

УДК 551.217.5; 551.213.3

ДЕГАЗАЦИЯ МАГМЫ КАЛЬДЕРООБРАЗУЮЩЕГО ИЗВЕРЖЕНИЯ КУРИЛЬСКОГО ОЗЕРА 7600 ЛЕТ НАЗАД И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА КЛИМАТ

© 2010 г. П. Ю. Плечов, А. Л. Балашова, О. В. Дирксен

Представлено академиком А.А. Маракушевым 18.12.2009 г.

Поступило 22.12.2009 г.

На южной оконечности Камчатского полуострова 7600 (¹⁴C) лет назад произошло одно из крупнейших кальдерообразующих извержений в голоцене – извержение Курильского озера (КО). Извержение сформировало кальдеру площадью ~76 км²; площадь, на которой фиксируются слои тефры, превышает 2 млн. км², а общий объем выброшенного материала оценивается в 140–170 км³ (70–80 км³ DRE) [1]. Пирокластический материал извержения КО обнаружен в ледниковом покрове Гренландии [2], что свидетельствует о всепланетном эффекте, произведенном извержением. Данное исследование посвящено оценке объема летучих компонентов, выброшенных в атмосферу во время извержения КО, и возможного влияния этого извержения на климат.

Содержание летучих в магме до извержения определяли прямыми измерениями содержания H₂O, S, Cl и F в стекловатых расплавных включениях, законсервированных в фенокристаллах плагиоклаза. Содержание летучих в породах после извержения оценивали по анализам стекол основной массы в тефре. Петрогенные компоненты измерены в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии геологического факультета МГУ (JEOL JSM-6480LV с энергодисперсионным анализатором INCA-Energy 350 и волновым спектрометром INCA-Wave 500); анализы на Cl, S, Mn в стеклах выполнены с помощью Cameca SX-100 (ГЕОХИ РАН, Москва); H₂O и F в стеклах определяли вторичной ионной масс-спектрометрией на приборе Cameca 5f (ИМИ РАН, Ярославль).

Материал для исследования был отобран в 2006 г. из обнажения на левом берегу р. Варварина, примерно в 2 км к северо-западу от места ее впадения в Тихий океан (бухта Три Сестры) и в

28.3 км к югу от Курильского озера (координаты 51°09'33" с.ш., 157°03'59" в.д.). Горизонт пирокластики КО в этом месте имеет общую мощность ~1.8 м. В верхней части горизонта лежит туф пирокластического потока мощностью ~1.5. В нижней части горизонта залегают двучленная тефра этого извержения общей мощностью ~30 см. Тефра КО представляет собой относительно хорошо сортированный рыхлый материал, состоящий из обломков пемзы с размерностью обломков до 3 см.

Из фракции 0.5–1 мм отобрали ~300 кристаллов плагиоклаза и из них приготовили препарат для изучения расплавных включений. Вкрапленники плагиоклаза извержения КО имеют сложноритмичную зональность, вариации состава в пределах An₄₂–An₅₄ и содержат крупные стекловатые природно-закаленные расплавные включения (рис. 1). Форма включений преимущественно изометричная или удлиненная (отношение длины к ширине до 5 : 1), размеры до 200 мкм в диаметре (для изометричных включений) и до 150 мкм в длину (для удлиненных). В некоторых включениях фиксируется маленький газовый пузырек (1% от объема включения), однако часть крупных включений не содержит видимого газового пузырька, что свидетельствует об очень быстрой закалке тефры во время извержения.

Как стекловатые расплавные включения в плагиоклазах, так и стекла основной массы пемзы являются риолитовыми; их состав отражает состав главной порции магмы в магматическом очаге перед извержением (табл. 1). Стекла основной массы беднее титаном и железом и богаче кремнеземом, алюминием, кальцием и натрием по сравнению с составом расплавных включений, что может свидетельствовать о кристаллизации титаномагнетита на стадиях, непосредственно предшествовавших закалке.

Существенные вариации содержания воды в расплавных включениях связаны с ее частичной потерей во время декомпрессии магмы [3]. Судя по узкому интервалу содержания воды в изученном образце (5.9–7.5 мас. %), эффект дегазации включений был незначительным. Для устранения эффекта потери воды расплавными включения-

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Институт вулканологии и сейсмологии
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук,
Петропавловск-Камчатский

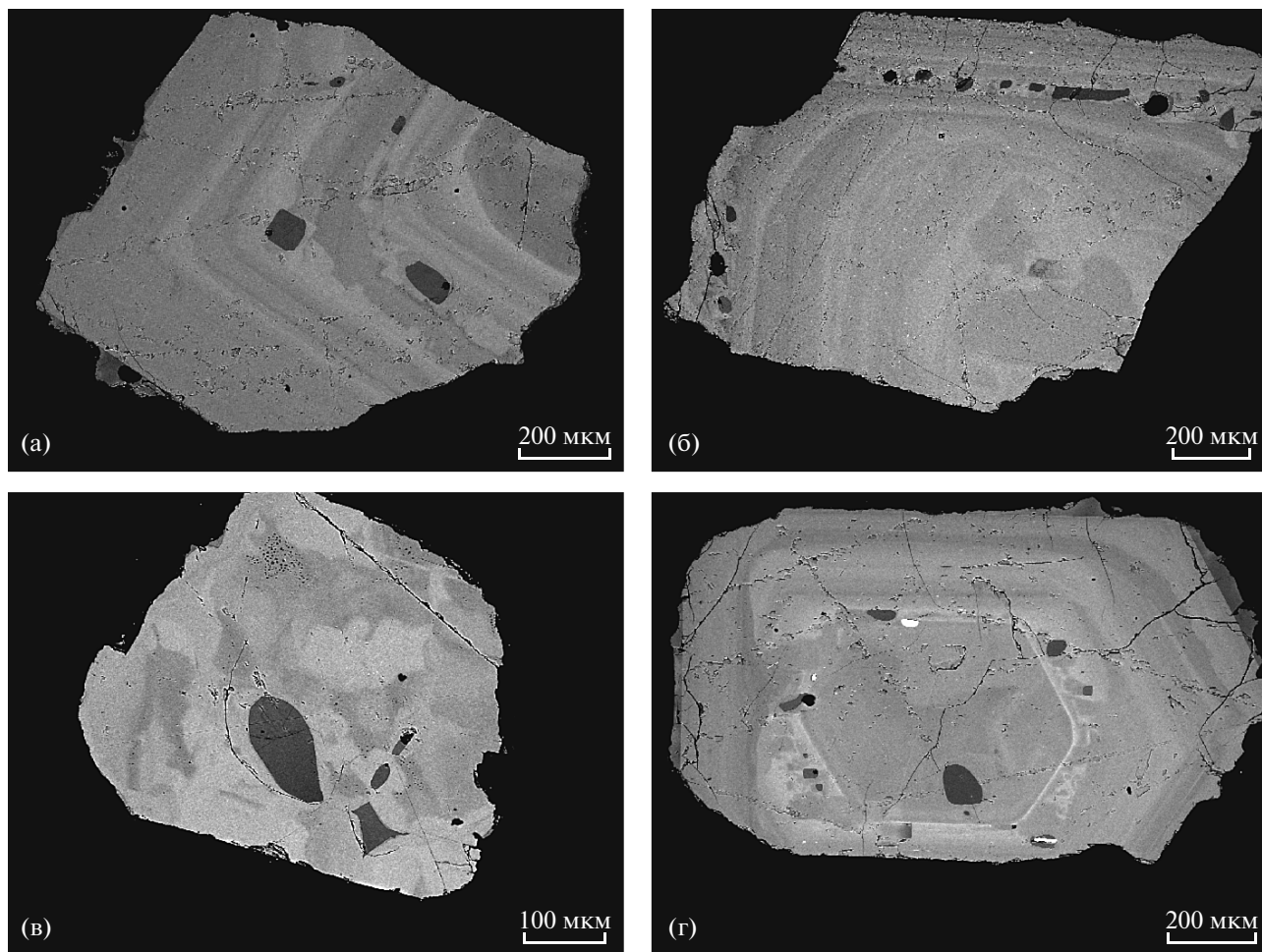


Рис. 1. Первичные стекловатые расплавные включения в плагиоклазах кальдеры Курильского озера.

Фотографии в отраженных электронах, JEOL JSM-6480LV, МГУ.

а — изометричное расплавное включение (100×100 мкм) с газовым пузырьком (диаметр 10 мкм), соответствует анализу 16 в табл. 1; б — расплавное включение вытянутой формы (200×30 мкм), приуроченное к зоне роста кристалла, соответствует анализу 18 в табл. 1; в — расплавное включение (170×60 мкм) удлинённой формы, не приуроченное к зональности кристалла, соответствует анализу 77 в табл. 1; г — расплавное включение (100×50 мкм), не приуроченное к определенной зоне роста кристалла.

ми за содержание воды в магматическом расплаве нами принято максимальное измеренное значение, т.е. 7.5 мас. %. Общий объем извергнутой магмы КО оценивается в $70\text{--}80$ км³ [1], а ее масса — в $(1.7\text{--}1.9) \cdot 10^{14}$ кг. Породы КО содержат в среднем ~15% фенокристаллов, подавляющее большинство которых представлено плагиоклазом и безводными темноцветными минералами. Таким образом, масса извергнутого магматического расплава составляла $(1.4\text{--}1.6) \cdot 10^{14}$ кг, и этот расплав являлся контейнером для $(1\text{--}1.2) \cdot 10^{13}$ кг воды.

Каждая пемзовая частичка имеет собственную историю дегазации и кристаллизации, которая зависит от вязкости магмы, размера частицы, скорости остывания, кинетики нуклеации пузырьков и других параметров [4]. Растворимость воды в риолитовом расплаве при атмосферном

давлении — менее 0.2 мас. %. Измеренное в стеклах пемз КО содержание воды значительно выше ее растворимости при 1 атм (4.5–5.5 мас. %, среднее значение 4.94), что свидетельствует о неполной дегазации. Неполная дегазация характерна для кальдерообразующих и плинианских извержений [5], что связывают с эффективной закалкой частиц тефры в атмосфере. Величины измеренного содержания воды в пеплах и пемзовых частицах близки между собой, что позволяет принять их для всей тефры, имеющей сходный режим остывания. Игнимбритовые покровы, пирокластические потоки и внутрикальдерные отложения, чья суммарная доля составляет ~40 об. %, могли охлаждаться с меньшей скоростью и поэтому быть более дегазированными, чем пепловые и пемзовые отложения. Для кальдерообразующих извержений (например, Байтоушан, Vaitoushan,

Таблица 1. Состав расплавных включений и пемз извержения Курильского озера (мас. %)

Номер зерна	Ап	Размер включений, мкм	SiO ₂ ^а	TiO ₂ ^б	Al ₂ O ₃ ^а	FeO* ^а	MnO ^б	MgO ^а	CaO ^а	Na ₂ O ^а	K ₂ O ^а	H ₂ O ^в	Cl ^б	S ^б	F ^в	Сумма
Расплавные включения																
7	50	100 × 20	72.80	0.29	11.76	1.50	0.01	0.29	1.41	4.37	1.87	7.52	0.150	0.014	0.028	102.02
16	51	120 × 120	71.98	0.31	12.16	1.63	0.02	0.30	1.58	4.26	1.96	6.68	0.142	0.012	0.038	101.07
18	42	150 × 20	72.89	0.23	11.61	1.22	0.01	0.18	1.12	4.32	1.91	5.96	0.161	0.012	0.027	99.64
35	54	100 × 120	70.34	0.22	12.20	1.32	0.02	0.29	1.37	3.97	2.19	7.44	0.142	0.019	0.040	99.56
40	42	80 × 80	74.30	0.29	11.42	1.60	0.01	0.33	0.94	4.21	2.00	7.19	0.166	0.002	0.038	102.50
60	45	50 × 50	71.11	0.41	12.75	1.44	0.02	0.24	1.63	4.00	2.17	6.90	0.159	0.004	0.036	100.87
75	51	80 × 60	73.69	0.15	12.05	1.34	0.01	0.27	1.38	4.02	2.15	5.71	0.139	0.013	0.037	100.96
77	52	150 × 70	73.11	0.34	11.82	1.68	0.02	0.30	1.12	4.25	1.97	5.94	0.162	0.012	0.041	100.76
91	43	120 × 80	73.11	0.25	12.35	1.31	0.01	0.22	1.40	4.16	2.04	6.93	0.170	0.021	0.040	102.61
Среднее			72.66	0.28	12.01	1.45	0.01	0.27	1.33	4.17	2.03	6.70	0.155	0.012	0.036	101.11
Дисперсия			1.67	0.01	0.16	0.03	0.00	0.00	0.05	0.02	0.01	0.46	0.000	0.000	0.000	
Пемзы																
7			74.44	0.23	12.07	1.26	0.01	0.16	1.24	4.23	1.99	4.78	0.129	0.001	0.034	100.57
38			73.72	0.27	13.01	1.53	0.02	0.28	1.48	4.29	1.94	4.60	0.131	0.009	0.039	101.33
40			73.94	0.25	12.52	1.25	0.02	0.22	1.43	4.31	1.92	5.34	0.143	0.000	0.031	101.38
60			75.40	0.28	12.50	1.52	0.02	0.25	1.39	4.16	2.04	4.47	0.150	0.003	0.037	102.22
91			74.26	0.23	12.38	1.41	0.01	0.25	1.48	4.19	2.02	5.49	0.135	0.001	0.033	101.89
Среднее			74.35	0.25	12.50	1.40	0.02	0.23	1.40	4.24	1.98	4.94	0.138	0.003	0.035	101.48

Примечание. Ап – количество аноритовой составляющей (мол. %) в плагиоклазе-хозяине; FeO* – суммарное содержание железа приведено для двухвалентной формы. ^а Микроскоп JEOL JSM-6480LV с анализатором INCA-Energy 350 (МГУ). ^б Микронзонд Cameca SX-100 (ГЕОХИ РАН). ^в Ионный зонд Cameca 5f (ИМИ РАН, Ярославль).

Северная Корея, Китай) величины содержания летучих в игнимбритовых покровах и тефрах различаются несистематически и их можно принять равными [6].

Положительная корреляция содержания воды и хлора в стеклах КО свидетельствует о несущественной гидратации тефры метеорными водами, которая может быть весьма значительной для подводных тефровых отложений [7]. Эффект гидратации стекол после извержения не поддается количественной оценке, поэтому среднее из измеренных в стеклах пемз содержание воды можно принять за максимальную оценку для изверженных продуктов. Таким образом, отложения КО содержат не более $(7.1-8.1) \cdot 10^{12}$ кг воды и в результате извержения КО в атмосферу поступило не менее $(3.7-4.2) \cdot 10^{12}$ кг воды. Распространяя аналогичные рассуждения на другие летучие компоненты, получим, что в атмосферу поступило $(4.3-4.9) \cdot 10^{10}$ кг хлора, $(8.6-9.8) \cdot 10^9$ кг фтора и $(2.6-2.9) \cdot 10^{10}$ кг серы. При этом стекла КО сохранили существенную часть хлора и фтора, тогда как сера практически полностью мигрировала.

Пары воды, формируя облачный покров, связывают большую часть выделившихся при извержении галогенов. Это может вызвать кислотные дожди в первые недели после извержения. Формирующийся облачный покров существенно влияет на проницаемость атмосферы для солнечной радиации, но этот эффект непродолжителен и имеет локальный характер. Основным климатическим эффектом вулканических извержений является образование долгоживущих сульфатных аэрозолей в стратосфере, что приводит к уменьшению ее проницаемости для солнечных лучей и похолоданию на поверхности Земли [8].

Величины содержания воды в первичных островодужных магмах максимальны для фронтальных частей дуг и уменьшаются при удалении от вулканического фронта [9]. Содержание фтора и серы, напротив, минимально в магмах вулканических фронтов и возрастает к тыловым зонам островодужных систем [9]. Для магм КО, приуроченных к активному вулканическому фронту, характерно высокое содержание воды и очень низкое содержание серы и фтора. Поэтому климатический эффект извержения КО сравним с гораздо

меньшими по объему историческими извержениями других геодинамических обстановок. Количество серы, попавшей в стратосферу во время извержения КО, примерно в 2 раза больше, чем во время извержений Кракатау (1883 г.), Катмаи (1910 г.), Пинатубо (1991 г.), имевших значительный климатический эффект [10]. Близкие к извержению КО оценки количества дегазированной серы получены для извержений вулканов Гайнапатина, Нуаупарутина, (Перу) в 1600 г. ($2.3 \cdot 10^{10}$ кг серы) и Тамбора, Tambora, (Индонезия) в 1815 г. ($2.8 \cdot 10^{10}$ кг серы) [10]. Климатический эффект извержений вулканов Гайнапатина (1600 г.) и Тамбора (1815 г.) относительно хорошо изучен и заключался в аномально холодных летних сезонах во многих районах мира на протяжении 2–3 лет. Извержение Тамбора (1815 г.) является причиной холодного 1816 г. в Европе (“года без лета”) [10], а извержение Гайнапатина (1600 г.), как считают, вызвало неурожай и голод в России 1601–1603 гг. [11].

В отличие от приэкваториальных извержений вулканов Тамбора и Гайнапатина климатический эффект извержения КО, находящегося в умеренно-северных широтах, должен был быть более локальным и, вследствие этого, более резким и продолжительным, так как разнос сульфатных аэрозолей мог осуществляться только в отдельных частях Северного полушария и их концентрация должна была быть выше, чем в случае извержений приэкваториальных вулканов.

Таким образом, извержение Курильского озера 7600 лет назад привело к выбросу в атмосферу

не менее $(3.7-4.2) \cdot 10^{12}$ кг воды, $(4.3-4.9) \cdot 10^{10}$ кг хлора, $(8.6-9.8) \cdot 10^9$ кг фтора и $(2.6-2.9) \cdot 10^{10}$ кг серы. Это извержение должно было иметь существенный климатический эффект, один из самых значимых за голоценовую эпоху.

Данное исследование поддержано РФФИ (грант 08–05–00193) и программой Президента РФ “Ведущие научные школы России” (грант 5338.2006.5, руководитель Л.Л. Перчук).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ponomareva V.V., Melekestsev I.V., Kyle P.R. et al. // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2004. V. 136. P. 199–222.
2. Брайцева О.А., Сулержицкий Л.Д., Пономарева В.В. и др. // ДАН. 1997. Т. 352. № 4. С. 516–518.
3. Wallace P.J. // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2005. V. 140. № 1/3. P. 217–240.
4. Papale P. // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 11043–11065.
5. Piochi M., Polacci M., De Astis G. et al. // Geochem. Geophys. Geosyst. 2008. V. 9. № 3. Q03013.
6. Horn S., Schmincke H.-U. // Bull. Volcanol. 2000. V. 61. № 8. P. 537–555.
7. Friedman I. // Geol. Soc. Amer. Bull. 1966. V. 77. № 3. P. 323–328.
8. Wanner H., Beer J., Bëtikover J. et al. // Quatern. Sci. Revs. 2008. V. 27. P. 1791–1828.
9. Portnyagin M., Hoernle K., Plechov P. et al. // Earth and Planet. Sci. Lett. 2007. V. 255. P. 53–69.
10. Oppenheimer C. // Progress Phys. Geogr. 2003. V. 27. № 2 P. 230–259.
11. De Silva S.L., Zielinski G. // Nature. 1998. V. 393. P. 455–458.