УДК 551.21

АКТИВНОСТЬ ВУЛКАНА ЭБЕКО В 2022 г.: МЕХАНИЗМ И ПРОДУКТЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ

© 2023 г. Т. А. Котенко^{*a*, *, С. 3. Смирнов^{*b*, *c*, **, Т. Ю. Тимина^{*b*, ***}}}

^аИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия ^bИнститут геологии и минералогии им В.С. Соболева СО РАН, просп. акад. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия ^cИнститут нефтегазовой геологии и минералогии им. А.А. Трофимука СО РАН,

просп. акад. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: sinarka2017@mail.ru **e-mail: ssmr@igm.nsc.ru ***e-mail: timina@igm.nsc.ru Поступила в редакцию 31.01.2023 г. После доработки 27.03.2023 г. Принята к публикации 10.04.2023 г.

Приводятся сведения об эруптивной активности вулкана Эбеко в 2022 г. С 22 января по 13 июня происходили фреатические взрывы в кратерном озере, вызванные просачиванием воды сквозь образовавшуюся в верхней части магматического канала пробку и ее вскипанием. С 14 июня начались эксплозии вулканского типа, уничтожившие озеро. Гранулометрический состав пеплов изменился в сторону уменьшения размерности частиц. Петрографические и минералого-геохимические исследования тефры позволяют определить этот период как фреатомагматическое извержение по наличию свежего ювенильного материала. Установлено, что взаимодействие магмы с водами гидротермальной системы вулкана Эбеко приводит к ее обеднению щелочными металлами и обогащению кремнеземом. Высказано предположение, что образование аморфного водосодержащего кремнезема в виде многочисленных обособлений и его последующая дегидратация может способствовать эксплозивной активности вулкана.

Ключевые слова: вулкан, Эбеко, кратерное озеро, фреатический, фреатомагматический **DOI:** 10.31857/S0203030623700244, **EDN:** WRATVN

введение

Вулкан Эбеко – действующий вулкан в северной части хребта Вернадского о. Парамушир (Курильские острова, Россия) (рис. 1а). Также это один из активных вулканов Курильских островов с вершинными кратерными озерами. На Курильских островах среди действующих стратовулканов и построек в системах вулканических хребтов кроме вулкана Эбеко вершинные озера в настоящее время присутствуют в кратерах вулканов Райкоке (о. Райкоке) и Палласа (о. Кетой) [Козлов, 2015; Мельников и др., 2020]. Другие кратерные озера приурочены к крупным кальдерным комплексам на островах Онекотан (Кольцевое и Черное). Симушир (Бирюзовое) и Кунашир (Кипящее и Горячее) [Горшков, 1967; Козлов, 2015]. Озера играют важную роль в формировании характера эруптивной активности, так как они способствуют образованию в остывающем магматическом теле трещинных и поровых вод. Их нагрев теплом магмы, также как и непосредственный контакт с ней, приводит к эксплозивным извержениям. Наличие озера в кратере действующего вулкана представляет собой источник гидрологической опасности, заключающейся, например, в возникновении лахаров [Kilgour et al., 2010; Mastin, Witter, 2000; Rouwet et al., 2014].

Фреатические извержения по принятой в настоящее время терминологии [Barberi et al., 1992; Christenson et al., 2010; Németh, Kósik, 2020; Pardo et al., 2014; Stix, de Moor, 2018] – извержения, в которых: 1) магма является лишь источником тепловой энергии и непосредственного участия в извержении не принимает, в продуктах извержения нет ювенильного материала, или его содержание незначительно; 2) движущей силой является расширение воляного пара и других газов преимушественно метеорного происхождения, заключенных в порах и трещинах вулканических пород. По мнению [Barberi et al., 1992; Christenson et al., 2010], к фреатическим извержениям следует относить разрушение взрывами газонепроницаемой пробки, образующейся в жерловой части в результате застывания поднимающейся магмы.



Рис. 1. Географическое положение рассматриваемых объектов.

а – местоположение вулканов группы Эбеко на о. Парамушир; б – вулканы группы Эбеко (Нз – Незаметный, Нж – Неожиданный, ЛП – лавовые потоки); в – Северный кратер (СК) с внутренним кратером Активной воронкой (АВ) в 2012 г.; г – аэроснимок вулкана Эбеко 6 июня 2022 г. (КК – кратер Корбута, СК – Северный кратер, СрК – Средний кратер, ЮК – Южный кратер). Фото М.Л. Котенко.

Фреатомагматические извержения объединяют в себе характеристики магматических и фреатических извержений, так как обусловлены контактом магмы с водами экзогенных источников [Zimanowski et al., 2015]. Продукты фреатомагматических извержений обязательно содержат ювенильный материал [Alvarado et al., 2016; Zimanowski et al., 2015]. Опубликованные работы сводят механизм фреатомагматических взрывов к следующему: на контакте магмы с поверхностными водами (например, на дне кратерных озер, при внедрении в водоносные горизонты или при контакте с породами постройки, содержащими поровые и трещинные воды гидротермальных систем) происходит ударное расширение водяного пара. Это ведет к фрагментации самой магмы и дроблению вмещающих ее пород постройки [Houghton et al., 2015; Morrisey et al., 1999; Wohletz, 1983]. Прерывистые фреатомагматические взрывы могут продолжаться от нескольких месяцев до нескольких лет с переменной частотой и интенсивностью.

Понимание природы и особенностей соотношений фреатических и фреатомагматических извержений одного и того же эруптивного центра дает ценную информацию о взаимодействии подводящей системы активного вулкана с поверхностными и подземными водами, позволяет проводить оценку динамики длительных периодов активности и прогноз вулканической опасности. В настоящей работе мы приводим новые данные о продолжающемся с 2016 г. периоде активизации вулкана Эбеко, в котором осенью 2021 г. и начале зимы 2022 г. наметился период затишья, сменившийся в конце января новым этапом активизации с признаками фреатических и фреатомагматических извержений.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ВУЛКАНИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ВУЛКАНОВ ГРУППЫ ЭБЕКО

Вулкан Эбеко входит в состав сложного вулканического массива хребта Вернадского о. Парамушир. Фундамент массива образован вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами миоценового и миоцен-плиоценового возраста [Новейший ..., 2005], на которых в северной части хребта фрагментарно сохранились остатки лавовых плато и потухших вулканов с возрастом от позднего плиоцена до раннего голоцена [Мелекесцев и др., 1993б; Опыт ..., 1966]. Вокруг вулкана Эбеко расположены конусы других вулканических аппаратов, не проявляющих признаков активности, но образовавшихся примерно в одно время с Эбеко (см. рис. 1б). Эту группу вулканических построек принято называть группой Эбеко [Новейший ..., 2005]. Аппараты этих вулканов сильно разрушены тектоническими и эрозионными процессами. Постройки голоценовых вулканов Эбеко и Неожиданный сложены преимущественно пирокластикой, к ним приурочены обширные лавовые поля (~5 и ~9 км² соответственно) [Горшков, 1967; Мелекесцев и др., 1993а]. Моногенный вулкан Незаметный не имеет хорошо выраженного конуса. Истечение узкого лавового потока произошло через юго-восточную бровку небольшого кратера. Составы лав вулканов группы Эбеко варьируют от базальтов до андезитов [Panin et al., 2015]. По данным [Мелекесцев и др., 1993а] извержения вулканов Неожиданный и Незаметный произошли не позднее 2.4–3 тыс. лет назад, в то время как вулкан Эбеко сохраняет эруптивную активность до настоящего времени.

Согласно [Горшков, 1967], вулкан Эбеко является сложной постройкой гнездового типа. Он состоит из трех слившихся конусов, содержащих крупные кратеры (Южный, Средний и Северный), образующие линейную меридионально вытянутую группу. Основания конусов лежат на лавовом плато, состоящим из потоков, стекающих по западному склону хр. Вернадского в долины рек Горшкова и Юрьева.

Вулкан Эбеко вмещает гидротермальную систему [Белоусов и др., 2002; Kalacheva et al., 2015] с мощными поверхностными проявлениями на внешних склонах конусов и внутри кратеров (фумаролы, горячие источники, кипящие водно-грязевые бассейны). В кратерах также периодически возникают ультракислые термальные озера.

Исторические извержения вулкана Эбеко, наиболее полный обзор которых дан в работах Горшков, 1967; Гущенко, 1974; Мелекесцев и др., 1993a, 1993б; Belousov et al., 2021], имели место в 1793, 1859, 1934–1935, 1963, 1965, 1967–1971, 1987-1991, 2009, 2010, 2011 и 2016-2021 гг. и носили чисто эксплозивный характер. Жерла извержений открывались в основном в пределах кратеров Среднего и Северного конусов. Дважды новые жерла открывались на некотором отдалении: жерло 1963 г. в Восточном цирке [Кирсанов и др., 1964] и жерло 2005 г. на восточном склоне ручья Лагерный [Котенко и др., 2010]. Часть извержений происходила (или начиналась) в кратерных озерах [Башарина, Храмова, 1971; Котенко и др., 2010, 2012; Мелекесцев и др., 19936; Скрипко и др., 1966]: в 1965, 2011 гг. взрывы происходили из озера Горячее Среднего кратера; в 1967, 1989 и 2006-2007 гг. – из озер в пределах Северного кратера.

Начиная с 1989 г. наиболее высокой активностью обладает Северный кратер. Современный центр вулканической активности начал формироваться в 2018 г.: он назван кратером Корбута (КК) (см. рис. 1г) [Котенко и др., 2019] или Новым северным кратером (New-North-Crater) в англоязычной литературе [Walter et al., 2020] и приурочен к северной кромке Северного кратера. Выбросами пирокластики из КК был полностью засыпан ранее существовавший кратер (Активная воронка, см. рис. 1) [Котенко и др., 2019; Belousov et al., 2021]. В конце 2021 г. в КК появилось новое озеро [Котенко, 2022].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве визуальных инструментов мониторинга эруптивной активности были использованы полевые наблюдения и фотосъемка в прикратерной зоне. Дистанционные методы наблюдений — постоянная покадровая фотосъемка камерой Brinno TLC 100 с частотой съемки 5 с (установлена на расстоянии 7 км от вулкана); аэрофотосъемка с применением БПЛА MAVIC Pro Platinum, оснащенным цифровой оптической фотокамерой с разрешением 12 мегапикселей; спутниковые снимки Европейского космического агентства (ESA) (https://apps.sentinel-hub.com/ ео-browser); данные о термальных аномалиях, предоставляемые проектом MIROVA (https://www. mirovaweb.it/?action=volcanoDetails_S2&volcano_ id=290380).

Измерение температуры поверхности озера производилось инфракрасным термометром Кельвин-компакт 1200 с точностью измерений $\pm 1^{\circ}$ С, линейные размеры кратера — электронной рулеткой GLM 250 VF фирмы BOSCH. Измерения площади зеркала озера в КК выполнялись на материалах плановой аэрофотосъемки и по снимкам спутника Sentinel 2 (https://apps.sentinel-hub. com/eo-browser). Площадь зеркала озера была выбрана в качестве инструмента мониторинга из трех возможных морфометрических характеристик (площадь зеркала, уровень и объем воды) для замкнутой бессточной котловины КК формы усеченного конуса. Суточные суммы атмосферных осадков получены из открытых данных Росгидромета для ближайшей метеостанции Северо-Курильск (№ 32215, 23 м н.у.м., расстояние до вулкана Эбеко 7 км).

Химический состав воды озера КК выполнен в Лаборатории постмагматических процессов ИВиС ДВО РАН.

Величина парогазовой эмиссии из КК определялась по двум методикам: расчету по высоте парогазового облака (плюма) и скорости ветра в слое существования шлейфа [Федотов, 1982]; сравнению площадей проекций парогазовых шлейфов на горизонтальную плоскость [Hochstein, Bromley, 2001], полученных в результате аэрофотосъемки с БПЛА. Расход газа для доступных в зимнее время термальных полей (Юго-восточного и Южного кратера) был получен по данным прямого измерения скорости потока на устье фумаролы (трубкой Пито), температуры газа (цифровой термометр IT-8 с хромель-алюмелевой термопарой), диаметра газового канала [Нехорошев, 1960].

Образцы свежих пеплов и бомб были собраны на бровке кратера Корбута и на удалении не более 1 км от него. Некоторые пробы вулканического пепла отбирались непосредственно после выброса с одежды и поверхности рюкзаков авторов.

Для проведения морфологических и микроаналитических исследований образцы тефры извержений 2022 года предварительно обрабатывались в ультразвуковой ванне для отделения ультратонкой фракции (<50 мкм). Изучение морфологии пепловых частиц и их микроаналитические исследования выполнялись на сканирующем электрон-

ном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований (ЦКП МИИ) ИГМ СО РАН), оборулованном источником электронов с полевой эмиссией и энергодисперсионным детектором рентгеновского излучения X-Max 50 фирмы Oxford Instruments. Анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ. Ток зонда составлял 1 нА. При анализе минералов и стекла пепловых частии время накопления спектра составляло 60 сек. Во избежание недоопределения Na в стеклах съемка производилась путем сканирования электронным пучком площадки, размер которой выбирался не менее 5 × 5 мкм. Состав определялся путем усреднения результатов измерения 2-3 площадок, расположенных поблизости. Калибровка производилась по хорошо охарактеризованным внутрилабораторным стандартам. Для проверки правильности и контроля дрейфа условий анализов производились измерения составов вкрапленников клинопироксена и плагиоклаза, стехиометрия которых предусматривает, что полный микрозондовый анализ их должен иметь сумму 100%. В случае, если сумма анализа минерала выходила за пределы диапазона 99-101 мас. %, производилась коррекция составов умножением концентраций всех элементов на коэффициент, равный отношению 100 к сумме анализа.

Для гранулометрического анализа проба пепла разделялась на фракции >1 мм и <1 мм с определением весовой доли каждой из фракций. Гранулометрический анализ фракции менее 1 мм проводился методом лазерной гранулометрии на приборе Analysette 22 Laser Particle Sizer фирмы Fritsch в Лаборатории геологии кайнозоя ИГМ СО РАН. Результаты этого анализа представлялись в объемных долях фракций.

Определение содержаний породообразующих элементов в валовом составе пеплов и бомб выполнялся методом рентгенофлюоресцентного анализа на спектрометре ARL 9900XL фирмы ARL в ЦКП МИИ ИГМ СО РАН. Потери при прокаливании определялись взвешиванием после изотермической выдержки пробы при 950°C в течение 2-х ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ АКТИВНОСТИ В КРАТЕРЕ КОРБУТА И ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗМЕРОВ КРАТЕРНОГО ОЗЕРА

Состояние кратера Корбута в период с 20 ноября 2021 г. по 21 января 2022 г.

Период предыдущей активности выражался в частых выбросах вулканского типа и продолжался с 19 октября 2016 г. по 19 ноября 2021 г. (http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/volc?name= Ebeko). Относительно мощные, но редкие взрывы в конце этого периода (август — ноябрь 2021 г.) свидетельствовали, вероятно, о замедлении скорости подъема магмы или даже прекращении ее движения или поступлении сильно обедненных газами порций магмы. Поэтому для подготовки взрывов требовался длительный период: пауза между сильными событиями составляла от 14 до 26 сут. В тоже время содержание SO₂ в составе эруптивных газов уже в середине августа снизилось в 2 раза по сравнению с предыдущим годом [Котенко и др., 2022], также свидетельствуя об обеднении газовой фазы магматическими компонентами.

Затем последовало затишье с 20 ноября 2021 г. до 22 января 2022 г., в течение которого в КК сохранялась высокая фумарольная активность, фумаролы действовали на дне и внутренних стенках кратера. Размеры кратера по бровке равнялись 230 м и 205 м, измеренная глубина ~100 м. По нашей оценке, величина парогазовой эмиссии из КК в ноябре-начале декабря 2021 г. составляла ~1350 т/сут, что вместе с атмосферными осадками создало условия для появления нового кратерного озера. 12 января 2022 г. озеро с температурой воды на поверхности 43°С имело площадь зеркала 4.5 тыс. м² [Котенко, Котенко, 2022]. Подводная фумарольная разгрузка проявлялась в виде конвективных ячеек, видимых на поверхности воды. Выше уреза воды на западной и северной стенках кратера также наблюдалась фумарольная активность.

Активность в кратере Корбута 22 января—13 июня 2022 г.

До 22 января 2022 г. средствами мониторинга не было зафиксировано ни одного выброса из кратера Корбута. Точную дату начала нового извержения установить сложно из-за ограничений визуального и инструментального мониторинга вершины вулкана в зимнее время. Они вызваны главным образом неблагоприятными погодными условиями: низкая облачность и метели не позволяют наблюдать и фотографировать вулкан с земли и из космоса. Вдобавок к этому, короткий световой день ограничивает время фотосъемки даже в благоприятную погоду. Первые образцы свежевыпавшего пепла были отобраны 22 января 2022 г. к юго-востоку от вулкана при наблюдаемом северо-западном ветре на уровне кромки кратера, 24 января в 2:40 UTC в г. Северо-Курильск в 7 км от вулкана наблюдался пеплопад при западном ветре, вулкан был закрыт. 2 февраля в 0:08 UTC нам удалось непосредственно наблюдать эксплозивный выброс из кратера Корбута. Аналогичный выброс был зафиксирован с помощью фото- и видеосъемки 5 февраля (рис. 2а, 2б, 2в). На фотографиях видно, что на начальной стадии формируется выброс в виде веера пепло-паро-газовых струй типа петушиного "хвоста" (cock's tail [Thorarinsson et al., 1964]). В начальный момент выброса струи пара и тефры имели различные направления и скорости (но не более 60 м/с), максимальная высота подъема тефры не превышала 600 м над кратером. Большая часть преимущественно грубообломочного материала, благодаря гравитационной сепарации смеси, падала обратно в кратер, в то время как парогазовые облака всплывали на высоту 0.5–2.5 км и рассеивались там в течение нескольких минут после выброса.

Похожие взрывы, но с незначительным содержанием пепла наблюдались до 13 июня, при этом формировались парогазовые шлейфы и облака. время сушествования которых не превышало несколько минут. После взрыва перемешанная с обломочным материалом вода в новом кратерном озере имела черный цвет еще в течение 20-30 мин (рис. 3). Выброшенная за пределы кратера смесь обломочного материала и воды отлагалась на внешних заснеженных склонах кратера, формируя насыщенные влагой плащи (см. рис. 3). 5 апреля после взрыва в 22:49 UTC в снежном покрове под нижней частью такого плаща сформировались многочисленные неглубокие каналы глубиной до 15 см. Подобный характер эруптивных отложений на покрытом снегом вулканическом конусе описан, например, в 2002 и 2004 гг. во время извержений из озера в южном кратере вулкана Коровин, Алеутские острова, США [Waythomas, 2022].

Изменение размеров озера в кратере Корбута

Площадь зеркала озера в кратере Корбута периодически измерялась с 11 декабря 2021 г. Диаграмма изменения площади зеркала (рис. 4) показывает, что 13 февраля была зафиксирована минимальная площадь зеркала, которая увеличивалась в дальнейшем вплоть до конца мая. Пополнение озера метеорной водой до второй декады мая обеспечивалось главным образом за счет выпадения снега непосредственно в кратер Корбута и метелевого переноса снега с других участков Северного кратера. В мае количество осадков было незначительно (см. рис. 4), но начался период интенсивного снеготаяния на уровне кратеров: по данным аэрологического зондирования (https:// weather.uwvo.edu/cgi-bin/sounding) с 7 мая средняя высота нулевой изотермы составляла 1820 м и более, т.е. на уровне кратера наблюдались преимущественно положительные температуры возлуха. Максимальная плошаль озера 9400 м² отмечена 27-30 мая, после чего началось ее уменьшение. Динамику изменений размеров озера в КК иллюстрирует рис. 5. 6 апреля озеро было снято до взрыва (см. рис. 5а) и через 17 мин после него (см. рис. 5б): цвет воды изменился с молочно-голубого на черный, демонстрируя появление большого количества взвеси (пирокластического ма-



Рис. 2. Фреатические взрывы 5 февраля в 23:41 UTC (а–в) и 24 июня в 3:10 UTC (г, д). Указано нарастание времени от начала взрыва. На рис. 2д видны паровые внутренние струи и паровые шапки в передних частях пепловых струй, характерные для фреатомагматических взрывов. Фото Е.И. Котенко (а–в) и Т.А. Котенко (г, д).

териала) в воде. Внутренние стенки кратера полностью покрыты слоем грязи. 6 и 12 июня (см. рис. 5в, 5д) озеро в кратере Корбута разделилось на две части: более глубокую северную (около 30% площади озера) с подводной фумарольной разгрузкой и мелководный участок с фумарольными струями, пробивающимися через донные отложения, где фумаролы издавали чавкающие звуки, периодически пробивая вязкую массу осадка, заливающую их устья. 24 июня в северовосточной части дна наблюдалось лишь небольшое овальное озеро на контакте с террасированными отложениями пирокластического осалка с юга и запада. После 24 июня озеро в КК перестало существовать. 18 июля и 18 сентября (см. рис. 5г, 5е) наблюдался сухой кратер с мощной парогазовой разгрузкой в углублении северо-восточной его части, с юга и запада поднимались террасы пепловых отложений.

Дважды предпринимались попытки зачерпнуть озерную воду для определения ее химического состава. Однако это не удалось и были проанализированы составы воды из ледяных линз (образованных выброшенной из кратера озерной водой взрывами 5 и 20 февраля. Для этой воды получены значения pH ~ 2.7, содержание (г/л) сульфат-иона 3.4 и 1.7, хлор-иона 3.3 и 0.4, мольные соотношения SO₄/Cl 0.4 и 1.5 соответственно. Полученные характеристики указывают на то, что KK содержал ультракислое сульфатно-хлоридное озеро.

Активность в кратере Корбута с 14 июня 2022 г. — по настоящее время

Начиная с 14 июня характер выбросов, объем выбрасываемого пеплового материала, форма и высота подъема пирокластических туч резко изменились. Ранние взрывы формировали пепловые облака типа "цветной капусты" черного цвета, в которых подобно выбросам февраля—июня 2022 г. происходила гравитационная сепарация твердого материала и парогазовой смеси с образованием в верхней части черной колонны снеж-



Рис. 3. Плащи и потоки воднопирокластической смеси ("грязи"), выброшенной из нового озера в КК, на склонах кратера Корбута: свежие 5 апреля 2022 г. после взрыва в 22:49 UTC (1) и предыдущих взрывов (2–5). Аэроснимок М.Л. Котенко.



Рис. 4. Диаграмма изменения площади зеркала озера в кратере Корбута, суточных сумм осадков (для высоты 23 м н.у.м., ближайшая метеостанция 32215 "Северо-Курильск"), количества зафиксированных взрывов из кратера Корбута с указанием периодов предполагаемой фреатической и фреатомагматической активности.

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 4 2023



Рис. 5. Изменение размеров озера в КК.

а, б – озеро в кратере Корбута б апреля в 9:26 LT перед взрывом (LT = UTC + + 11ч) (а) и в 9:43 LT после взрыва (б); в, г – кратер Корбута 6 июня с озером (в) и 18 июля без озера (г), вид с юга (на бровке кратера 18 июля белыми окружностями очерчены свежие крупные бомбы с поверхностью "хлебной корки"); д – озеро 12 июня (пунктирная линия разделяет мелководный участок (I) и более глубокий участок (II) с подводной разгрузкой фумарол с северной стороны, вид с северо-востока; е – кратер Корбута 18 сентября (сильная фумарольная активность сосредоточена в северо-восточной части дна). Аэроснимки М.Л. Котенко (в, е) и К.А. Петрова (г). Фотосъемка Т.А. Котенко (а, б) и Д.А. Ермолаева (д).

но-белых шапок пара. В более поздних выбросах, которые характеризовались большим объемом и высокой скоростью подъема, цвет пеплового облака стал темно-серым, а образование паровых шапок наблюдалось только для завершающей стадии выброса. Наблюдение отдельных взрывов показало, что на их начальном этапе формировались относительно тонкие струи, направленные под углом к вертикали, и только после этого начинало образовываться массивное облако, постепенно превращающееся в мощный вертикальный плюм. Высота таких выбросов могла достигать 4 км. В основании особенно мощных выбросов формировались приземные пепловые волны (base surges). Характеристики выбросов позволяют отнести их к вулканскому типу извержений.

С 11 июня увеличилась частота выбросов. Так, 24 июня выбросы наблюдались в среднем каждые 1.5 ч (см. рис. 2г, 2д), высота пепловых облаков составляла 0.4–3.4 км над кратером, длина пепловых шлейфов – более 15 км. 8 июля пауза между взрывами в среднем составляла уже 58 мин, при этом ее длительность менялась от 2 мин до 3.5 ч. В отдельные дни, например, 3 и 8 июля, в течение 30–50 мин после взрывов сохранялись мощные постэруптивные газовые шлейфы с небольшой примесью пепла протяженностью 10–12 км, аналогичные газовым шлейфам после взрывов в 2020—2021 гг. [Котенко и др., 2022]. Измеренная по фото- и видеосъемке начальная скорость газопепловых струй извержений 2022 г. обычно составляла 20—60 м/с, достигая 130—150 м/с только при очень сильных взрывах, выбрасывающих крупные бомбы на расстояние до 0.8 км от жерла.

С 11 июня в кратере Корбута, по данным MIROVA (https://www.mirovaweb.it) и KBEPT (http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/index?type=3), стали также устойчиво регистрироваться термальные аномалии.

ОПИСАНИЕ ПРОДУКТОВ ИЗВЕРЖЕНИЯ

Продуктом первых выбросов в кратере Корбута была смесь озерной воды и взвешенной в ней пирокластики. После 14 июня (второй период) выпадение тефры вблизи кратера (0—800 м) зачастую происходило в виде дождя с пеплом, или в форме медленного оседания. Полосы падения в случае оседания имели вид множества изогнутых вертикальных тонких струй. В середине августа в ближней зоне в радиусе до 0.8 км стало происходить выпадение вулканических бомб и баллистических блоков размером до 40 см на максимальном отдалении. 19 августа на удалении до 50 м от бровки кратера были выброшены первые бомбы типа "хлебной корки".

Гранулометрический состав и морфология частиц

На рис. ба показано соотношение в массовых долях тонкой и грубой фракций в пробах выброшенного взрывами твердого материала. По соотношению долей разных фракций отчетливо различаются периоды с января до июня (1 период) и с июня по сентябрь (2 период) 2022 г. На рисунке видно, что для первого периода характерна существенная доля фракции >1 мм, которая варьирует от 66 до 17 мас. %, в то время как в твердом материале выбросов второго периода ее доля менее 6 мас. %.

Гранулометрический состав тонких (пепловых) фракций твердого материала для обоих периодов также различается. Распределение по размерам частиц в пеплах первого периода имеет три моды: от 5 до 20 мкм с максимумом 10-15 мкм, от 50 до 90 мкм с максимумом 50-70 мкм и от 100 до 500 мкм с максимумом 250-400 мкм (см. рис. 6б). Преобладают частицы, имеющие размерность от 100 до 500 мкм. Пеплы второго периода также демонстрируют три моды в тех же диапазонах размерности, но увеличивается доля фракции 50-90 мкм, у которой максимум смещается к диапазону 50-60 мкм. Наибольшее число частиц с размерностью 100-500 мкм в пеплах проб второго периода попадает в диапазон 100-200 мкм, а доля более крупных частиц снижается практически до нуля (см. рис. 6в).

Подавляющее число ювенильных частиц в тонкой фракции при исследовании на сканирующем электронном микроскопе методом обратно рассеянных электронов имеют блоковую морфологию по классификации [Wohletz, 1983]. Форма частиц субизометричная или вытянутая. Газовые пузырьки редки и, как правило, не соединяются между собой.

Минеральный и химический состав тефры

Ювенильные частицы представляют собой кристаллы, окруженные стекловатой основной массой или стекловатые обломки с однородным стеклом, в которое погружены микролиты и фенокристаллы плагиоклаза (~80%), ортопироксена и клинопироксена (~15-20% в сумме), магнетита и апатита (<5%) с различной степенью идиоморфизма (рис. 7а, 7б). Доля стекла в таких частицах варьирует в очень широких пределах – от ~50 до 10%. Преобладают частицы, представленные кристаллами и обломками минералов, стекловатые частицы находятся в подчиненном количестве. Ювенильные частицы присутствуют во всех изученных образцах тефры независимо от времени отбора. Доля частиц полностью раскристаллизованных и гидротермально-измененных пород по визуальным оценкам имеет подчиненное значение.

Иногда среди свежего однородного стекла, тон которого в обратно рассеянных электронах нейтральный серый (fg, см. рис. 7), встречается вещество, внешне напоминающее стекло, но имеющее в обратно рассеянных электронах более темный тон (далее, темная основная масса, аg, см. рис. 7в, 7г, 7д). Темная основная масса иногда непосредственно контактирует со свежим стеклом (см. рис. 7д).

В некоторых частицах обособления с темной основной массой имеют округлые очертания и секреционное строение (см. рис. 7г). От более свежей основной массы их отделяет кайма из пустот, вытянутых вдоль границы раздела. Краевая часть выполнена мелкими удлиненными кристаллами, часто ориентированными в сторону центра секреции. По составу эти кристаллы отвечают санидину (см. рис. 7г, 7д).

В секреционных обособлениях присутствуют кристаллы плагиоклаза и пироксенов, аналогичные тем, которые находятся за их пределами. Часто санидин секреционных обособлений использует плагиоклаз в качестве затравки. Некоторые из кристаллов плагиоклаза частично располагаются в свежем стекле, частично в темной основной массе. Санидин полностью расположен в темной основной массе обособлений и не встречается за их пределами.



Рис. 6. Гранулометрический состав тефры вулкана Эбеко. а – весовая доля мелкой фракции (<1 мм) в пеплах конца 2021 г. (оранжевый цвет) и первой половины 2022 г. (синий цвет); б – результаты лазерно-гранулометрического анализа мелкой фракции пеплов первого периода; в – результаты лазерно-гранулометрического анализа пеплов второго периода. Классификация пепла по размерам тонкой фракции, по [Houghton et al., 2015]: Гр – грубый, Ср – средний, Т – тонкий, ОТ – очень тонкий.



Рис. 7. Структурно-текстурные особенности частиц мелкой фракции тефры извержений 2022 г. Pl – плагиоклаз, CPx – клинопироксен, OPx – ортопироксен, Sa – санидин, Crs – кристобалит, Kl – каолин, Anh – ангидрит, Py – пирит, fg – свежее стекло, аg – измененное стекло (темная основная масса). Пояснения в тексте.

· · · ·							
Номер образца	Э1/2022	Э1/22	Э2/22	Э3/22	Э5/22	Э11/22	Э12/22
SiO ₂	55.66	56.05	53.51	54.05	55.72	52.78	54.32
TiO ₂	0.67	0.66	0.64	0.65	0.66	0.64	0.62
Al_2O_3	16.52	16.22	16.14	16.24	16.38	16.18	16.16
FeO	8.54	8.65	8.17	8.21	8.19	8.35	8.11
MnO	0.15	0.17	0.13	0.14	0.15	0.13	0.14
MgO	2.96	3.25	2.51	2.83	2.94	2.34	2.73
CaO	6.01	6.27	6.66	6.70	6.47	6.75	6.72
Na ₂ O	2.66	2.63	2.54	2.62	2.65	2.62	2.65
K ₂ O	1.94	1.94	1.89	1.89	1.98	1.86	1.91
P_2O_5	0.19	0.17	0.18	0.18	0.17	0.19	0.17
SO ₃	0.20	0.21	1.52	1.07	0.56	1.26	0.84
ППП	4.42	3.30	6.08	5.45	3.56	6.17	4.82
Сумма	99.91	99.51	99.97	100.03	99.43	99.28	99.19

Таблица 1. Содержания петрогенных компонентов в тефре извержений из кратера Корбута в феврале—июне 2022 г. (мас. %)

Примечание. ППП – потери при прокаливании. Даты отбора тефры: Э1/2022 – 22.01.2022; Э1/22 – 03.02.2022; Э2/22 – 05.02.2022; Э5/22 – 20.02.2022; Э11/22 – 24.06.2022; Э12/22 – 24.06.2022.

Центральная часть секреционных обособлений может содержать полость или полости с идиоморфными или ксеноморфными кристаллами α-кристобалита, разбитым трещинами на полигональные блоки (структура "рыбьей чешуи") (см. рис. 7г). Объемная доля полостей в таких обособлениях визуально менее или сопоставима с объемом, занятым кристаллами и самой темной основной массой (см. рис. 7г).

В подчиненном количестве встречаются частицы с полностью раскристаллизованной основной массой, часто содержащие продукты гидротермального изменения (хлорит, пирит и т.п.), и совсем редко частицы, состоящие из минералов гидротермального происхождения (каолинит, пирит, ангидрит, аморфный кремнезем) (см. рис. 7е).

По своему химическому составу пепловый материал выбросов обоих периодов отвечает андезитам, содержания калия в которых имеют пограничное значение между умеренными и высокими (табл. 1, рис. 8а, 8б), и близок к составам лав и вулканических бомб вулканов группы Эбеко (табл. 2, см. рис. 8). Тем не менее, на рис. 8 видно, что составы пеплов незначительно, но систематически смещены в область с более высоким содержанием SiO₂ и низким – щелочных металлов. Таким образом, характер вариаций кремнезема и шелочей в валовых составах пеплов (см. рис. 8. белая стрелка) отличается от линии эволюции магм вулканов группы Эбеко (см. рис. 8, серая стрелка), но пересекается с ней в точке, отвечающей составам бомб, выброшенных из кратера Корбута извержениями 2021 г.

Рентгеноспектральный микроанализ показал, что составы свежих стекол пепловых частиц соответствуют трахириолитам с высоким содержанием калия (табл. 3, см. рис. 8). Составы стекол основной массы вулканических бомб эволюционируются от высококалиевых трахидацитов до трахириолитов при практически неизменной сумме щелочей (см. рис. 8а). Составы свежих стекол в пепловых частицах отвечают наиболее кремнистым стеклам основной массы вулканических бомб. Диаграммы на рис. 8 (а, б, в) демонстрируют, что в составах стекол вулканических бомб по мере увеличения содержания SiO₂ снижается содержание натрия. При этом содержание калия возрастает. Составы стеклоподобного вешества темной основной массы показывают, что оно состоит из практически чистого кремнезема, с существенной примесью глинозема и низкими содержаниями FeO, CaO, Na₂O и K₂O (табл. 4, см. рис. 8). На рис. 8 можно увидеть, что эволюция его составов направлена от свежих стекол в сторону обеднения щелочами и обогащения кремнеземом. Такую же тенденцию имеют и содержания других элементов (см. табл. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Извержение 2022 г. в кратере Корбута началось с относительно слабых выбросов материала со дна кратерного озера, имеющих форму "петушиного хвоста", типичную для гидровулканических извержений на морском мелоководье или в кратерных озерах [Parfitt, Wilson, 2008; Houghton et al., 2015]. Такие выбросы формируются на на-



Рис. 8. Составы продуктов извержений вулкана Эбеко. 1 — составы лав вулканов группы Эбеко (по [Panin et al., 2015] и по неопубликованным данным авторов); 2 — составы вулканических бомб 1934—1935 гг.; 3 — составы стекол основной массы вулканических бомб 1934—1935 гг.; 4 — составы вулканических бомб 2021 г.; 5 — составы стекол основной массы 2021 г.; 6 — валовые составы тефры 2022 г.; 7 — составы стекол тефры 2022 г.; 8 — составы стеклоподобного вещества темной основной массы в частицах тефры 2022 г.; 9 — состав кремнистого вещества частиц гидротермального происхождения (см. рис. 7е).

чальных стадиях как фреатических, так и фреатомагматических извержений андезитовых стратовулканов с кратерными озерами, например, фреатомагматическое извержение вулкана Руапеху (Новая Зеландия) в 1995-1996 г. [Nakagawa et al., 1999] и фреатическое в 2007 г. [Kilgour et al., 2010]. Поэтому схожесть морфологии формирующихся эруптивных облаков не позволяет однозначно определить тип извержения только по этому признаку. После того, как озеро в КК было полностью осушено, произошло увеличение количества взрывов (см. рис. 4), их мощности, изменение морфологии формирующихся пепловых облаков. Выбросы приобрели характер эксплозивных извержений вулканского типа. Появление в продуктах извержения бомб типа "хлебная корка" является очевидным признаком вовлечения ювенильного материала и превращения извержения во фреато-магматическое.

Наши наблюдения показали, что выбросы из КК в первый период с января по июнь 2022 г. выносили более грубый материал, преобладающая размерность которого отвечала средне- и крупнозернистому пеплу, по [White, Houghton, 2006]. При переходе ко второму периоду развития эруптивной активности, начиная с июня, произошло изменение гранулометрического состава - он стал более тонкозернистым. Мы связываем такое измерение размерности с различной интенсивностью эксплозивных событий. Не исключено, что более грубый материал первого периода состоял в большей степени из частиц озерного осадка, содержащего помимо пепла продукты разрушения крупных обломков и бомб предыдущих выбросов, падавших непосредственно в кратер.

Таблица	2. Содер	жания пе	трогенні	ых элемеі	нтов в пр	одуктах	изверже	ний вулн -	санов гру г	ппы Эбен	co (Mac. %					
Номер образца	ПР17-04	ПР17-01	ПР17-02	ПР17-03	ПР17-05	311/21	Э13/21	Э 14/21	ПР21-12	ПР21-15а	ПР21-16а	ПР21-166	ПР21-13	ПР21-18	ПР-40*	ПР-60*
		By	лкан Эбе	KO						[вулкан Эб	ЭКО				
Вулкан	Бс	мбы изве	ржения 1	934-1935	TT.	Бомбь	I, август (2021 r.	Средний кратер	Ю	жный кра	də		Северны	й кратер	
											Лавы г	лоценовь	іх изверж	ений		
SiO_2	55.92	58.28	59.52	56.86	57.68	56.94	56.81	56.81	59.56	59.44	59.81	56.06	54.82	53.29	52.93	53.94
TiO_2	0.68	0.67	0.62	0.68	0.65	0.69	0.68	0.68	0.65	0.64	0.64	0.72	0.72	0.74	0.77	0.73
Al_2O_3	16.90	16.61	16.40	16.89	16.16	16.86	17.00	17.01	15.58	16.10	15.41	16.72	16.98	16.87	17.91	17.72
FeO	9.68	8.28	7.83	9.40	9.35	9.34	9.31	9.18	8.72	8.54	8.80	9.82	9.95	10.82	10.70	10.36
MnO	0.18	0.16	0.15	0.17	0.17	0.18	0.17	0.17	0.16	0.17	0.16	0.18	0.18	0.19	0.19	0.19
MgO	3.10	2.75	2.50	3.13	3.05	3.22	3.17	3.09	2.78	2.69	2.82	3.33	3.59	4.24	4.25	4.00
CaO	7.18	5.92	5.71	7.32	6.66	7.50	7.42	7.39	6.12	6.28	5.84	7.67	8.25	8.51	9.12	8.74
Na_2O	2.89	3.22	3.22	2.91	2.90	2.94	2.98	2.98	3.04	3.01	2.94	2.91	2.79	2.70	2.69	2.76
K_2O	2.10	2.55	2.78	2.08	2.23	2.13	2.10	2.12	2.45	2.46	2.61	1.97	1.92	1.73	1.69	1.75
P_2O_5	0.19	0.12	0.19	0.19	0.17	0.18	0.19	0.19	0.17	0.17	0.16	0.18	0.20	0.21	0.20	0.20
ШШШ	0.41	0.76	0.33	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.38	0.20	0.60	0.14	-0.17	-0.11	-0.14	-0.15
Сумма	99.24	99.31	99.26	99.64	99.36	99.97	99.84	99.62	99.61	99.69	99.78	99.68	99.23	99.20	100.32	100.24
Номер образца	ПР21-08	ПР21-09	ПР21-10	ПР-30*	ПР-32*	ПР-34л*	ПР-39*	ПР-66А	* IIP21-0	I ПР21-0	2 IIP21-0	3 IIP21-04	ПР21-06	ПР22-11	ПР22-13	ПР21-11
Вулкан				вулкан	Эбеко				* *	Незаме [,] ный	1. 1.	еожиданн	ый	Краг	пенини	KOBA
		ла	вы и дайн	ки плейст	оценовог	o Bo3pac	ra		жерло		-		лавы	-		
SiO_2	59.07	54.90	57.18	58.32	61.35	59.90	60.33	56.46	55.49	54.83	57.98	57.48	56.49	58.61	55.34	58.44
TiO_2	0.61	0.70	0.81	0.60	0.53	0.60	0.57	0.64	0.73	0.68	0.64	0.63	0.65	0.64	0.69	0.63
AI_2O_3	15.63	17.05	16.89	16.56	16.58	16.46	16.77	17.53	16.45	16.99	16.52	16.36	16.90	16.56	17.44	16.69
FeO	8.21	10.48	8.45	8.30	7.30	8.31	7.82	9.58	9.68	10.09	9.10	9.00	9.20	8.64	9.81	8.75
MnO	0.16	0.18	0.14	0.16	0.16	0.16	0.21	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.18	0.18	0.17
MgO	3.66	3.56	2.86	3.70	2.32	2.74	2.54	3.51	3.29	3.71	3.14	3.06	3.23	2.92	3.54	2.96
CaO	6.27	7.30	5.73	6.98	5.59	6.10	5.80	7.37	7.70	7.84	6.71	6.62	7.31	6.63	7.86	6.86
Na_2O	3.02	2.88	3.15	3.08	3.38	3.04	3.36	2.95	2.80	2.75	2.95	2.96	2.92	3.04	2.81	2.94
K_2O	2.40	1.74	2.17	2.19	2.56	2.52	2.47	1.97	1.92	1.80	2.19	2.12	2.03	2.24	1.78	2.27
P_2O_5	0.11	0.23	0.25	0.19	0.18	0.17	0.20	0.18	0.18	0.19	0.19	0.18	0.16	0.18	0.15	0.18
ШШШ	0.65	0.50	1.64	0.17	0.20	0.00	-0.17	-0.23	0.93	0.10	0.11	0.53	0.14	0.00	0.20	0.07
Сумма	99.78	99.53	99.28	100.26	100.14	100.01	99.90	100.14	99.34	99.17	99.70	99.12	99.20	99.63	99.80	96.66
Примеча. Вулкан К	ние. * – да рашенинн	нные по [] икова не 1	Panin et al. входит в гр	., 2015]; ** руппу Эбе	- безымя ко, но отн	нный вул юсится к	каническ хребту Ве	ий аппар ернадскої	ат плейсто ю.	оценового	возраста в	0.5 км на се	Bepo-BocT	ок от вулк	ана Неож	иданный.

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 4 2023

16

КОТЕНКО и др.

05,000		Э1/22			Э3,	Э5/22			
Ооразец	1	2	3	1	2	3	4	1	2
SiO ₂	76.40	73.88	74.86	76.80	77.80	76.13	75.14	75.25	74.38
TiO ₂	0.40	0.48	0.47	0.34	0.43	0.48	0.45	0.48	0.49
Al_2O_3	11.72	12.39	11.70	11.55	10.96	11.38	12.68	11.85	12.29
FeO	1.55	2.35	2.03	1.49	1.45	1.68	1.89	2.29	2.29
MgO	0.00	0.10	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00
CaO	0.23	0.91	0.63	0.72	0.41	0.51	0.78	0.85	0.96
Na ₂ O	2.48	3.16	3.04	2.84	2.83	2.94	3.25	3.11	3.44
K ₂ O	6.16	5.48	5.89	5.61	5.64	5.72	5.59	5.47	5.37
Cl	0.08	0.23	0.21	0.14	0.27	0.23	0.15	0.18	0.21
Сумма	99.01	98.98	98.91	99.50	99.80	99.08	99.93	99.73	99.43
Ofnasau		Э5/22				Э12	2/22		<u>.</u>
Образец	3	4	5	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	78.26	77.74	76.76	76.00	75.20	75.87	75.85	75.97	75.06
TiO ₂	0.36	0.44	0.42	0.47	0.44	0.37	0.41	0.43	0.44
Al_2O_3	10.78	11.05	12.02	11.81	11.92	11.86	12.37	11.66	11.97
FeO	1.51	1.38	1.95	1.91	2.02	1.95	1.81	1.87	2.01
MgO	0.00	0.00	0.00	0.08	0.12	0.11	0.07	0.07	0.09
CaO	0.44	0.37	0.64	0.62	0.80	0.72	0.94	0.54	0.75
Na ₂ O	2.70	2.72	2.96	3.03	3.10	3.18	3.25	3.13	3.17
K ₂ O	5.56	5.79	5.46	5.71	5.48	5.62	5.46	5.70	5.52
Cl	0.20	0.28	0.19	0.22	0.25	0.20	0.22	0.27	0.22
Сумма	99.81	99.76	100.39	99.87	99.34	99.89	100.38	99.64	99.23

Таблица 3. Представительные электронно-зондовые анализы свежего стекла частиц тефры извержений из кратера Корбута в январе—июне 2022 г. (мас. %)

Небольшая мощность ранних взрывов не приводила к тонкой фрагментации этого материала. Учитывая это, а также характер и размеры формирующихся при эксплозиях первого периода облаков, мы полагаем, что эти извержения связаны с взаимодействием озерных вод с разогревающимися породами жерла и, таким образом, должны быть отнесены к извержениям фреатического типа. Обилие ювенильных обломков в продуктах первого периода, тем не менее, не позволяет полностью исключить участие в них магматического материала. Принимая во внимание длительный характер текущей эруптивной активности вулкана, сами ювенильные частицы могут быть как продуктом фрагментации близповерхностных порций свежей магмы, так и продуктов затвердевания более ранних порций.

Доминирующая размерность частиц пирокластики второго периода отвечает очень тонкому и тончайшему пеплу, по [White, Houghton, 2006]. Согласно работе [Wohletz, 1983] это свидетельствует в пользу фреатомагматического механизма фрагментации магмы. Это хорошо согласуется с увеличением мощности эксплозий и тем, что кратерное озеро в этот период было осушено.

Результаты исследования химического состава пеплов вулкана Эбеко в 2022 г. показывают, что он относится к умеренно-высококалиевым андезитам известково-щелочного ряда, близок к составам вулканических бомб, выброшенных из КК в 2021 г. (см. рис. 8), и согласуется с данными по составу пирокластического материала 2019 г., представленными в работе [Belousov et al., 2021]. Это подтверждает сделанный вывод о доминировании в тефре ювенильного материала. Небольшое, но систематическое, отклонение валовых составов тефры от линии магматической дифференциации (см. рис. 8) в сторону обогащения кремнеземом и обеднения другими компонентами можно объяснить как небольшой примесью частиц гидротермально-измененных пород, так и наличием продуктов взаимодействия свежей магмы с флюидами гидротермальной системы вулкана, рассуждения о котором будут даны ниже.

1	1 1	1 2	. 1			,					
050000	Э2/22	Э2/22	Э2/22	Э3/22	Э3/22	Э3/22	Э5/22	Э5/22	Э5/22	Э5/22	Э5/22
Образец	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	5
SiO ₂	91.95	90.74	89.62	86.26	98.43	90.54	93.64	97.53	97.98	94.88	93.08
TiO ₂	0.20	0.18	0.12	0.12	0.10	0.17	0.27	0.15	0.13	0.12	0.23
Al_2O_3	4.35	5.75	5.71	7.05	1.28	5.39	3.23	1.06	1.28	2.72	3.51
FeO	0.51	0.37	0.28	0.23	0.13	0.26	0.53	0.17	0.23	0.30	0.42
MnO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
MgO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
CaO	0.29	0.61	0.41	0.25	0.00	0.22	0.17	0.00	0.00	0.14	0.17
Na_2O	1.13	1.81	1.58	1.42	0.54	1.47	0.53	0.26	0.42	1.16	1.27
K ₂ O	0.90	1.00	1.64	3.51	0.00	2.18	1.45	0.52	0.52	0.72	1.14
SO ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Cl	нпо	нпо	нпо	0.07	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Сумма	99.33	100.46	99.34	98.90	100.48	100.22	99.82	99.68	100.57	100.04	99.84
Образец	Э5/22	Э5/22	Э5/22	Э5/22	Э5/22	Э5/22	Э5/22	Э5/22	Э5/22	Э5/22	Э5/22
ооразец	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	89.70	95.99	94.79	96.83	94.97	98.88	90.05	98.56	90.55	96.75	94.28
TiO ₂	0.25	0.25	0.20	0.18	0.17	0.15	0.13	0.17	0.17	0.12	0.15
Al_2O_3	5.10	2.06	2.85	2.08	3.17	0.89	5.18	0.87	5.39	1.55	3.47
FeO	0.49	0.22	0.33	0.23	0.12	0.13	0.18	0.00	0.49	0.21	0.26
MnO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
MgO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
CaO	0.31	0.11	0.18	0.11	0.11	0.00	0.39	0.00	0.27	0.00	0.15
Na ₂ O	1.36	0.73	1.04	0.08	0.92	0.42	1.11	0.43	1.58	0.57	0.90
K ₂ O	2.12	0.48	0.98	0.33	1.02	0.07	2.51	0.00	1.90	0.28	1.33
SO ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Cl	нпо	нпо	0.27	0.07	нпо	нпо	нпо	нпо	0.26	нпо	нпо
Сумма	99.33	99.84	100.65	100.62	100.48	100.54	99.54	100.03	100.61	99.49	100.55

Таблица 4. Представительные электронно-зондовые анализы стекла темной основной массы частиц тефры извержений из кратера Корбута в январе—июне 2022 г. (мас. %)

Примечание. нпо – ниже пределов обнаружения.

Взаимосвязь магматических продуктов текущей эруптивной активности с предыдущими периодами можно установить, сопоставив составы свежих стекол в продуктах извержений. Для этой цели сравним составы стекол тефры и основной массы вулканических бомб 2021-2022 гг. со стеклом основной массы бомб 1934–1935 гг. На рис. 8 видно, что составы свежего стекла частиц тефры и основной массы бомб 2021 г. близки друг к другу и отвечают наиболее кремнистым стеклам бомб 1934–1935 гг., что, вероятно, отражает эволюцию составов расплава при кристаллизации малоглубинного очага, питающего извержения вулкана Эбеко. Эта эволюция привела к обогащению расплавов калием и обеднению натрием (см. рис. 8г, розовые стрелки), которые можно объяснить кристаллизацией парагенезиса плагиоклаза, клино- и ортоприоксена с возрастающей долей плагиоклаза, у которого, возможно, уменьшается содержание Са. Состав расплава магмы, принимающей участие в извержениях текущего этапа эруптивной активности, высококремнистый, трахириолитовый. Это заключение согласуется с данными по составам стекол пирокластики 2019 г. [Веlousov et al., 2021]. Опираясь на соотношение содержания K_2O в стекле бомб 2021 г., содержания расплава в магме можно оценить примерно в 40 мас. %, что согласуется с визуальными оценками доли стекла в ювенильных частицах тефры 2022 г. Такая магма должна обладать высокой вязкостью, низкой подвижностью и относительно низкими температурами.

Составы стеклоподобного вещества темной основной массы резко отличаются от свежего стекла обогащением кремнеземом и обеднением всеми остальными элементами. Они демонстрируют, что помимо кристаллизации минералов в магме происходят другие процессы, приводящие к изменениям в составе расплава. Тесная взаимосвязь темной основной массы с пористыми и кавернозными участками пепловых частии заставляет предположить, что эти процессы связаны с взаимодействием расплавов с флюидной фазой. Незначительное количество газовых пузырьков в частицах тефры и высокие суммы микрозондовых анализов стекол говорит о низком содержании магматических летучих компонентов. Кроме того, как правило, такие пузырьки имеют хорошо выраженную округлую форму и не содержат минерализации, что свидетельствует о низкой концентрации растворенных солей в магматическом газе и отсутствии реакционных взаимоотношений между газом и расплавом. Это заставляет предполагать, что причиной образования высококремнистых участков с темной основной массой является взаимодействие свежей магмы с резко неравновесным с ней флюидом. С нашей точки зрения таким флюидом может быть флюид гидротермальной системы, функционирующей под вулканом Эбеко [Белоусов и др., 2002; Рычагов и др., 2004; Kalacheva et al., 2015] или флюид, просачивающийся из кратерного озера.

В округлых обособлениях, содержащих санидин, кристобалит и темную основную массу, часто наблюдаются ненарушенные кристаллы плагиоклаза и пироксена, идентичные кристаллам, заключенным в свежем стекле (см. рис. 7г). Некоторые из них могут находиться одновременно в свежем стекле и темной основной массе. Это говорит в пользу того, что флюид проникал в магматическое тело не по трещинам. В противном случае кристаллы магматических минералов были бы расколоты. Округлая форма обособлений предполагает, что исходное вещество имело форму пузырька или капли, сосуществующей с расплавом. В ходе своих перемещений в расплаве оно могло захватить и магматические минералы.

Образование санидина в изученных образцах происходило только в присутствии гипотетической флюидной фазы и связано тем, что в исходном силикатном расплаве содержится достаточное количество калия и алюминия. Это довольно типично для продуктов молодого вулканизма и свидетельствует о взаимодействии силикатного вещества с водными флюидами или фумарольными газами при высоких температурах [Ganino et al., 2019; Shchipalkina et al., 2020]. Благодаря кристаллизации санидина вещество основной массы теряет калий, алюминий и отчасти натрий (см. рис. 8, синяя стрелка). Вероятно, заключенный в обособлении флюид также экстрагировал из расплава натрий, другие компоненты и мог содержать некоторое количество кремнезема. Именно это способствовало обеднению вещества темной основной массы всеми элементами кроме SiO₂ и образованию кристобалита уже из самой флюидной фазы в полостях обособлений на самых поздних стадиях. Принимая во внимание кремнекислый состав и более высокую. по сравнению со свежим стеклом, трещиноватость стеклоподобного вещества темной основной массы (см. рис. 7д), можно предположить, что оно изначально содержало большое количество воды и могло соответствовать гелю кремнезема.

Кристаллы кристобалита (см. рис. 7г), приуроченные к полостям, и относящихся к низкотемпературной α-модификации, разбиты трещинами типа "рыбьей чешуи" и имеют облик, типичный для пород экструзивных куполов кислого состава [Horwell et al., 2013; Иванова и др., 2018]. Известно, что такой кристобалит образуется из газовой фазы при температурах, превышающих температуру фазового перехода из α в β-кристобалит ~240°C [Horwell et al., 2013].

Таким образом, полученные данные позволяют предположить, что в области, где происходит фрагментация магмы, имеет место активное взаимодействие ее с неким флюидом. Природа этого флюида нам пока достоверно не известна. Однако, принимая во внимание низкую пористость стекловатых частиц и их блоковую морфологию, мы можем утверждать, что причиной фрагментации магмы не является расширение магматических газов. Блоковая морфология частиц типична для фреатической и фреатомагматической фрагментации [Wohletz et al., 2013]. Существенно кремнекислый характер составов вешества. заполняющего обособления с темной основной массой, санидином и кристобалитом, говорит о том, что флюид имел кислую реакцию [Hedenquist et al., 1994; Lowenstern et al., 2018] и, вероятно, его происхождение связано с гидротермальной системой вулкана Эбеко. Взаимодействие такого флюида с силикатным магматическим веществом могло способствовать образованию обособлений, содержащих водосодержащий аморфный кремнезем.

Обособления с темной основной массой установлены только в пепловых частицах. В основной массе вулканических бомб они не обнаружены. Это позволяет предположить, что тонкая фрагментация будет характерна для тех участков магмы в жерле, которые обогащены продуктами взаимодействия расплава с флюидом гидротермальной системы, вероятно, содержащими гидратированный аморфный кремнезем. Его дегидратация в многочисленных обособлениях при вторичном разогреве или обновлении магмы будет способствовать развитию фреатомагматических взрывов даже в условиях, когда отсутствует подток к жерлу грунтовых, талых вод или воды из кратерного озера. Уточнение деталей и масштаба этого процесса требует дальнейших исследований и будет предметом последующих публикаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые за историю наблюдения за эруптивной активностью вулкана Эбеко получены данные о характере его активности на завершающей стадии магматического извержения и его продуктах. В короткий период покоя чашеобразная форма кратера, высокая фумарольная разгрузка в кратере Корбута и значительные метеорные осадки способствовали накоплению термальных кислых вод над вулканическим жерлом в виде нового кратерного озера. Просачивание озерных вод вглубь жерла по трещинам и контакт экзогенной воды с остывающей магмой, в свою очередь, привели к возобновлению взрывной активности в виде слабых фреатических выбросов в январе 2022 г. Морфология и размеры формировавшихся при эксплозиях первого периода облаков, преобладание пепла средне- и крупнозернистой размерности позволяют отнести их к фреатическому типу. Многочисленные ювенильные частицы в тефре этого периода могут быть как продуктом фрагментации свежей магмы, так и продуктом затвердевания более ранних порций.

В дальнейшем произошло нарастание интенсивности фреатических выбросов, а затем изменение стиля извержения на взрывы вулканского типа. Характер и сила эксплозий, уменьшение размерности пепла второго периода (преобладание тонкого и тончайшего), появление бом с поверхностью типа "хлебной корки" свидетельствуют в пользу фреатомагматического механизма фрагментации магмы. Петрографические и минералого-геохимические исследования тефры обоих периодов показали не только наличие в ней ювенильного материала, но и наличие взаимодействия между магмой и флюидом, источником которого может быть гидротермальная система вулкана Эбеко. Такое взаимодействие приводит к обеднению магмы щелочными металлами и обогащению ее кремнеземом, образованию обособлений аморфного водосодержащего кремнезема, дегидратация которого также может рассматриваться как одна из причин регулярного возобновления фреатомагматических извержений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Л.В. Котенко (ИВиС ДВО РАН) и Т.В. Смирнову (ИГМ СО РАН) за постоянное участие и активную помощь в отборе материалов и проведении исследований непосредственно на вулкане Эбеко. Большую помощь в проведении микроаналитических исследований оказал заведующий Лабораторией рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН к. г.-м. н. Н.С. Карманов. Авторы благодарят рецензентов за конструктивную критику и ценные замечания, позволившие значительно улучшить статью.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Вулканологическая часть работы выполнена в рамках НИР ИВиС ДВО РАН тема № FWEW-2019-0001 "Комплексное исследование крупных уникальных геотермальных систем, источники тепла и металлоносных флюидов". Минералого-геохимические и петрографические исследования проводились в рамках гранта РНФ 20-17-00075.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Башарина Л.А., Храмова Г.Г. Состояние вулкана Эбеко в 1966–1967 гг. // Бюлл. вулканол. станций. 1971. № 47. С. 44–51.

Белоусов В.И., Рычагов С.Н., Сугробов В.М. Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система: геологическое строение, концептуальная модель, геотермальные ресурсы // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 34–50.

Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.

Гущенко И.И. Извержения вулканов Мира. Каталог. М.: Наука, 1974. 474 с.

Иванова Д.А., Щербаков В.Д., Плечов П.Ю. и др. Кристобалит в экструзивных породах вулкана Безымянный // Новые данные о минералах. 2018. Т. 52. Вып. 2. С. 51–59.

https://doi.org/10.25993/FM.2018.52.23628

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.

Козлов Д.Н. Кратерные озера Курильских островов. Южно-Сахалинск: Сахалинский областной краевед-ческий музей, ИМГиГ ДВО РАН, 2015. 112 с.

Котенко Т.А., Котенко Л.В. Новое озеро в кратере Корбута вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. № 1. Вып. 53. С. 5–11.

https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-1-53-5-11

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 2010–2011 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 1. Вып. 19. С. 160–167.

Котенко Т.А., Мельников Д.В., Тарасов К.В. Газовая эмиссия вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2003– 2021 гг.: геохимия, потоки и индикаторы активности // Вулканология и сейсмология. 2022. № 4. С. 31–46. https://doi.org/10.31857/S0203030622040058

Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В. Извержение вулкана Эбеко (о. Парамушир) в 2018 г. // Материалы XXII региональной научной конференции "Вулканизм и связанные с ним процессы", посвященной Дню вулканолога, 28–29 марта 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 82–85.

Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирьянов В.Ю. и др. Вулкан Эбеко (Курильские о-ва): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч. 1 // Вулканология и сейсмология. 1993а. № 3. С. 69–81.

Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирьянов В.Ю. и др. Вулкан Эбеко (Курильские о-ва): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч. 2 // Вулканология и сейсмология. 1993б. № 4. С. 24–42.

Мельников Д.В., Ушаков С.В., Гирина О.А. и др. Формирование новых озер в Активной воронке Мутновского вулкана и кратера вулкана Райкоке // Материалы XXIII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога "Вулканизм и связанные с ним

20

процессы". Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 42–44.

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

Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. ред. Н.П. Лаверов. М: Наука, 2005. 604 с.

Опыт комплексного исследования района современного и новейшего вулканизма (на примере хр. Вернадского, о. Парамушир) // Тр. СахКНИИ. 1966. Вып. 16. 208 с.

Рычагов С.Н., Пушкарев В.Г., Белоусов В.И. и др. Северо-Курильское геотермальное месторождение: геологическое строение и перспективы использования // Вулканология и сейсмология. 2004. № 2. С. 56–72.

Скрипко К.А., Филькова Е.М., Храмова Г.Г. Состояние вулкана Эбеко летом 1965 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1966. № 42. С. 42–55.

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.

Alvarado G.E., Mele D., Dellino P. et al. Are the ashes from the latest eruptions (2010–2016) at Turrialba volcano related to phreatic or phreatomagmatic events? // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2016. V. 327. P. 407–415.

https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores .2016.09.003

Barberi F., Bertagnini A., Landi P., Principe C. A review on phreatic eruptions and their precursors // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1992. V. 52. P. 231–246.

https://doi.org/10.1016/0377-0273(92)90046-G

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

Christenson B.W., Reyes A.G., Young R. et al. Cyclic processes and factors leading to phreatic eruption events: insights from the 25 September 2007 eruption through Ruapehu crater lake, New Zealand // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2010. V. 191. P. 15–32.

https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores .2010.01.008

Ganino C., Libourel G., Bernard A. Fumarolic incrustations at Kudryavy volcano (Kamchatka) as a guideline for hightemperature (>850°C) extinct hydrothermal systems // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2019. V. 376. P. 75–85.

https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.03.020

Hedenquist J.W., Aoki M., Shinohara S. Flux of volatiles and oreforming metals from the magma-hydrothermal system of Satsuma Iwojima volcano // Geology. 1994. V. 22. P. 585–588.

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

Horwell C.J., Williamson B.J., Llewellin W. et al. The nature and formation of crystobalite at Soufriere Hills volcano, Montserrat: implication for the petrology and stability of silicic lava domes // Bull. Volcanol. 2013. V. 75. № 696. P. 2–19. https://doi.org/10.1007/s00445-013-0696-3

Houghton B., White D.L., Van Eaton A.R. Phreatomagmatic and related eruption styles // Encyclopedia of volcanoes / Ed. H. Sigurdsson. Elsevier, 2015. P. 537–552.

https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00030-4

Kalacheva E., Taran Yu., 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. 2015. V. 310. P. 118–131.

https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.11.006

Kilgour G., Manville V., Della Pasqua F. et al. The 25 September 2007 eruption of Mount Ruapehu, New Zealand: Directed ballistics, surtseyan jets, and ice-slurry lahars // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2010. V. 191. P. 1–14. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.10.015

Lowenstern J.B., van Hinsberg, V., Berlo K. et al. Opal-A in glassy pumice, acid alteration, and the 1817 phreatomagmatic eruption at Kawah Ijen (Java), Indonesia // Frontiers in Earth Science. 2018. V. 6. № 11.

https://doi.org/10.3389/feart.2018.00011

Mastin L.G., Witter J.B. The hazards of eruptions through lakes and seawater // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2000. V. 97. P. 195–214.

Morrisey M., Zimanowsky B., Wohletz K., Buettner R. Phreatomagmatic fragmentation // Enciclopedia of volcanoes / Ed. H. Sugurdsson. Academic Press, 1999. P. 431–445.

Nakagawa M., Wada K., Thordarson T. et al. Petrological investigations of the 1995 and 1996 eruptions of Ruapehu volcano, New Zealand: formation of discrete and small magma pockets and their intermittent discharge // Bull. Volcanol. 1999. V. 61. P. 15–31.

Németh K., Kósik S. Review of explosive hydrovolcanism // Geosciences. 2020. V. 10(2). P. 44.

https://doi.org/10.3390/geosciences10020044

Parfitt E.A., Wilson L. Fundamentals of physical volcanology. Blackwell Publishing, 2008. 230 p.

Panin G.L., Gora M.P., Bortnikova S.P., Shevko E.P. Subsurface structure of the northeastern fumarole field of the Ebeko volcano (Paramushir Island) according to the data of geoelectrical and geochemical studies // Russ. J. Pac. Geol. 2015. V. 9. № 4. P. 301–311.

https://doi.org/10.1134/S1819714015040077

Pardo N., Cronin S.J., Németh K. et al. Perils in distinguishing phreatic from phreatomagmatic ash; insights into the eruption mechanisms of the 6 August 2012 Mt. Tongariro eruption, New Zealand // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2014. V. 286. P. 397–414.

https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.05.001

Rouwet D., Sandri L., Marzocchi W. et al. Recognizing and tracking volcanic hazards related to non-magmatic unrest: a review // J. Appl. Volcanol. 2014. V. 3. P. 17. https://doi.org/10.1186/s13617-014-0017-3

Shchipalkina N.V., Pekov I.V., Koshlyakova N.N. et al. Unusual silicate mineralization in fumarolic sublimates of the Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia – Part 2: Tectosilicates // Eur. J. Mineral. 2020. V. 32. P. 121–136. https://doi.org/10.5194/ejm-32-121-2020

Stix J., de Moor J.M. Understanding and forecasting phreatic eruptions driven by magmatic degassing // Earth Planets Space. 2018. V. 70. P. 83.

https://doi.org/10.1186/s40623-018-0855-z

Thorarinsson S., Einarsson T., Sigvaldason G. et al. The submarine eruption of the Vestmann Islands 1963–64 // Bull. Volcanol. 1964. V. 27. P. 435–445.

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. Iss. 12/1961. https://doi.org/10.3390/rs12121961

Waythomas C.F. Selected Crater and Small Caldera Lakes in Alaska: Characteristics and Hazards // Front. Earth Sci. 2022. V. 9. 751216.

https://doi.org/10.3389/feart.2021.751216

White J.D.L., Houghton B.F. Primary volcaniclastic rocks // Geology. 2006. V. 34. P. 677–680. https://doi.org/10.1130/G22346.1

Wohletz K.H. Mechanisms of hydrovolcanic pyroclast formation: grain-size, scanning electron microscopy, and experimental studies // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 1983. V. 17(1-4). P. 31-63.

https://doi.org/10.1016/0377-0273(83)90061-6

Wohletz K., Zimanowski B., Büttner R. Magma – water interactions // Modeling volcanic processes. The physics and mathematics of volcanism / Eds S. Fagents, T.K.P. Gregg, R.M.C. Lopes. Cambridge: University Press, 2013. P. 230– 257.

https://doi.org/10.1017/CBO9781139021562.011

Zimanowski B., Büttner R., Dellino P. et al. Magma–water interaction and phreatomagmatic fragmentation // The Encyclopedia of Volcanoes / Eds H. Sigurdsson, B. Houghton, S.R. McNutt et al. London: Academic Press, 2015. P. 473– 484.

https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00026-2

Ebeko Volcano Activity in 2022: Mechanism and Products of Eruption

T. A. Kotenko^{1, *}, S. Z. Smirnov^{2, 3, **}, and T. Y. Timina^{2, ***}

¹Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia ²Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, prosp. akad. Koptyuga, 3, Novosibirsk, 630090 Russia ³Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Mineralogy SB RAS, prosp. akad. Koptyuga, 3, Novosibirsk, 630090 Russia

*e-mail: sinarka2017@mail.ru

e-mail: ssmr@igm.nsc.ru *e-mail: timina@igm.nsc.ru

The paper provides information about the eruptive activity of the Ebeko volcano in 2022. From January 22 to June 13, phreatic explosions occurred in the crater lake caused by water seeping through the plug formed in the upper part of the magma channel and its boiling. On June 14, Vulcanian explosions began, destroying the lake. The granulometric composition of the ashes has changed in the direction of reducing the particle size. Petrographic and mineralogical-geochemical studies of tephra allow us to define this period as a phreatomagmatic eruption by the presence of fresh juvenile material. It is established that the interaction of magma with the waters of the hydrothermal system of the Ebeko volcano leads to its depletion with alkali metals and enrichment with silica. It is suggested that the formation of amorphous water-containing silica in the form of numerous separations and its subsequent dehydration may contribute to the explosive activity of the volcano.

Keywords: volcano, Ebeko, crater lake, phreatic, phreatomagmatic