

## Гидрологический и гидрохимический режим кратерного озера вулкана Эбеко (1951-2020 гг.), о. Парамушир

Т.А. Котенко, Е.Г. Калачева

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: [keg@kscnet.ru](mailto:keg@kscnet.ru)

На основе литературных данных и собственных многолетних наблюдений показано изменение гидрологического и гидрохимического режима оз. Горячее, расположенного в Среднем кратере активного вулкана Эбеко, в период с 1951 г. по 2020 г. Отмечено изменение гидрохимического типа воды по цепи  $\text{Na-Cl-SO}_4 \rightarrow \text{Al-Na-Cl-SO}_4 \rightarrow \text{Al-Ca-SO}_4 \rightarrow \text{Al-SO}_4$ , уменьшение минерализации (с 8 г/л до 0.5 г/л) и температуры, а также увеличение pH. Текущее извержение (2016 г. – настоящее время) изменило гидрологический режим озера.

**Введение.** Эбеко – один из самых активных вулканов Курильской островной дуги. Он имеет сложное строение типа Сомма-Везувий и сложен лавами и пирокластическим материалом андезитового состава. На вершине современного, вытянутого в меридиональном направлении, насыпного конуса располагается четыре близких по размерам, соприкасающихся кратера: Южный, Средний, Северный и Корбута (рис. 1). Формирование последнего началось в ходе текущего (2016 г. – ныне) извержения на месте существовавшей ранее Активной воронки с частичным захватом территории Северного кратера [3]. С апреля 2018 г. по несколько десятков раз в день из него происходят эксплозии пирокластического материала, вследствие чего очертания его постепенно изменяются, а размеры увеличиваются.

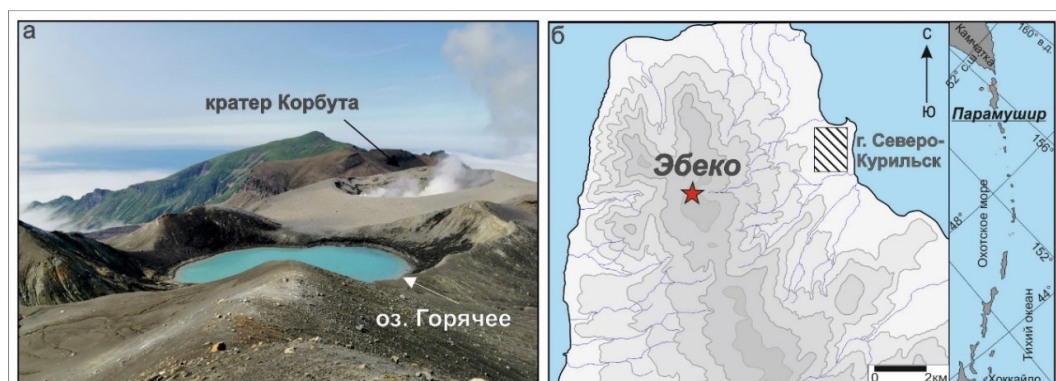


Рис. 1. Кратерная часть вулкана Эбеко (а) и его расположение на о. Парамушир (б). На врезке – Курильская островная дуга.

Вулкан Эбеко характеризуется активной гидротермальной деятельностью, сосредоточенной в его привершинной части. В чашах его кратеров в межэруптивные периоды регулярно формируются озера различных размеров. Их гидрологический режим, химический состав и продолжительность существования определяются состоянием вулкана. Наибольший интерес вызывает озеро (рис. 1а), образовавшееся после извержения Эбеко 1934-35 гг. [1] в Среднем кратере и сохранившееся до настоящего времени.

Цель данной работы – проследить изменение гидрологического режима оз. Горячее и эволюцию химического состава его воды за весь период наблюдений с 1951 г. по 2020 г., используя литературные источники и собственные данные.

**Гидрологический режим озера.** Первые исследования на озере были выполнены в середине 20-го века. По состоянию на 1951-1957 гг. [1, 2], озеро имело ромбовидно-овальную форму с площадью водного зеркала 21 600 м<sup>2</sup>. В рельефе дна выделялись 4 воронки глубиной до 17 м (на 1957 г.). Вода оз. Горячее характеризовалась как

кислая, средняя температура составляла 30-35 °С, повышаясь до 62-90 °С. По его берегам почти непрерывным кольцом, а также на дне озера располагались фумаролы. В юго-западном секторе находились разнообразные по размерам кипящие водно-грязевые котлы. На южном берегу озера, почти на уровне воды, располагался крупный трещинный минерализованный ( $M=4.5$  г/л) горячий ( $T=77$  °С) источник с  $pH<1$ . Вода ( $Q\sim 1-2$  л/сек) вытекала из широкой трещины (сечением до 10 см) с одновременным бурным выделением газов и вливалась в озеро. Этот выход воды был единственным видимым постоянным источником питания озера. Сток из озера осуществлялся через протоку в Северный кратер в оз. Холодное.

Согласно [6], интенсивность гидротермальной деятельности в кратере стала резко снижаться после 1957 г., и уже в 1959-1960 гг. фумаролы прослеживались только вдоль западного и южного берегов озера, уровень воды в озере снизился, и сток из него прекратился. В западной части кратера обнажились гидросольфатары, представляющие собой различных размеров углубления, заполненные мутной, местами газифицирующей водой с температурами от 35-41 °С до 87-96 °С,  $pH$  1.4-1.7 и минерализацией 2.2-3.1 г/л. Значительное количество небольших газовых струй пробивалось со дна озера в его прибрежной части. Фумаролы с температурами газа не более 100 °С с серными башнями высотой до 1 м в этот период сохранились только на его южном берегу. Температура озерной воды в 1959-1960 гг. была уже 25-28 °С и продолжала снижаться. В 1963-1964 гг. она составляла всего 18-20 °С. Источник на южном берегу, описанный выше, больше нигде не упоминался. Нарушение баланса озера связывалось с сейсмическим событием, произошедшим 18 августа 1957 г.

8 августа 1965 г. в озере произошло фреатическое извержение, в результате которого уровень озера за неделю (с 8 по 19 августа) понизился на 10-11 м. Всего ушло 160 300 м<sup>3</sup> воды, что составляло около 90 % от общего ее объема, находившегося в озере до 8.08.1965 г [5]. В это же время значительно сократилась и фумарольная деятельность в кратере. Дальнейшее колебание объема воды происходило только за счет поступающих атмосферных осадков. Оно то заполнялось, то превращалось в три разобренных небольших озерца. Сквозь толщу озера по-прежнему происходило поступление вулканических газов, подогревавших воду в отдельных местах до 80-90 °С (при низком уровне воды), при средних значениях 17-20 °С.

В 1971-1985 гг. холодное озеро диаметром до 150 м заполняло кратер, минерализация составляла всего 0.5 г/л при  $pH=2.4-2.8$ . В некоторых местах на поверхности водной глади были заметны выходы газов, а на западном берегу располагались слабые фумаролы. Во время аэрофотосъемки 3 октября 1988 г. [4] кратер был полностью сухим, признаков фумарольной деятельности обнаружено не было.

Следующий этап наблюдения за Средним кратером начался авторами данной статьи в 2001 г. и продолжается в настоящее время. До осени 2016 г. режим озера был достаточно стабилен. Оно ежегодно вскрывалось ото льда в начале-конце июня. В летний период объем воды контролировался преимущественно таянием снеговых запасов. В конце августа – сентябре уровень озера значительно понижался практически до полного исчезновения (рис. 2а-в), а в октябре-ноябре, после выхода на остров осенних тайфунов, озерная чаша вновь наполнялась. Температура воды в среднем составляла 7-10 °С, прогреваясь в августе до 12-14 °С, при минерализации 0.2-0.3 г/л и  $pH$  2.9-3.6. В середине июля 2011 г. у оснований юго-западной и юго-восточной стенок кратера произошли четыре гидротермальных взрыва. Первые два случились под водой (после осушения этой части стали видны образовавшиеся воронки, заполненные холодной водой), а два других – в наземных условиях. Следует отметить, что взрывы в юго-западной части произошли в месте существовавших до 1967 г. наиболее мощных фумарол кратера (рис. 2). Произошедшие в 2011 г. гидротермальные взрывы не изменили гидрологический режим озера. Термальные проявления на дне кратера по-прежнему отсутствовали.

В начальный период текущего извержения (октябрь 2016 г. – май 2017 г.) пепловые взрывы происходили также в Среднем кратере [3] из образовавшихся в 2011 г. воронок, а весной 2018 г. на дне Среднего кратера были обнаружены несколько слабых фумарол в проталине размером около 15×30 м (рис. 2г). В летне-осенний период 2018-2020 гг. озеро уже полностью занимало дно кратера без значительных колебаний уровня (рис. 2д, е). Визуальные наблюдения с кромки кратера в этот период не выявили признаков гидротермальной активности, но на фотоснимках, сделанных в разное время (например, 16.07.2020 г., рис. 2е), видны кольцевые разводы на поверхности воды, которые могут быть связаны с поступлением со дна термального флюида. К сожалению, спуститься к озеру для определения его физико-химических параметров и проведения гидрохимического опробования в 2018-2020 гг. не удалось в виду того, что Средний кратер находится в зоне поражения крупных обломков пироклаستيку, постоянно выбрасываемых из кратера Корбута.



Рис. 2. Средний кратер. Демонстрация уровней озера до текущего извержения (а-в). Термальная площадка с парогазовыми выходами в южной части дна 2 мая 2018 г. (г). Состояние кратера 21.08.2019 г. (д). Аэрофотоснимок озера 16 июля 2020 г., на увеличенном выделенном участке белыми кругами показаны места газовой разгрузки (е). Фото Котенко Т.А. (а-г), Касперского Е.В. (д), Котенко М.Л. (е).

**Эволюция химического состава.** Химический состав оз. Горячее, как любого кратерного озера, зависит от ряда факторов: от количества серы и хлора, поступающих с фумаролами, расположенными на дне озера, степени разбавления метеорными водами, интенсивности взаимодействия озерных вод с окружающими породами, а также от дебита и состава питающих его термальных вод.

На графике (рис. 3) отображено изменение концентраций основных анионов и соотношений катионов для вод оз. Горячее во времени, а также химический состав термопроявлений, существовавших на его берегах в 1950-х годах. Для построения использованы опубликованные [2, 5, 6] и собственные данные (2011-2012 гг.).

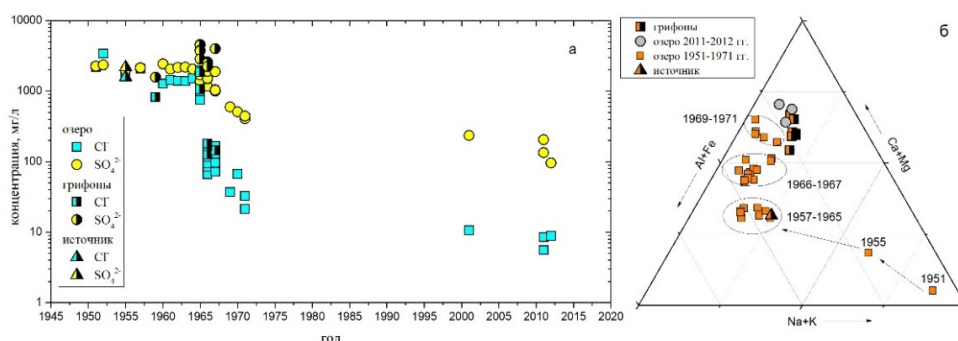


Рис. 3. Вариации анионного (а) и соотношение катионного (б) состава вод оз. Горячее за весь период наблюдений.

Анализ всех существующих данных показал, что эволюция химического состава вод озера происходила последовательно (рис. 3). В 1951-1952 гг. отмечался Na-Cl-SO<sub>4</sub> тип вод с минерализацией ~7 г/л и pH<2. На фоне постепенного ослабления фумарольной активности в кратере во второй половине 1950-х – начале 1960-х гг., при стабильных концентрациях сульфата (~2 г/л), стало снижаться содержание хлора и натрия. Это привело к уменьшению минерализации (до 4 г/л) и изменению гидрохимического типа вод на Al-Cl-SO<sub>4</sub>. В 1966-1967 гг., после практически полного прекращения фумарольной деятельности в кратере, состав воды стал преимущественно сульфатный, концентрации хлор-ионов снизились более чем в 10 раз, до 0.1-0.2 г/л. В катионном составе увеличилась доля Ca<sup>2+</sup>. В этот период наблюдалась достаточно четкая дифференциация в анионном составе вод: в юго-западной части озера содержание SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> достигало 2.5 г/л, в северо-восточной части – не превышало 1 г/л. Соотношение катионов при этом оставалось стабильным по всей площади. Озерная вода в этот период стала отвечать Ca-Al-SO<sub>4</sub> типу, а pH увеличился до 1.8-2.6. Тенденция снижения количества растворенных компонентов сохранилась в дальнейшем. В 2011-2012 гг. в озере была пресная вода Ca-SO<sub>4</sub> типа, с концентрациями сульфат и хлор-ионов 100-200 мг/л и 6-8 мг/л, соответственно.

Воды кипящих котлов, источника и грифонов, которые наблюдались до середины 1960-х гг. по берегам озера (рис. 3), характеризовались схожим с озерной водой химическим составом.

Возможно, текущее извержение, приведшее к изменению гидрологического режима озера, наложило отпечаток и на химический состав его вод. Для выявления этого факта необходимо провести гидрохимическое опробование после снижения активности вулкана.

**Заключение.** Озеро Горячее, сформировавшееся в Среднем кратере вулкана Эбеко после извержения 1934-1935 гг., за весь период наблюдений претерпело значительные изменения в гидрологическом режиме, химическом составе воды и физико-химических показателях. Значительные преобразования связаны с изменением интенсивности фумарольной деятельности в кратерной зоне вулкана. Гидрохимический тип воды, начиная с первых данных, полученных в 1951 г., менялся не менее 4-5 раз. Гидрологический режим длительное время определялся поступлением атмосферных осадков. В ходе текущего извержения в Среднем кратере возобновилась слабая фумарольная деятельность, увеличение мощности которой может привести к дальнейшему изменению режима и химического состава оз. Горячее.

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

#### Список литературы

1. Горшков Г.С. Вулканы острова Парамушир и их состояние летом 1953 г. // Бюллетень вулканологической станции. 1954. № 22. С. 9-29.
2. Иванов В.В. Современная гидротермальная деятельность вулкана Эбеко на острове Парамушир // Геохимия. 1957. № 1. С. 63-76.
3. Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В. Извержение вулкана Эбеко (о. Парамушир) в 2018 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXII Всероссийской научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, 28-29 марта 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 82-85.
4. Мелекесцев И.В., Дзигало В.Н., Кирьянов В.Ю. и др. Вулкан Эбеко (Курильские о-ва): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч. 2 // Вулканология и сейсмология. 1993. № 4. С. 24-41.
5. Сидоров С.С. Активизация вулкана Эбеко в 1963-1964 гг. и эволюция его гидротермальной деятельности в предшествующий период // Бюллетень вулканологической станции. 1966. № 40. С. 61-69.
6. Храмова Г.Г. Кратерно-озерные отложения: динамика формирования (на примере вулкана Эбеко). Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. 136 с.