



УДК 551.21

Н. А. Малик

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: malik@kscnet.ru*

Извержение вулкана Кизимен 2010–2013 гг.: результаты исследования водных вытяжек из пеплов, природных вод и постэруптивных газов

Приведены результаты исследования водных вытяжек из пеплов, отобранных во время извержения вулкана Кизимен в 2010–2011 гг., природных вод в районе извержения в 2011–2013 гг., вулканических газов, отобранных на новообразованном привершинном фумарольном поле в октябре 2014 г. Показано изменение состава водорастворимого комплекса пеплов в процессе эксплозивной стадии извержения; относительно высокое содержание серы и хлора, и низкое — фтора в вытяжках из пеплов и постэруптивных газах и конденсатах газа.

Введение

Вулкан Кизимен находится в центральной части Восточного вулканического пояса Камчатки в зоне сочленения Щапинского грабена и горста хр. Тумрок, осложненной системой сбросов северо-восточного простирания. Вулкан представляет собой одиночный конус высотой 2376 м, сложный по морфологии, с выступами экструзивных куполов и крупно глыбовыми мощными лавовыми потоками. Породы первых трёх этапов эруптивной активности вулкана, начавшейся около 11 тыс. л. н., представлены роговообманковыми андезитами и дацитами; последний четвертый этап отличался излиянием лавовых потоков андезибазальтов и базальтов [7]. Для вулкана характерны эксплозивно-экструзивно-эффузивные извержения, т. к. единственное извержение вулкана Кизимен, отмеченное в историческое время, происходило в 1928–1929 гг. [10] и в то время не изучалось, то начавшаяся в октябре 2010 г. его новая активизация является первой возможностью для изучения свежих изверженных продуктов этого вулкана.

Извержение, начавшееся в октябре 2010 г. с образования 2-х газовых выходов и небольших газо-пепловых выбросов из них, 10 декабря перешло в активную эксплозивную стадию: практически непрерывно отмечались пепловые шлейфы разной длины и насыщенности, даже при слабых выбросах пирокластики — формирование пирокластических потоков (ПП) преимущественно в юго-восточном секторе вулкана; их отложения вызвали проходжение мощного лахара по долине руч. Поперечный 13 декабря 2010 г. [9]. В конце февраля 2011 г. на восточном склоне вулкана был замечен лавовый поток длиной около 200–300 м, интенсивность эксплозивной деятельности несколько снизилась, а в декабре 2011 г. прекратилась. В апреле-мае 2012 г. излияние лавы сократилось, а на кромке

кратера начали выжиматься жесткие блоки. Эта экструзивная стадия извержения, сопровождалась раскалёнными лавинами и иногда более крупными обрушениями, изредка дополнялась кратковременными эксплозиями [5]. С октября 2013 г. активность вулкана снизилась: при работе в районе вулкана 12–15 октября и по видео наблюдениям (северный склон) с 1 октября отмечается только парогазовая активность, хотя, по данным КФ ГС, до конца октября регистрировались сейсмические события, интерпретируемые как «возможные слабые газо-пепловые выбросы и сход лавин», а до конца ноября — свечение и термальная аномалия над вершиной вулкана.

Фактический материал и методы исследования

Основной материал для данной работы составили пеплы, которые были выброшены во время активной эксплозивной стадии: декабре 2010 — марте 2011 гг., а также в декабре 2011 г., и отобраны в течение соответствующего зимнего периода, т. е. не были подвержены промыванию тальми водами. Это позволило оценить не только общую массу тефры, но и количество водорастворимых веществ, поступивших на земную поверхность в результате эксплозивного извержения.

Пробы снега с пеплом таяли при комнатной температуре, фильтровались, полученный фильтрат после измерения объёма сдавался на гидрохимический анализ в АЦ ИВиС. Полученные пеплы высушивались, взвешивались, масса пересчитывалась на площадь отбора пробы. Пробы пепла подвергались дальнейшему анализу — гранулометрическому, химическому, минералогическому. Результаты химического анализа снеговых вытяжек пересчитывались на 100 г пепла (через объём талого снега и массу пепла).

Так как при приготовлении вытяжек вместо дистиллята использовался снег, включающий прослойки пепла, то для учёта его состава отбирались пробы чистого снега. Его минерализация не превышала 6 мг/л, среди анионов преобладали сульфат ионы, среди катионов — кальций. Вытяжки из пеплов имели минерализацию более чем в 10 раз превышающую фоновую, поэтому она не учитывалась.

Состав поверхностных водотоков изучался на примере р. Левая Щапина и её притока — ручья Поперечного, берущего начало из оз. Теплякова на восточном склоне вулкана и дренирующего практически на всём течении толщу свежих пирокластических отложений изучаемого извержения. Также были отобраны пробы из озёр Теплякова и 2-х подпрудных, образованных отложением толщ пирокластиков в долине ручья чуть ниже [8, рис. 10].

Были приготовлено несколько водных вытяжек из лавы. Образцы взвешивались, заливались дистиллированной водой; через определенное время вытяжка отфильтровывалась.

Гранулометрический анализ тефры выполнялся сначала ситовым методом с промывкой водой по стандартной методике (ГОСТ 12,536-79). Использовались сита с размером ячеек, меняющимся по степенному закону (0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2 мм), дополнительно для выделения наиболее мелкой фракции использовалось сито с минимальным размером ячейки — 0,056 мм. Гранулометрический состав фракции менее 0,056 мм изучался с помощью лазерного дифракционного анализатора «Analysette-22 СОМПАКТ» фирмы FRITSCHE GmbH, позволяющего определять распределение частиц по размерам в диапазоне 0,3–300 мкм. Результаты ситового и приборного анализа затем объединялись с помощью программного обеспечения «A_22» к лазерному анализатору размера частиц «Analysette-22 СОМПАКТ». Удельная площадь поверхности пеплов ($\text{м}^2/\text{г}$) вычислена по единой методике с использованием этой же программы.

Характеристика пеплов

С декабря 2010 г. по март 2011 г. пеплопадами была охвачена территория полуострова Камчатка от п. Тигиль до г. Петропавловск-Камчатский общей площадью около 100 тыс. км². Во время полевых работ было проведено шурфование снежной толщи примерно в 100 точках и отобраны около 200 образцов пепла. Общая масса тефры, изверженная вулканом к концу февраля, составила около 10 млн т [9].

Во всех пробах пепла независимо от расстояния от вулкана пылеватая фракция (<0,063) составляет 40–70% (рис. 1). Это связано с отложением вблизи вулкана пеплов облаков ПП. Причём, особенностью данного извержения было то, что ПП сопровождали почти каждую эксплозию. Пеплы, выпавшие 10–13 декабря 2010 г., имеющие более крупнозернистый состав (рис. 1), что связано, вероятно, с проработкой эруптивного жерла в этот период.

Исследуемые пеплы по химическому составу относятся к высокоглинозёмистым андезитам и дацитам калиево-натриевой серии (59–68% SiO_2) [9] и в целом имеют более кислый состав чем лапиллии, отложения ПП и лавы этого извержения (56,5–64,5% SiO_2) [5], что также связано с присутствием большой доли пылеватой фракции, отложившейся из облаков ПП.

Водорастворимый комплекс пеплов

Вытяжки из пеплов, выпавших в период с конца декабря 2010 г. по начало марта 2011 г., отобранных на расстоянии 7–137 км от вулкана, имеют сравнительно большую минерализацию — 0,5–2 г на 100 г пепла, в среднем из 30 проб — 1 г на 100 г пепла. Пеплы начальных эксплозий (10–14 декабря 2010 г.) менее минерализованы [9]. Также отличаются малой минерализацией (~210 мг на 100 г) вытяжки из пеплов, отобранных в декабре 2011 г. (последние из отобранных проб тефры).

В целом среди анионов водорастворимого комплекса пеплов активной эксплозивной стадии преобладает сульфат-ион (около 650 мг на 100 г), затем хлорид — (60) и фторид-ионы (~4,5); среди катионов — кальций (235), затем натрий (27), магний (12) и калий (10). Так же присутствуют ионы железа (до 10 мг) и кремнекислоты (до 20 мг).

Всего с декабря по март 2011 г. вместе с пеплами в окружающую среду было вынесено около 100 тыс. т водорастворимых веществ, в т.ч.: SO_4^{2-} — 65, Cl^- — 6,2, F^- — 0,4, Ca^{2+} — 24, Na^+ — 2,7, Mg^{2+} — 1,2, K^+ — 1, Fe^{2+} — 0,4, H_4SiO_4 р. — 0,9 тыс. т. [9].

В 5-и специально подготовленных вытяжках из пеплов в АЦ ИВиС были определены микроэлементы: Al (0,5–3 мг на 100 г пепла), Mn (0,08–0,4), Cu (0,3–0,6), Co (0,01–0,04), Ni (0,004–0,023). т. е. всего за извержение: Al ~ 175 т, Mn ~ 24 т, Cu ~ 45 т, Co ~ 2,5 т, Ni ~ 1,4 т.

Для равноценного сравнения, результаты анализов водных вытяжек из пеплов, выпавших в разное время извержения, пересчитаны на 1 м² поверхности каждого образца (табл. 1).

Анионный состав вытяжек также служит показателем качественного состава и соотношений газовой фазы. Отношение S/Cl в водорастворимом комплексе пеплов, выпавших в конце декабря 2010 г. — первой половине января 2011 г., относительно высокое и в среднем составляет около 4, при этом абсолютные содержания водорастворимых компонентов также наиболее высоки (табл. 1, рис. 2). В вытяжках из пеплов, отобранных в феврале-марте 2011 г., происходит значительное увеличение содержания хлорид-иона, уменьшение сульфат-иона и, соответственно, уменьшение отношения S/Cl до 0,6 и затем до 0,3. В вытяжках из пеплов, отобранных в декабре 2011 г., данное отношение сохраняется (0,6–0,7), но общая минерализация падает. Данные изменения, вероятно, отражают изменения в газовом составе извергаемых продуктов и являются типичными для извержений с участием ювенильного вещества

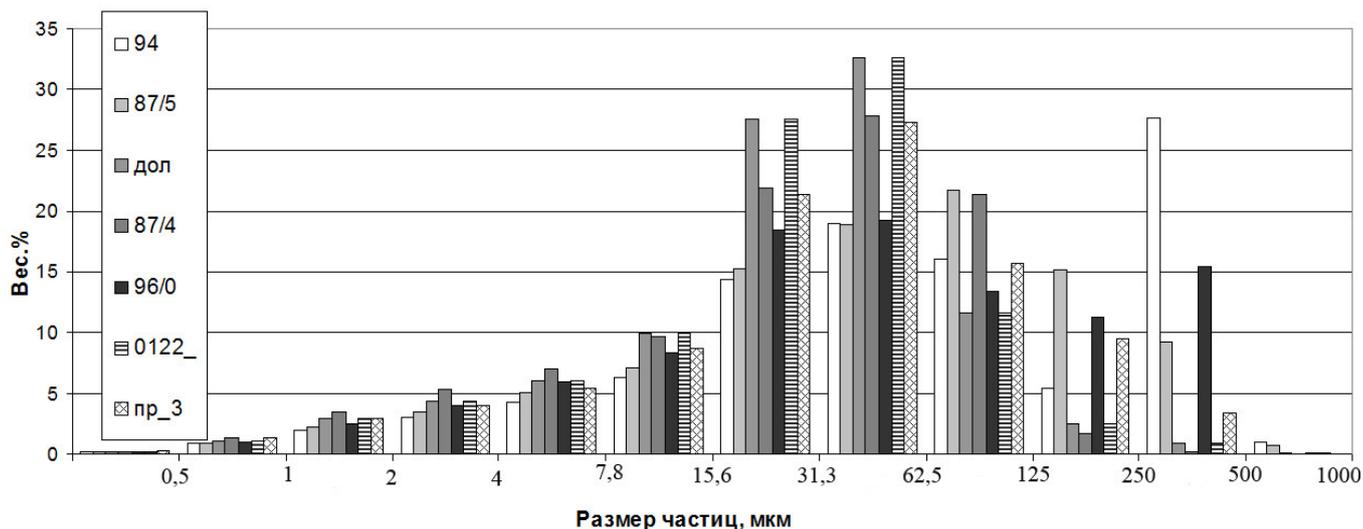


Рис. 1. Гранулометрический состав пеплов вулкана Кизимен, изверженных в 2010–11 гг. Дата пеплопада и расстояние от вулкана до точки отбора даны в табл. 1.

Таблица 1. Состав водорастворимого комплекса пеплов вулкана Кизимен, отложенных различными пеплопадами в 2010–11 гг., в мг на м² удельной поверхности пепла

№ пробы	94	87/5	Дол	87/4	96/0	122	пр_3	Б-11
Дата пеплопада	10–13.12.10	28–29.12.10	01.01.11	07.01.11	13.01.11	09.02.11	дек. 11	24.12.06
L, км	95	23	82	23	52	14	9	31
Площадь поверхности пепла, м ² /г	0,171	0,189	0,177	0,271	0,213	0,245	0,241	0,241
pH	5,1	4,37	4,66	4,44	4,53	3,86	5	4,75
F ⁻	н.п.о.	0,10	0,07	0,09	0,12	0,15	—	0,23
Cl ⁻	0,6	2,8	3,2	3,3	2,2	5,4	1,7	1,88
SO ₄ ²⁻	6,9	47,5	73,6	24,9	26,9	10,6	3,5	6,77
Na ⁺	0,5	1,5	2,1	0,8	0,9	0,8	0,7	1,16
K ⁺	0,5	0,6	0,8	0,3	0,3	0,2	0,2	0,269
NH ₄ ⁺	0,061	0,074	0,463	0,043	0,072	0,099	н.п.о.	н.п.о.
Ca ²⁺	1,66	16,84	27,84	9,31	9,17	5,28	1,08	2,26
Mg ²⁺	0,33	0,74	1,02	0,51	0,37	0,27	0,16	0,29
Fe ²⁺	0,08	н.п.о.	0,25	0,40	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	—
Al ³⁺						0,73		—
H ₄ SiO ₄	0,91	0,44	0,61	0,13	0,29	0,71	0,46	—
Сумма	12,1	74,3	116,1	41,2	42,1	25,2	8,1	13,0
S/Cl	3,96	5,73	7,59	2,51	4,00	0,66	0,68	1,19
Cl/F	—	27	45	36	18	37	—	8

Примечание. Н.п.о. — ниже порога определения, прочерк — компонент не определялся. Б-11 — результаты для пепла вулкана Безымянного, изверженного 24 декабря 2006 г. Химический анализ водных вытяжек выполнен в АЦ ИВиС ДВО В. В. РАН Дунин-Барковской, Л. Н. Гарцевой, А. А. Кузьминой, С. В. Сергеевой, И. Ф. Тимофеевой.

(газы серы, как менее растворимые в магме, выделяются из неё в первую очередь, затем HCl и HF; газонасыщенность извергаемого материала сначала резко возрастает, а затем постепенно снижается).

Так как пирокластика и водные вытяжки из пеплов этого вулкана ранее не изучались, проведено сравнение с данными, полученными при изучении извержения другого андезитового вулкана полуост-

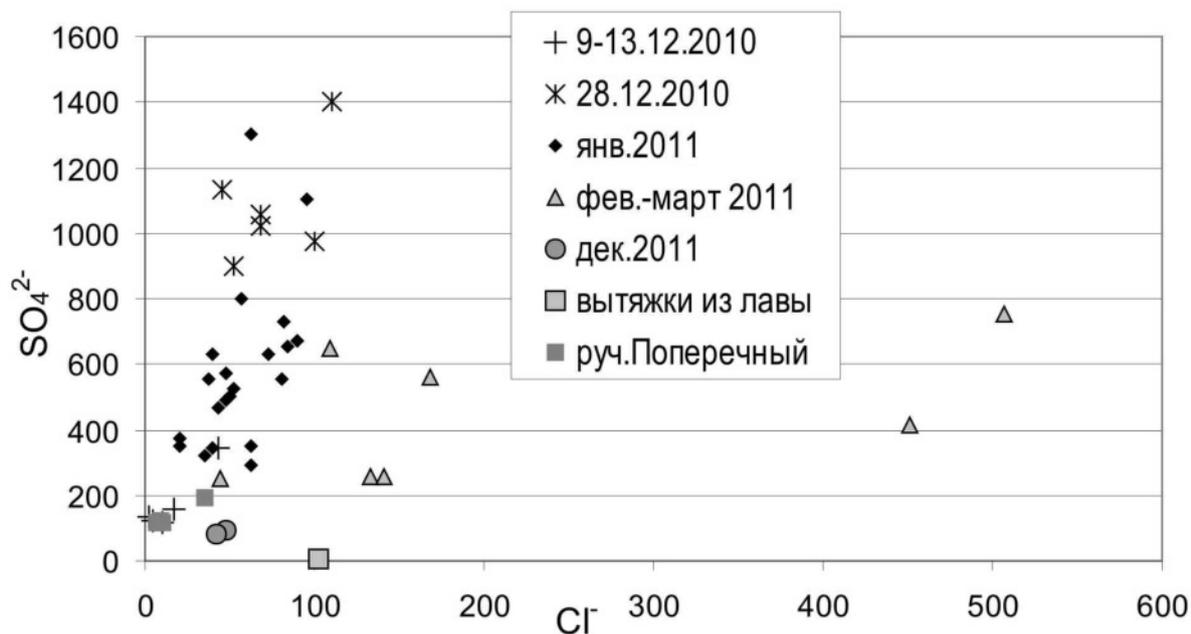


Рис. 2. Содержание основных анионов в вытяжках из пеплов разных периодов извержения, мг/100 г

рова — Безымянного в декабре 2006 г. [4] (табл. 1). Очевидно, что пеплы вулкана Кизимен выносят больше водорастворимых веществ, особенно ионов сульфата и кальция, при этом меньше опасного для живых организмов фтора. Большое содержание водорастворимых веществ в пеплах в Кизимен является следствием их мелкозернистого состава и высокой газонасыщенности извергаемого материала.

Состав поверхностных вод

Минерализация вод ручья Поперечного, по долине которого в начале извержения сошёл лахар, а с мая по декабрь 2011 г. — пирокластические потоки, варьирует в пределах 325–695 мг/л в зависимости от места и времени отбора (табл. 2). Химический анализ воды из ручья Поперечный, отобранной в начале и конце декабря 2011 г. в районе пересечения ручья с тропой на Тумроки, показал увеличение содержания в ней хлорид-иона в 1,5 раза, сульфат-иона в 2,5 раза после активизации 14 декабря. В целом, содержание сульфат-иона значительно превышает показатели для рек Камчатки, что указывает на его вынос их газонасыщенных пирокластических отложений. В химическом составе озёр (Подпрудных 1 и 2, и Теплякова) и других поверхностных вод в верховьях руч. Поперечного на восточном склоне вулкана также заметны повышенные содержания вулканогенных макрокомпонентов (Ca, SO₄²⁻ и др.), уменьшающиеся к концу извержения (табл. 3).

Также были приготовлены и проанализированы три водные вытяжки из образцов лавы, отобранных 23 марта на фронте и 30 апреля 2012 г. в центральной части русла лавового потока. В их составе среди анионов значительно преобладает хлор, в меньшем количестве присутствует сульфат-ион; среди ка-

тионов (в порядке убывания) — кальций, магний, железо, натрий. Водорастворимый комплекс лав, вероятно, формирующийся за счёт отложения солей на стенках пор, даёт представление об источниках вещества фумарольных минералов, образующихся на лавовых потоках при газовом метасоматозе лав [11].

Фумарольные газы

До последнего извержения (2010 г.) на северо-западном склоне вулкана, на высоте 1950 м н. у. м. располагалась единственная постоянно действующая фумарольная площадка, известная с 1825 г. [1] В конце 2010 г. в восточной привершинной части вулкана образовалось две фумарольные площадки, в ставшие центром извержения. После окончания эксплозивной стадии паро-газовая активность охватила всю вершину. 12 октября 2014 г. были проведены работы на привершинном фумарольном поле, образовавшемся на западном склоне вулкана (на высотах начиная с 2250 м н. у. м. до вершины) во время извержения, предположительно в конце 2011 г. На высоте 2280 м были обнаружены фумаролы с напорным выходом газа. Максимальная измеренная температура фумарол этого поля 270° С. Были отобраны 5 проб газа. Также был отобран конденсат — желтый непрозрачный, на внутренних поверхностях барботеров образовались плёнки из коллоидной серы. Повсеместно на этой площадке выходы газа обильно инкрустированы серой. В насосах, используемых для отбора конденсатов и капиллярах также было обнаружено большое количество серы. Как показали измерения, сера в этой и других фумаролах отлагается при температуре ниже 200° С. [6]

Таблица 2. Химический состав вод ручья Поперечного

дата	11.12.11	23.12.11	24.12.11	26.12.11	04.01.12	07.01.12	01.03.12	19.03.12	12.10.13	
место	тропа	100 м от устья	тропа	тропа	тропа	тропа	тропа	600 м н. у. м.*	700 м н. у. м.	тропа
pH	6,8	7,1	6,6	6,7	6,6	6,6	6,9	6,6	7,8	7,4
HCO ₃ ⁻	131,8	233,1	131,8	147,7	119,0	125,5	153,7	190,3	87,8	97,6
Cl ⁻	5,8	26,8	7,8	7,8	6,4	6,4	8,5	9,9	0,2	0,2
SO ₄ ²⁻	45,4	66,5	107,5	115,2	90,1	89,5	161,3	259,2	200,0	188,0
Na ⁺	17,5	28,9	13,4	14,8	16,7	16,2	22,3	3,8	30,0	29,1
K ⁺	3,7	4,9	3,6	3,7	3,8	3,9	3,7	8,9	4,4	4,7
Ca ²⁺	36,1	26,5	41,7	41,3	48,1	48,1	72,1	98,4	54,2	57,3
Mg ²⁺	12,7	28,9	14,5	16,4	14,3	14,7	19,0	23,0	15,6	16,4
NH ₄ ⁺	0,4	0,9	0,6	0,7	<0,1	0,8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Fe _{сум}	<0,1	<0,1	0,1	2	<0,1	<0,1	0,3	2,1	1,2	0,9
H ₃ BO ₃	2,4	2,4	1,2	1,2	2,4	2,1	<0,28	0,0	<0,28	<0,28
H ₄ SiO ₄ р.	70,9	80,5	76,3	79,4	71,1	38,4	72,1	92,4	29,4	41,7
Минер.	327	499	399	436	372	346	513	693	423	436

Прим. Тропа — место пересечения ручья Поперечного с тропой на Тульрокские источники,

* — выходы термальной воды в долине ручья

Таблица 3. Химический состав озер и других поверхностных вод в верховьях руч. Поперечного

дата	23.03.12	29.04.12	01.08.12	15.10.12	12.10.13			
место	оз. Подпруд. 2	исток руч., 1230 м	оз. Подпруд. 1	оз. Телякова	лужа, 1850 м	грязелок, 1400 м	оз. Подпруд. 1	оз. Подпруд. 2
pH	6,8	4,1	5	6,6	4,66	4,53	6,4	6,8
HCO ₃ ⁻	36,6	<0,05	0,0	6,1	6,1	<0,5	7,9	48,8
Cl ⁻	9,9	34,8	9,2	11,5	9,3	22,4	0,2	0,2
SO ₄ ²⁻	119,0	192,1	48,0	61,8	14,0	34,1	36,4	8,0
Na ⁺	25,5	4,5	3,4	2,1	2,2	8,3	2,8	5,6
K ⁺	3,7	2,2	1,1	1,0	1,9	2,5	0,9	3,0
Ca ²⁺	36,1	84,2	18,0	16,4	4,2	10,0	8,4	7,5
Mg ²⁺	5,6	2,3	3,6	4,6	2,4	1,2	2,2	5,3
Fe ³⁺	<0,05	0,1	—	—	<0,1	<0,1	<0,1	1,0
H ₄ SiO ₄ р.	50,5	4,8	14,9	41,9	2,5	47,7	5,6	25,2
H ₄ SiO ₄ к.	65,6	н.о.	20,7	—	—	—	—	—
Минер.	353	325	119	145	43	126	64	105

Таблица 4. Химический состав фумарольных газов вулкана Кизимен, ммоль/моль

Фумарольное поле	Дата, (источник)	T, °C	H ₂ O	CO ₂	H ₂ S	SO ₂	HCl	HF	CO	CH ₄	H ₂	N ₂	Ar	He
Новое западное	14.10.2014	270	951	32	7,74	5,8	3,54	0,018	1,5 · 10 ⁵	8 · 10 ⁴	0,024	0,33	3 · 10 ⁴	1,3 · 10 ⁴
	14.10.2014	270	950	26,5	11,3	8,6	3,28	0,013	—	—	—	—	—	—
Постоянно действующее	1979–80 гг. [2]	240	926	67	4,4	0,15	2,2	0	0	0,74	0,05	—	—	—
Ср. для фумарол зоны субдукции	[12, 13]		946	24,6		18,3*	6,9	0,61						

Примечание. Прочерк — компонент не определялся. Концентрации N₂ и Ar скорректированы с учётом загрязнения воздухом. Анализ выполнен в АЦ ИВиС ДВО Л.Н. РАН Гарцевой (поглощенные газы) и Лаб. постамагматических процессов В.И. Гусевой (непоглощенные газы). Данные для 1979–80 г. по возможности усреднены и пересчитаны.

* — суммарная сера.



Рис. 3. Относительные содержания компонентов в фумарольных газах вулкана Кизимен.

В составе непоглощённых газов содержалось 7–14 об.% кислорода (или 0,004–0,011 мол.% от общего состава газа), что свидетельствует о примеси воздуха. При этом отношение $N_2/Ar = 147–227$ значительно больше воздушного (84), что показывает магматическое происхождение большей доли азота (рис. 12). Содержания и отношения конденсируемых газов (H_2O/S , CO_2/S , CO_2/HCl , S/HCl) типичны для вулканических газов зоны субдукции (табл. 4, рис. 12), [12]. Содержание HF как в газе, так и в конденсате отличается очень низкими значениями — более чем в 30 раз меньше среднего для газов зоны субдукции.

Содержание микрокомпонентов в конденсате газа (33 ppm) сравнительно небольшое вследствие низких температур, а также большого содержания коллоидной серы, затрудняющей анализ.

Выводы

1) Пеплы в. Кизимен содержат сравнительно большое количество водорастворимых веществ, что является следствием их мелкозернистого состава и высокой газонасыщенности извергаемого материала.

2) В процессе извержения в вытяжках из пеплов наблюдается уменьшение отношения S/Cl , а также содержания основных компонентов, что, вероятно, отражает изменения в газовом составе извержения.

3) Отмечен вынос водорастворимых веществ в поверхностные воды во время извержения. К 2013 г. содержания хлорид-ионов заметно падают, а сульфат-ионов сохраняются и даже возрастают, что, возможно, объясняется разной растворимостью хлоридов и сульфатов.

4) Всего с декабря 2010 г. по март 2011 г. вместе с пеплами в окружающую среду было вынесено около 100 тыс. т водорастворимых веществ, в т.ч.: $SO_4^{2-} - 65$, $Cl^- - 6,2$, $F^- - 0,4$, $Ca^{2+} - 24$, $Na^+ - 2,7$, $Mg^{2+} - 1,2$, $K^+ - 1$, $Fe^{2+} - 0,4$, H_4SiO_4 р. — 0,9, $Al \sim 0,175$, $Mn \sim 0,024$, $Cu \sim 0,045$, $Co \sim 0,0025$, $Ni \sim 0,0014$ тыс. т. В тоже время, выброшенные 10 млн т пепла были рассеяны на большой территории, поэтому только вблизи вулкана на площади, охваченной отложениями пирокластических пото-

ков и лахара, а также в радиусе 7–8 км от него, где масса пепла превышала 2–3 кг на m^2 , извержение могло оказать заметное воздействие на окружающую среду.

5) Состав газов, отобранных на образованном во время извержения фумарольном поле, не смотря на низкую температуру отбора ($270^\circ C$), близки к среднему составу вулканических газов зоны субдукции, за исключением низкого содержания HF, отмеченного и в конденсатах газа и в вытяжках из пеплов извержения.

6) Соотношения свободных газов на треугольных диаграммах (рис. 12) предполагает формирование состава исследуемых газов, в первую очередь, за счёт смешения магматического флюида и воздуха.

7) Содержание микрокомпонентов в конденсате газа (33 ppm) сравнительно небольшое вследствие низких температур, а также большого содержания коллоидной серы, затрудняющей анализ.

Авторы выражают благодарность за предоставленные образцы и помощь в отборе проб в процессе полевых работ А. Н. Биченко, Я. Д. Муравьёву, А. А. Овсянникову, А. В. Сокоренко, С. А. Чиркову, В. В. Ящучку, а также сотрудникам Аналитического центра (Л. Н. Гарцевой, М. А. Назаровой, В. В. Дуниной-Барковской, А. А. Кузьминой, С. В. Сергеевой) и Лаб. Постмагматических процессов (В. И. Гусевой) ИВиС за выполнение химических анализов. Работа выполнена при частичной поддержке гранта ДВО № 12-III-08-172.

Список литературы

1. Влодавец В. И., Пийп Б. И. Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюл. вулканол. станции. 1957. № 25. С. 5–95.
2. Зеленский М. Е., Таран Ю. А., Дубинина Е. О. и др. Источники летучих компонентов для вулкана зоны субдукции: вулкан Мутновский, Камчатка // Геохимия. 2012. № 6. С. 555–575.
3. Кирсанова Т. П., Вергасова Л. П., Юрова Л. М., Таран Ю. А. Фумарольная активность вулканов Шивелуч и Кизимен в 1979–1980 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 3. С. 33–42.

4. Малик Н. А. Извержение вулкана Безымянный 24 декабря 2006 г., Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2011. №4. С. 50–59.
5. Малик Н. А., Максимов А. П., Ананьев В. В. Извержения вулкана Кизимен в 2010–2012 гг. и его продукты // Материалы региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29–30 марта 2012 г. — Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 64–70.
6. Малик Н. А., Плутоксина Е. Ю. Самородная сера вулкана Кизимен // Материалы XII Региональной молодёжной научной конференции «Исследования в области наук о Земле» 25 ноября 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014. С. 31–38.
7. Мелекесцев И. В., Пономарёв В. В., Волынец О. Н. Вулкан Кизимен (Камчатка) — будущий Сент-Хеленс? // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 3–32.
8. Мельников Д. В., Двигало В. Н., Мелекесцев И. В. Извержение 2010–2011 гг. камчатского вулкана Кизимен: динамика эруптивной активности и геолого-геоморфологический эффект (на основе данных дистанционного зондирования) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 87–101.
9. Овсянников А. А., Малик Н. А. Тейфра извержение вулкана Кизимен в декабре 2010 г. — феврале 2011 г. // Материалы конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», 30 марта — 1 апреля 2011 г. — Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 57–61.
10. Пийн Б. И. Вулкан Кизимен // Бюл. вулканол. станции на Камчатке. 1946. № 13. С. 22–32.
11. Серафимова Е. К., Флёров Г. Б., Невзоров А. Н. Состав водорастворимого комплекса базальтовых лав Большого трещинного толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1983. № 3. С. 25–32.
12. Aiuppa A., Giudice G., Liuzzo M., et al. First volatile inventory for Gorely volcano, Kamchatka. *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39, DOI: 10.1029/2012GL051177
13. Gerlach T. M. Volcanic sources of tropospheric ozone-depleting trace gases // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2004. Vol. 5. doi:10.1029/2004GC000747.
14. Taran Y., Zelenski M. Systematics of the water isotopic composition and chlorine content in arc-volcanic gases. In: Zellmer, G.F., Edmonds, M., Straub, S.M. (Eds.), *The Role of Volatiles in the Genesis, Evolution and Eruption of Arc Magmas.* *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 2014. 410.¹

¹<http://dx.doi.org/10.1144/SP410.5>.