

УДК 551.215.6/504.455

КРАТЕРНЫЕ ОЗЕРА ХРЕБТА ВЕРНАДСКОГО О. ПАРАМУШИР (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА): ВОДНЫЙ БАЛАНС И ДИНАМИКА

© 2025 г. Т. А. Котенко

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
бульвар Пийна, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия
e-mail: sinarka2017@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.04.2024 г.

После доработки 26.06.2024 г.

Принята к публикации 12.12.2024 г.

Рассматривается водный баланс вершинных кратерных озер хребта Вернадского, о. Парамушир. Для расчета приходной части были измерены осадки на высоте кратеров. Установлено, что необходимым условием существования постоянных холодных кратерных озер при количестве осадков ~4660 мм за гидрологический год является площадь водосбора более 60 тыс. м². Рассмотрена эволюция озер в кратерах действующего вулкана Эбеко. Дана оценка вулканического питания (притока воды и/или пара вулканического происхождения) термальных озер в предшествующие периоды времени и при современном состоянии вулкана. Установлено, что в перспективе Средний кратер и кратер Корбута подходят для формирования горячих озер, однако до окончания текущего извержения в кратере Корбута формирование озера в нем невозможно. В постэруптивный период при предполагаемом диаметре кратера 250 ± 50 м для равновесного существования озера с температурой 35°C и площадью зеркала 25 тыс. м² будет достаточен вулканический приток 8–13 кг/с. Поступление вулканического пара в оз. Горячее Среднего кратера регистрируется с 2017 г., однако озеро остается холодным. Показано, что вулканический приток должен составлять 5 ± 2 кг/с, чтобы было достигнуто балансовое равновесие для озера с температурой 35°C и площадью зеркала 25 тыс. м².

Ключевые слова: вулкан Эбеко, кратер, озеро, водный баланс, вулканический приток, орографическая составляющая осадков

DOI: 10.31857/S0203030625010037, EDN: GISSPR

ВВЕДЕНИЕ

Бессточные озера в кратерах действующих вулканов отличаются от обычных озер дополнительным источником питания — притоком воды и/или пара из вулкана (далее — вулканическим притоком), таким образом, их состояние напрямую отражает состояние вулканической активности. Целью большинства исследований активных кратерных озер является идентификация предвестников взрывной эруптивной активности. Определение предвестников возможно при четком понимании вклада как невулканических, так и вулканических компонентов, обеспечивающих баланс массы и энергии [Гавриленко, 2000; Pasternack, Varekamp, 1997; Hurst et al., 2015].

В северной части о. Парамушир в пределах хребта Вернадского существуют постоянные и временные кратерные озера, как холодные, так и горячие (см. рис. 1, рис. 2, табл. 1). Однако при достаточно большом количестве осадков (более 2000 мм/год у подножия хребта) постоянные озера находятся только в кратере Богдановича (см. рис. 2д) и кратерах вулкана Эбеко (см. рис. 2а, 2б, 2г). Остальные благоприятные для формирования водоемов структуры (см. табл. 1) в лучшем случае заполняются временными холодными озерами в период снеготаяния. Все горячие озера в последние 90 лет были приурочены к кратерам действующего вулкана Эбеко (оз. Горячее в Среднем кратере (см. рис. 1г (ГО1), рис. 2а), уже несуществующие

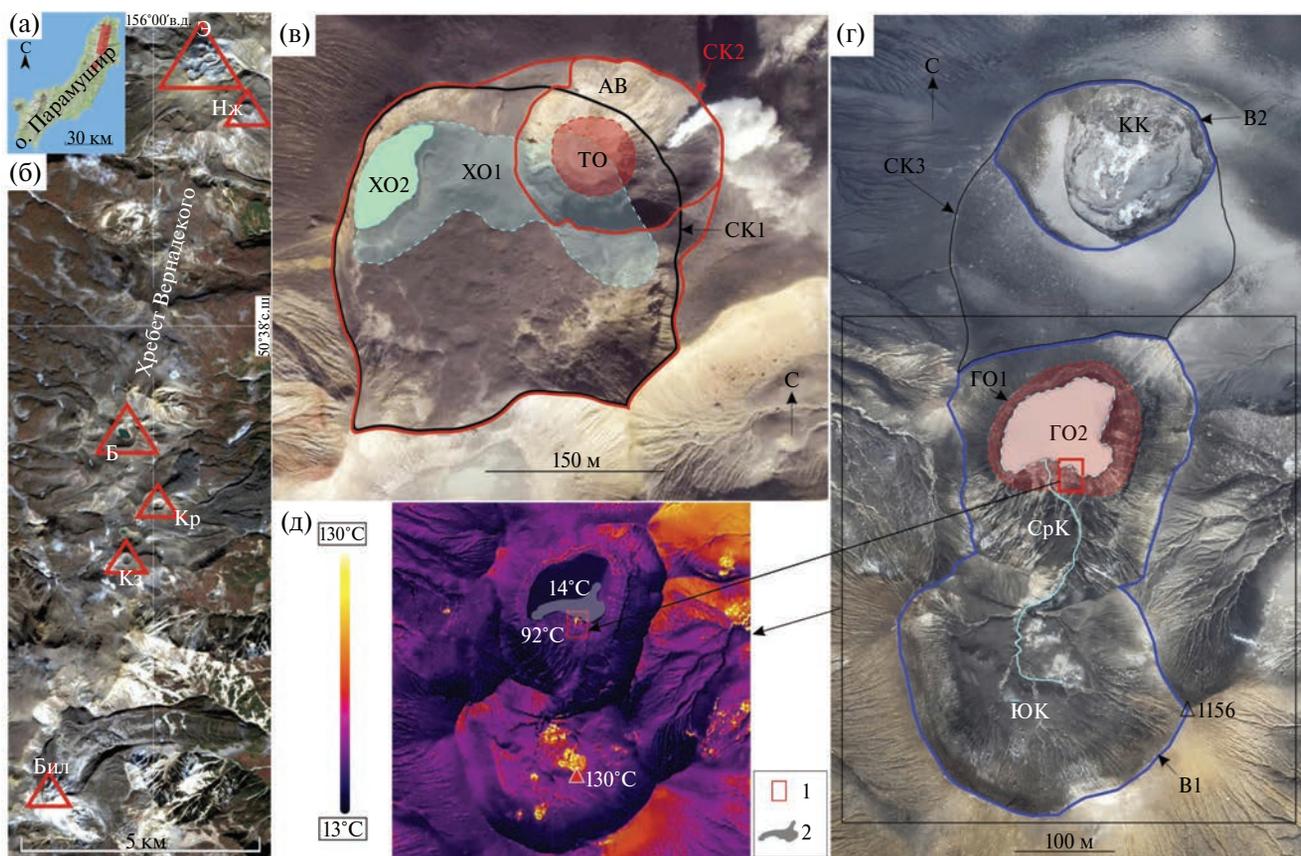


Рис. 1. Кратерные озера хребта Вернадского, о. Парамушир. а – местоположение хребта Вернадского; б – вулканы с вершинными замкнутыми кратерами: Э – Эбеко, Нж – Неожиданный, Б – вулкан Богдановича, Кр – Крашенинникова, Кз – Козыревского, Бил – Билибина; в – озера в пределах Северного кратера вулкана Эбеко в 1952–2007 гг., отмеченные на спутниковом снимке Google Earth от 12.10.2012 г.: XO1 и XO2 – холодное озеро до 1967 г. [Сидоров, 1966] и после; СК1 и СК2 – Северный кратер до 1967 г. [Сидоров, 1966] и в 2012 г.; АВ – Активная воронка в 1989–2016 гг.; ТО – термальное озеро в АВ в 2005–2007 гг.; г, д – аэрофотосъемка вулкана Эбеко 10 сентября 2023 г. в видимом и инфракрасном спектрах соответственно. 1 – береговая термальная площадка; 2 – участок видимой подводной газовой разгрузки; ГО1 и ГО2 – оз. Горячее в 1952 г. и в дату съемки; КК – кратер Корбута; СК3 – Северный кратер; СрК – Средний кратер; ЮК – Южный кратер; В1 и В2 – границы водосборов ГО и КК соответственно.

озера в Активной воронке (см. рис. 1в, рис. 2в) и в кратере Корбута (см. рис. 2г). Также здесь периодически существовали одновременно от одного до трех холодных озер в Среднем (см. рис. 2б) и Северном (см. рис. 1в) кратерах.

Начиная с середины прошлого века был выполнен целый ряд исследований оз. Горячее, в которых преимущественно рассматривалось изменение химического состава воды и уровня озера в связи с динамикой фумарольной и эруптивной активности вулкана [Башарина, Храмова, 1971; Иванов, 1957; Котенко, Калачева, 2021; Сидоров, 1966; Скрипка и др., 1966; Храмова, 1974]. Формирование кратерно-озерных отложений оз. Горячее и реликтовых озерных толщ Южного кратера и Восточного цирка изучались Г.М. Власовым [1960] и Г.Г. Храмовой

[1987]. О термальном озере в Активной воронке опубликована отрывочная информация относительно эпизодических измерений его температуры, химического состава, площади зеркала, глубины [Котенко и др., 2010; Меняйлов и др., 1967; Новейший ..., 2005]. Обзор хронологии существования термальных озер в пределах Северного кратера и динамика семимесячного существования горячего озера в молодом кратере Корбута в 2022 г. даны в работах [Котенко, Котенко, 2022; Котенко и др., 2023]. Единственный расчет водного и теплового баланса для оз. Горячее по состоянию на 1950-е гг. был выполнен в работе [Pasternack, Varekamp, 1997].

Эксплозивные извержения вулкана Эбеко в последние 100 лет главным образом были приурочены к Северному и Среднему кратерам,

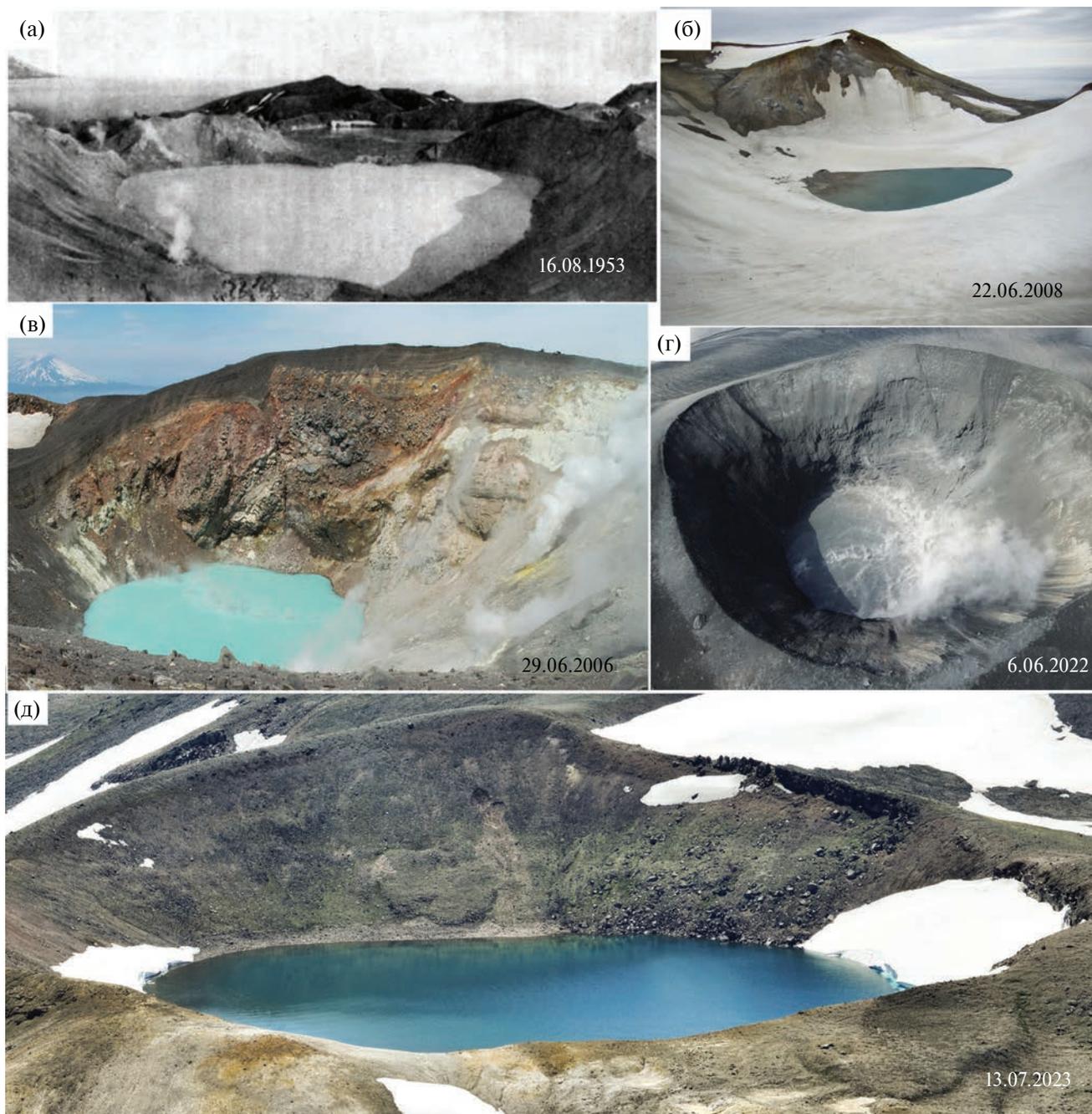


Рис. 2. Озера в кратерах вулкана Эбеко: оз. Горячее в Среднем кратере, на заднем плане – холодное озеро в Северном кратере [Горшков, 1958] (а); остывшее оз. Горячее (б); термальное озеро в Активной воронке (в); термальное озеро в кратере Корбута (г); оз. Маловодное, кратер вулкана Богдановича (д). Фото сделаны Л.В. Котенко (б, в, д) и М.Л. Котенко (г).

при этом целый ряд извержений (в 1965, 1967, 1989, 2006–2007, 2022 гг.) происходили или начинались в кратерных озерах [Башарина, Храмова, 1971; Котенко и др., 2010, 2023; Новейший ..., 2005; Скрипко и др., 1966].

Целью данного исследования является совершенствование мониторинга эруптивной активности в кратерах вулкана Эбеко, в некоторых

из которых постоянно, а в некоторых периодически существуют озера. В работе выполнена оценка составляющих водного баланса холодных и термальных кратерных озер вулкана, водный баланс которых напрямую зависит от вулканической активности. Особое внимание было уделено моделированию величины вулканического притока воды или пара, необходимого для существования горячих озер при

Таблица 1. Вершинные кратеры хребта Вернадского с постоянными или временными бессточными озерами

Вулкан	Озеро	Кратер	Период	Координаты (ф с.ш., л в.д.)	Кратер					Водосбор	
					$H_{\text{макс}}$, М н.у.м.	Глубина, М	$D_{\text{с-ю}}$, М	$D_{\text{з-в}}$, М	S , $\text{м}^2 \times 10^3$	S , $\text{м}^2 \times 10^3$	
Э	ГО1	СрК	1960	50° 41' 19.04", 156° 00' 53.14"	1100	100	270	250	58	106.6	
Э	ГО2	СрК	2000–2016	50° 41' 19.04", 156° 00' 53.14"	1100	70	270	250	58	106.6	
Э	ХО1	СК	1960*	50° 41' 26.84", 156° 00' 55.09"	1075	70	300	300	70.6	70.6	
Э	ТО	АВ	2005–2006	50° 41' 29.33", 156° 00' 59.51"	1068	59	168	150	20.3	22	
Э	КК	КК	01.05.2022	50° 41' 30.37", 156° 00' 55.44"	1103	100	214	244	39	39	
Нж	прс	–	–	50° 40' 48.95", 156° 01' 46.79"	1075	28	210	188	30.2	30.2	
Б	М	–	–	50° 37' 18.23", 156° 59' 45.27"	1120	63	460	420	172.5	177.3	
Кр	прс	–	–	50° 37' 18.23", 156° 59' 45.27"	1072	62	270	240	53.6	53.6	
Кз	прс	–	–	50° 35' 57.95", 156° 59' 48.08"	1154	43	240	240	44.4	44.4	
Бил	прс	–	–	50° 33' 24.96", 155° 58' 32.33"	1080	40	246	240	51	51	

Примечание. М – оз. Маловодное; прс – пересыхающее озеро; $H_{\text{макс}}$ – максимальная высота гребня; D – диаметр по гребню; S – площадь; * – данные из работ [Горшков, 1957; Новейший ..., 2005]. Другие индексы вулканов, кратеров вулкана Эбеко и озер см. на рис. 1.

современном состоянии кратеров вулкана. Чтобы получить актуальные данные об осадках на высоте кратеров, было проведено полевое измерение жидких осадков в течение трех с половиной месяцев 2023 г. на высоте 1020 м.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ

Хребет Вернадского занимает северную часть о. Парамушир. Его длина – 15 км, высота гребня – от 900 до 1156 м, ориентация – с северо-востока на юго-запад (17°) (см. рис. 1а, 1б). Хребет сформирован вулканической деятельностью линейно-гнездового типа плейстоцен-голоценового возраста [Новейший ..., 2005]. Часть потухших вулканов хребта Вернадского (см. рис. 1б) имеет вершинные кратеры, которые могли бы вмещать озера при достаточно высоком количестве выпадающих осадков. Кратеры вулканов имеют (или имели в прошлом, например Активная воронка вулкана Эбеко) диаметры от 128 до 460 м, глубины 40–100 м, площади водосборов от 0.02 до 0.18 км²

(см. табл. 1). Однако только кратер вулкана Богдановича заполнен постоянным холодным озером. Озеро Маловодное в кратере вулкана Богдановича – самое большое из озер хребта Вернадского с площадью зеркала в среднем 45.7 тыс. м² и площадью водосбора ~0.18 км² (высота зеркала – 1066 м, расстояние от вершины вулкана Эбеко – 7.3 км).

В северной части хребта расположен действующий, преимущественно, андезитовый вулкан Эбеко, характеризующийся частыми извержениями вулканического типа и извергающийся в настоящее время (<http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/volc?name=Ebeko>). В течение рассматриваемого времени его голоценовая постройка состояла сначала из трех последовательных кратеров, а начиная с 1967 г. – из четырех. В кратерах диаметрами 200–300 м и глубинами до 100 м периодически или постоянно наблюдалась интенсивная фумарольная деятельность, а также существовало от одного до трех озер с переменными термическим, химическим и

гидрологическим режимами [Иванов, 1957; Котенко и др., 2022; Меняйлов и др., 1988; Новейший ..., 2005; Опыт ..., 1966]. К концу мая 2024 г. сохранилось только одно кратерное озеро (оз. Горячее, Средний кратер) (см. рис. 1г, ГО2). Химический состав воды горячих озер при температуре воды $>25^{\circ}\text{C}$ (оз. Горячее в 1951–1956 гг. [Башарина, Храмова, 1971; Иванов, 1957; Сидоров, 1966; Скрипко и др., 1966; Храмова, 1974], озер в Активной воронке и кратере Корбута [Котенко и др., 2023; Котенко и др., 2010; Меняйлов и др., 1969]) характеризовался $\text{pH} < 2$ и минерализацией до 5 г/л. Температура воды холодных озер не превышает температуры воздуха (не более 15°C), минерализация воды составляет менее 0.5 г/л, $\text{pH} = 2.5\text{--}4$ [Котенко, Калачева, 2021]. Все холодные озера характеризуются значительными вариациями объема воды вплоть до кратковременного их исчезновения. Эруптивная активность вулкана Эбеко в последние 60 лет изменяла преимущественно морфологию Северного и Среднего кратеров, в результате изменялось количество озер, их локализация и размеры, физико-химические характеристики.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Площади кратеров, озер и водосборных бассейнов вычислялись с использованием открытых ГИС-источников (GOOGLE и SAGA), аэрофотосъемки 2022–2023 гг., выполненной с помощью БПЛА DJI Mavic 3 и 3T (см. табл. 1). Высота аэрофотосъемки составляла от 400 до 1500 м. Для съемки в видимом спектре на БПЛА была установлена широкоугольная камера Mavic 3t Hasselblad, с помощью которой получены снимки с разрешением 4000×3000 пикселей. Съемка термальной аномалии в Среднем кратере выполнена также с БПЛА в инфракрасном спектре в диапазоне 8–14 мкм с последующей обработкой снимков в программе DJI Thermal Analysis Tool 3. Разрешение тепловизионной камеры – 640×512 пикселей, точность измерения температуры – $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Для балансовых расчетов использовали данные полевых измерений температуры воды и метеопараметров в 2022–2023 гг. портативными цифровыми приборами: термометром с погружной хромель-алюмелевой термопарой, ручным ИК-термометром Кельвин-компакт

1200, метеостанцией SKYWATCH atmos. Также использованы открытые метеоданные и данные аэрологического зондирования ближайшей станции Росгидромета № 32215 “Северо-Курильск”, расположенной на высоте 23.8 м над уровнем моря на удалении от вулкана Эбеко 7 км (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

ЭВОЛЮЦИЯ ОЗЕР В КРАТЕРАХ ВУЛКАНА ЭБЕКО

В период с 1951 по 1956 г. [Горшков, 1957, 1958; Иванов, 1957] в Среднем кратере находилось термальное оз. Горячее (см. рис. 1г (ГО1), рис. 2а). Наблюдалась интенсивная газо-гидротермальная активность на дне озера и выше его уреза. Средняя температура воды составляла $30\text{--}35^{\circ}\text{C}$, в местах выходов гидротерм – до 90°C ($\text{pH} < 2$, минерализация – до 5 г/л). Благодаря высокому уровню воды происходил ее сток из Среднего кратера в Северный. Северный кратер был наполовину или менее заполнен холодным озером (см. рис. 1в, XO1).

В 1957–1964 гг. оба озера сохранялись, но в результате ослабления фумарольной активности в Среднем кратере происходило постепенное охлаждение оз. Горячее, объем воды в озере уменьшался, сток в Северный кратер прекратился [Опыт ..., 1966; Храмова, 1974]. Температура озерной воды в 1959–1960 гг. была уже $25\text{--}28^{\circ}\text{C}$, а в 1963–1964 гг. она составляла всего $18\text{--}20^{\circ}\text{C}$ [Опыт ..., 1966]. Холодное озеро в Северном кратере сохранялось, данные о его объеме, вариациях уровня отсутствуют, максимальная глубина достигала 7 м [Зеленов и др., 1965].

1965–1988 гг. 8 августа 1965 г. в Среднем кратере произошло фреатическое извержение, в результате которого уровень оз. Горячее понизился на 10–11 м с потерей 90% объема [Скрипко и др., 1966]. После извержения фумарольная деятельность в кратере значительно сократилась. Температура воды озера еще в начале этого периода составляла $17\text{--}20^{\circ}\text{C}$, после 1970 г. она стала близка к температуре воздуха, зимой озеро стало замерзать [Меняйлов и др., 1969, 1988]. В 1967 г. в северо-восточной части Северного кратера произошло эксплозивное извержение, в результате которого сформировался новый кратер Активная воронка (см. рис. 1в, АВ).

Восточная часть холодного озера была засыпана пирокластикой, а площадь озера уменьшилась более чем в три раза (см. рис. 1в, ХО1 и ХО2) [Меняйлов и др., 1969]. В Активной воронке после окончания извержения образовалось горячее озеро с мощной постэруптивной фумарольной разгрузкой на дне. Это озеро сохранялось даже во время извержения, начавшегося в Активной воронке в октябре 1987 г. [Меняйлов и др., 1988; Новейший ..., 2005].

1989–2004 гг. В 1989 г. извержение в Активной воронке усилилось и его жерло переместилось с восточной стенки на дно кратера. В результате озеро в Активной воронке было уничтожено [Новейший ..., 2005]. Холодные озера в Среднем и Северном кратерах были засыпаны в 1989 г. пирокластикой этого извержения [Новейший ..., 2005], но впоследствии восстановились. Гидрологический режим оз. Горячее характеризовался сильными вариациями объема воды вплоть до исчезновения в августе – начале сентября.

2005 г. – июнь 2007 г. Фреатические извержения в Активной воронке сопровождались возобновлением фумарольной активности на ее дне и появлением термального озера (см. рис. 1в (ТО), рис. 2в) с максимальной глубиной 15 м. В июле 2007 г. фумарольная активность на дне кратера прекратилась и термальное озеро исчезло [Котенко и др., 2010].

Июль 2007 г. – сентябрь 2016 г. В этот период сохранялись только холодные озера в Среднем и Северном кратерах и маленькое сезонное озеро в Активной воронке, пересыхающее после исчезновения питающего его снежника. В середине июля 2011 г. в Среднем кратере произошли четыре гидротермальных взрыва, причем два из них – подводные, оставившие после падения уровня воды обособленные маары глубиной до 4 м, заполненные кислой холодной водой с минерализацией ~3 г/л. Гидрологический режим оз. Горячее после этого не изменился, термальные проявления на дне кратера по-прежнему отсутствовали [Котенко и др., 2022].

Октябрь 2016 г. – август 2018 г. Началось новое извержение вулканского типа, которое происходило одновременно из трех жерл: два из них находились в Среднем кратере и одно – в Активной воронке. В июне 2017 г. жерла в Среднем кратере прекратили быть активными, кратер

заполнился холодным озером, но в южной части озера появилась слабая газовая разгрузка [Котенко и др., 2022]. Сохранилось холодное озеро в Северном кратере.

Сентябрь 2018 г. – декабрь 2023 г. В ходе продолжающегося эксплозивного извержения рядом с Активной воронкой начал формироваться новый активный кратер – кратер Корбута, взрывы из которого засыпали Активную воронку и холодное озеро Северного кратера (см. рис. 1г) [Котенко и др., 2022]. В Среднем кратере сохранялась слабая газовая разгрузка в оз. Горячее, но озеро оставалось холодным [Котенко, Калачева, 2021]. С 17 ноября 2021 г. по 21 января 2022 г. на вулкане Эбеко наблюдалась только фумарольная активность [Котенко, Котенко, 2022; Котенко и др., 2023] с сохранением мощной постэруптивной фумарольной разгрузки в кратере Корбута с расходом ~16 кг/с. Величина эмиссии из кратера Корбута была получена методом сравнения площадей проекций аэрозольных шлейфов на горизонтальную плоскость [Hochstein, Bromley, 2001]. Площади проекций шлейфов фумарол кратера Корбута, а также крупных фумарол Южного кратера и восточных склонов вулкана вычислялись по аэрофотосъемке. Для верификации данных для доступных фумарол проводилось прямое измерение расходов газа по скорости струй, их температуре и размеру выходного отверстия согласно работе [Нехорошев, 1960]. Фумарольная разгрузка и обильные осадки способствовали возникновению в кратере горячего озера с температурой воды ~43°C (см. рис. 2г). В конце января 2022 г. в кратере Корбута возобновилась эруптивная активность, начавшаяся с подводных гидротермальных взрывов. В середине июня стали происходить взрывы вулканского типа значительной силы, в результате которых озеро перестало существовать [Котенко и др., 2023]. В итоге в 2023 г. сохранилось одно озеро – оз. Горячее в Среднем кратере с газовой разгрузкой в южной части озера (см. рис. 1д). Температура воды в озере по-прежнему невысокая, но выше температуры воздуха на несколько градусов. Так, в июне 2023 г. она составляла 13°C относительно средней измеренной температуры воздуха в этот день 4.5°C и при наличии постоянного притока талой воды со снежника. Падение уровня озера в начале июля 2023 г. привело к обнажению части слабых газовых

выходов. Термальная аномалия на этом участке уверенно фиксировалась на термоснимках с БПЛА с июля по сентябрь (см. рис. 1д). Максимальная температура на аномальном участке с введением поправки на атмосферное поглощение составила $\sim 92^\circ\text{C}$, температура поверхности озера $\sim 14^\circ\text{C}$ при температуре воздуха 11°C .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Водный баланс

Баланс массы бессточного кратерного озера определяется равенством входных и выходных составляющих [Гавриленко, 2000; Hurst et al., 2015; Pasternack, Varekamp, 1997] и может быть представлен в виде

$$M_{\text{вул}} + M_{\text{ос}} + M_{\text{сток}} = M_{\text{исп}} + M_{\text{ф}}, \quad (1)$$

где входные компоненты водного баланса: $M_{\text{вул}}$ – вулканический приток воды и/или пара, $M_{\text{ос}}$ – осадки, выпадающие на поверхность озера, $M_{\text{сток}}$ – осадки, стекающие в озеро из водосборного бассейна; а выходные компоненты: $M_{\text{исп}}$ – испарение с поверхности озера, $M_{\text{ф}}$ – фильтрация через дно озера. Для холодных озер в неактивных кратерах (например, оз. Маловодное) $M_{\text{вул}} = 0$, в остальных случаях эта величина искомая.

Вклад атмосферных осадков. Среднее за гидрологический год (начало – 1 ноября) количество осадков для высоты стационарной метеостанции (23.8 м н.у.м.) составляет 2024.5 мм (осреднение за период с 1975 по 2022 г.). Высота зеркала кратерных озер близка к 1000 м, они расположены на вершине хребта Вернадского длиной 15 км и с высотой гребня от 900 до 1156 м, ориентированного с юго-запада на северо-восток ($\sim 17^\circ$). Хребет Вернадского представляет собой орографический барьер для влагонесущих потоков, преобладающие направления которых квазиперпендикулярны хребту: в период с августа по апрель преобладают западные и северо-западные направления ветра, а с мая по июль восточные и юго-восточные [Научно-прикладной ..., 1990]. Ветровой режим о. Парамушир соответствует наиболее благоприятным условиям для орографического усиления осадков с ростом высоты препятствия [Barry, 2008] в результате: 1) адиабатического

охлаждения и конденсации при вынужденном подъеме устойчиво стратифицированных влажных воздушных масс на орографическом барьере; 2) усиления конвекции в условиях турбулентного потока; 3) образования орографической облачности при возникновении горной волны (волны препятствия) в атмосфере над препятствием [Бернгард, 2004; Мусаелян, 1962]. На Курильских островах первый процесс наиболее характерен для теплого сезона, второй – для холодного, а третий не имеет сезонных приоритетов [Научно-прикладной ..., 1990]. В целом ряде исследований для невысоких прибрежных хребтов, аналогичных хребту Вернадского, наблюдалось увеличение осадков над их вершинами на 60–300% [Bruintjes, 1994; Minder et al., 2008].

Непосредственно на вулкане Эбеко инструментально атмосферные осадки до сих пор не измерялись. В 2023 г. осадкомер был установлен на высоте 1020 м на расстоянии 1.1 км к юго-востоку от вулкана. Измерения проводились с 16 июня по 5 октября 2023 г. сразу после периодов сильных или продолжительных осадков, зафиксированных на метеостанции в Северо-Курильске (9 измерений). Коэффициенты приращения жидких осадков (отношение суммы осадков на высоте 1020 м к осадкам, измеренным на стационарной метеостанции) варьировали от 1.3 до 3.1, среднее значение – 2.3. Для оценки зимних осадков были рассмотрены результаты работы [Сучков, 1999], в которой в результате балансовых наблюдений на малых ледниках хребта Вернадского в течение 1985–1988 гг. были получены суммы твердых осадков для высоты 950 м, превышающие данные метеостанции в среднем в 3.17 раза. Данные были получены из снегозапаса перед началом абляции, т.е. уже с учетом таких значимых факторов, как потери на испарение с поверхности снежного покрова и метелевое испарение снега [Гляциологический ..., 1984]. Однако ледники приурочены к областям максимального снегонакопления на подветренном склоне в результате метелевого переноса снега [Гляциологический ..., 1984]. Механизмы снегонакопления в кратерах и склоновых снегоборных бассейнах значительно отличаются [Рыбак и др., 2019], и ориентироваться на данные, полученные в работе [Сучков, 1999], для нашего исследования будет неверным, так как

это приведет к завышению количества осадков. Поэтому для оценки величины зимних осадков были привлечены результаты измерений Росгидромета в зимний сезон 1987–1988 гг. на высоте 900 м, представленные в фондовых материалах СахУГМС¹. По этим наблюдениям вариации коэффициента приращения твердых осадков составили 1.6–3.2. В итоге был принят средний коэффициент приращения всех видов осадков 2.3, что дает 4656 мм осадков за гидрологический год.

Следует учесть также потери за счет испарения со снежного покрова [Дюнин, 1963; Постников, 2016], которые могут быть значительными. На основе натуральных наблюдений и математического моделирования [Лавров, 2023] установлен наиболее значимый метеорологический фактор, определяющий испарение с поверхности снега, – это дефицит влажности воздуха (коэффициент корреляции – 0.59–0.82). Это позволяет использовать для оценки сублимации снега за длительный период формулу А.Н. Постникова [2016]

$$E = 0.31nd, \quad (2)$$

где E – испарение (в мм), n – число суток с установившимся снежным покровом, d – дефицит влажности воздуха (в гПа). Дефицит влажности воздуха на высоте 1 км за 2017–2023 гг., по данным аэрологического зондирования АЭ “Северо-Курильск” Росгидромета (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>), составлял в разные месяцы от 3.7 до 5.5 гПа (продолжительность периода – 240 сут), что дает суммарное испарение с поверхности снега ~350 мм. Это снижает годовую сумму осадков до 4306 мм и дает норму осадков $m_{oc} = 1.37 \cdot 10^{-4}$ кг/с/м² (табл. 2).

В случае холодного озера потери за счет испарения с поверхности снега были вычтены из общей суммы осадков. При термальном незамерзающем озере внутри закрытой чаши кратера весьма вероятно более высокая влажность воздуха и, соответственно, более низкий дефицит влажности: так, при относительной влажности воздуха 80% (дефицит ~2 гПа) испарение с поверхности снега снижается более чем в два раза (~150 мм). Также расчет испарения должен

быть применен к части водосбора за вычетом площади незамерзающего озера, занимающего 15–35% (см. табл. 2). Таким образом, потери на испарение снега перестают быть значимой величиной. Сумма осадков при балансовых расчетах для термальных озер была принята равной 4656 мм (см. табл. 2).

Сток осадков в озеро из водосборного бассейна. К осадкам, стекающим в озеро с площади водосбора, был применен коэффициент α , показывающий долю поверхностного стока от общего количества осадков. Согласно работе [Вакин, Сугробов, 1972], поверхностный сток со склонов вулканов составляет в среднем 2/3 от количества осадков, а оставшаяся часть приходится на инфильтрацию, поэтому в расчетах был принят коэффициент $\alpha = 0.67$.

Испарение с поверхности озера. Наличие испарения с поверхности холодных кратерных озер хребта Вернадского лимитировано периодом открытой от льда и снега поверхностью воды и уровнем нулевой изотермы осенью, что составляет период около трех месяцев (июль–сентябрь). Расчет испарения за длительный период времени (мм) может быть вычислен по формуле ГГИ [Указания ..., 1969]

$$E = 0.14n e_0 - e_1 \cdot 1 + 0.72W, \quad (3)$$

где n – число суток; e_0 – максимальная упругость водяного пара над водной поверхностью при температуре поверхности воды, мбар; e_1 – абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м над водной поверхностью, мбар; W – скорость ветра на высоте 2 м над водной поверхностью (принята величина 2.5 м/с, так как пространство внутри кратера закрыто от ветра). Средняя величина испарения за сезон составила ~125 мм. Скорость испарения с холодных озер (см. табл. 2) при средней температуре поверхности воды 9°C, воздуха 11°C и средней относительной влажности воздуха 60% для 92 суток составила 0.7 кг/с для оз. Маловодное и 0.6 кг/с для озера в Северном кратере (см. рис. 1в, XO1).

Испарение с поверхности горячего озера намного превышает испарение с холодной поверхности воды [Гавриленко, 2000; Hurst et al., 2015; Terada et al., 2012]. Для оценки испарения с горячих озер применяется целый ряд формул, подробный разбор которых дан в работе [Hurst

¹ Технический отчет снеголавинной группы ГМБ “Северо-Курильск” за зимний сезон 1987–1988 гг. 132 с.

Таблица 2. Составляющие водного баланса кратерных озер хребта Вернадского

Озеро	Год	$T_{оз}$, °C	Кол-во осадков, мм/год	кг/с/м ² ($\times 10^{-4}$)			$S_{оз}$	$S_{высб}$	$M_{ос}$	$M_{сток}$	$M_{ф}$	$M_{исп}$	$M_{бул}$		
				$m_{ос}$	$m_{ф}$	$m_{исп}$								тыс. м ²	кг/с
М	—	9	4306	1.37	3.8	—	45.7	177.3	6.3	12	17.6	0.7	—		
ХО1	1960	9	4306	1.37	2.2	—	35	70.6	4.8	3.3	7.5	0.5	—		
ГО1	1952	35*	4656	1.48	2/3.8	3.8	30*	106.6	4.4	7.6	6/11.4	11.4	5.4/10.8		
	модель	35	4656	1.48	2/3.8	3.8	25	106.6	3.7	8.1	5/9.5	9.5	2.7/7.2		
ТО	2005–2006	40	4656	1.48	2	5.2	4.3	22	0.6	1.8	0.9	2.2	0.7		
			4656	1.48	2	5.2	6	22	22	0.9	1.6	1.2	3.1	1.8	
КК	2022	53	1967	0.6	2	11.1	6.3	39	0.4	1.4	1.3	7.0	6.5		
			1967	0.6	2	17.1	6.3	39	39	0.4	1.4	1.3	10.8	10.3	
КК	модель	43	4656	1.48	2/3.8	6.3	6.4	50	0.9	4.3	1.3/2.4	4	0.1/1.2		
			4656	1.48	2/3.8	6.3	7.4	50	1.1	4.2	1.5/2.8	4.6	0.8/2.2		
			4656	1.48	2/3.8	6.3	8	50	8	50	1.2	4.1	1.6/3	5	1.3/2.7
			4656	1.48	2/3.8	6.3	9.4	50	9.4	50	1.4	4	1.9/3.6	5.9	2.4/4.1
			4656	1.48	2/3.8	6.3	15	50	15	50	2.2	3.4	3/5.7	9.4	6.8/9.5
			4656	1.48	2/3.8	3.8	9.4	50	9.4	50	1.4	4	1.9/3.6	3.6	0.1/1.7
			4656	1.48	2/3.8	3.8	15	50	15	50	2.2	3.5	3/5.7	5.7	3/5.7
			4656	1.48	2/3.8	3.8	25	50	25	50	3.7	2.5	5/9.5	9.5	8.3/12.8

Примечание. * – данные из работ [Горшков, 1958; Pasternack, Varekamp, 1997].
Индексы озер см. в табл. 1 и на рис. 1.

et al., 2015]. Скорость испарения $m_{исп}$, полученная по одной из них [Ryan et al., 1974], варьировала при различных граничных условиях в пределах $(3.8-17.1) \cdot 10^{-4}$ кг/м²/с, а для разных объектов – от 2.2 до 11.4 кг/с (см. табл. 2).

Фильтрация через дно озера. Для холодных бессточных озер дренаж через дно озера равен поступлению осадков на водосборную площадь за вычетом испарения [Указания ..., 1969]. Рассчитанная скорость инфильтрации для оз. Маловодное ($m_{\phi} = 3.8 \times 10^{-4}$ кг/м²/с) значительно больше, чем для холодного озера в Северном кратере (2.2×10^{-4} кг/м²/с) по состоянию на 1960 г. (см. табл. 2). Второе значение близко к величине 2×10^{-4} кг/м²/с, полученной в результате прямых измерений для термального озера Югама в Японии [Nigayama et al., 2020]. Необходимо учитывать, что в котловине оз. Маловодное не наблюдается fumarолярная или гидротермальная активность, а в Северный кратер в 1952–1959 гг. наблюдался сток термальной высокоминерализованной воды из озера Среднего кратера [Зеленов и др., 1965; Храмова, 1974]. Существенным фактором высокой величины просачивания в этом случае, вероятно, является отсутствие химической контаминации трещин и пор, уменьшающей фильтрационные способности донных отложений. Инфильтрацию, полученную для холодных озер, можно принять за фактическую для начального периода жизни горячих озер в молодом кратере сразу после окончания его извержения. Впоследствии из-за уменьшения этой части расхода для поддержания баланса термального озера потребуется меньшее количество термального флюида (см. рис. 3). То есть, в случае ослабления вулканического притока в озеро, его потеря может быть частично сбалансирована уменьшением инфильтрации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Очевидно, что в климатических условиях северной части о. Парамушир площадь водосбора <60 тыс. м² не может обеспечить стабильное существование холодного озера на высоте около 1 км только за счет метеорной компоненты. Поэтому в кратерах вулканов Неожиданный, Козыревский, Билибина и Крашенинникова, где не наблюдается гидротермальная активность,

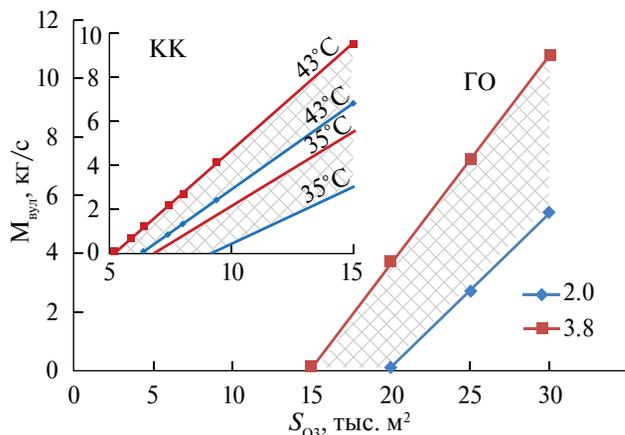


Рис. 3. Вулканический приток относительно площади озера при разной скорости инфильтрации для оз. Горячее (ГО) и озера в кратере Корбута (КК). 2 и 3.8 – скорости инфильтрации (в кг/м²/с × 10⁻⁴).

образуются только сезонные талые озера, время жизни которых не превышает двух месяцев.

Формула водного баланса для термальных озер вулкана Эбеко имеет вид

$$M_{вул} = m_{исп} \cdot S_{оз} + m_{\phi} \cdot S_{оз} - m_{ос} \cdot S_{оз} - 0.67m_{ос} \cdot (S_{вдсб} - S_{оз}), \quad (4)$$

где $m_{\phi} = 2 (3.8) \times 10^{-4}$, а скорость испарения с поверхности озера

$$m_{исп} = \frac{E_{исп}}{L}, \quad (5)$$

где $E_{исп}$ (Вт/м²) – потери тепла на испарение с поверхности озера, L – скрытая теплота испарения воды при температуре 40°C (2.38 МДж/кг). Формулы расчета $E_{исп}$ по работе [Ryan et al., 1974]:

$$E_{исп} = \left(2.7 T_v - T_{v1} \frac{1}{3} + 3.2W \right) e - e_1, \quad (6)$$

$$T_v = T / (1 - 0.378e/P), \quad (7)$$

где T_v и T_{v1} – виртуальные температуры для озера и для воздуха на высоте 2 м над поверхностью озера; T – температура озера или воздуха в градусах Кельвина; W (м/с) – скорость ветра на высоте 2 м над поверхностью озера; e и e_1 (мбар) – давление насыщенного водяного пара при температуре озера и давление водяного пара для воздуха на высоте 2 м над водной поверхностью при заданной влажности; 2.7 и

3.2 – эмпирические коэффициенты; P (мбар) – атмосферное давление.

В этой работе для расчетов было принято атмосферное давление 912 мбар, скорость ветра и влажность воздуха на высоте 2 м над озером – 2.5 м/с и 60% соответственно, среднегодовая температура воздуха – 0°C.

Расчет водного баланса кратерных озер представлен в табл. 2. В результате балансовых расчетов были получены предполагаемые минимальные разгрузки вулканического флюида для термальных озер вулкана Эбеко в разные периоды времени. Приток вулканической воды или пара варьировал от 0.7 кг/с для самого маленького озера, которое существовало в Активной воронке в 2005–2006 гг., до 10.3 кг/с для извергающегося озера в кратере Корбута в 2022 г. при скорости инфильтрации 2×10^{-4} кг/м²/с. Для оз. Горячее по состоянию на 1952 г. поступление вулканического флюида могло составлять от 5.4 до 10.8 кг/с в зависимости от скорости инфильтрации.

Для кратера Корбута парогазовая разгрузка (~16 кг/с) был измерена в ноябре–декабре 2021 г. после окончания извержения и перед заполнением его озером [Котенко и др., 2023]. По состоянию на 1 мая 2022 г. площадь озера в этом кратере составляла 6.3 тыс. м², температура поверхности воды (43°C) была измерена с кромки кратера инфракрасным термометром. Коэффициент ослабления для расстояния 80 м до поверхности воды с учетом угла измерения менее 90° и сильного парения мог составлять 0.7–0.8 [Harris et al., 2009]. То есть фактическая температура воды, вероятно, была 53–61°C, обеспечивая испарение с поверхности озера от 7 до 10.8 кг/с. На 1 мая 2023 г. вулкан уже находился в стадии извержения [Котенко и др., 2023]: несколько раз в сутки в кратере происходили взрывы, формирующие выбросы в виде “петушиного хвоста”, обычные для гидровулканических извержений в кратерных озерах. Поэтому наблюдалась высокая температура воды (>45°C), характерная для извергающихся активных кратерных озер [Pasternack, Varekamp, 1997], не живущих длительное время. Сумма осадков взята за период с 20 ноября 2021 г. (дата прекращения взрывов в кратере) по 1 мая 2022 г. (дата полевых наблюдений) с учетом орографического коэффициента. Расчет дает вулканический

приток 8.4 ± 2 кг/с, при этом часть фумарол находилась на стенках кратера выше уреза озера и не принимала участие в его питании (см. рис. 1е).

Следующим шагом было моделирование возможности появления термальных озер при современном состоянии кратеров вулкана (см. табл. 2, рис. 3).

Кратер Корбута по состоянию на октябрь 2023 г. имел размер 240×210 м и глубину ~100 м. Извержение продолжается, и мы не можем знать окончательную морфологию кратера после прекращения эксплозий. Но, исходя из истории эруптивной активности вулкана Эбеко, можем предположить, что диаметр кратера будет составлять 250 ± 50 м подобно другим кратерам с глубиной 100 м или менее [Belousov et al., 2021]. В табл. 2 представлены расчеты составляющих водного баланса в зависимости от площади и температуры озера. Так, для существования в кратере озера с площадью зеркала 15 тыс. м² и температурой воды 43°C достаточно поступление вулканического флюида от 7 до ~10 кг/с (при разной скорости инфильтрации); при температуре воды в озере 35°C вулканический приток снижается в среднем в два раза. То есть если скорость просачивания через дно озера в начальный период времени после окончания текущего извержения будет высокая (3.8×10^{-4} кг/м²/с), то для поддержания балансового равновесия потребуется более высокий вулканический приток (см. рис. 3).

Озеро Горячее. По состоянию на 19 сентября 2023 г. оз. Горячее имело площадь зеркала 11.3 тыс. м² и температуру поверхности 14°C, что на 3°C выше температуры воздуха. Очевидно, что парогазовая разгрузка в озеро недостаточна для его значительного прогрева. Вклад вулканической компоненты от 2.7 до 5.4 кг/с мог бы обеспечить существование термального озера (35°C) с площадью зеркала 25 и 30 тыс. м² соответственно при скорости инфильтрации 2×10^{-4} кг/м²/с (см. табл. 2, рис. 3). При более высокой скорости просачивания (3.8×10^{-4} кг/м²/с) потребуется как минимум двойное превышение этого вулканического вклада в питание озера (см. табл. 2, рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вулкан Эбеко – один из самых активных вулканов Курильских островов, имеющий одновременно от одного до трех кратерных озер. Наличие озер в его кратерах может определять характер вулканической активности, а также представлять угрозу в виде лахаров. Для усовершенствования мониторинга активности кратерных озер вулкана Эбеко были определены составляющие водного баланса холодных и горячих озер самого вулкана Эбеко и холодного озера в кратере вулкана Богдановича. В результате воднобалансовых расчетов получены значения вулканического притока воды и/или пара, необходимого для существования горячих озер в условиях современного состояния вулкана.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Л.В. Котенко (ИВиС ДВО РАН) за участие во всех полевых работах в районе проведения исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках НИР ИВиС ДВО РАН (тема № FWEW-2019-0001: “Комплексное исследование крупных уникальных геотермальных систем, источники тепла и металлоносных флюидов”).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башарина Л.А., Храмова Г.Г.* Состояние вулкана Эбеко в 1966–1967 гг. // Бюлл. вулканол. станций. 1971. № 47. С. 44–51.
- Бернгард Р.П.* Горные волны как особо опасное аэрологическое явление над Курильскими островами // Курильские острова (природа, геология, землетрясения, вулканы, история, экономика) / Отв. ред. Т.К. Злобин, М.С. Высокова. Южно-Сахалинск: Сахалинское книжное изд-во, 2004. С. 152–156.
- Вакин Е.А., Сугробов В.М.* Гидрогеологические особенности вулканических структур и современные гидротермальные системы // Гидрогеология СССР: Камчатка, Курильские и Командорские острова. 1972. Т. XXIX. С. 169–196.
- Власов Г.М.* Особенности кратерно-озерных отложений // Бюлл. МОИП. 1960. Т. 35. № 6. С. 95–109.
- Гавриленко Г.М.* Гидрологическая модель кратерного озера вулкана Малый Семячик (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2000. № 6. С. 1–11.
- Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
- Горшков Г.С.* Действующие вулканы Курильской островной дуги // Тр. Лаборатории вулканологии. 1958. Вып. 13. С. 5–71.
- Горшков Г.С.* Каталог действующих вулканов Курильских островов // Бюлл. вулканол. станций. 1957. № 25. С. 96–178.
- Дюнин А.К.* Механика метелей. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963. 378 с.
- Зеленов К.К., Ткаченко Р.П., Канакина М.Л.* Перераспределение рудообразующих элементов в процессе гидротермальной деятельности влк. Эбеко (о. Парамушир) // Тр. ГИН АН СССР. 1965. Вып. 141. С. 140–167.
- Иванов В.В.* Современная гидротермальная деятельность вулкана Эбеко на острове Парамушир // Геохимия. 1957. № 1. С. 63–76.
- Котенко Т.А., Калачева Е.Г.* Гидрологический и геохимический режим кратерного озера вулкана Эбеко (1951–2020 гг.), о. Парамушир // 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. 125–128.
- 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. С. 129–137.
- 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., Сандиминова 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., 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., Смирнов С.З., Тимина Т.Ю.* Активность вулкана Эбеко в 2022 г.: механизм и продукты

- извержения // Вулканология и сейсмология. 2023. № 4. С. 3–22.
<https://doi.org/10.31857/S0203030623700244>
- Лавров С.А.* Влияние метеофакторов, свойств снега и климатических изменений на испарение с поверхности снежного покрова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 63–88.
https://doi.org/10.35567/19994508_2023_3_5
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Храмова Г.Г.* Газо-гидротермальное извержение вулкана Эбеко в феврале–апреле 1967 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1969. № 45. С. 3–6.
- 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. 1988. № 4. С. 21–36.
- Мусаелян Ш.А.* Волны препятствий в атмосфере. Л.: ГИМИЗ, 1962. 144 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сахалинская область. СПб.: Гидрометеиздат, 1990. Сер. 3. Вып. 34. 351 с.
- 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. Лавров. М.: Наука, 2005. 604 с.
- Опыт комплексного исследования района современного и новейшего вулканизма (на примере хр. Вернадского, о. Парамушир) // Тр. СахКНИИ СО АН СССР / Отв. ред. С.И. Набоко. Южно-Сахалинск: Дальневосточное книжное изд-во, 1966. Вып. 16. 208 с.
- Постников А.Н.* Испарение с поверхности снежного покрова за период его залегания на территории России // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 42. С. 55–63.
- Рыбак О.О., Рыбак Е.А., Корнева И.А.* Описание переноса и накопления снега в математической модели поверхностного баланса массы горного ледника. Часть I. Теория, базовые алгоритмы и тестирование // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 37. № 3. С. 70–78.
<https://doi.org/10.33075/2220-5861-2019-3-70-78>
- Сидоров С.С.* Активизация вулкана Эбеко в 1963–1964 гг. и эволюция его гидротермальной деятельности в предшествующий период // Бюлл. вулканол. станций. 1966. № 40. С. 61–69.
- Скрипко К.А., Филькова Е.М., Храмова Г.Г.* Состояние вулкана Эбеко летом 1965 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1966. № 42. С. 42–55.
- Сучков В.Е.* Энергия оледенения ледников о. Парамушир (Курильские острова) // Материалы гляциологических исследований. 1999. Вып. 87. С. 196–201.
- Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 84 с.
- Храмова Г.Г.* Влияние усиления активности вулкана Эбеко на состав вод озера Горячего // Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма. Новосибирск: Наука, 1974. С. 62–67.
- Храмова Г.Г.* Кратерно-озерные отложения: динамика формирования (на примере вулкана Эбеко). Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. 136 с.
- Barry R.G.* Mountain weather and climate. London: Cambridge University Press, 2008. 505 p.
- 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>
- Bruinjtjes R.T., Clark T.L., Hall W.D.* Interactions between topographic air-flow and cloud/precipitation development during the passage of a winter storm in Arizona // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51. P. 48–67.
- Harris A.J.L., Lodato L., Dehn J., Spampinato L.* Thermal characterization of the Vulcano fumarole field // Bull. Volcanol. 2009. V. 71. P. 441–458.
<https://doi.org/10.1007/s00445-008-0236-8>
- Hirayama Y., Okawa A., Nakamachi K. et al.* Estimation of water seepage rate in the active crater lake system of Kusatsu-Shirane volcano, Japan, using FDNPP derived radioactive cesium as a hydrological tracer // J. Environ. Radioact. 2020. V. 218. № 106257.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106257>
- Hochstein M.P., Bromley C.J.* Steam cloud characteristics and heat output of fumaroles // Geothermics. 2001. V. 30. P. 547–559.
- Hurst T., Hashimoto T., Terada A.* Crater Lake energy and mass balance // Volcanic Lakes / Eds D. Rouwet et al. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. P. 307–322.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-36833-2_3
- Minder J.M., Durran D.R., Roe G.H., Anders A.M.* The climatology of small scale orographic precipitation over the Olympic mountains: Patterns and processes // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2008. V. 134(633). P. 817–839.
<https://doi.org/10.1002/qj.258>
- Pasternack G., Varekamp J.C.* Volcanic Lake systematics, I. Physical constraints // Bull. Volcanol. 1997. V. 58. P. 528–538.
- Ryan P.J., Harleman D.R., Stolzenb K.D.* Surface heat loss from cooling ponds // Water Resour. Res. 1974. V. 10. P. 930–938.

Terada A., Hashimoto T., Kagiya T. A water flow model underlying hydrothermal system // Bull. Volcanol. 2012. of the active crater lake at Aso volcano, Japan: fluctuations V. 74. P. 641–655. of magmatic gas and groundwater fluxes from the <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0550-4>

CRATER LAKES OF THE VERNADSKY RIDGE OF PARAMUSHIR ISLAND (KURIL ISLANDS): WATER BALANCE AND DYNAMICS

T. A. Kotenko

*Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia
e-mail: sinarka2017@mail.ru*

The paper considers the water balance of cold and hot crater lakes of the Vernadsky ridge on Paramushir Island. Precipitation was measured at the height of the craters to calculate the incoming part. A necessary condition for the existence of permanent cold crater lakes with precipitation of ~4660 mm per hydrological year is a catchment area of more than 60 thousand m². The evolution of lakes in the craters of the active Ebeko volcano is presented. The volcanic contribution (inflow of water and/or steam of volcanic origin) to thermal lakes in previous periods of time and in the current state of the volcano has been estimated. In the long term, the Middle Crater and the Korbut crater are suitable for the formation of hot lakes. Until the end of the current eruption in the Korbut crater, the formation of a lake in it is impossible. In the post-eruptive period, with an estimated crater diameter of 250 ± 50 m, a volcanic inflow of 8–13 kg/s will be sufficient for the equilibrium existence of a lake with a temperature of 35°C and a mirror area of 25 thousand m². Volcanic steam has been entering the lake in the Middle Crater since 2017, but the lake remains cold. The volcanic inflow should be 5 ± 2 kg/s in order to achieve a balance equilibrium for a lake with a temperature of 35°C and a mirror area of 25 thousand m².

Keywords: Ebeko volcano, crater, lake, water balance, volcanic inflow, orographic precipitation's component