ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ, 2022, № 4, с. 31–46

УДК 551.217.5

ГАЗОВАЯ ЭМИССИЯ ВУЛКАНА ЭБЕКО (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА) В 2003–2021 гг.: ГЕОХИМИЯ, ПОТОКИ И ИНДИКАТОРЫ АКТИВНОСТИ

© 2022 г. Т. А. Котенко[a], *, Д. В. Мельников[a], К. В. Тарасов[a]

[a] Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

*e-mail: sinarka2017@mail.ru

Поступила в редакцию 06.12.2021 г.
После доработки 07.02.2022 г.
Принята к публикации 08.04.2022 г.

Приводятся новые данные о химическом и изотопном составе вулканических газов, эмиссии SO_2 и почвенного CO_2 действующего вулкана Эбеко. Вулкан извергался в 2009, 2010, 2011 гг., с октября 2016 г. по ноябрь 2021 г. Состав вулканических газов за 2003–2016, 2021 гг. получен в результате прямого опробования фумарол. Высокотемпературный газ (420–529°C) имеет состав, типичный для курильских магматических газов с атомным отношением C/S <1, содержанием HCl 5–7 ммоль/моль, изотопным составом конденсатов: $\delta D \sim -24$, $\delta^{18}O = 2.6–4.9$. Установлены геохимические предвестники извержений: увеличение концентраций CO_2, H_2, SO_2, H_2S, HCl; падение отношения C/S вплоть до величин <1, характерного для магматических газов Курил; рост температуры; утяжеление изотопов δD и $\delta^{18}O$ в конденсатах вулканического пара; увеличение газового потока. Методом накопительной камеры измерен высокий почвенный поток CO_2 на двух термальных полях (до 10442 г/м^2/сут), превышающий видимый фумарольный вынос (~50 т/сут против ~40 т/сут). Поток SO_2 из активного кратера был измерен с помощью сканирующего УВ спектрометра ДОАС в 2020 и 2021 гг. и составил: 99 ± 28 и 9 ± 2.7 т/сут в газовых шлейфах, и 747 ± 220 и 450 ± 130 т/сут в пепловых шлейфах соответственно. Уменьшение эмиссии SO_2 в августе 2021 г. связывается с дегазацией магмы перед завершением извержения.

Ключевые слова: вулкан Эбеко, вулканические газы, поток SO_2, предвестники извержений, диффузия CO_2

DOI: 10.31857/S0203030622040058

ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Эбеко – один из наиболее активных вулканов Курильской островной дуги. История его эруптивной активности показывает, что прекращение лавовых излияний около 2.4 тыс. лет назад сменилось чисто эксплозивными извержениями вулканского типа [Мелекесцев и др., 1993а; Belousov et al., 2021]. Для извержений данного типа характерны периодические кратковременные взрывы умеренной силы, при которых формируются пепловые колонны или шлейфы. По механизму инициации извержения вулкана Эбеко, имеющего мощную гидротермальную систему, классифицируются как фреатические и фреато-магматические [Мелекесцев и др., 1993б; Kalacheva et al., 2016; Belousov et al., 2021]. На вулкане за последние 100 лет произошло 5 продолжительных вулканских извержений, не считая одиночных взрывов [Belousov et al., 2021]. Последнее извержение продолжалось более пяти лет (октябрь 2016 г.–ноябрь 2021 г.). При такой частоте и длительности эруптивных событий вулкан Эбеко представляет значительную угрозу для населения г. Северо-Курильск (отдаление от вулкана всего 6 км) и регионального авиасообщения. При этом небольшая высота и относительная доступность позволили в середине прошлого века начать геохимический мониторинг состояния вулкана [Воронова и др., 1966; Сурнина, 1959]. В работах [Меняйлов и др., 1988а, 1988б; Menyailov et al., 1985] было установлено, что состав низкотемпературных фумарольных газов (<120°C) на вулкане Эбеко в межэруптивный период стабилен, а в предэруптивный – прослеживаются увеличение температуры и изменение соотношений между концентрациями CO_2, H_2, H_2S, SO_2, HCl, HF [Menyailov et al., 1985]. Изменения начинают проявляться за несколько лет до начала извержения.

В данной статье анализируются газовые пробы 2003–2016, 2021 гг., полученные прямым опробованием с целью обнаружения геохимических индикаторов вулканической активности. Кроме того, дистанционным методом определены потоки SO_2 как в периоды фумарольной деятельности, так и в пепловых выбросах. Также впервые при-

водятся данные потока почвенного CO_2 на двух фумарольных полях.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав газов получен в результате прямого опробования фумарол и анализа по общепринятой методике [Giggenbach, Goguel, 1989]. Для отбора фумарольных газов применялись барботеры и ампулы Гиггенбаха с щелочным поглотителем (4 М раствор NaOH) и кварцевая газоотборная трубка. Также брались пробы для фиксации H_2S в барботерах с добавлением 10% ацетата Cd. Конденсаты фумарольных газов отбирали в охлаждаемый барботер с принудительной прокачкой газа для определения изотопного (δD и $\delta^{18}O$) и химического состава фумарольного пара. Химические анализы выполнены в Аналитическом Центре и в лаборатории постмагматических процессов ИВиС ДВО РАН.

Изотопный состав воды ($\delta^{18}O$ и δD) конденсатов фумарольных газов проанализирован: в 2007 г. – в Геологической службе Японии (Geological Survey of Japan, K. Kazahaya), остальные – в Лаборатории тепломассопереноса ИВиС ДВО РАН на приборе Los Gatos (аналитик П.О. Воронин). Погрешность определения изотопного состава ±0.2‰ для $\delta^{18}O$ и ±1‰ для δD.

Измерения потока почвенного CO_2 производились методом накопительной камеры [Chiodini et al., 1998]. Работа велась с помощью прибора LICOR LI-8100, состоящего из накопительной камеры, снабженной инфракрасным газоанализатором, с обработкой данных на мини-компьютере. Газ циркулирует из камеры в анализатор и обратно через пластиковые трубки с помощью воздушного насоса. Поток CO_2 рассчитывается на основании увеличивающейся со временем концентрации газа в камере. В каждой точке была измерена температура грунта на глубине до 20 см.

Дистанционные измерения эмиссии диоксида серы выполнялись с помощью сканера, работающего на основе дифференциальной оптической абсорбционной УВ-спектрометрии (ДОАС). Технически сканер соответствует оборудованию, разработанному в рамках проекта Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC) [Galle et al., 2010]. Для создания ортофотоплана вулкана Эбеко и его фумарольных полей использовались: квадрокоптер DJI Phantom 4 PRO (съемка в видимом диапазоне) и квадрокоптер DJI Matrice 300 RTK, на котором установлена камера Zenmuse H20T для съемки в видимом и инфракрасном диапазонах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения в расположении и мощности фумарольных полей

На вулкане Эбеко газовая разгрузка наблюдается на площади около 0.7 км^2. В 2002–2003 гг. в кратерах вулкана и на их внешних склонах [Котенко, Котенко, 2006] можно было выделить 12 участков (фумарольных полей) (рис. 1, №№ 1–4, 6–11, 13, 14) и две парящие площадки на гребне плейстоценового конуса (см. рис. 1, № 12). Парогазовый поток для всего вулкана в этот период был оценен в ~906 т/сут, из которых >70% давали фумаролы 2-го Восточного поля. Вклад Активной Воронки был очень мал (0.02 т/сут). Постоянного озера на дне Активной Воронки не было. Также не было термальной активности в Среднем кратере, и она почти прекратилась на участке фумаролы Гремучая. С 27 января 2005 г. началось наращивание мощности газовой разгрузки в Активной воронке, появились фумаролы на дне кратера, что привело к формированию термального озера (рис. 2а); появилось фумарольное поле Июльское на внешнем склоне Активной воронки и фумарола в воронке взрыва ниже Северо-восточного поля [Котенко и др., 2007]. Усиление или появление фумарольной деятельности проявилось на площади около 0.16 км^2 с максимальным расстоянием до 0.5 км к востоку от будущего жерла извержения в Активной воронке.

29 января 2009 г. началось эксплозивное извержение вулкана, которое продолжалось до 18 июня 2009 г. [Котенко и др., 2010; McGimsey et al., 2014]. Извержение заключалось в умеренных кратковременных вулканских взрывах. Из жерла в восточной стенке Активной воронки в течение светлого времени суток происходило от 3 до 15 взрывов с разной периодичностью, высота подъема пепла составляла 0.5–3.7 км над кратером. Во время извержения максимальная температура фумарол за пределами активного кратера наблюдалась на Юго-восточном поле (125°С) (табл. 1), на остальных полях температура не превышала 115°С. Температура газов эксплозивного жерла составляла 400–500°С.

После окончания извержения 2009 г. и до начала извержения в октябре 2016 г. фумарольная деятельность сохранялась в пределах всех выделенных на рис. 1 участков. Высокотемпературная парогазовая разгрузка (≥400°С) продолжалась и после извержения 2009 г. из эруптивного жерла в Активной воронке (см. рис. 2б). В верхней части южного склона Среднего кратера появилась линейная область прогрева со слабым парением. В 2011 г. в озере Среднего кратера произошли фреатические взрывы, оставившие два маара на дне озера, но повышение температуры озера не произошло, и оно оставалось холодным [Котенко и др., 2012].

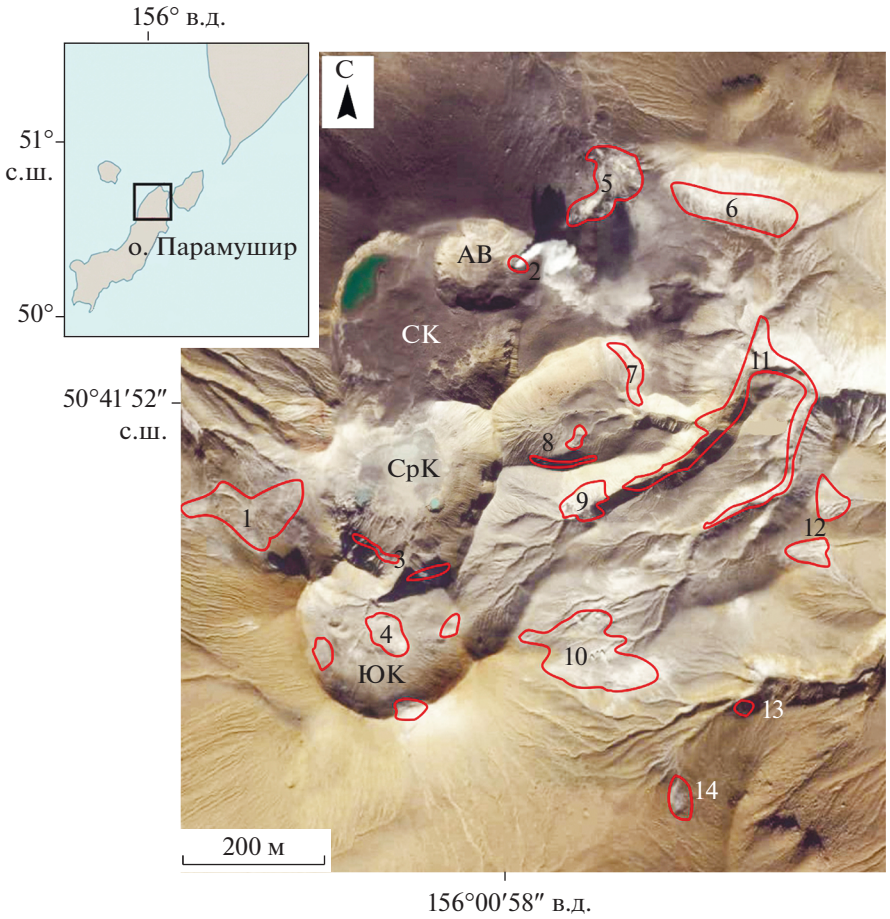

Рис. 1. Расположение вулкана Эбеко (врезка) и его фумарольных полей в сентябре 2016 г.
Фумарольные поля: 1 – Западное, 2 – Активной воронки (АВ), 3 – Среднего кратера (СрК), 4 – Южного кратера (ЮК), 5 – Июльское (ИП), 6 – Северо-восточное (СВП), 7 – Флоренского (ФП), 8 – 1-е Восточное, 9 – 2-е Восточное, 10 – Юго-восточное (ЮВП), 11 – ручья Лагерного (ЛП), 12 – плейстоценового конуса, 13 – 2-е ЮВП, 14 – 3-е ЮВП. В качестве картографической основы использован космический снимок с сервиса Google Earth.

Последнее извержение вулкана Эбеко, длившееся более пяти лет (с октября 2016 г. по 19 ноября 2021 г.), началось в Активной воронке и Среднем кратере одновременно. Подробно ход извержения и детали миграции его жерл освещены в работах [Котенко и др., 2018, 2020; Belousov et al., 2021]. До августа 2017 г. в Активной воронке действовало одно жерло на восточном склоне, затем появилось второе на противоположном склоне (см. рис. 2в). До августа 2018 г. дегазация и выбросы пепла наблюдались из этих двух жерл, затем – только из западного (см. рис. 2г). В сентябре 2018 г. Активная воронка была полностью засыпана пирокластикой, а вокруг западного жерла был взрывами выкопан новый кратер – кратер Корбута (см. рис. 2д, 3). В англоязычной литературе закрепилось название Новый северный кратер (New-North-Crater) [Walter et al., 2020].

В результате аэросъемки кратеров и фумарольных полей в видимом и инфракрасном диапазоне, выполненной 16 августа 2021 г., был получен ортофотоплан вулкана Эбеко. Фотомозаика с наложением температурных аномалий показана на рис. 3. Конус растущего кратера Корбута заполнил весь Северный кратер. Глубина молодого кратера на дату съемки составляла ~100 м при диаметрах по бровке 230 м, по дну – 110 м. Сильная фумарольная активность была сосредоточена на дне и нижних частях склонов (см. рис. 2е). Дно кратера после сильных взрывов очищалось и тогда была видна бугристая поверхность, разбитая трещинами. Предположительно, открывалась головная часть магматического тела. В ходе извержения были частично засыпаны тефрой фумарольные поля Флоренского и Июльское. Фото- и аэрофотосъемка, проведенные в 2017–2021 гг., подтвердила наличие газовой разгрузки в юго-восточной части холодного озера в Среднем кратере. Мощность разгрузки незначительна по сравнению с объемом воды в озере, поэтому температура озерных вод не поднимается выше 12°С и на инфракрасном снимке поверхность озера – это

Рис. 2. Парогазовая и эруптивная активность в активных кратерах вулкана Эбеко: кратерное озеро и фумаролы в восточной стенке Активной воронки в предэруптивный период (а); в Активной воронке действует единственное высокотемпературное газовое жерло, кратер сухой (б); газовая разгрузка из двух жерл Активной воронки в паузах между пепловыми выбросами (в); действует только одно жерло в Активной воронке (западное) (г); фумаролы в кратере Корбута 24 июня 2020 г. (д); фумарольная активность там же 26.08.2021 г. (е). Фото: Л.В. Котенко (а–д), Ю.А. Витушко (е).

самый холодный участок. Максимальная температура 340°С была получена в кратере Корбута. Эта температура, вероятнее всего, ниже реальной, так как небольшая загазованность кратера экранировала горячие участки.

Общая характеристика состава фумарольных газов

Представительные газовые анализы фумарол Эбеко за период 2003–2021 гг. показаны в табл. 1, где они сгруппированы по местоположению. Такая группировка выбрана из-за отличия составов газов на разных полях, на что указывалось и ранее [Меняйлов и др., 1988а; Kalacheva et al., 2016]. Максимальная измеренная температура в период с 2003 г. по июнь 2005 г. составила 140°С, в 2005–2008 гг. – 300–529°С (Июльское поле и Активная воронка). После извержения 2009 г. в Активной воронке сохранялась мощная газовая разгрузка с температурой более 400°С, которая стала доступна для прямого опробования только в течение короткого периода в 2015–2016 гг. В это время впервые удалось получить ряд последовательных анализов высокотемпературного газа с максимальной темпе-

Таблица 1. Химический состав фумарольных газов вулкана Эбеко, ммоль/моль

Место отбора	Время отбора	T°C	H_2O	H_2	CO_2	CO	SO_2	H_2S	HCl	HF	N_2 **	Ar**	He	CH_4	C/S	S/Cl	$\delta^{18}O$	δD
СВП	2003*	110	980	0.0001	17.2	0.00001	2.10	0.08	0.18		0.05	0.0013	0.00018	0.0005	7.9	12.1		
СВП	2004*	110	987.0	0.00013	7.9	0.00003	2.90	0.22	0.08		0.06	0.0007	0.00002	0.00006	2.5	39		
СВП	2005*	125	987.9	0.0001	7.6	0.00002	3.56	0.19	0.31		0.27	0.0053	0.0002	0.00003	2	12.3		
СВП	12.02.2010	100	979.3	0.0003	17.9	0.00003	1.36	0.17	0.97		0.16	0.002	0.0002	0.0005	11.7	1.6		
СВП	11.05.2010	108	981.7	0.0004	15.5	0.00001	2.07	0.21	0.04		0.41	0.006	0.0002	0.0006	6.8	60		
СВП	09.08.2011	115	942	0.00007	54.7	0.00004	1.64	0.31	0.18		0.88	0.012	0.0007	0.001	28.1	10.7		
СВП	2012*	115	992	0.0001	6.9	0	0.54	0.17	0.01		0.24	0.003	0.00004	0.0001	9.7	71		
СВП	23.08.2013	110	944.3	0.00009	52.4	0.00007	0.72	0.31	0.46		1.06	0.018	0.00031	0.0003	50.9	2.2		
СВП	31.07.2014	110	919.7	0.0065	75.9	0	0.68	0.66	0	0.008	1.87	0.027	0.00135	0.0016	56.8		–4.8	–47
СВП	26.08.2015	101	946.0	0.00004	51.5	0.00004	1.59	0.44	0.07		0.23	0.004	0.00017	0.0002	25.4	30	–4.98	–47.4
СВП	12.05.2016	113	941.4	0.0002	77.6	0.00113	1.51		0.24		0.93	0.010	0.00074	0.001	51.4	6.4	–4.12	–46.2
СВП	02.09.2016	104	916.6	0.0003	77.6	0.00005	4.87		0.03		0.39	0.002	0.00006	0.0006	15.9	162	–4.02	–45.7
ИП	2005*	147	905.0	0.0002	22.7	0.00004	33.5	2.50	27.5		1.3	0.022	0	0.00005	0.6	1.3		
ИП	11.08.2007	320	987.8	0.2787	2.8	0	6.13	0.65	0.81		0.22	0.005	0	0.00009	0.4	8.3		
ИП	11.09.2007	255	986.1	0.0054	2.74	0	7.12	0.39	0.21		0.50	0.008	0	0.00009	0.4	35	–4	–56.7
ИП	22.02.2008	188	989.2	0.016	3.73	0	3.22	0.63	0.11		0.31	0.002	0	0	1	35		
ИП	25.04.2009	110	969.3	0.0018	17.7	0	4.13	1.29	2.31		3.58	0.05	0	0.00002	3.3	2.3		
ИП	2011*	106	993.3	0.07	5.8		0.34	0.25	0.05		0.21	0.002	0.00007	0.00002	9.8	12		
ИП	26.08.2015	101	972.6	0.045	25.6	0.005	1.59		0.006		3.35	0.046	0.00002	0.00015	16.1	274		
АВ	2008*	105	982.3	0.176	8.88	0	2.83	1.32	0.4		0.72	0.006	0.0003	0.00006	2.1	9.5		
АВ	26.08.2015	497	923.2	0.057	34.3	0.00019	33.5	4.19	4.36		0.21	0.004	0.00003	0.00005	0.9	8.6	2.57	–24.6
АВ	12.05.2016	472	957.2	0.411	14.0	0.00014	26.95		1.21		0.05	0.001	0.00010	0.00001	0.5	22	4.23	–23.1
АВ	02.09.2016	503	948.0	0.06	13.5	0.00016	27.21	4.18	6.79		0.22	0.002	0.00002	0.00001	0.4	4.6	4.89	–24.2
ФП	2010*	117	983.2	0.0001	14.4	0	0.18	1.90	0.3		0.14	0.0003	0.00024	0.00001	6.9	6.9		
ЮК	2011*	116	959.6	0.078	34.4	0	2.40	0.05	2.1		0.30	0.004	0.00037	0.00009	14	1.2		
ЮК	23.04.2016	110	966.2	0.0017	69.3	0.00043	11.6		4.13		2.10	0.012	0.00022	0.00015	5.9	2.8	–2.9	–42.1
ЮК	15.09.2016	131	953.3	0.0076	31.9	0.00002	4.82		9.62		0.01	0.0002	0.00029	0.00001	6.6	0.5	–1.2	–34
ЮК	11.08.2021	105	971.9	0.001	26.5	0.00001	1.06	0.31	0.001	0.004	0.19	0.0015	0.00006	0.00006	19.3	1136		
ЮВП	16.09.2008	123	900.7	0.04	84	0	8.90	1.50	3.3		0.08	0.001	0.0009	0.003	8.1	3.2		
ЮВП	25.04.2009	125	941.3	0.0018	45.3	0.00007	5.38	1.75	5.74		0.15	0.0006	0.00059	0.00005	6.4	1.2		
ЮВП	2010*	135	812.2	0.0021	152	0	40.8	2	0.4		1.00	0.017	0.0018	0.0002	3.6	107		
ЮВП	13.09.2012*	120	945.6	0.9	48	0	1.60	1.60	0.8		1.10	0.030	0.0031	0.0003	15	4.0		
ЮВП	14.04.2014	140	960.9	0.0006	28.7	0	4.09	2.58	3.05	0.031	0.49	0.006	0.00025	0.0001	4.3	2.2	–2.3	–45.6
ЮВП	21.04.2016	107	966.8	0.0050	23.5	0.00008	29.9		0.90		0.64	0.001	0.00103	0.00001	0.8	33.2	–1.87	–43.3
ЮВП	15.09.2016	129	902.9	0.0026	83.8	0.00004	9.16		3.55		0.13	0.00001	0.0008	0.00003	9.2	2.6	–1.67	–38.2
ЮВП	12.08.2021	110	931.2	0.035	60.2	0.00003	3.37	3.04	1.27	0.013	0.07	0.0006	0.0002	0.00006	9.4	4		
ЮВП	15.08.2021	110	936.5	0.0005	59.7	0.00005	2.62	0.41	0.18	0.012	0.14	0.002	0.0003	0.00002	19.7	17		
ЛП	26.08.2015	100	977.6	0.00002	20.7	0.00002	0.54	0.87	0.02		0.14	0.002	0.00005	0.00002	14.6	91	–9.8	–72
ЛП	15.09.2016	102	934.4	0.0008	53.9	0	7.72		0.13		1.29	0.018	0.00024	0.00007	7	60	–9.4	–71.1

Примечание. Аббревиатуры названий полей даны на рис. 1; * – [Kalacheva et al., 2016]; ** – содержание после коррекции на контаминацию воздухом: N_2** = N_2 (проба) – O_2 × 3.73; Ar** = Ar (проба) – O_2/22.45.

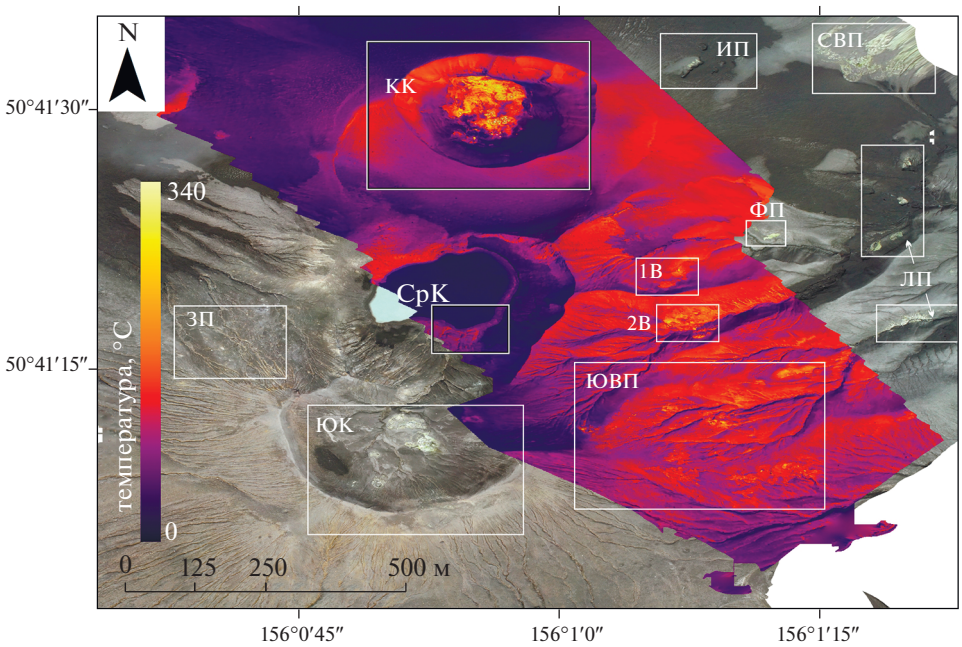

Рис. 3. Аэроснимок вулкана Эбеко и его фумарольных полей 16 августа 2021 г. с наложением инфракрасной съемки. Обозначения кратеров: КК – кратер Корбута, СрК – Средний кратер, ЮК – Южный кратер. Фумарольные поля склонов вулкана: ЗП – Западное, ИП – Июльское, СВП – Северо-восточное, ФП – Флоренского, 1В – 1-е Восточное, 2В – 2-е Восточное, ЮВП – Юго-восточное, ЛП – ручья Лагерного.

ратурой отбора 503°С. В октябре 2016 г. началось новое извержение с образованием в точке отбора одного из жерл.

Все пробы содержат 81–99 мол. % воды без четкой зависимости ее количества от температуры. Высокотемпературный газ имеет состав, типичный для магматических газов Курильских островов согласно [Taran et al., 2018] с атомными отношениями C/S <1, с высоким содержанием HCl (5–7 ммоль/моль). Тройная диаграмма на рис. 4а показывает относительные концентрации CO_2, общей серы (SO_2 + H_2S) и HCl для фумарольных газов Эбеко. Все точки Активной воронки, два анализа Июльского поля за 2007 г. и один Юго-восточного поля за 2016 г. (группа **1**) ложатся в одну область с магматическими газами вулканов Кудрявый (о. Итуруп) и Палласа (о. Кетой). Все эти пробы отобраны в предэруптивные периоды (от двух лет до 1.5 месяцев до начала извержений вулкана в 2009 и 2016 гг.). Остальные газы традиционно делятся на две группы: газы (группа **3**) с малым содержанием HCl, наиболее обогащенные CO_2 (с высокими C/S), и газы группы **2** с высоким содержанием HCl и более низким отношением C/S: северо-восточный и юго-восточный сектор, соответственно. Составы низкотемпературных газов сильно отличаются как между собой, так и во времени по содержанию HCl, общей серы, отношению SO_2/H_2S. Общим для всех газов, как уже указывалось ранее [Kalacheva et al., 2016], независимо от стадии активности вулкана, остаются низкие концентрации H_2 (на порядок ниже магматического: максимум 0.4 ммоль/моль для АВ против ~5 на вулкане Кудрявый), CO, небольшая концентрация метана. Почти всегда SO_2/H_2S > 1. Стабильное преобладание H_2S над SO_2 наблюдалось в фумаролах поля Флоренского в 1979–1984 гг. [Меняйлов и др., 1988а] и Гремучей в 1967–1983 гг. [Menyailov et al., 1985]. Также, по нашим данным за 2010 г., в пробах фумарол поля Флоренского H_2S на порядок превышал SO_2. В августе 2021 г. были отобраны пробы из фумарол Южного кратера и Юго-восточного поля (см. табл. 1). В фумароле Южного кратера оказалось низкое содержание HCl, что не характерно для этого участка. На Юго-восточном поле отбор производился из двух разных точек: одна – в восточной части поля, вторая – в южной. По концентрации H_2S анализы с восточного участка отличались почти на порядок (3 против 0.4 ммоль/моль), в 7 раз была выше концентрация HCl и на два порядка выше концентрация водорода. 26 августа на этом участке произошел взрыв, в серных отложениях образовался провал диаметром около 1 м, из провала наблюдалось истечение жидкой серы с языками пламени. Вероятно, температура газа под серной коркой в момент отбора уже была выше, чем измеренная на устье фумаролы.

В работе [Giggenbach, 1987] показано, что химический состав вулканических газов контролируется состоянием химического равновесия между компонентами самой газовой фазы или внутри гетерогенной системы, включающей взаимодействие газа и породы. Одним из главных парамет-

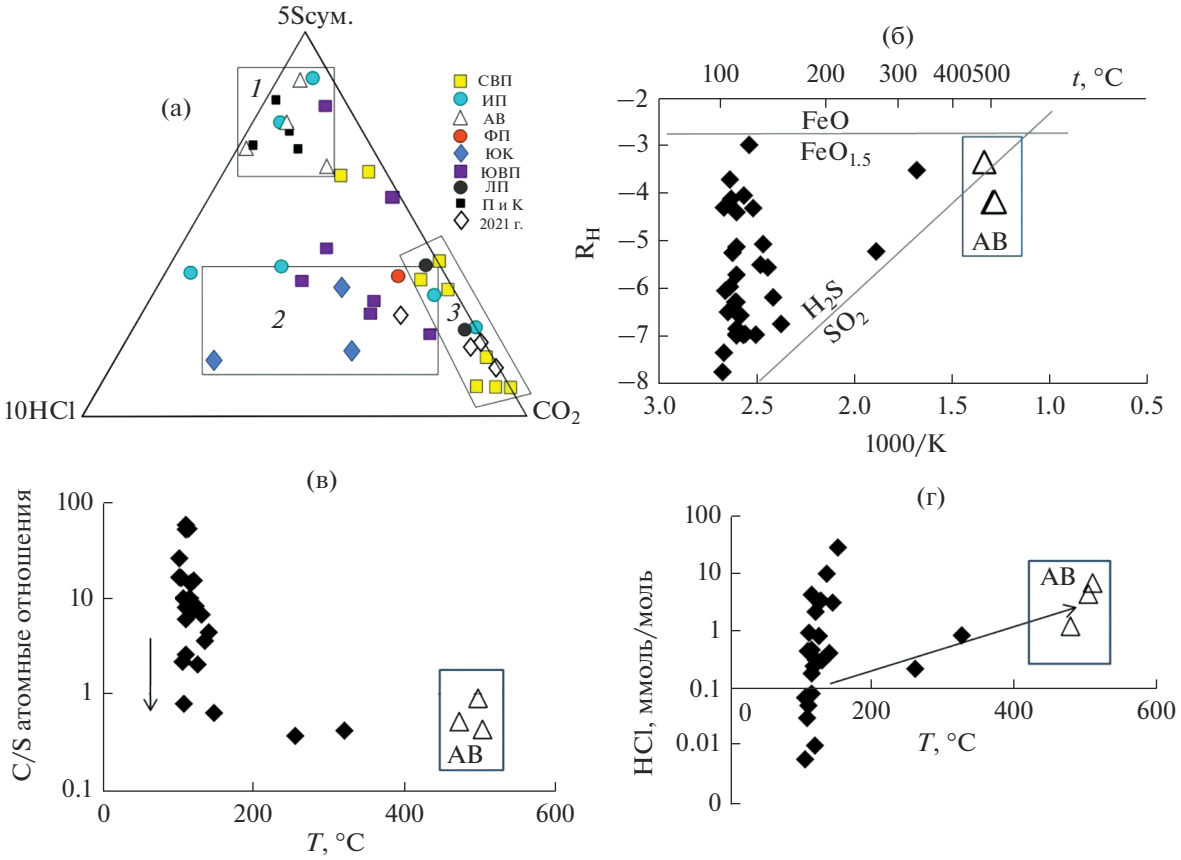

Рис. 4. Треугольная диаграмма CO_2–$S_{сум}$–HCl (мольные концентрации) для газов вулкана Эбеко (а) и графики R_H, C/S, HCl относительно температуры фумарольных газов (б, в, г).
Обозначения фумарольных полей см. рис. 1. “П и К” – высокотемпературные газы курильских вулканов Палласа и Кудрявого [Taran et al., 2018].

ров окислительно-восстановительных равновесий была принята концентрация водорода в форме $R_H = lg(H_2/H_2O)$. Для собранных на вулкане Эбеко газовых проб (см. рис. 4б) показан R_H в зависимости от температуры газа. Также представлены теоретические линии, характеризующие равновесие газов с различными окислительно-восстановительными буферами: “породным буфером $FeO–FeO_{1.5}$” и “серным буфером $H_2S–SO_2$” [Giggenbach, 1987], так как окислительно-восстановительное состояние высокотемпературных вулканических газов контролируется реакциями между окисленными и восстановленными видами серы в самой газовой фазе. Точки для газов Активной воронки с температурами 470–503°C ложатся близко к линии газового буфера, значения для газов с температурами <350°C показывают сильный разброс. Часть низкотемпературных газов стремится к достижению равновесия с породой, что характерно для гидротермальных газов.

Отношение C/S в зависимости от температуры газов представлено на рис. 4в. С ростом температуры отношение C/S стремится к магматическому (<1), а при низких температурах разброс составляет почти два порядка, включая низкие значения, близкие к магматическим. Содержание HCl также сильно варьирует в низкотемпературных газах (см. рис. 4г). При этом с ростом температуры содержание HCl неизменно увеличивается и при $T > 400$°C достигает значений, характерных для магматических газов с максимальным значением 6.79 ммоль/моль.

Изотопный анализ конденсатов вулканического пара представлен на рис. 5а. Все точки занимают промежуточное положение между линией метеорных вод Крейга ($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$) [Craig, 1961] и областью составов магматической воды зоны субдукции [Таран и др., 1989]. Также показан диапазон авторских данных изотопных составов метеорных осадков о. Парамушир (–52...–83‰ для δD и –7...–13‰ для $\delta^{18}O$). На графике прослеживается участие в формировании фумарольных газов в разной степени метеорной и магматической компоненты. По относительному положению точек на графике наибольшая величина вклада магматической компоненты наблюдается для высокотемпературного газа Активной воронки, а метеорной – для поля ручья Лагерного. Для многих дуговых вулканов наблюдается прямая корреляция между содержанием HCl в газах и δD воды

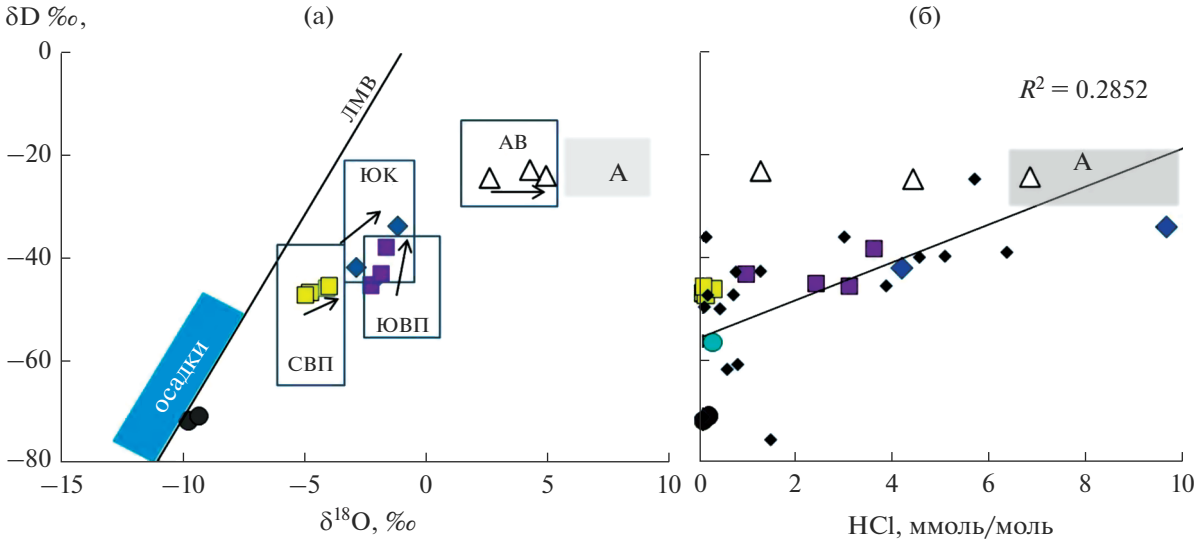

Рис. 5. Изотопный состав конденсатов фумарольного пара в 2015–2016 гг. (а) и концентрация δD относительно HCl (см. табл. 1) (б).
Стрелки показывают динамику изменения параметров во времени; ЛМВ – линия метеорных вод ($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$) [Craig, 1961]; А – область составов магматической воды зоны субдукции [Таран и др., 1989]; маленькие ромбы – [Меняйлов и др., 1988а; Taran et al., 2018]. Остальные обозначения см. табл. 1.

[Taran, Zelenski, 2014 и др.]. Однако, как видно на рис. 5б, для вулкана Эбеко такой корреляции не наблюдается. Только низкотемпературный газ поля ручья Лагерного стабильно содержит мало HCl и имеет δD, близкий к местным метеорным водам. Несколько анализов с температурами 400–503°C попадают в область составов магматической воды дугового типа или близки к ней. Что касается остальных проб, с учетом наших новых данных за 2015–2016 гг. и с учетом других опубликованных данных [Меняйлов и др., 1988а; Taran et al., 2018], нет значимой корреляции HCl–δD. Величина достоверности линейной аппроксимации $R^2 < 0.3$. Как уже обсуждалось в работе [Kalacheva et al., 2016], высокие концентрации HCl в низкотемпературном паре в данном случае могут быть объяснены наличием в постройке вулкана кипящего гиперкислого рассола. Следует также отметить, что в изменении HCl и δD в период перед последним извержением нет четкой динамики во времени даже для высокотемпературного газа.

Суммируя данные по изотопному составу конденсатов, содержанию HCl, H_2 и отношению C/S, можно предложить следующую последовательность по возрастанию магматического вклада в состав газов для разных фумарольных полей: ЛП, СВП, ИП, ФП < ЮВП, ЮК < АВ перед извержением 2016–2021 гг. Однако, как показано в работах [Котенко и др., 2007; Меняйлов и др., 1988], в периоды предэруптивных изменений на любом локальном участке может наблюдаться рост температуры до 380–529°C, который сопровождается изменением их состава: отношение C/S становится близко к магматическому (~1 и даже <1) (рис. 6а), растет содержание CO_2, HCl, H_2. При этом в газах Эбеко концентрация SO_2 почти всегда выше концентрации H_2S.

Геохимические предвестники извержений вулкана 2009 г. и 2016–2021 гг.

Изменения начинают проявляться за несколько лет до начала извержения, например, с 1963 г. перед извержением 1967 г., с 1983 г. перед извержением 1987 г. [Меняйлов и др., 1988а, 1988б; Menyailov et al., 1985]. А именно: повышение температуры газов и изменение их компонентного состава: уменьшение отношения C/S, увеличение отношений S/CI, F/CI и H_2S/SO_2, рост концентраций SO_2, H_2S, H_2, HCl, HF, увеличение $\delta^{18}O$ в конденсатах. Также наблюдается усиление общего газового потока и расширение площади фумарольной деятельности [Кирсанов и др., 1964; Menyailov et al., 1985]. Как сказано выше, вулкан Эбеко имеет мощную гидротермальную систему и характеризуется фреатическими и фреато-магматическими извержениями. Современные наблюдения за предэруптивными изменениями состава фумарольных газов на подобных вулканах [Stix, de Moor, 2018] также показывали в большинстве случаев усиление потока SO_2 и падение отношения C/S до магматического. Геохимические сигналы начинали проявляться за несколько недель и даже лет до извержения.

За период наших наблюдений произошли два продолжительных вулканических извержения: в январе–июне 2009 г. (~4.5 мес.) и с октября 2016 г. по ноябрь 2021 г. (более 5 лет). Предвестники извержения 2009 г. освещены в работах [Котенко и др.,

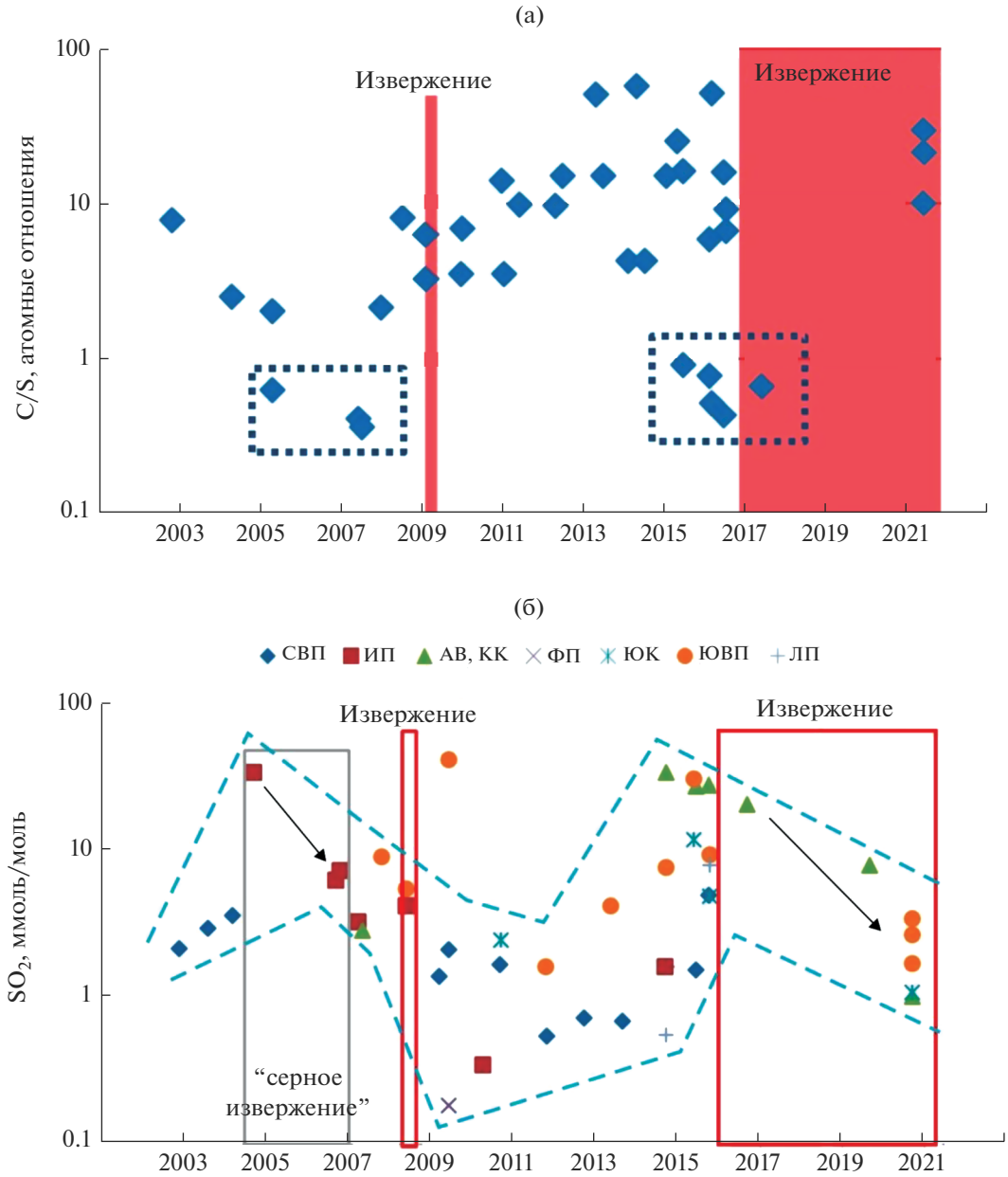

Рис. 6. Динамика изменения C/S (атомные отношения) в газах вулкана Эбеко: перед каждым извержением достигалось значение <1, характерное для магматических газов (а), и временной ряд для концентрации SO_2 (ммоль/моль) в газах вулкана Эбеко (б).
Стрелками показано уменьшение концентрации в течение извержений; КК – кратер Корбута, остальные названия фумарольных полей согласно рис. 1.

2006, 2010]. Фумарольные газы имели температуру не выше 140°C в промежуток времени с 2003 г. до января 2005 г. Начиная с 27 января 2005 г., происходили одиночные фреатические взрывы в Активной воронке и за ее пределами (в левом борту руч. Лагерного). На восточной стенке Активной воронки открылось жерло, также усилилась фумарольная активность на дне, где образовалось кислое термальное озеро. С июля 2005 г. на северном склоне Активной воронки началась мощная фумарольная деятельность (Июльское поле) на площади 0.02 км^2, максимальная температура фумарол достигала 529°C. По всей поверхности поля текли серные потоки. В июне 2006 г. произошло самовозгорание фумарольной серы, и нижняя часть серных построек и потоков выгорела. В газах Северо-восточного поля с июля 2004 г. увеличивалось содержание CO_2, SO_2, H_2S и HCl и росла температура фумарол. Газы нового Июльского поля в 2005 г. имели очень высокую концентрацию HCl (~28 ммоль/моль) с отношением S/Cl = 1.3, и вплоть до начала извержения отно-

Таблица 2. Эмиссия основных газовых компонентов фумаролами вулкана Эбеко в разные периоды, т/сут

Компонент	1983	2003	2005–2006	2012	2015	2016	2017
H_2O	1804.5	862	7593	1864	1230	1718	3840*
CO_2	79	36	448	185	110	134	160
SO_2	9.5	4	896	14	101	145	250
HCl	4	1.9	418	5	14	21	46
H_2S	3.8	1.9	37	5	14	12	74
Ссылка	1	2	2	5	3	5	4

Примечание. * Содержание водяного пара рассчитано по среднему значению за 02.09.2016 г. (см. табл. 1); 1–5 – ссылки: 1 – [Меняйлов и др., 1988а], 2 – [Котенко, Котенко, 2010], 3 – [Melnikov et al., 2016], 4 – [Taran et al., 2018], 5 – настоящая работа.

шение C/S сохранялось низким (<1) (см. рис. 6а). На обоих полях уменьшалось отношение SO_2/H_2S. Длительность предэруптивного периода извержения 2009 г. составила более 4.5 лет. На площади 0.16 км^2 произошли изменения фумарольной деятельности, включая Активную воронку и участки к востоку и северо-востоку от нее на расстоянии до 0.5 км.

Предвестники извержения 2016 г. были выявлены в газовых анализах в апреле–мае 2016 г.: увеличение концентраций CO_2, SO_2, H_2, а в газах Активной воронки уменьшение C/S от 0.6 до 0.4 и SO_2/ H_2S от 8 до 6.5 (см. табл. 1, рис. 6а). Содержание HCl к сентябрю 2016 г. выросло и составило 6.8 и 9.6 ммоль/моль (в фумаролах Активной воронки и Южном кратере, соответственно). Изменение концентрации SO_2 во времени показано на рис. 6б. Для всех точек, кроме Активной воронки и кратера Корбута в период последнего извержения вулкана, концентрация SO_2 получена по газовым анализам. Для активных кратеров в 2017 и 2020–2021 гг. был сделан расчет по инструментально измеренному в шлейфах SO_2 и общему парогазовому потоку, полученному по методу [Федотов, 1982] при допуске, что концентрация H_2O составляла 94.8 мол. %, как в высокотемпературном газе перед извержением (см. табл. 1, сентябрь 2016 г.). То есть, полученные во время извержения значения очень приблизительные. Независимо от точки отбора, наблюдалась идентичная динамика: концентрация SO_2 увеличивалась на порядок и более в предэруптивные периоды. С другой стороны, от начала извержения к его окончанию происходило заметное уменьшение SO_2. Это касается и “серного” извержения на Июльском поле в 2005–2006 гг.

Также в 2016 г. наблюдался сдвиг в сторону утяжеления изотопов кислорода и водорода в конденсатах 4-х полей (см. рис. 5а). Новые участки термальной разгрузки не появлялись, но эмиссия газов из Активной воронки, дававшей до 90% общего газового потока вулкана, заметно, почти в полтора раза, увеличилась в 2016 г. относительно лета 2015 г. (табл. 2).

Таким образом, наиболее четкими геохимическими предвестниками двух извержений были: увеличение концентраций H_2, SO_2 и CO_2 в несколько раз и даже на порядок с понижением отношения C/S до <1; утяжеление изотопов кислорода и водорода в конденсатах; рост температуры фумарол (для предвестников извержения 2009 г.); увеличение газового потока. Рост концентрации HCl в низкотемпературных газах вулкана Эбеко может быть предвестником только в комплексе с другими изменениями, так как наблюдаемые концентрации заключены в очень широком диапазоне значений (см. рис. 4г) независимо от стадии активности вулкана.

Результаты измерений почвенного потока CO_2 на фумарольных полях вулкана Эбеко

В настоящее время измерения диффузионного почвенного потока CO_2 широко применяются в качестве инструмента мониторинга активных вулканов. Подобные наблюдения уже много лет ведутся на вулканах Италии, Мексики и других стран [Chiodini et al., 1998; Hsin-Yi Wen et al., 2016]. Регулярные наблюдения с помощью сети приборов позволяют предсказывать вулканические и тектонические явления [Mazot et al., 2011 и др.].

На вулкане Эбеко первое измерение диффузионного потока CO_2 было выполнено 20 июля 2017 г. на Северо-восточном поле. Измерения были сделаны по сетке с расстоянием между узлами 6 м (30 точек). Площадь покрытия составила 720 м^2. Был выбран участок ровной поверхности ниже фумарольных выходов. Минимальное значение почвенного диффузионного потока CO_2 составило 1670 г/м^2/сут, максимальное – 8828 г/м^2/сут, среднее – 3466 г/м^2/сут. Опробованный участок составляет всего 7% от площади Северо-восточного поля, поэтому не может характеризовать все поле. Однако наличие такого высокого почвенного потока CO_2 на локальном участке подтвердило необходимость измерений диффузионного потока CO_2 из постройки вулкана, о величине которого пока нет никаких данных. К сожалению, работать вблизи активного кратера не представлялось возможным из-за продолжающегося эксплозивного извержения вулкана: частые взрывы с выбросом лапилли и бомб исключали безопасную работу на близких расстояниях. Поэтому дальнейшие измерения проводились на Юго-восточ-

Таблица 3. Потоки почвенного CO_2 на вулкане Эбеко и других вулканах

Вулкан, год	Область, км^2	Поток CO_2, т/сут	Средний удельный поток, г/м^2/сут	Ссылка
Эбеко, ЮВП, 2020–2021	0.032	50	1564	Настоящая работа
Головнина, 2020	0.036	2	53	[Тарасов, 2021]
Миякеджима (Япония), 1998	0.62	146	235	[Shimoike et al., 2002]
Вулькано (Италия), 1995	0.65	269	414	[Chiodini et al., 1996]
Флегрейские Поля, Сольфатара (Италия), 1994	0.09	133	1478	[Chiodini et al., 1998]
Чанбайшань (Китай), 1996	3.2	138	43	[Chiodini et al, 1998]
Тэйде (Испания), 1996	0.53	380	717	[Hernandez et al., 1998]
Гора Мамонт (США), 1995	0.145	350	2413	[Gerlach et al., 1998]
Гора Мамонт (США), 1997	0.145	130	897	[Gerlach et al., 1998]

ном поле: 11 августа 2020 г. и 12 августа 2021 г. Так как резкие изменения атмосферного давления, скорости ветра и осадки могут внести погрешности в измерения [Lewicki et al., 2007], мы отслеживали метеорологическую обстановку по данным высотного зондирования аэрологической станции “Северо-Курильск” (7 км от вулкана). Съемка CO_2 велась на сухом грунте при сухой погоде. Погодные условия были достаточно близки: атмосферное давление 903 ± 3 ГПа, относительная влажность 50 ± 2%, отсутствие осадков более суток, отсутствие сильного ветра. В общей сложности на Юго-восточном поле было выполнено 29 измерений CO_2 и температуры грунта на глубине до 20 см на площади 32000 м^2. Поверхность фумарольного поля сложена вулканическим пеплом и шлаком, на поле присутствуют грязевые котлы, крупные фумаролы, присыпанные свежим пеплом плотные отложения серных потоков, участки с измененными породами и шлаком, инкрустированным солями на парящих площадках. В структурном плане поверхность осложнена фумарольными буграми, расчлененными сухими руслами временных водотоков.

Измеренные величины потока CO_2 варьировали от 3.49 до 10442 г/м^2/сут, температура грунта от 10.6°С до 96.5°С. На рис. 7а видны три зоны с мощным потоком CO_2 – более 7000 г/м^2/сут. Эти точки соответствуют областям поля со значительными гидротермальными изменениями слагающих пород.

Для зон с мощным потоком CO_2 характерна также высокая температура грунта (см. рис. 7б). Однако, точки с высокой температурой наблюдаются и на других площадках фумарольного поля и не обязательно связаны с сильным потоком CO_2. Диффузионный поток углекислого газа в вулканических регионах часто коррелирует с повышенными температурами почвы [Bloomberg et al., 2014; Werner et al., 2008 и др.]. На Юго-восточном поле такая корреляция не наблюдается, так же, как и в случае фумарольных полей вулкана Головнина (о. Кунашир) [Тарасов, 2021]. Вероятно, в нашем случае поверхностные корки гидротермально-измененных пород, а также захороненные под свежей пирокластикой серные потоки, могут экранировать диффузионный поток газов. Именно поэтому максимумы потока почвенного CO_2 зафиксированы на периферии бугров крупных фумарол. Похожее распределение диффузии установлено на вулкане Сатсума-Иводзима (Япония) [Shimoike et al., 2002], где мощные отложения серы внутри и вокруг кратера за счет низкой проницаемости препятствовали прохождению вулканического газа через почву, концентрируясь в каналах фумарол.

Рассчитанный общий диффузионный поток CO_2 на Юго-восточном поле вулкана Эбеко составляет не менее 50 т/сут (18 тыс. т/год), при среднем значении потока 1564 г/м^2/сут. Однако следует заметить, что мы не проводили изотопные исследования проб почвенного газа на определение $\delta^{13}C–CO_2$, что позволяет исключить CO_2 невулканического происхождения. Подобные исследования на вулкане Сатсума-Иводзима показали, что доля биогенного и атмосферного углерода может быть значительна и на вершинах вулканов – до 80% от общего потока CO_2 [Shimoike et al., 2002].

Фумаролы Юго-восточного поля имеют низкие температуры, в составе их газов вторым по концентрации компонентом после водяного пара является CO_2 (см. табл. 1). Среднее содержание CO_2 12–15 августа 2021 г. составляло около 5 мол. %, а общий расход фумарольного газа 320 ± 20 т/сут (10% от парогазовой разгрузки кратера Корбута по методу сравнения проекций площадей фумарольных шлейфов на горизонтальную поверхность на аэроснимках [Hochstein, Bromley, 2001]. В свою очередь для кратера Корбута парогазовая эмиссия (~3200 ± 550 т/сут) была рассчитана по высоте шлейфа и средней скорости ветра в слое уровень кратера – вершина шлейфа, по [Федотов, 1982]. Таким образом, фумарольная эмиссия CO_2 составила ~40 т/сут, т.е. почвенный диффузионный поток CO_2 с Юго-восточного фумарольного поля (50 т/сут) оказался выше потока за счет фумарольных выходов. В табл. 3 сравниваются наши

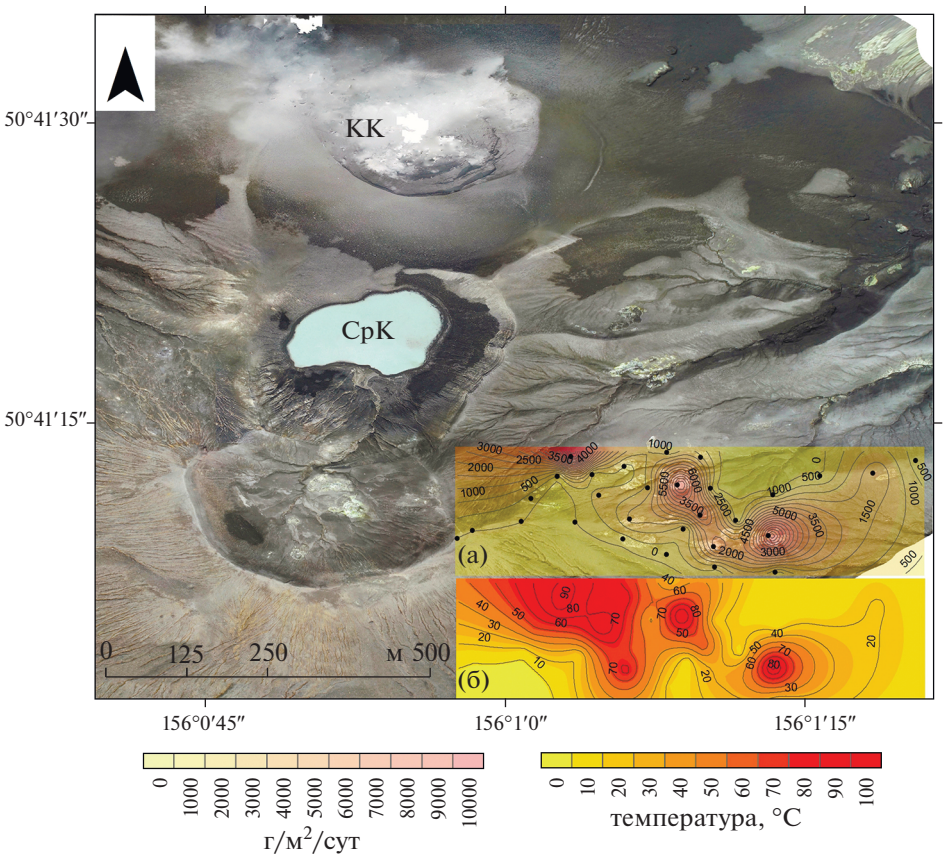

Рис. 7. Аэроснимок вулкана Эбеко 16 августа 2021 г.
а – наложение распределения диффузии CO_2 на ЮВП с указанием точек измерений; б – карта-схема распределения температуры грунта на этом же участке.

данные с измерениями на других вулканах. Если дальнейшие исследования с увеличением плотности съемки и отбором почвенного газа на изотопы углерода подтвердят полученную величину эмиссии, то это будет одна из самых высоких разгрузок диффузионного CO_2 на вершинах вулканов.

Динамика общей эмиссии газов

Динамика общей газовой эмиссии представляет интерес и как индикатор предэруптивного состояния и для оценки объема отделения летучих в разные фазы активности вулкана. Величина общего расхода газа (водяной пар + основные компоненты, т/сут) и его компонентный состав в разные годы показаны в табл. 3. В межэруптивный период впервые расход газа был определен в 1959 г. А.С. Нехорошевым [1960], затем И.А. Меняйловым с соавторами [Меняйлов и др., 1988а] в 1979, 1983 гг. и составил 864 и 1918 ± 22 т/сут соответственно. Нами величина эмиссии определялась по скорости газовых струй доступных фумарол, измеренной температуре и размеру выходного отверстия [Нехорошев, 1960], а также по высоте парогазового облака (плюма) и скорости ветра в слое существования шлейфа [Федотов, 1982]. В 2020–2021 гг. для сравнения величины эмиссии с разных фумарольных полей была использована аэрофотосъемка и метод сравнения площадей проекций шлейфов на горизонтальную плоскость [Hochstein, Bromley, 2001].

Величина расхода газа в спокойные межэруптивные периоды составляла 1–2 тыс. т/сут, увеличиваясь в несколько раз в периоды извержений (см. табл. 3). Самый высокий поток для всего вулкана ~9400 т/сут был измерен в 2005–2006 гг. – выше, чем в 2020 и 2021 гг. 5020 ± 900 и 4270 ± 600 т/сут (эруптивный период, паузы между вулканскими взрывами). При этом в первом случае ~75% потока поступало не из извергающихся кратеров, а из многочисленных мощных фумарол на площади Июльского поля – нового участка дегазации. Поэтому мы, вслед за авторами [Belousov et al., 2021; Tanakadate, 1936], выделили этот период как “серное” извержение, в процессе которого подъем магмы вызывает нагрев серной залежи, плавление и мобилизацию серы в виде многочисленных потоков жидкой серы и выделение большого количества серных газов.

Начиная с 2009 г., до 60–90% общего газового потока давали активные кратеры: Активная воронка – вплоть до начала извержения в 2016 г. и в

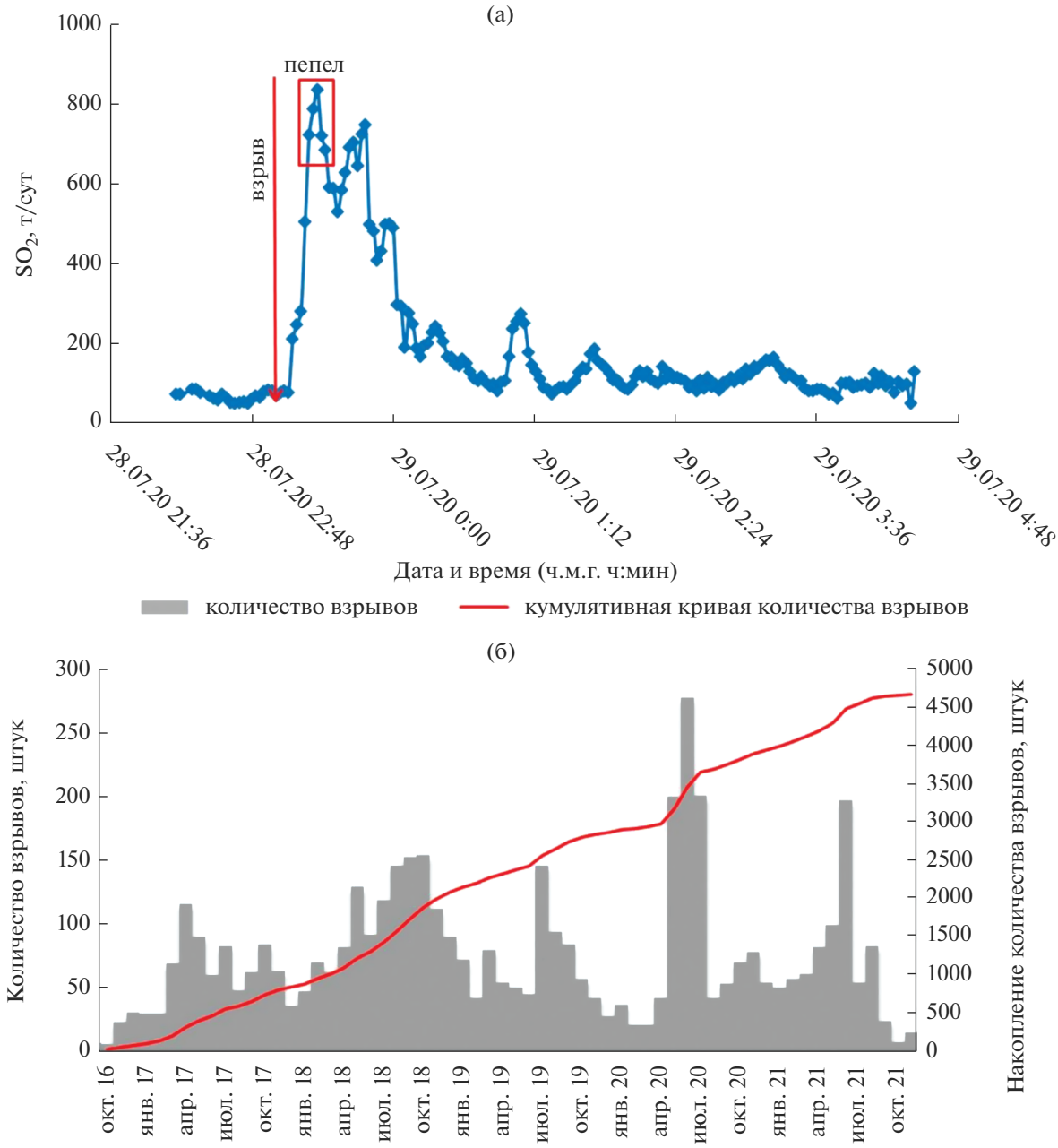

Рис. 8. Измеренные в июле 2020 г. концентрации SO_2 в шлейфах, время UTC (а) и распределение количества зафиксированных вулканских взрывов за весь период извержения и их накопление (б). Максимальное количество взрывов зарегистрировано в мае–июле 2020 г.

период с июня 2017 г. до лета 2018 г.; Активная воронка вместе со Средним кратером – в период октябрь 2016–май 2017 г. В 2018–2021 гг. основная дегазация происходила из молодого кратера Корбута (75–80% от общего потока).

Эмиссия диоксида серы активным кратером

Начиная с 2015 г., на вулкане Эбеко стали применяться инструментальные методы измерения эмиссии SO_2 из активного кратера. Первые измерения были выполнены техникой ДОАС до начала извержения 2016 г., в августе 2015 г. [Melnikov et al., 2016; Taran et al., 2018]. Эмиссия SO_2 составила 100 ± 50 т в сутки. Поток других газов был рассчитан по составу отобранного газа. В дальнейшем выход двуокиси серы был измерен еще дважды в 2017 г. [Taran et al., 2018] с использованием техники МультиГаз (Multi-Gas [Shinohara, 2005]) и переносного ДОАС спектрометра во время пауз между вулканскими взрывами. Авторами измерения при помощи сканирующего ДОАС прибора

Таблица 4. Поток SO_2 из активного кратера

Дата	SO_2, т/сут	Ссылка
12.08.2015	100 ± 20	[Taran et al., 2018]
02.09.2016	143 ± 50	Настоящая работа
11.08.2017	250 ± 30	[Taran et al., 2018]
29.07.2020	99 ± 28	Настоящая работа
29.07.2020*	747 ± 220	Настоящая работа
14.08.2021	9 ± 2.7	Настоящая работа
14.08.2021*	450 ± 130	Настоящая работа

Примечание. * – Эруптивные шлейфы.

проводились 29 июля 2020 г. и 14 августа 2021 г. на протяжении 6 и 16 час с расстояния 1.1 и 1.7 км от оси шлейфа соответственно. В табл. 4 приводятся результаты измерений потока SO_2 из активного кратера в предэруптивный период и во время текущего извержения. По данным таблиц 3 и 4 можно сказать, что в 2015 г. был зафиксирован высокий поток SO_2, который еще увеличился перед извержением от 100 ± 20 до 143 ± 50 т/сут. В 2017 г. наблюдалась самая высокая разгрузка SO_2 из активного кратера в газовом шлейфе, а в 2020 г. – в пепловом. Последнее измерение 14.08.2021 г. показало значительное снижение средней величины эмиссии SO_2 в газовых и пепловых выбросах. В газовых шлейфах получены значения потока 99 ± 28 и 9 ± 2.7 т/сут, в пепловых шлейфах 747 ± ± 220 и 450 ± 130 т/сут соответственно. В “завершающих” газовых шлейфах, то есть в мощных шлейфах, сохраняющихся после прекращения поступления пепла, содержание SO_2 постепенно уменьшалось от близкого к эруптивному до фонового (рис. 8а). В 2021 г. сильные взрывы стали происходить реже и уменьшилась их продолжительность. Так, 29 июля 2020 г. эмиссия пепла длилась только 5 мин, а мощный парогазовый шлейф с высоким содержанием SO_2 наблюдался еще в течение двух часов. Продолжительность же “завершающих” парогазовых шлейфов 14 августа 2021 г. составляла от 13 мин до 42 мин после взрыва. Уменьшение потока SO_2 в августе 2021 г. по сравнению с июлем 2020 г. свидетельствует в пользу близкого окончания извержения, как было показано для вулкана Асо (Япония) [Shinohara et al., 2018]. Последние пепловые шлейфы на вулкане были зафиксированы 19 ноября 2021 г.

В течение всего периода текущего извержения проводился визуальный контроль количества и высоты эксплозий. Использовались видеокамеры Brinno TimeCam TLC 100, позволяющие осуществлять покадровую съемку с периодичностью 5 с. Постоянная фотосъемка велась из г. Северо-Курильск (7 км от вулкана), эпизодически камера устанавливалась вблизи кратеров на несколько суток. На рис. 8б показана частота взрывов (число взрывов в месяц), а также интегральная кривая их общего числа. Наблюдения проводились в светлое время суток. Кроме того, большую часть времени наблюдения были невозможны из-за плохой погоды или закрытой облаками вершины вулкана, поэтому точное количество взрывов неизвестно. Если оценить общую массу SO_2, поступившего за все визуально зафиксированные эксплозии в 2016–2021 гг., исходя из среднего значения за один взрыв (1200 т по данным измерений ДОАС), то эта величина может составлять ~5.6 Мт. Это минимальная оценка, так как время осуществления визуальных наблюдений составило ~20% от общей продолжительности извержения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена информация о составе фумарольных газов вулкана Эбеко за период 2003–2021 гг. Характерной особенностью вулкана Эбеко являются низкотемпературные газы с высоким HCl и с очень переменными отношениями основных компонентов и концентрации водорода. Высокотемпературный газ имеет состав, типичный для курильских магматических газов с атомным отношением C/S < 1, содержанием HCl 5–7 ммоль/моль; изотопным составом конденсатов: $\delta D \sim -24$, $\delta^{18}O = 2.6–4.9$, но более низкой концентрацией H_2 (на порядок и более).

Показаны изменения в составе и температуре газов перед событиями 2009 и 2016 гг.: увеличение концентраций H_2, H_2S, SO_2, CO_2 и HCl в несколько раз и даже на порядок с понижением отношения C/S до <1; утяжеление изотопов кислорода и водорода в конденсатах; рост температуры фумарол. Также наблюдалось увеличение общего газового потока, с чем было связано появление новых участков фумарольной деятельности.

На двух участках конуса вулкана Эбеко впервые был измерен диффузионный почвенный поток CO_2, оказавшийся очень высоким (до 10442 г/м^2/сут). На Юго-восточном поле диффузионный поток CO_2 превысил фумарольный (~50 т/сут против ~40 т/сут).

Впервые систематически инструментально измерялись потоки SO_2 во время извержения 2016–2021 гг. Установлено уменьшение потока SO_2 из активного кратера в 2021 г. относительно 2020 г. В газовых шлейфах получены значения потока 99 ± 28 и 9 ± 2.7 т/сут, в пепловых шлейфах 747 ± 220 и 450 ± 130 т/сут соответственно. Уменьшение потока SO_2 в августе 2021 г. по сравнению с июлем 2020 г. свидетельствовало о близком окончании извержения.

Таким образом, имеются четкие геохимические предвестники извержений вулкана Эбеко. Поэтому газовый мониторинг должен быть продолжен с учетом мирового опыта усовершенствования методик наблюдений. На будущее необходима также площадная съемка почвенного CO_2 всей привершинной площади вулкана.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят С.Н. Рычагова за постоянную помощь, Е.Г. Калачеву за совместную работу, Л.В. Котенко за постоянное участие в полевых работах, отбор большого объема газовых проб, Д.Ю. Кузьмина за участие в отборе газов в 2003, 2011 гг. и в проведении съемки почвенного CO_2 в 2017 г.

Авторы благодарят рецензентов за конструктивную критику и ценные замечания, позволившие значительно улучшить статью.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00517/20.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воронова Л.Г., Сидоров С.С., Сурнина Л.В. Эволюция гидротермальной деятельности вулкана Эбеко в период с 1951 по 1963 гг. // Опыт комплексного исследования района современного и новейшего вулканизма (на примере хр. Вернадского, о. Парамушир). Южно-Сахалинск, 1966. С. 162–168.

Кирсанов И.Т., Серафимова Е.К., Сидоров С.С. и др. Извержение вулкана Эбеко в марте–апреле 1963 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1964. № 36. С. 66–72.

Котенко Т.А., Котенко Л.В. Гидротермальные проявления и тепловой поток вулканов Эбеко и Крашенинникова (о. Парамушир, Курильские о-ва) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 1. Вып. 7. С. 129–137.

Котенко Т.А., Котенко Л.В. Состояние вулкана Эбеко (о-в Парамушир) и влияние его активизации на экологическую обстановку // Вестник ДВО РАН. 2010. № 3. С. 51–58.

Котенко Т.А., Котенко Л.В., Сандимирова Е.И. и др. Извержение вулкана Эбеко в январе–июне 2009 г. (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 1. Вып. 15. С. 56–68.

Котенко Т.А., Котенко Л.В., Сандимирова Е.И. и др. Эруптивная активность вулкана Эбеко (о. Парамушир) в 2010–20111 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 1. Вып. 19. С. 160–167.

Котенко Т.А., Котенко Л.В., Шапарь В.Н. Активизация вулкана Эбеко в 2005–2006 гг. (остров Парамушир, Северные Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 3–13.

Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В. Извержение вулкана Эбеко (Курильские о-ва) в 2016–2017 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 1. Вып. 37. С. 32–42.

Котенко Т.А., Смирнов С.З., Сандимирова Е.И. Вулкан Эбеко в 2019 г.: динамика извержения по наземным данным // Материалы XXIII региональной научной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога, 2020 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 38–41.

Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирьянов В.Ю. и др. Вулкан Эбеко (Курильские острова): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Часть I // Вулканология и сейсмология. 1993а. № 3. С. 69–81.

Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирьянов В.Ю. и др. Вулкан Эбеко (Курильские острова): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Часть II // Вулканология и сейсмология. 1993б. № 4. С. 24–42.

Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Особенности химического и изотопного состава фумарольных газов в межэруптивный период деятельности вулкана Эбеко // Вулканология и сейсмология. 1988а. № 4. С. 21–36.

Меняйлов И.А., Овсянников А.А., Широков В.А. Извержение вулкана Эбеко в октябре–декабре 1987 г. // Вулканология и сейсмология. 1988б. № 3. С. 105–108.

Нехорошев А.С. Геотермические условия и тепловой поток вулкана Эбеко на о-ве Парамушир // Бюлл. вулканол. станций. 1960. № 29. С. 38–46.

Сурнина Л.В. Химический состав газов вулкана Эбеко // Геохимия. 1959. № 5. С. 468–473.

Таран Ю.А., Покровский Б.Г., Дубик Ю.М. Изотопный состав и происхождение воды в андезитовых магмах // Докл. АН СССР. 1989. Т. 304. № 2. С. 440–443.

Тарасов К.В. Результаты съемки почвенного потока CO_2 в кальдере вулкана Головнина (о. Кунашир) // Материалы XXIV региональной научной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога, 29–30 марта 2021 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С. 152–155.

Федотов С.А. Оценки выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 3–28.

Belousov A., Belousova M., Auer A. et al. Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles // Bull. Volcanol. 2021. V. 83(4). https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z

Bloomberg S., Werner C., Rissmann C. et al. Soil CO_2 emissions as a proxy for heat and mass flow assessment, Taupo Volcanic Zone, New Zealand // Geochemistry. Geophys. Geosystems. 2014. V. 15. P. 4885–4904. https://doi.org/10.1002/2014GC005327

Chiodini G., Cioni R., Guidi M. et al. Soil CO_2 flux measurements in volcanic and geothermal areas // Appl. Geochem. 1998. V. 13. P. 543–552. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(97)00076-0

Chiodini G., Frondini F., Raco B. Diffuse emission of CO_2 from the Fossa crater, Vulcano Island (Italy) // Bull. Volcanol. 1996. V. 58. P. 41–50.

Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. № 133. P. 1702–1703.

Galle B., Johansson M., Rivera C. et al. Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC) – A global network for volcanic gas monitoring: Network layout and instrument description // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. D05304. https://doi.org/10.1029/2009JD011823

Gerlach T.M., Doukas M.P., McGee K.A. et al. Three year decline of magmatic CO_2 emissions from soils of a Mammoth Mountain tree kill: Horseshoe Lake, CA, 1995–1997 // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 1947–1950.

Giggenbach W.F. Redox processes governing the chemistry of fumarolic gas discharges from White Island, New Zealand // Appl. Geochem. 1987. V. 2. P. 143–161.

Giggenbach W.F., Goguel, R.L. Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges // New Zealand DSIR Chem. Division Report 2407, Christchurch, New Zealand. 1989. P. 88.

Hochstein M.P., Bromley C.J. Steam cloud characteristics and heat output of fumaroles // Geothermics. 2001. V. 30. P. 547–559.

Hsin-Yi Wen, Tsanyao F. Yang, Tefang F. Lan et al. Soil CO_2 flux in hydrothermal areas of the Tatun Volcano Group, Northern Taiwan // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2016. V. 321. P. 114–124.
https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.021

Kalacheva E., Taran Y., Kotenko T. et al. Volcano-hydrothermal system of Ebeko volcano, Paramushir, Kuril Islands: geochemistry and solute fluxes of magmatic chlorine and sulfur // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2016. V. 310. P. 118–131.
https://doi.org/10.1016/j.volgeores.2015.11.006

Lewicki J.L., Hilley G.E., Tosha T. et al. Dynamic coupling of volcanic CO_2 flow and wind at the Horseshoe Lake tree kill, Mammoth Mountain, California // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L03401.
https://doi.org/10.1029/2006GL028848

Mazot A., Rouwet D., Taran Y. et al. CO_2 and He degassing at El Chichón volcano, Chiapas, Mexico: gas flux, origin and relationship with local and regional tectonics // Bull. Volcanol. 2011. V. 73. P. 423–441.
https://doi.org/10.1007/s00445-010-0443-y

McGimsey R.G., Neal C.A., Girina O.A. et al. The 2009 Volcanic activity in Alaska, Kamchatka, and the Kurile Islands – Summary of events and response of the Alaska Volcano Observatory // U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013–5213. 2014. 125 p.
https://doi.org/10.3133/sir20135213

Melnikov D., Malik N., Kotenko T. et al. A new estimate of gas emissions from Ebeko volcano, Kurile Islands // Goldschmidt Conference, 26 June–1 July, 2016, Yokohama, Yapan. P. 2047.

Menyailov I.A., Nikitina L.P., Shapar V.N. Results of geochemical monitoring of the activity of Ebeko volcano (Kurile Islands) used for eruption prediction // J. Geodynamics. 1985. V. 3/4. P. 259–274.
https://doi.org/10.1016/0264-3707(85)90038-9

Shimoike Y., Kazahaya K., Shinohara H. Soil gas emission of volcanic CO_2 at Satsuma-Iwojima volcano, Japan // Earth Planets Space. 2002. V. 54. P. 239–247.

Shinohara H. A new technique to estimate volcanic gas composition: Plume measurements with a portable multisensor system // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2005. V. 143(4). P. 319–333.

Shinohara H., Yokoo A., Kazahaya R. Variation of volcanic gas composition during the eruptive period in 2014–2015 at Nakadake crater, Aso volcano, Japan // Earth Planets Space. 2018. V. 70. P. 151.
https://doi.org/10.1186/s40623-018-0919-0

Stix J., de Moor J.M. Understanding and forecasting phreatic eruptions driven by magmatic degassing // Earth Planets Space. 2018. V. 70(83).
https://doi.org/10.1186/s40623-018-0855-z

Tanakadate H. Volcanic activity in Japan during the period between July 1934 and October 1935 // Japanese J. Astronomy and Geophysics. 1936. V. 13. P. 121–139.

Taran Y., Zelenski M. Systematics of water isotopic composition and chlorine content in arc-volcanic gases // The Role of Volatiles in the Genesis, Evolution and Eruption of Arc Magmas // Special Publications. Geological Society. London. 2014. P. 410–432.

Taran Y., Zelenski M., Chaplygin I. et al. Gas emissions from volcanoes of the Kuril Island arc (NW Pacific): geochemistry and fluxes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2018. V. 19(6). P. 1859–1880.
https://doi.org/10.1029/2018GC007477

Walter T.R., Belousov A., Belousova M. et al. The 2019 Eruption Dynamics and Morphology at Ebeko Volcano Monitored by Unoccupied Aircraft Systems (UAS) and Field Stations // Remote Sens. 2020. V. 12. P. 1961.
https://doi.org/10.3390/rs12121961

Werner C., Hurwitz S., Evans W.C. et al. Volatile emissions and gas geochemistry of Hot Spring Basin, Yellowstone National Park, USA // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2008. V. 178. P. 751–762.
https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.09.016

Gas Emission from Ebeko Volcano (Kuril Islands) in 2003–2021: Geochemistry, Fluxes and Indicators of Activity

T. A. Kotenko[1, *], D. V. Melnikov[1], and K. V. Tarasov[1]

[1]*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

**e-mail: sinarka2017@mail.ru*

This article reports new data on the chemical and isotopic composition of volcanic gases and the SO_2 flux and the soil CO_2 flux from the active Ebeko volcano. Within the time interval of 2003–2021 the volcano erupted in 2009, 2010, 2011, October 2016–November 2021. Volcanic gas composition for 2003–2016, 2021 were obtained by direct sampling from fumaroles. The high-temperature gas (420–529°C) has a composition typical of magmatic gases with C/S atomic ratios <1, HCl content 5–7 mmol/mol; isotopic composition of the volcanic vapor $\delta D \sim -24$, $\delta^{18}O = 2.6–4.9$. Geochemical precursors of eruptions have been established: an increase in concentrations of CO_2, H_2, SO_2, HCl; a drop in the C/S ratio up to values of <1, which is characteristic of magmatic gases of the Kuriles; an increase in temperature; heavier values of δD and $\delta^{18}O$ in the gas condensates; increasing of the total gas output. A high soil CO_2 flux was measured using the accumulation chamber method at two thermal fields (up to 10442 g/m^2/day), exceeding the visible discharge (~50 t/day versus ~40 t/day). SO_2 flux from the active crater was measured by DOAS instruments in 2020 and 2021: they were 99 ± 28 and 9 ± 2.7 t/day in gas plumes, and 747 ± 220 and 450 ± 130 t/day in ash plumes, respectively. A decrease of SO_2 output is associated with the rise of degassed magma before the end of the eruption.

Keywords: Ebeko volcano, volcanic gases, SO_2 flux, precursors of eruptions, diffuse CO_2