

Дискуссии

УДК 551.21

НЕКОТОРЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДВОДНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ В КАЛЬДЕРЕ АКАДЕМИИ НАУК 2-3 ЯНВАРЯ 1996 г.

© 2004 Г. А. Карпов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006. 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Институт вулканологии и сейсмологии; тел. (415-22)5-02-25; факс (415-22)5-47-23; e-mail: karpovga@kcs.iks.ru

Рассмотрены некоторые геохимические особенности подводного извержения в кальдере Академии Наук 2-3 января 1996 г. Даются общие сведения об этом уникальном по ряду параметров фреато-магматическом извержении, составе изверженного материала, гидрохимическим изменениям кальдерного озера Карымское. Приводятся анализы химического состава воды новых и существовавших до извержения термальных источников и гейзеров, общесолевой состав и содержание Zn, Ni, Mn, Fe, Cu, Sr, Al в воде озера Карымское до и после извержения. Исходя из содержания в воде озера предположительно глубинных компонентов – хлора и серы, рассчитано количество эндогенного вещества, поступившего в озеро в процессе извержения. Используя систему аналогий с работой гейзера, сделаны приблизительные расчеты количества ювенильной воды, поступившей из магматического очага при извержении, и массы дегазированного магматического вещества. Объясняется причина кратковременности извержения, оценивается масса свежего магматического материала под дном озера и тепловая мощность подводного извержения.

Подводное извержение, произошедшее 2-3 января 1996 г. в заполненной озером (оз. Карымское) кальдере считавшегося угасшим вулкана Академии Наук (Муравьев и др., 1997), можно отнести к уникальным.

Во-первых – это, по-видимому, первое непосредственно наблюдавшееся специалистами фреато-магматическое извержение в пресноводном бассейне на Камчатке. Во-вторых, извержение произошло вблизи берега на относительно небольшой глубине (около 60 м), в кальдерном озере (диаметром 3.8 км, урез воды до извержения + 623.91 м), где не бывает сильных волнений воды. Вследствие этого новая вулканическая форма хорошо выражена морфологически и сохраняется в своем первозданном виде¹. В-третьих, при значительной мощности извержения (особенно

в первые его часы) оно было непродолжительным: по различным оценкам длилось от 10 до 30 часов. В-четвертых, продукты этого извержения значительно различаются по составу. Основную массу изверженных пород – пески, шлаки, мелкие и средние вулканические бомбы составляют базальты (SiO₂ 52.30-53.08%; Al₂O₃ 18.37-19.72%; CaO 10.34-11.0%). Крупные бомбы весом более тонны состоят из своеобразно переслаивающихся зон черных базальтов и светло-серых пемзовидных дацитов. Границы зон резкие, отчетливые. Общее количество материала кислого состава по оценкам Е.Н. Гриб, не превышает 2-3% от количества материала базальтового состава (Гриб, 1997).

Наконец, следует отметить, что подводное извержение происходило параллельно с терминальным извержением Карымского вулкана, отстоящего от северного берега озера Карымское на 6 км².

¹ В первые часы после образования кратера, верх его был, по-видимому, частично срезан и размыв волнами типа «цунами» и базисными волнами от извержения.

² Вулкан Карымский продолжает извергаться (по состоянию на 1 декабря 2004 г.).

Пеплы и лавы извержений Карымского вулкана имеют типичный андезитовый состав (Федотов, 1997).

Несмотря на кратковременность подводного извержения, произошли большие гидрогеохимические изменения, что привело к катастрофическим последствиям для биоты озера и реки Карымской, вытекающей из него и в 30 км от истока впадающей в Тихий океан.

Извержение произошло зимой. Ледяной панцирь на озере достигал толщины порядка 0.2 м, и на нем находился слой снега не менее 2 м. В результате мощных фреато-магматических взрывов и значительного притока глубинного тепла, весь лед и снег на озере был растоплен в считанные часы. Достоверно известно, что за неделю до этого события озеро было сковано льдом. Утром 2 января 1996 г. с вертолета, пролетавшего над озером, было отмечено, что озеро свободно от льда. В 15 часов (местного времени) озеро уже парило по всей поверхности, а в северном секторе озера, в 250-300 м от берега наблюдалась четко выраженная клубовидная колонна пара, поднимавшаяся с площади диаметром порядка 200 м на высоту 5-6 км, а по некоторым оценкам до 8 км (Муравьев и др., 1997; Федотов, 1997; Карпов et al., 1996). В нижней части колонны 2 (и в меньшей степени 3) января были видны взмывающие вверх «черные стрелы» выбросов раздробленного каменного материала. Бурные всплески взрывов вызывали мощные волны. О их высоте можно судить по катастрофическим последствиям. При маршрутном обследовании после извержения на северном берегу озера были обнаружены размывы борта озера, сломанные и вывернутые кусты ольхового стланика на высоте до 20 м над урезом озера. Серия частых взрывов с выбросом паро-газового и шлако-бомбового материала продолжалась порядка 12-18 часов (Федотов, 1997; Муравьев и др., 1997). Еще 10-12 часов, по нашему мнению, происходило извержение преимущественно паро-газовой смеси. За это время сформировался подводный шлаковый конус с кратером диаметром до 600 м, насыпная северная часть которого возвышалась над уровнем воды, и образовав серповидный полуостров площадью 0.47 км² (рис. 1). Не исключено, что одновременно действовали два эруптивных центра (исходя из характера поражения растительности и по словам очевидца А.В. Сокоренко, их могло быть больше), расположенные на одной субмеридиональной линии. На плановом фотоснимке хорошо видна оваль-

ная воронка под водой напротив истока реки Карымской. Именно к этому месту тяготеют находки наиболее крупных бомб, в которых наблюдается сонахождение материала и базальтового, и дацитового состава (пемзовидные образования с пленкой базальта черного цвета).

Рассмотрим некоторые геохимические особенности и следствия подводного извержения.

Состав воды новых термальных источников

Судя по составу изверженного материала на полуострове Новогоднем, можно предположить, что он поставлялся из разноглубинных источников. По-видимому, мантийный (или корово-мантийный) базальтовый расплав, внедрившись в верхние зоны коры, вызвал ее локальное плавление. Не исключено, что плавление происходило в присутствии воды. Процесс протекал быстро, со взрывами, что привело к образованию вулканических бомб сложного базальт-дацитового состава. О наличии мантийной компоненты свидетельствуют высокие содержания ванадия и меди фактически во всех пробах тефры базальтового состава (Карпов et al., 1996). В донной пробе мелкозернистого песка из основной зоны эрупции и в сере возгонов на термальной площадке нового полуострова отмечено также повышенное содержание ртути (до $2.0 \times 10^{-3}\%$). Присутствие в тефре мелких обломков измененных до опалитов пород с кристаллами пирита, возможно, свидетельствует о внедрении расплава в зону деятельности высокотемпературной гидротермальной системы.

О химическом составе растворов этой гидротермальной системы, по-видимому, можно судить по минерализации гидротерм, возникших в северном обрамлении участка извержения и на южном берегу озера, где образовались новые грязевые котлы и гейзер. Новые термальные источники проявились и в узкой зоне субмеридионального простираения в центральной части новообразованного полуострова (рис. 1). Термальные воды с температурой от 33 до 92°C высачивались здесь в четырех взрывнопровальных воронках глубиной от 1.5 до 5 м, а также у уреза воды озера по кольцевому обрамлению эруптивного центра и под левобережной террасой у истока р. Карымской³.

³ Эти источники, по сообщению Я.Д. Муравьева, проявились после 15 мая 1996 г., когда произошел прорыв естественной плотины, образовавшейся в результате извержения, и р. Карымская восстановила свое русло.

Таблица 1. Химический состав воды термальных источников, возникших на периферии Карымского озера после подводного извержения 1996 г., мг/л

Компо- ненты	Источники							
	1	1 ^а	3	3 ^а	4	4 ^а	5	6
NH ₄ ⁺	0.1	0.2	-	0.1	0.7	0.7	0.1	-
Na ⁺	341.7	330.0	89.6	255.0	551.0	547.0	255.0	237.0
K ⁺	43.2	33.2	9.2	24.0	58.0	64.5	13.9	26.0
Li ⁺	0.54	-	-	-	-	-	-	-
Ca ²⁺	50.1	64.0	112.2	48.0	124.0	96.0	5.6	9.0
Mg ²⁺	30.4	18.0	51.1	9.7	16.9	29.0	0.2	0.0
Σ К	465.9	445.2	264.6	336.8	750.6	737.2	274.6	272.0
Cl ⁻	224.4	199.0	42.6	282.0	753.0	824.0	303.0	355.0
F ⁻	0.43	0.45	2.51	1.20	0.51	0.51	1.7	2.3
SO ₄ ²⁻	691.6	547.0	595.6	240.0	509.0	345.0	86.5	92.0
HCO ₃ ⁻	70.8	174.0	1.2	152.0	140.3	162.0	42.7	85.0
CO ₃ ²⁻	0.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	23.7	-
Σ А	987.2	924.6	641.9	675.2	1402.3	1331.5	457.6	534.3
H ₃ BO ₃	14.8	12.2	6.2	16.3	53.4	54.4	32.6	48.0
H ₄ Si ₄	402.0	463.0	279.0	390.0	291.0	380.0	384.0	343.0
Mn	0.5	-	-	-	-	-	-	-
Zn	0.04	-	-	-	-	-	-	-
Ni	0.003	-	-	-	-	-	-	-
Cu	0.0003	-	-	-	-	-	-	-
Fe	0.3	0.3	2.5	-	-	-	0.3	-
Σ М	1870.7	1845.0	1194.2	1418.3	2497.3	2503.1	1148.9	1197.3
pH	6.75	8.20	4.6	7.31	7.76	6.70	9.35	8.7
T°, C	56	56	55	79	89	87	98	98
Cl/Na	0.6	0.6	0.5	1.1	1.4	1.5	1.2	1.50
Na/K	7.9	9.9	9.7	10.6	9.5	8.5	18.3	9.1
Cl/SO ₄	0.3	0.3	0.4	1.2	1.5	2.4	3.5	3.8
Cl/K	5.2	5.9	4.6	11.7	12.9	12.8	21.8	13.6
Дата отбора	22.01.96	11.02.96	22.01.96	03.01.97	10.10.96	03.01.97	11.02.96	05.84

Примечание. Источники (см. рис.1): 1, 1^а – воронка взрыва № 4; 3, 3^а – высачивание воды у уреза озера; 4, 4^а – источник у основания террасы в истоке р. Карымской; 5, 6 – источники Академии Наук (гейзер). Аналитик: В.К. Марынова (ИВ ДВО РАН); проба 6 приводится для сравнения из работы (Пилипенко, 1989); пробы отобраны Р.А. Шуваловым и Г.А. Карповым; «-» – не определялось; Mn, Zn, Ni, Cu, Fe анализировались С.М. Фазлуллиным на ИСП в геологической службе Японии (г. Цукубо).

Состав растворов существенно различен (табл. 1). Можно более-менее уверенно предположить, что глубинным условиям формирования отвечают наиболее высокотемпературные растворы источника, выходящего в группе газогидротерм под левобережной террасой р. Карымской, у ее истока (табл. 1, пробы 4, 4^а). Действительно, это наиболее высокоминерализованные воды, существенно хлоридно-натриевые (с достаточно высокой примесью сульфата), с аммонием, калием и гидрокарбонатом. По общему составу, генетическим коэффициентам (Cl/Na, Na/K, Cl/K) и содержанию бора они близки к типичным хлоридно-натриевым растворам высокотемпературных гидротермальных

систем типа Узон-Гейзерной, Паужетки, Вайракай (Белоусов, Сугробов, 1976; Карпов, 1988). Близки они и водам как нового, возникшего в результате извержения, так и старого гейзера (табл. 1, пробы 5 и 6). От Паужетско-Гейзерного типа эти источники (и в первую очередь, воды воронок, представленных в табл. 1, пробы 1 и 1^а) отличает повышенное содержание сульфата, что отразилось на снижении соотношения Cl/SO₄. После завершения извержения содержание сульфата во всех источниках значительно снизилось (табл. 1, пробы 1 и 1^а, 3 и 3^а, 4 и 4^а). По-видимому, следует предположить приток во время извержения значительных масс сернистых соединений. Подтверждением

этому является обнаружение H_2S в количестве до 23.8 мг/л в воде четвертой взрывно-пробной воронки сразу же после извержения и выходы сероводородсодержащих паро-газовых струй на самой северной термальной площадке (здесь осаждается самородная сера). Относительно высокие содержания в водах воронок и в термах, высачивающихся у уреза воды озера, таких компонентов как сульфат, фтор, магний, железо, цинк, никель, по-видимому, можно объяснить тем, что эти растворы имеют смешанное происхождение. Они образуются за счет конденсации вулканических газо-паровых эманаций в трещинно-поровых полостях холодных верхних горизонтов осадков. Об этом же свидетельствует и наиболее низкая температура этих источников. Очевидно, вулканические летучие в период извержения имели галоидно-сернистый состав. Со временем в составе поступающих из глубины газов начинает увеличиваться доля углекислоты (табл. 1). Определенную роль в формировании солевого состава термальных растворов играют также процессы выщелачивания пеплово-шлаковых продуктов извержения. Так, в искусственных водных вытяжках⁴ из свежих проб пепла, выпавшего в окрестностях озера при извержении, определено (в мг/л): Na^+ 27.85-115.9; K^+ 3.72-14.0; Ca^{2+} 38.82-324.3; Mg^{2+} 7.57-25.0; $Fe_{общий}$ 10.9-21.0; Cl^- 42.7-257.0; SO_4^{2-} 181.2-1112.0 (аналитик В.К. Марынова). Обнаруживается хорошее соответствие отношений Na/K , Cl/SO_4 в растворимой части пеплов и в воде взрывных воронок.

Состав воды Карымского озера до и после извержения

До извержения 1996 г. вода озера Карымского имела гидрокарбонатно-натриевый состав и очень низкую общую минерализацию (табл. 2, пробы 16*, Ф-1/93). В озере даже хорошо прижилась озерная форма лосося-коканы, разводимая здесь ихтиологами с 1976 г. Но уже с 1993 г. отмечается слабый рост общей минерализации, выразившейся в увеличении содержания Na , Cl , V и, возможно, Zn (в 1984 г. Zn в воде не определялся).

В пробе воды, отобранной 22 января 1996 г., т.е. фактически сразу же после извержения,

⁴ Извлечение водорастворимых соединений из 100 г пепла, залитого 0,5 л дистиллата, после 24 ч. выстаивания.

наблюдается резкое возрастание содержаний Na , K , Ca , Mg , Cl , F , V , кремнекислоты, сульфата и, соответственно, общей минерализации. Поменялся тип воды. Она стала сульфатно-натриево-кальциевой, кислой (табл. 2, проба 22.01/1). Обращает на себя внимание резкое увеличение содержания тяжелых металлов — Zn , Ni , Mn , Fe , Cu . В пробах, отобранных с акватории озера и из района вблизи центра эрупции в мае 1996 г., помимо отмеченных выше элементов, фиксируется довольно высокое содержание Al , Sr . Примечательно, что не обнаруживается ни практически значимой вертикальной стратификации, ни площадной гидрохимической зональности в озере (табл. 2). Вся масса воды достаточно хорошо перемешана и однородна. Можно предположить также, что субмеридиональный профиль, вдоль которого отбирались пробы, трассирует разломно-трещинную зону с выходами газо-гидротерм на дне. Логичность такого допущения диктуется тем, что воронки взрыва на новообразованном полуострове, центр подводной эрупции и выходы источников Академии Наук на южном берегу озера хорошо укладываются в линейную зону. Как уже выше упоминалось, в районе известных ранее источников Академии Наук после извержения 1996 г. появились новые термальные площадки, новый гейзер и многочисленные грязевые котлы и пульсирующие источники.

При таких допущениях однородность растворов в этой части озера в первые месяцы после извержения легко объяснима. Тем не менее, опробование озера в октябре 1996 г. и в январе 1997 г. показало, что намечается тенденция уменьшения содержания Mg , V , H_4SiO_4 , Fe , сульфата и общей минерализации воды (табл. 2, пробы 20-К/96, 13-К/96 и 5-К/97). Это, в первую очередь, связано с разубоживанием раствора за счет атмосферных осадков и притока многочисленных ручьев холодной воды, общая масса которых составляет 1/8 объема воды озера в год (устное сообщение Я.Д. Муравьева). Хорошее соответствие уменьшения концентрации солевого состава воды озера этому соотношению свидетельствует о том, что, по-видимому, 10 месяцев спустя после извержения глубинный тепломассопоток из зоны эрупции существенно сократился или прекратился вовсе. В таком случае, анализируя поведение элементов солевого состава воды озера за весь период наблюдений с 1984 по 1997 гг., можно сделать заключение о существовании

элементов-индикаторов процесса эндогенной активизации данного участка земной коры. Ими, по нашему мнению, могут служить Cl, Na, Ca, общая минерализация, а также В и, возможно, Zn, содержания которых достаточно отчетливо имели тенденцию к повышению за 3 года до извержения.

О генезисе солевого состава озерной воды

Как было показано выше, после подводного извержения солевой состав воды Карымского озера резко изменился. Исходя из вариаций содержания наиболее информативных индикаторов глубинности — хлора и серы, попытаемся рассчитать количество эндогенного вещества, поступившего в озеро в процессе извержения, и определить природу минерализации озерной воды. К сожалению, из-за множественности форм нахождения серы в эндогенной флюидной системе, содержание сульфат-иона в воде озера не может отражать всей массы серы, привнесенной во время извержения. Часть ее была вынесена газовой фазой в виде H_2S и, безусловно, какая-то доля выпала из круговорота, отложившись в виде серы самородной (что наблюдается в настоящее время⁵ на самой северной термальной площадке № 6, вблизи паро-газового выхода). Поэтому расчеты по сульфат-иону, по-видимому, следует использовать лишь для предварительной оценки. Наиболее показательны содержания в воде хлора.

Исходные данные для расчетов: диаметр озера 3.8 км, средняя глубина 48 м. Объем воды до извержения — 544×10^6 м³. Объем вулканического материала, отложившегося в озере в результате извержения — около $40 \cdot 10^6$ м³, в литре воды озера сразу после извержения содержалось, в среднем, 50 мг Cl⁻ и 374 мг SO_4^{2-} (табл. 2). Допуская хорошую перемешанность воды озера, получаем, что во всем объеме водоема было растворено порядка 27200 т хлора и 203456 т сульфат-иона.

Сколько (и в каком виде) глубинного флюида должно было поступить в озеро, чтобы обеспечить наблюдаемую минерализацию воды?

Очевидно, в формировании солевого состава воды озера участвовали все составляющие вулканического процесса: летучие магматичес-

кого расплава, изверженный вулканический материал, аэрозоли, гидротермы. Трудно количественно определить долю каждого из них. По-видимому, на первой (в период собственно фреато-магматического извержения) стадии, основную роль играли летучие соединения — пар, газ, аэрозоли. После завершения активной стадии извержения поступление эндогенных компонентов (хлора, серы, бора и др.) продолжалось (также за счет выщелачивания изверженного материала) по системам образовавшихся тектонических трещин⁶. Об этой части эндогенных компонентов несет информацию минеральная нагрузка термальных источников, проявившихся вокруг зоны эрупции.

Объем и содержание вулканических газов, в составе которых, безусловно, огромную роль играли хлориды, фториды, и соединения форм мы пока еще не можем точно оценить количественно. Тем не менее, для приблизительных расчетов можно использовать систему аналогий. Так, в период пароксизмальной фазы извержения паро-газовая колонна поднималась над поверхностью озера на высоту 5–6 км и выглядела как мощнейший гейзер. По свидетельству Я.Д. Муравьева, в основании колонны, также как и у основания выбрасываемого пароводного столба гейзера, наблюдалось бурное кипение воды на площади диаметром около 200 м. Сама паро-газовая колонна имела диаметр порядка 50 м, т.е. площадь сечения составляла около 2000 м², и поднималась на высоту 3–5 км. Такое соотношение очень близко параметрам гейзера «Великан» в Долине Гейзеров на Камчатке. Этот гейзер с площади устья выводного канала 10 м² извергает за одну минуту работы около 30 т воды. Следовательно, можно рассматривать «фонтан» Карымского подводного извержения как аналог одно-временного извержения 200 гейзеров типа «Великан». В таком случае, при этом извергалось около 6×10^3 т воды в минуту. Известно, что подводное извержение продолжалось не более суток. Интенсивность его, конечно, была неодинаковой во времени. Принимая, в среднем, продолжительность активной стадии 10 часов, находим, что в процессе извержения на поверхность было выброшено $3 \times 6 \cdot 10^6$ т воды. Если считать всю эту воду ювенильной⁷, то, исходя

⁵ В 1997 г.

⁶ Эти трещинные зоны хорошо фиксируются на местности по выходам гидротерм и провалам.

⁷ В вулканических газах вода обычно занимает до 98%.

НЕКОТОРЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДВОДНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ

Таблица 2. Химический состав воды оз. Карымское и р. Карымской, мг/л

Компоненты	Номера проб											
	16*	Ф-1/93	22.01/1	11.02/3	11.02/5	Ф-2/10	Ф-2/64	Ф-3/10	Ф-3/58	20-К/96	13-К/96	5-К/97
H ⁺	-	-	0.60	0.76	0.70	0.70	-	-	-	0.22	0.22	0.40
NH ₄ ⁺	-	0.9	-	0.2	0.2	0.2	0.20	0.20	0.20	0.0	0.0	0.10
Na ⁺	10.4	14.0	57.0	75.0	78.0	73.0	64.6	65.3	64.4	74.3	69.2	62.0
K ⁺	1.6	0.84	8.5	7.3	7.3	6.6	6.6	6.6	6.7	7.6	7.1	7.0
Ca ²⁺	1.6	6.0	66.0	66.0	67.0	63.2	63.2	64.0	64.0	64.0	62.0	58.0
Mg ²⁺	0.5	0.6	19.5	14.4	13.2	18.4	18.40	18.9	19.3	7.2	10.9	14.5
Cl ⁻	8.5	21.3	49.0	35.5	39.0	38.3	37.60	40.5	39.0	50.8	49.3	42.6
SO ₄ ²⁻	3.8	4.8	405.9	379.0	379.0	374.6	374.0	374.0	374.0	317.0	317.0	307.0
HCO ₃ ⁻	35.1	22.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F ⁻	0.0	0.08	6.3	1.8	1.8	1.74	1.84	1.70	1.76	-	-	1.40
H ₄ SiO ₄	48.0	48.0	210.0	330.0	333.0	192.0	192.0	190.0	194.0	161.0	157.0	192.0
H ₃ BO ₃	0.0	0.10	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7
Zn	-	0.009	0.042	0.031	-	0.059	0.251	0.059	0.054	-	-	-
Ni	-	0.0002	0.019	0.006	-	0.00	0.005	0.008	0.010	-	-	-
Mn	-	0.001	1.90	1.54	-	1.64	1.70	1.86	1.70	-	-	-
Fe _{общ.}	-	6.87	8.63	7.32	-	9.73	9.46	10.91	7.71	1.7	2.8	3.2
Cu	-	0.0004	0.052	0.040	-	0.041	0.051	0.048	0.053	-	-	-
Sr	-	-	-	0.18	-	0.17	0.20	0.19	0.19	-	-	-
Al	-	-	-	-	-	5.30	5.86	5.89	5.53	3.50	4.10	1.3
Σ М	109.6	125.7	834.9	921.7	920.1	786.5	776.7	780.9	779.4	688.2	680.5	690.4
pH	7.0	7.4	3.22	3.16	3.20	3.22	3.22	3.28	3.22	3.70	3.70	3.40
T ⁰ , C	1	4	22	19	21	-	-	-	-	20	10	1,5
Дата отбора	05.84	07.93	22.01.96	11.02.96	11.02.96	05.96	05.96	05.96	05.96	09.10.96	09.10.96	3.01.97

Примечание. Пробы отобраны: 16* - (Г.Ф. Пилипенко, 1989) из озера на истоке р. Карымской; Ф-1/93 – С.М. Фазлуллиным, там же; 22.01/1 – Г.А. Карповым в северном секторе озера, в 3 м от берега; 11.02/3 и 11.02/5 – Р.А. Шуваловым, соответственно в центральной части озера и в 200 м от северного берега, почти над центром подводной эрупции; с индексом «Ф» - С.М. Фазлуллиным, Ф-2/10 и Ф-2/64 – южнее центра эрупции, на глубинах 10 м и 64 м соответственно, Ф-3/10 и Ф-3/58 – над центром эрупции, на глубинах 10 м и 58 м. Пробы с индексом «К» отобраны Г.А. Карповым – 20-К/96 – в северном секторе озера, в 3 м от берега; 13-К/96 и 5-К/97 – в истоке р. Карымской. Аналитик В.К. Марынова (центральная химическая лаборатория ИВ ДВО РАН). Тяжелые металлы анализировались на ICP К. Сузуки (Токийский университет), в остальных – С.М. Фазлуллиным в геологической службе Японии (г. Цукубо). Прочерк – не анализировалось.

из среднего⁸ содержания воды в магме базальтового состава порядка 0.1%, получим, что дегазировалось 3.6×10^9 т магматического материала. Общая масса изверженного материала (подводной постройки, нового полуострова и тефра на дне озера) оценивается в 72 млн. т (Федотов, 1997). Унесено за пределы озера с потоками воды (мощные отложения в широкой долине в верховьях р. Карымской) и по ветру в виде пепла порядка половины этой массы материала. По нашим расчетам, при извержении на поверхность было выброшено едва 2.7% от общей массы дегазированного базальтового расплава. Основная его часть осталась в магматическом выводном канале и в самом магматическом очаге, в его верхней зоне. Возможно, что мощный прорыв расплава в воду озера, вызвав фреатические взрывы, тем самым еще более усилил извержение, так как при взрывах возникает локальное разряжение, которое, в свою очередь, инициирует дегазацию. В таком случае можно предположить, что быстро дегазированная головная часть магмати-

ческой колонны тем самым была лишена своей движущей силы – газов. Тяжелый, более вязкий дегазированный базальтовый материал как пробкой закупорил выводной канал, и извержение (несмотря на свою огромную начальную мощность) быстро прекратилось.

Итак, принимаем, что при извержении на поверхность поступило $3.6 \cdot 10^6$ т ювенильной⁹ воды. Если исходить из содержания иона хлора в конденсате фумарольных газов – порядка 7.8 г/л, а сульфат-иона – 21.47 г/л (как, например, в активной воронке Мутновского вулкана (Вакин и др., 1976)), то в озеро при извержении должно было поступить 28000 т хлора и 77000 т серы в виде сульфат-иона. Как видим, по порядку цифр получается хорошее совпадение с реальным содержанием в воде озера хлора ($27.2 \cdot 10^3$ т). По-видимому, все другие источники поступления хлора в воду играли подчиненную роль. По сульфат-иону наблюдается более чем двукратное превышение, что дает основание для заключения о присутствии в составе извергнувшегося материала более разнообразных форм

⁸ Хотя есть представления о более высоком содержании воды в магме.

⁹ Т.е. находившейся до извержения в магматическом веществе.

проявления серы, которые при окислении трансформируются в сульфатные соединения.

Проведенные расчеты показывают, таким образом, что можно с достаточным приближением определить количество магматического материала, поднявшегося из магматического очага и находящегося под дном озера цифрой 3.6×10^9 т. При средней плотности габбро (эквивалент базальта) около 3.0 г/см^3 , магматическое «тело» под дном озера должно иметь объем порядка 1.2 км^3 . Сколько тепла генерировало это магматическое вещество в процессе извержения? В нашем случае это сравнительно легко рассчитывается по оценке количества тепла, необходимого для расплавления льда на озере и последующего нагрева этой воды и воды озера до наблюдавшейся температуры 25°C .

При площади поверхности озера 11.33 км^2 , толщине льда 0.2 м , снега 2.0 м и средней плотности льда 0.94 г/см^3 и уплотненного снега 0.45 г/см^3 общая ледово-снежная масса на озере к моменту извержения оценивается в $12.3 \times 10^{12} \text{ г}$. Исходя из теплоемкости льда (80 кал/г), на ее расплавление потребовалось $9.84 \times 10^{14} \text{ Дж}$ тепла. На нагрев этой массы воды от 0 до 25°C требуется $3.36 \times 10^{14} \text{ кал}$ или $14.06 \times 10^{14} \text{ Дж}$ тепла. На подогрев подледной воды (массой¹⁰ около $542 \times 10^{12} \text{ г}$) от 4°C до 25°C необходимо $113.6 \times 10^{14} \text{ кал}$ ($475.6 \times 10^{14} \text{ Дж}$) тепловой энергии. Таким образом общая затрата тепла составляет $126.8 \times 10^{14} \text{ кал}$ или $5.30 \times 10^{16} \text{ Дж}$. Это эквивалентно годовой тепловой разгрузке 27 таких современных гидротермальных систем как Долина Гейзеров на Камчатке (Белоусов, Сугробов, 1976).

Основные выводы

1. Подводное извержение в кальдере Академии Наук привело к кардинальным изменениям химического состава крупного водного бассейна. Пресная вода озера Карымское объемом $544 \times 10^6 \text{ м}^3$ за несколько часов извержения подкислилась до pH 3.2 и приобрела сульфатный натриево-кальциевый состав и общую минерализацию до 0.9 г/л .

2. По северной территории озера, тяготея к новому центру эрупции, возникли термальные площадки и термальные источники (названные Пийповскими (Федотов, 1997)). Состав

¹⁰ Учтена масса льда ($\sim 2 \times 10^{12} \text{ г}$), которая должна входить в массу воды озера.

вод последних различен. Одни гидротермы – сульфатно-хлоридного и натриевого состава, близки к известному Паужетско-Гейзерному типу, другие – относятся к конденсатным, смешанным водам сложного состава.

3. Исходя из представления о быстрой дегазации головной части магматической колонны, внедрившейся под дно Карымского озера, нами дано объяснение непродолжительности подводного фреато-магматического извержения в кальдере Академии Наук.

4. Методом аналогии с механизмом деятельности и параметрами крупных гейзеров типа «Великан» в Долине Гейзеров на Камчатке рассчитана масса ювенильной воды, выброшенной на поверхность за время извержения: $3.6 \times 10^6 \text{ т}$. Тепловая энергия извержений оценена в $1.27 \times 10^{16} \text{ кал}$ ($5.3 \times 10^{16} \text{ Дж}$).

5. Спустя год после извержения, отмечена тенденция уменьшения общей минерализации воды озера за счет уменьшения содержания Mg, B, H_4SiO_4 , SO_4^{2-} . Озеро зимой 1996-1997 гг. покрылось льдом (за исключением узкой прибрежной зоны с термальными источниками). Это может свидетельствовать о резком сокращении поступления эндогенного теплового потока из эруптивного центра.

6. По предварительным данным изменения в химическом составе воды озера начались с 1993 г. Возможные элементы-индикаторы процесса эндогенной активизации района – Cl, S, Na, Ca, B и Zn (?). Гидрохимический мониторинг состава воды кальдерного озера может использоваться для прогностических целей.

Автор благодарит Я.Д. Муравьева и В.А. Дроздина за информацию о ходе извержения и ценные замечания в процессе подготовки статьи.

Примечание

Автор был непосредственным свидетелем извержения и участником полевых работ в районе извержения 1996 г. в кальдере Академии Наук. Эта статья готовилась к публикации в 1997 г., как итоговая по оценке геохимических особенностей продуктов извержения по состоянию изученности на тот период времени. Но в журнале «Вулканология и сейсмология» в конце 1997 г. были опубликованы две крупные статьи (С.А. Федотова и Я.Д. Муравьева с соавторами), в которых этот вопрос был освещен с достаточной полнотой. В то же время (при сходимости многих выводов), наши оценки

количества взрывов в озере и общей мощности извержения несколько расходились, например, с данными С.А. Федотова. Автор счел необходимым проверить свои расчеты. Публикация статьи была отложена. За последующие шесть лет исследований материал статьи получил дополнительные обоснования. Более того, примененный нами оригинальный метод оценки процессов извержения и их масштабов на основе аналогий с работой гейзеров, а также пусть приближенная оценка минимальной массы ювенильной воды, поступившей на поверхность при извержении, дали нам основу другого подхода к оценке суммарной мощности самого извержения. По нашим расчетам, она была на два порядка больше, чем показано в публикации 1997 г. В статье даны ссылки на работы 1997 г., и читатели смогут сами проанализировать изложенный материал и сделать соответствующие выводы о, как мы считаем, уникальном подводном извержении в кальдере Академии Наук в 1996 г.

Список литературы

Белоусов В.И., Сугробов В.М. Геологическая и гидрогеологическая обстановка геотермальных районов и гидротермальных систем Камчатки // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. С. 5-22.

Вакин Е.А., Курсанов И.Г., Курсанова Т.П. Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. С. 85-114.

Гриб Е.Н. Петрология продуктов извержения 2-3 января 1996 г. в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 71-96.

Карпов Г.А. Современные гидротермы и ртутно-сурьмяно-мышьяковое оруденение. М.: Наука, 1988. 183 с.

Муравьев Я.Д., Федотов С.А., Будников В.А. и др. Вулканическая деятельность в Карымском центре в 1996 году: вершинное извержение Карымского вулкана и фреато-магматическое извержение в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 38-70.

Пилипенко Г.Ф. Гидротермы Карымского вулканического центра на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1989. № 6. С. 85-101.

Федотов С.А. Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 3-37.

Karpov G.A., Muraviev Y.D., Shuvalov R.A. et al. A subaqueous eruption from the caldera of Akademii Nauk volcano on January 2-3 1996 // Newsletter of the IAVCEI Commition on Volcanic Lakes. 1996. № 9. P. 14-17.