее количество ювенильного материала, поступившего на поверхность за время извержения оценивается в $2,78 \cdot 10^9$ т, в том числе: лавового материала — $1,44 \cdot 10^9$ т ($0,72 \text{ км}^3$), пирокластического материала — $1,28 \cdot 10^9$ т ($1,085 \text{ км}^3$), летучих — $0,06 \cdot 10^9$ т ($72,28 \text{ км}^3$) (см. статью Е.К. Мархинина в наст. сборнике).

Значительная часть пепла и газообразных продуктов рассеяна на большие расстояния, и их воздействие на состояние гидросферы не поддается количественным оценкам. В данном сообщении обсуждается влияние поступившего на поверхность глубинного вещества на химический состав поверхностных и подземных вод непосредственно в районе извержения.

Район извержения — южное подножие вулкана Толбачик — представляет собой лавовый покров, образованный за последние 2000–3000 лет рядом трещинных извержений, аналогичных последнему (см. статью О.А. Брайцевой и др. в наст. сборнике). Площадь лавового щита 800 км^2 , мощность достигает 100 м. Он сложен потоками покровных и глыбовых базальтовых лав, сильно трещиноватых, с многочисленными пустотами и пещерами протяженностью сотни метров. Лавы обладают чрезвычайно высокой водопроницаемостью. Действительные скорости движения подземных вод в таких комплексах вулканических пород могут достигать, по оценкам Ю.Ф. Манухина (1972), 800 м/сут. Голоценовый лавовый покров лежит выше местного базиса дренирования и является областью питания и транзита для мощного потока грунтовых вод, разгружающегося вдоль фронта щита и дающего начало рекам: Левый Толбачик, Озерная. Выходы источников линейные и концентрированные, дебиты достигают 100 л/сек. Здесь же можно предполагать и разгрузку более глубоких водоносных горизонтов.

В пределах самого лавового щита нет постоянных водотоков, однако прослой тонкой переотложенной пирокластики образуют местами локальные водоупоры. Там появляются источники с дебитами до 2 л/сек, ручейки протяженностью 10–20 м и небольшие озера (рисунок). Их питание, как правило, обеспечивают снежники, сохраняющиеся до конца лета.

В 1976 г. в пределах Толбачинского лавового щита нами были опробованы все водопроявления: источники, реки, озера, снежники, атмосферные осадки (дождь). Наблюдения были сделаны в период, когда эффузивная деятельность вулкана уже преобладала над эксплозивной, взрывы в кратере были редкими и относительно слабыми, количество пирокластики и газов резко сокращалось. Результаты наиболее характерных анализов обобщены в табл. 1 и 2 (рассмотрен макрокомпонентный состав). Как видно из табл. 2, влияние извержения проявилось прежде всего в увеличении минерализации атмосферных осадков, а также в изменении соотношений катионов и анионов. Обычно осадки в этом районе имеют минерализацию от 20 до 60 мг/л и гидрокарбонатный натриево-кальциевый состав. Во время же извержения минерализация осадков достигает 300 мг/л, снижается pH, возрастают относительные и абсолютные количества кальция и магния, в анионной части появляется хлор. Отмечаются высокие (необычные для Камчатки) содержания фтора, достигающие в снежнике у конуса Южного прорыва 20 мг/л. Распределение содержаний F^- отоброжено на схематической карте (см. рис.).



Гидрохимическая схема южного сектора подножья вулкана Толбачик; Составили Т.П. Кирсанова, Л.М. Юрова, Г.Ф. Пилипенко, 1976 г., июль, август

1 — конусы Северного и Южного прорывов; 2 — конусы прорывов Большого трещинного Толбачинского извержения и Плоский Толбачик; 3 — конусы прежних извержений; 4 — источники: а — опробованные, б — неопробованные; 5 — места отбора проб воды в реках; 6 — опробованные снежники; 7 — озера; 8 — пещеры в лавовых потоках; 9 — лавовые потоки Северного и Южного прорывов; 10 — границы кекуров; 11 — номер анализа в таблице. Содержание F в водопрооявлениях и осадках (мг/л): 12 — 1,5; 13 — от 1,5 до 5; 14 — от 5 до 10; 15 — от 10 до 20; 16 — максимальные содержания F (мг/л) в отдельных водопрооявлениях. Площади распространения гидрохимических типов в вод: 17 — Cl-Ca-воды; 18 — HCO₃-Mg-Ca-воды

Устанавливается закономерное сокращение минерализации осадков и воды снежников по мере удаления от центра извержения (табл. 2). Сходство химических составов вод и атмосферных осадков в пределах лавового щита (табл. 3) указывает, что питание поверхностных и грунтовых вод происходит за счет атмосферных осадков. Об этом же свидетельствует и отношение rF/rCa (табл. 4). Как видно из табл. 4, наиболее характерное для атмосферных осадков отношение

Таблица 1

Химический состав вод в районе извержения Толбачинских вулканов

Компоненты	1		2		3	
	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %
Катионы						
NH_4^+	0,4	0,41	Нет	—	0,7	0,66
Na^+	30,0	26,42	44,0	23,01	42,0	30,24
K^+	4,6	2,44	3,4	1,08	6,1	2,66
Ca^{2+}	44,0	44,72	97,0	58,43	40,0	33,22
Mg^{2+}	15,6	26,01	17,7	17,48	24,4	33,22
Сумма	94,6	100,00	162,1	100,00	113,2	100,00
Анионы						
F^-	10,0	8,05	2,7	1,40	5,0	3,86
Cl^-	142,0	60,79	248,5	69,93	156,4	65,28
SO_4^{2-}	80,0	25,38	85,0	17,68	80,0	24,78
HCO_3^-	18,3	4,56	67,1	10,99	19,5	4,75
S суммарное	1,3	1,22	—	—	1,5	1,33
Сумма	251,7	100,00	403,3	100,00	262,4	100,00
Общая минерализация	346,3		565,4		375,6	
pH	6,0		7,0		6,3	

Таблица 1 (продолжение)

Компоненты	8		9		10	
	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %
Катионы						
NH_4^+	—	—	Нет	—	Нет	—
Na^+	38,2	27,10	45,0	26,45	16,6	25,36
K^+	—	—	5,8	2,02	—	—
Ca^{2+}	22,0	17,90	30,0	20,24	20,0	36,23
Mg^{2+}	41,3	55,00	46,4	51,29	12,9	38,41
Сумма	101,5	100,00	127,2	100,00	49,5	100,00
Анионы						
F^-	0,5	0,25	1,0	0,72	1,1	2,13
Cl^-	20,3	0,63	39,8	16,12	11,4	11,35
SO_4^{2-}	17,3	5,42	4,0	1,15	3,0	1,42
HCO_3^-	346,5	85,70	347,7	82,01	136,4	85,10
S суммарное	—	—	—	—	—	—
Сумма	384,5	100,00	392,5	100,00	150,9	100,00
Общая минерализация	486,0		519,7		200,4	
pH	7,5		7,3		7,1	

4		5		6		7	
мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %
—	—	0,2	0,14	—	—	0,1	0,16
40,0	23,75	42,5	25,41	42,0	29,4	42,0	28,71
—	—	4,6	1,65	—	—	4,1	1,74
22,0	16,8	30,0	20,60	23,0	18,2	25,0	19,72
47,4	59,45	46,4	52,20	40,4	52,5	38,4	49,68
109,4	100,00	123,7	100,00	105,4	100,00	109,6	100,00
0,6	0,18	1,0	0,70	0,5	0,32	1,0	0,78
24,4	9,28	34,1	13,43	27,1	11,6	34,1	15,08
17,3	4,84	2,0	0,56	19,2	6,08	3,0	0,94
387,9	85,7	327,1	85,31	329,4	82,0	323,3	83,20
—	—	—	—	—	—	—	—
430,3	100,00	409,2	100,00	376,3	100,00	361,4	100,00
555,4		532,9		498,2		471,0	
8,05		7,3		7,5		7,1	

11		12		13		14	
мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %
Нет	—	Нет	—	Нет	—	Нет	—
41,2	29,51	41,2	30,37	44,2	35,56	30,0	27,31
3,9	1,64	3,5	1,56	3,1	1,48	2,4	1,26
20,0	16,39	22,0	19,03	22,0	20,37	24,0	26,21
39,0	52,46	34,2	48,44	28,1	42,59	26,9	46,22
104,1	100,00	100,9	100,00	97,5	100,00	83,3	100,00
1,1	0,95	1,0	0,88	—	—	—	—
35,5	15,82	34,1	16,87	34,1	15,73	25,6	14,88
3,0	0,95	4,0	1,41	2,0	0,66	4,0	1,65
317,2	82,28	280,6	80,84	311,1	83,61	246,5	83,47
—	—	—	—	—	—	—	—
356,8	100,00	319,7	100,00	347,2	100,00	276,1	100,00
460,9		420,6		444,7		359,4	
7,1		7,3		7,4		7,4	

Таблица 1 (окончание)

Компоненты	15		16		17	
	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %
Катионы						
NH ₄ ⁺	0,2	0,11	Нет	—	Нет	—
Na ⁺	44,2	21,45	18,0	12,87	35,5	30,6
K ⁺	8,5	2,46	7,0	2,97	4,0	1,38
Ca ²⁺	90,0	50,48	60,0	49,50	40,0	39,7
Mg ²⁺	28,0	25,70	26,6	34,66	17,1	27,72
Сумма	171,0	100,00	110,6	100,00	95,6	100,00
Анионы						
F ⁻	19,0	11,01	15,0	10,72	6,0	5,72
Cl ⁻	227,2	70,43	191,7	73,27	10,65	54,4
SO ₄ ²⁻	52,0	11,89	44,0	12,48	96,0	36,2
HCO ₃ ⁻	36,6	6,61	15,8	3,53	12,2	3,62
S суммарное	—	—	—	—	—	—
Сумма	334,8	100,00	266,6	100,00	220,7	100,00
Общая минерализация	505,8		377,2		316,3	
pH	6,0		6,0		—	

Примечание. 1 — источник в воронке на лавовом потоке Клешня (август); 2 — источник (грунтовое высачивание), высота 1004 (июль); 3 — источник Магуськина (август); 4, 5 — Амрокские источники, южный берег (4 — апрель, 5 — август); 6, 7 — Амрокские источники, северный берег (6 — апрель, 7 — август); 8–13 — Озерновские источники (8 — апрель, 9–13 — август); 14 — р. Озерная в 12 км от истоков (август); 15 — озеро в пещере Южного прорыва (август); озеро у горы Каменистой (16 — июль, 17 — сентябрь) (определение содержаний F⁻ проводилось ионоселективным электродным методом с LaF₃, предложенным В.П. Розе и А.В. Гордиевским).

гF⁻/гСа сохраняется для всех водопроявлений на лавовом щите в отличие от вод высокодебитных источников на его периферии, в частности Озерновских и Амрокских (табл. 1, 4; рис. 1). По составу эти воды, областью питания для которых является лавовый щит, — типичные гидрокарбонатные воды выщелачивания молодых базальтовых лав, но их минерализация несколько выше, она достигает 500 мг/л. Невысокие содержания в их составе F⁻, по-видимому, можно объяснить комплексобразованием при повышении pH и содержания Mg и Са в процессе движения воды от областей питания к очагам разгрузки (Крайнов, Петрова, 1976). Ни в одном из источников периферии лавового щита нами не обнаружено характерных признаков подмешивания термальных вод (повышенные температуры, заметное увеличение содержаний Cl, Na, K). Возможно, в этом специфическом районе (базальтовый вулканизм трещинного типа) за поисковые критерии на термальные воды надо принимать такие параметры, как ион HCO₃⁻ и H₄SiO₄ в воде и H₂ в газе, характерные для термальных вод (высоких и энергетических параметров) Исландии.

Интересно сопоставить химический состав воды одного из источников, питающих оз. Амрок, типичного для Озерновской и Амрокской групп источников (см. табл. 1), с составом воды, отобранной у фронта лавового потока Южного прорыва, вплотную подошедшего к озеру в декабре 1975 г. (табл. 5, см. рис. 1). В результате выщелачивания из свежей лавы вдвое увеличивалась минерализация, а также содержание Mg²⁺, Ca²⁺, HCO₃⁻, K, тогда как содержание хлора не изменилось.

Таблица 2

Состав атмосферных осадков в пределах лавового щита южного подножья вулкана Толбачик

Компоненты	1		2		3		4	
	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %
Катионы								
NH ₄ ⁻	1,30	24,14	0,5	13,64	1,2	2,27	2,0	3,46
Na ⁺	Сл.	—	0,3	4,55	7,0	9,74	15,4	21,07
K ⁺	0,6	6,90	Сл.	—	4,1	3,57	—	—
Ca ²⁺	3,0	51,72	3,0	68,18	20,0	32,47	30,0	47,17
Mg ²⁺	0,6	17,24	0,4	13,63	19,5	51,95	10,9	28,30
Сумма	5,50	100,00	4,2	100,00	51,8	100,00	58,4	100,00
Анионы								
F ⁻	0,6	6,94	0,6	4,76	5,0	9,08	8,3	15,60
Cl ⁻	11,4	44,44	7,1	31,75	78,1	76,92	56,8	56,74
SO ₄ ²⁻	Нет	—	4,0	12,70	—	—	20,0	14,89
HCO ₃ ⁻	15,9	36,11	14,6	38,10	19,5	11,19	29,0	12,77
S суммарное	1,4	12,51	1,3	12,69	1,4	2,80	—	—
Сумма	29,4	100,00	27,7	100,00	104,0	100,00	107,1	100,00
Общая минерализация	34,9		31,9		155,8		165,5	
pH	4,7		6,5		5,3		6,0	

Примечание. 1 — СВ подножие Плоского Толбачика, высота 1700 м, 9.VIII. 1976 г.; 2 — ур. Пески, южное подножие, высота 1400 м, 19.VIII. 1976 г.; 3 — гора Высокая, 25. VII. 1976 г. 4 — Южный прорыв, лагерь вулканологов, 21.VII. 1976 г.

Итак, химический состав вод лавового щита прямо указывает и на атмосферное происхождение самих вод, и на вулканический источник их минеральной составляющей. Растворимые вещества могли быть захвачены водами из газового облака вулкана или из пирокластического материала (как в воздухе, так и на Земле).

Водные вытяжки из пеплов и шлаков показывают, что каждый килограмм пирокластики содержит от 300 до 3400 мг легкорастворимых веществ (см. статью И.А. Меняйлова, Л.П. Никитиной в настоящем сборнике, табл. 5).

Таким образом, в первом приближении можно оценить количество растворимых веществ, поступающих в подземные воды с атмосферными осадками в непосредственной близости от извержения; для этого зададимся площадью 200 км², на которой проведены наблюдения. Годовое количество осадков в этом районе 800 мм, минерализация осадков (дождь, снежники, см. табл. 2, 3) в среднем близка к 100 мг/л. Общее количество растворенных веществ, поступивших с атмосферными осадками за время извержения (19 месяцев), составит $2,2 \cdot 10^4$ т, в том числе Cl — $1 \cdot 10^4$, F — $2 \cdot 10^3$, S — $4 \cdot 10^3$ т.

Сопоставить эти цифры с общим количеством воднорастворимых веществ, выброшенных за время извержения, можно лишь весьма приблизительно, так как остается неизвестным состав эруптивных газов. Имеющиеся анализы газов, отобранных в лавовых потоках на значительном удалении от эруптивных центров, могут лишь качественно характеризовать состав вулканических газов. Однако самые общие оценки могут быть сделаны. Принимая количество газообразных продук-

Таблица 3

Типы химического состава вод в районе вулкана Толбачик (по данным 104 анализов)

Место отбора проб воды	Тип водопроявления	Общая минерализация, г/л	Формула химического состава вод	pH
Южный прорыв	Атмосферные осадки (дождь)	0,17–0,30	$Cl_{57-65}SO_{415-20}F_{9-16}$ $Ca_{44-47}Mg_{28-30}Na_{21-25}$	5,4–6,0
Северный прорыв (гора Высокая)	Дождь	0,03–0,16	$Cl_{23-28}SO_{40-61}HCO_{30-26}F_{2-14}$ $Ca_{32-77}Mg_{8-63}NH_{42-22}Na_{2-10}$	3,8–5,7
Лавовый щит	Снежки	0,05–0,13	$Cl_{39-56}HCO_{310-45}F_{1-32}SO_{42-21}$ $Ca_{31-99}Mg_{0-51}Na_{1-23}NH_{40-5}$	4,4–6,2
То же	Озера	0,19–0,38	$Cl_{66-77}HCO_{37-20}SO_{42-20}F_{3-11}$ $Ca_{33-74}Mg_{5-35}Na_{13-26}$	6,0–6,8
"	Пещеры	0,36–0,50	$Cl_{61-71}SO_{412-25}F_{10-11}$ $Ca_{46-63}Mg_{12-25}Na_{21-33}$	6,0–6,4
"	Источники	0,13–0,6	$Cl_{54-90}SO_{417-34}HCO_{35-13}F_{1-13}$ $Ca_{33-73}Mg_{17-48}Na_{3-30}$	5,7–6,7
Оз. Амрок	"	0,46–0,89	$HCO_{382-91}Cl_{8-15}$ $Mg_{49-53}Na_{21-29}Ca_{20-21}$	7,2–7,3
Р. Озерная	"	0,31–0,52	$HCO_{361-68}Cl_{11-31}SO_{41-18}$ $Mg_{33-51}Na_{25-36}Ca_{16-36}$	7,2–7,4

Таблица 4

rF/rCa отношения в водах района Толбачинских вулканов

Тип водопроявления	Место нахождения	rF/rCa	Наиболее характерные отношения rF/rCa
Атмосферные осадки (дождь)	Северный прорыв, гора Высокая	0,08–0,35	0,20–0,22
Снежки	Северный прорыв	0,80–0,90	—
То же	Южный прорыв	0,90	—
"	Лавовый щит	0,17–0,62	—
Озера	То же	0,14–0,26	0,18–0,25
Воды лавовых пещер	"	0,22–0,25	0,22–0,25
Источники	Амрокские	0,03–0,04	0,03–0,04
	Озерновские	0,04–0,06	0,04–0,06

Таблица 5

Состав водных вытяжек из продуктов извержения Толбачинских вулканов

Компоненты	1		2		3	
	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %	мг/л	мг · экв, %
Катионы						
NH ₄ ⁺	0,2	0,56	0,01	0,01	2,6	1,22
Na ⁺	31,5	79,2	46,9	45,0	55,6	21,25
K ⁺	9,0	13,3	13,7	7,7	13,0	2,90
Ca ²⁺	2,4	6,94	37,1	40,7	50,0	21,95
Mg ²⁺	Нет	—	3,7	6,6	73,2	52,68
Сумма	43,1	100,00	101,4	100,00	194,4	100,00
Анионы						
F ⁻	1,5	4,55	15,2	14,4	1,2	0,51
Cl ⁻	10,6	17,05	56,7	28,90	34,1	8,12
SO ₄ ²⁻	28,8	34,10	134,5	50,4	2,0	0,34
HCO ₃ ⁻	47,6	44,3	21,3	6,3	656,4	91,03
Сумма	88,5	100,00	212,5	100,00	694,9	100,00
Общая минерализация	131,6	—	313,9	—	889,3	—
pH	7,84	—	6,4	—	7,3	—

Примечание. 1 — шлак у конуса Южного прорыва, 24.IX. 1976 г. 2 — пепел с палатки в лагере вулканологов, Южный прорыв, 6.IX. 1976 г. 3 — вода у фронта лавового потока, достигшего оз. Амрок, 15.VIII. 1976 г

Таблица 6

Количество легкорастворимых веществ, поступивших в гидросферу, т

Механизм поступления компонентов в гидросферу	Компоненты, т		
	Cl	F	S
Поступило на поверхность с газообразными продуктами	$2 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$
Выпало с осадками	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^*$
Выпало с осадками и было поглощено из пироклаستيку	$1,1 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^3$	$4,2 \cdot 10^3$
Внесено источниками Амрокскими и Озерновскими	$9 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^3$

Примечание. Расход воды в р. Озерной (август 1976 г.) составляет $\sim 5 \text{ м}^3/\text{сек.}$

тов равным $6,0 \cdot 10^7$ (см. статью Е.К. Мархина в настоящем сборнике) и приписывая им усредненный состав газа (объемн. %) лавовых потоков Толбачинских вулканов, по данным И.А. Меняйлова (1976): H₂O — 95; HF — 0,04; HCl — 0,2; SO₂ — 0,05; H₂S — 0,005; CO₂ — 0,5; N₂ — 0,4; H₂ — 0,4, находим следующие соотношения (табл. 6).

Аналогичные оценки могут быть сделаны и для других элементов. Несмотря на приблизительность количественных оценок, можно сделать следующие выводы.

1. Существенное влияние извержения на состав поверхностных и подземных вод ограничивается небольшой площадью.

2. Большая часть газообразных продуктов рассеивается вдали от места извержения, не вызывая резких отклонений в химическом режиме гидросферы.

3. Район южного подножия вулкана Толбачик можно считать перспективным на термальные воды, для поисков которых следует использовать геофизические методы разведки. Применение поисковых геохимических критериев, характерных для геотермальных районов Исландии, в этом районе затруднено из-за интенсивного и обильного разбавления грунтовыми водами (модуль поверхностного питания — $25,8 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$, модуль подземного стока — $50 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$).

ЛИТЕРАТУРА

Гидрогеология СССР. Камчатка. Курильские и Командорские острова, т. XXIX. М., 1972, с. 120–121.

Крайнов С.Р., Петрова Н.Т. Фтороносные подземные воды, их геохимические особенности и влияние на биогеохимические процессы. — Геохимия, 1976, № 10, с. 1533–1541.

Манухин Ю.Ф. Особенности водообмена и гидродинамическая зональность геотермаль-

ных районов области современного вулканизма (на примере Камчатки). Автореф. канд. дис. Л., 1975, с. 1–29.

Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Гусева Р.В., Шапарь В.Н. Результаты отбора и анализа вулканических газов на Толбачинском трещинном извержении в 1975 году. — Докл. АН СССР, 1976, т. 230, № 2, с. 440–442.