Извержение вулкана Эбеко в 2023-2025 гг.: мониторинг с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и фотокамер покадровой съемки Котенко Т.А. The 2023-2025 eruption of Ebeko Volcano monitored by unmanned aerial vehicle (UAV) and time-laps cameras

Kotenko T.A.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский; e-mail: sinarka2017@mail.ru

Эруптивная активность вулкана Эбеко (начавшаяся в январе 2022 г.) снизилась с сентября 2024 г. Взрывы из кратера Корбута не фиксировались после 19 января 2025 г. 8-15 августа 2024 г. в Северном и Среднем кратерах наблюдались фреатические взрывы, вызвавшие сход лахара. Сообщается об изменениях в тепловом поле, полученных с помощью съемки с БПЛА.

Применение аэрофотосъемки в видимом и инфракрасном (ИК) спектрах для изучения эруптивной активности и картирования термальных аномалий на вулкане 2019 г. [1, 2, 6]. Предыдущими Эбеко осуществляется с исследованиями инструментальными методами была создана базовая тепловая карта. В данной работе приводятся результаты полевых наблюдений, фотосъемки со стационарных камер и аэрофотосъемки с БПЛА в июне 2023 г. – феврале 2025 г. во время продолжавшегося Впервые фреато-магматического извержения. выполнялся систематический мониторинг термальной активности с помощью съемки с БПЛА в течение длительного периода.

Методы

За 2023-2025 гг. выполнено 22 подъема на вулкан Эбеко с проведением аэрофотосъемки при разных метеорологических условиях. ИК-съемка выполнялась с помощью квадрокоптера DJI Mavic 3T, оснащенного тепловизионной камерой с разрешением 640×512 пикселей в диапазоне измеряемой длины волны 8-14 мкм. Точность измерения температуры ±2 °C. Обработка ИК-изображений выполнялась в программе DJI Thermal Analysis Tool 3. Дополнительно к атмосферной коррекции для активного кратера вводились поправки на поглощение излучения фумарольными газами [5]. Фотографии в видимом спектре с разрешением 4000×3000 пикселей получены широкоугольной камерой Mavic 3t Hasselblad. Ортофотопланы в видимом и ИК-спектрах были получены с помощью программы обработки материалов воздушного фотографирования «Панорама Фото» ПАРБ.00290-01. Наземные измерения температуры выполнялись цифровым термометром с погружной хромель-алюмелевой термопарой и ручным ИК-термометром Кельвин-компакт 1200. Метеорологические время полетов измерялись В 2023 г. ручным параметры во цифровым термогигрометром SKYWATCH atmos, точность измерения температуры ±0.2 °C, влажности ± 3 %, а в 2024 г. – цифровой метеостанцией Misol, установленной в Южном кратере (рис. 1a), с точностью измерения температуры ± 1 °C, влажности ± 5 %.

Покадровая фотосъемка велась фотокамерами BRINNO TLC 100 из г. Северо-Курильск (7 км от вулкана) и из Южного кратера вулкана Эбеко (рис. 1а). Ограничение наблюдений: темное время суток и отсутствие видимости.

Характеристика эруптивной активности

Эруптивная активность вулканского типа по-прежнему была приурочена к кратеру Корбута (КК) (рис. 1).



Рис. 1. ИК-карта за 10.09.2023 г. (а); Кратеры Корбута (КК) и Средний (СрК) 06.10.2024 г. (б); ИК-снимок кратера Корбута 24.03.2024 г.(в) и увеличенный участок 2 06.10.2024 г. (г). 1, 2 – участки появления новых термальных аномалий, 3 – фумарольные поля, засыпанные пирокластикой. СК – Северный кратер; ГО – озеро Горячее; Л – лахар; Т – внутрикратерная терраса; МС – метеостанция; ФК – фотокамера.

В январе 2023 г. – июле 2024 г. взрывы происходили в основном с интервалом не более 2 ч. Так, в апреле 2024 г. в светлое время суток наблюдалось до 12 эксплозий с преобладающим интервалом 0.5-1 ч (рис. 2б). В сентябре 2024 г. количество взрывов было уже не более шести, преимущественно с интервалом 2-2.5 ч (рис. 2в). В 10 % случаев пауза между взрывами стала превышать 10 ч. При этом условия мониторинга (наличие видимости) в сентябре были лучше, чем в апреле: 35 % против 24 %. В длительные перерывы между взрывами дно и внутренние стенки кратера успевали покрыться возгонами.



Рис. 2. Зафиксированное количество взрывов на вулкане Эбеко в 2023-2025 гг. (а); повторяемость интервалов между взрывами в апреле и сентябре 2024 г. (б); термальная аномалия в КК 4 февраля 2025 г., наложенная на видимое изображение (в).

Площадь КК 6 октября 2024 г. составила ~43 тыс. м² (260×210 м). Температура дна между взрывами после введения атмосферной и газовой коррекции составляла

500±102 °C. На рис. 1в показана термограмма КК 24.03.2024 г., в течение 1.5 ч до полета взрывы не наблюдались. Максимальная измеренная температура пепло-газовых струй во время взрывов после коррекции составляла 674±104 °C. Это значительно ниже температуры магмы 1000±50 °C, рассчитанной по геотермобарометрам [4]. Таким образом, поглощение длинноволнового излучения пеплом в измеряемом спектре давало ошибку измерения в среднем >33 %.

Аэрофотосъемка 2023-2024 гг. показывала постоянный снос материала с внутренних стенок кратера и скопление его вместе с пирокластикой взрывов на дне кратера. Также внутреннее строение КК осложнилось появлением внутрикратерной террасы с западной стороны, высота которой продолжала расти (рис. 1б). Помимо горячей пирокластики, отлагающейся вблизи КК сразу после взрывов, термальная аномалия в КК была приурочена к его дну и осыпям, примыкающим к внутренним стенкам. Самый горячий участок тяготел к центру (50.691° с.ш., 156.015° в.д.) (рис. 1в) и был заполнен самыми горячими фумаролами или окружен их кольцом. В направлении от центра к периферии термальной аномалии температура снижалась. Более холодные фумаролы пробивались сквозь пирокластические и осыпные отложения.

После 19 января не было зафиксировано ни одного взрыва. При отсутствии видимости, но попутном направлении ветра от вулкана на г. Северо-Курильск (западные румбы), не наблюдалось ни одного пеплопада или отложения пепла на снегу. Аэрофотосъемка 4 февраля 2025 г. также показала отсутствие свежих отложений пепла. В КК наблюдалась фумарольная активность. Термальная аномалия в кратере имела мозаичное строение, на дне находились небольшие разрозненные холодные участки, покрытые снегом или льдом (рис. 2в). Максимальная температура в пределах термальной аномалии в кратере 216 °C, однако она, вероятнее всего, сильно занижена (большая высота полета дала размер пикселя 1.8 м и, соответственно, низкую интегрированную температуру за счет вовлечения соседних более холодных участков).

Термальные аномалии за пределами активного кратера

С помощью ИК-съемки с БПЛА в 2023-2025 гг. регулярно обновлялись карты термальных аномалий, приуроченных к участкам газо- и гидротермальной разгрузок за пределами КК. Два фумарольных поля вблизи КК были засыпаны пирокластикой (рис. 1а, участки 3); возможно, все еще сохраняющаяся здесь активность не имеет поверхностных проявлений. На других участках изменений площади аномалий и их температурного фона не отмечено, наблюдалась незначительная миграция газовых выходов в пределах стабильных аномалий. Термальная аномалия в южной части дна Среднего кратера не фиксировалась при высоком уровне воды в озере, так как в этом случае берег затапливается.

Новые термальные аномалии с парогазовой разгрузкой зафиксированы 14 августа 2024 г.: (1) эксплозивный ров из вытянутых в линию близко расположенных взрывных воронок в направлении с запада на восток в Северном кратере (участок 1 на рис. 1б); (2) две трещины в восточном склоне Среднего кратера, обе длиной ~90 м (участок 2 на рис. 16, г). Нижняя из трещин состояла из череды небольших кратеров. Данные объекты впервые обнаружены на фотосъемке 9 августа 2024 г., в 5 ч местного времени (UTC+11 ч), после 11 ч отсутствия видимости. Они возникли вследствие фреатических взрывов на этих участках. Появление линейных/кольцевых структур, вероятно, может указывать на локальное разрушение при растяжении, вызванное проседанием части вулканической постройки после удаления верхушки магматического столба сильными взрывами в условиях замедления/прекращения поступления свежей магмы. 8 августа сильные взрывы из КК были зафиксированы в 11:44 и 20:20 ч местного времени. Первый из взрывов сопровождался сильным пеплопадом с выпадением вулканического песка в г. Северо-Курильск. Сброс

магматического газа через трещины, открывшиеся на покрытых снегом склонах, мог вызвать серию фреатических взрывов. Об открытии подобной трещины при извержении вулкана Эбеко в 1989 г. сообщается в [3]. Редкие взрывы в Среднем кратере продолжались по 15 августа включительно. В дальнейшем сохранилась фумарольная разгрузка: слабая в Северном кратере и более сильная в Среднем с температурой выхода газа 134±28 °С (рис. 16).

Последствием фреатических взрывов также стал узкий лахар длиной около 1 км, сошедший на западный склон вулкана по истоку р. Горшкова (рис. 1б).

Заключение

Предположительно, с сентября 2024 г. поступление свежей магмы прекратилось или значительно замедлилось, и стал преобладать фреатический тип извержений. Анализы пеплов данного периода пока отсутствуют. Однако в пользу этого предположения свидетельствуют: увеличение пауз между эксплозиями; уменьшение содержания пепла в эруптивных шлейфах вплоть до формирования чисто парогазовых выбросов; образование трещин на периферии активного кратера и кратковременные фреатические взрывы, приуроченные к этим трещинам. После 19 января 2025 г. эруптивная активность не наблюдалась.

Впервые для вулкана Эбеко выполнялся систематический мониторинг термальной активности с помощью ИК-съемки с БПЛА с составлением ортофотопланов в сантиметровом диапазоне участков с термальными аномалиями. Два фумарольных поля вблизи активного кратера оказались засыпаны пирокластикой уже в июне 2023 г. Новые термальные аномалии с парогазовой разгрузкой стали последствием фреатических взрывов 8-15 августа 2024 г. в Среднем и Северном кратерах. Результатом этих взрывов стал также небольшой лахар, следы схода которого зафиксированы на западном склоне вулкана.

Работа выполнена в рамках НИР ИВиС ДВО РАН по теме № FWME-2024-0005 «Исследование структуры и динамики геотермальных систем, выделение источников тепла и металлоносных флюидов, физико-химическое моделирование минералообразования в зонах разгрузки парогидротерм». Автор благодарит Л.В. Котенко (ИВиС ДВО РАН) за участие в проведении полевых измерений.

Список литературы

- 1. Большаков И.Е., Нуждаев А.А., Кузнецов Р.А. и др. Экспедиция на вулканы Алаид и Эбеко (Курильские острова) летом 2023 года // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. Вып. 60. № 4. С. 105-113. http://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-4-60-105-113
- 2. 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
- 3. *Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Будников В.А.* Активность вулкана Эбеко в 1987-1991 гг.; характер извержений, особенности их продуктов, опасность для г. Северо-Курильск // Вулканология и сейсмология. 1992. № 5-6. С. 21-33.
- Belousov A., Belousova M., Auer A. et al. Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles // Bulletin of Volcanology. 2021. V. 83. № 1. P. 1-24. https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z
- 5. *Sawyer G.M., Burton M.R.* Effects of a volcanic plume on thermal imaging data // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. Art. L14311. https://doi.org/10.1029/2005GL025320
- 6. *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 Sensing. 2020. V. 12. Art. 1961. https://doi.org/10.3390/rs12121961