

**Озеро Бирюзовое (кальдерный комплекс Заварицкого, о. Симушир): гидротермальная активность в 2023-2024 гг. и водный баланс**

**Котенко Т.А.**

**Biryuzovoye Lake (Zavaritsky caldera complex, Simushir Island): hydrothermal activity in 2023-2024 and water balance**

**Kotenko T.A.**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

*e-mail: sinarka2017@mail.ru*

В настоящей работе представлены результаты изучения гидротермальной активности в молодой кальдере вулкана Заварицкого (о. Симушир, Курилы) в 2023-2024 гг. Наблюдается разгрузка термальных вод (~60 кг/с с температурой до 70 °С, минерализацией 2.3 г/л, pH 6.9) на юго-западном берегу на протяжении 500 м. Рассчитаны составляющие водного баланса озера.

В строении кальдерного комплекса Заварицкого выделяются две соммы позднплейстоценового возраста, внутрикальдерный вулкан Заварицкого и внутренняя голоценовая кальдера [2, 8]. Самая молодая кальдера, возникшая в результате извержения, датированного 1831 г. [13], заполнена бессточным озером Бирюзовое (рис. 1б).

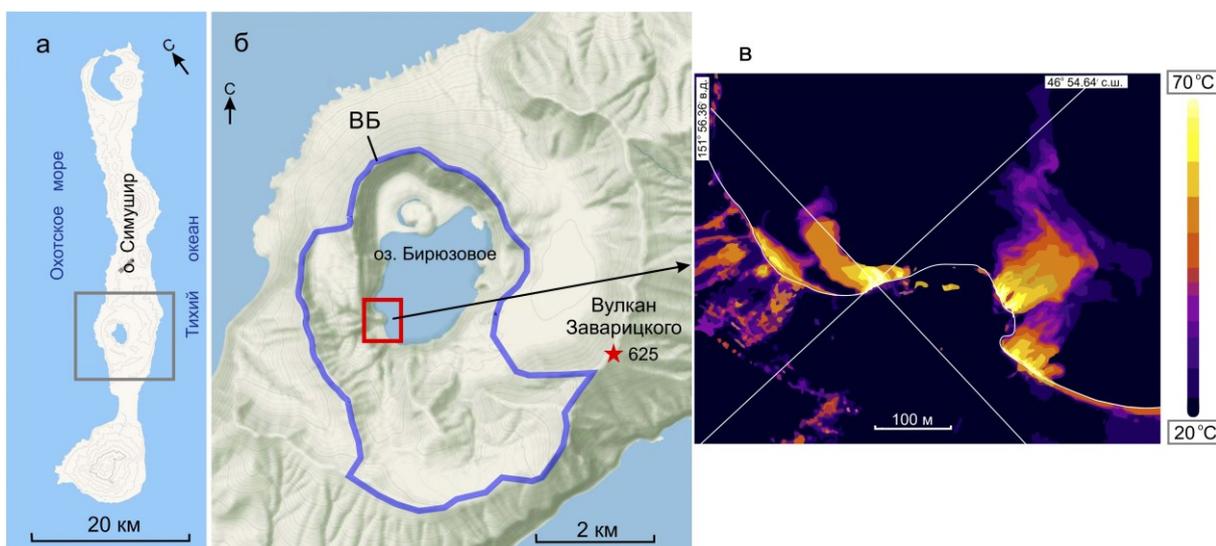


Рис. 1. Положение кальдерного комплекса Заварицкого на о. Симушир (а); водосборный бассейн (ВБ) оз. Бирюзовое (б); термограмма горячих источников по данным 2024 г. (в).

По данным [3], зеркало озера находится на высоте 50 м н.у.м., максимальная глубина составляет 87 м. Превышение гребня кальдеры над урезом воды составляет 250-400 м. Исторические извержения (между 1916 г. и 1931 г., 1957 г.) [2, 5] были приурочены к северной части дна молодой кальдеры, где некоторое время еще наблюдались выходы горячих источников и фумарольная активность [6]. В 1946 г. отечественными геологами [9] впервые наблюдались горячие источники на юго-западном берегу озера, где они действуют до настоящего времени.

### Методы

Инфракрасная (ИК) съемка выполнялась с квадрокоптера DJI Mavic 3T, оснащенного тепловизионной камерой с разрешением 640×512 пикселей в диапазоне измеряемой длины волны 8-14 мкм. Точность измерения температуры ±2 °С. Обработка ИК-изображений выполнялась в программе DJI Thermal Analysis Tool 3. Фотографии в видимом спектре с разрешением 4000×3000 пикселей получены широкоугольной камерой Mavic 3t Hasselblad. Метеорологические параметры во время полетов

измерялись ручным цифровым термогигрометром SKYWATCH atmos, точность измерения температуры  $\pm 0.2$  °С, влажности  $\pm 3$  %.

Анализы химического состава воды выполнены в Аналитическом центре ИВиС ДВО РАН по стандартным методикам, аналитики С.М. Иванова, Е.А. Якимова.

### Характеристика гидротермальной разгрузки

Озеро Бирюзовое заполняет дно кальдеры с высокими крутыми бортами высотой 250-400 м над урезом воды и уклоном до 85°, что сильно осложняет спуск к озеру. Кроме того, большая часть склонов оголена от растительности, сложена пирокластическим материалом, легко вовлекаемым в современные обвально-оползневые процессы. Задернованные склоны прорезаны эрозионными рывтинами временных водотоков, подошва склонов местами закрыта осыпными шлейфам. ИК-съёмка с БПЛА дает возможность дистанционного мониторинга термальной активности в кальдере, она была выполнена в 2023 [4] и 2024 гг. В 2024 г. аэрофотосъемка проводилась 3 августа в 15 ч при пасмурном небе и повторно в 20 ч в сумерках. Температура воздуха составляла 24 °С, скорость ветра 8 м/с, высота полета над озером 270 м. Термальные аномалии уверенно установлены только в юго-западной части озера (рис. 1в).

При спуске в кальдеру была взята проба воды из источника на уресе озера, высота зеркала составляла 47 м. Наличие береговых террас указывает на колебание уровня воды в озере высотой не менее 1 м. Вода источника имеет нейтральный хлоридный натриевый состав (табл. 1) с минерализацией 2.3 г/л.

Таблица 1. Химический состав воды источника

Дата отбора	Координаты		T, °C	pH	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
03.08.2024 г.	46° 54.64' с.ш., 151° 56.36' в.д.		70	6.89	0.73	1049	77.4	80.5
Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SiO <sub>2p</sub>	Al	Fe <sub>общ</sub>	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	M
718	64.5	30	7.2	210	<0.04	<0.1	50.7	2289

Данный химический состав близок к отборам 1955 г. (рис. 2а, б) в период спокойного состояния вулкана. В изменении концентраций Cl и SO<sub>4</sub> в воде озера и источниках юго-западного берега в течение 1957-1959 гг. (рис. 2в) прослеживается явная связь с извержением 1957 г.

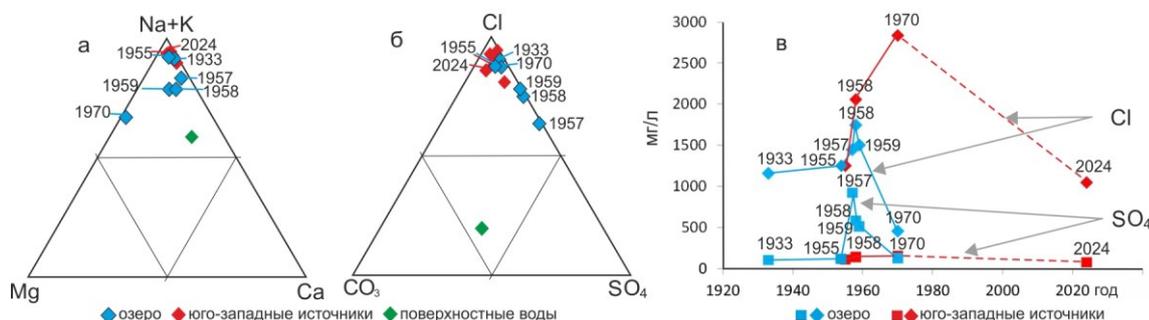


Рис. 2. Треугольные диаграммы относительных концентраций основных катионов (а) и анионов (б) в водах кальдеры Заварицкого. Изменение во времени хлор- и сульфат-ионов (в). 1933 – год опробования. Данные за 1933-1970 гг. из [6, 11].

### Водный баланс

Водный баланс бессточного кратерного озера определяется равенством (1) прихода ( $M_{вул}$  – вулканический приток воды и/или пара;  $M_{ос1}$  – осадки, выпадающие на поверхность озера;  $M_{ос2}$  – осадки, стекающие в озеро из водосборного бассейна) и

расхода ( $M_{исп}$  – испарение с поверхности озера;  $M_{\phi}$  – фильтрация через дно озера) [14]. Относительно искомого вулканического притока формула принимает вид:

$$M_{вул} = M_{oc1} + M_{oc2} - M_{исп} - M_{\phi} \quad (1)$$

**Вклад атмосферных осадков.** Среднее за год количество осадков, по данным стационарной метеорологической станции Симушир (25 м н.у.м), составляет 1706 мм [7]. К осадкам, стекающим в озеро с площади водосбора, был применен коэффициент 0.67, показывающий долю поверхностного стока от общего количества осадков [1]. Поступление осадков на поверхность озера в 3.1 раза меньше, чем приток с площади водосбора. В табл. 2 показаны составляющие водного баланса в размерности скорости потоков ( $m_i$ ).

Таблица 2. Составляющие водного баланса оз. Бирюзовое

Осадки, мм/год	$S_{оз}$	$S_{водсб}$	Приток		Отток		$m_{вул}$
			$m_{oc1}$	$m_{oc2}$	$m_{\phi}$	$m_{исп}$	
	км <sup>2</sup>		кг/с				
1706	3.29	18.6	178	555	658	134	-59

**Испарение с поверхности озера.** Испарение с поверхности холодного озера происходит после разрушения ледяного покрова и прекращается при переходе температуры воздуха через ноль осенью, то есть в течение семи месяцев (май-ноябрь). Расчет испарения  $E$  (мм) был выполнен по формуле ГГИ [10]:

$$E = 0.14n(e_0 - e_1)(1 + 0.72W) \quad (2),$$

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 ~123 мм.

Скорость испарения  $m_{исп}$  с горячей поверхности озера на участках выхода термальных источников рассчитывалась по [15] и составила ~11 кг/с.

**Фильтрация через дно озера.** Для расчета принята скорость дренажа для термальных озер  $2 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>2</sup>/с [12].

**Вулканический приток.** Предполагаемая разгрузка вулканического флюида составила ~59 кг/с. Для существования в кальдере термального озера с температурой 35 °С необходим вулканический приток >1.1 т/с, так как испарение с поверхности в этом случае многократно (в 8-9 раз) возрастает.

### Заключение

В результате изучения гидротермальной активности в кальдере Заварицкого (о. Симушир) в 2023-2024 гг., в том числе с помощью БПЛА, установлено, что разгрузка хлоридных натриевых нейтральных термальных вод с температурой до 70 °С и минерализацией 2.3 г/л происходит на юго-западном берегу на протяжении 500 м. Химический состав воды источников близок к отборам 1955 г. [6] и 1970 г. [11] в период межэруптивного состояния вулкана. Рассчитанные составляющие водного баланса озера позволяют предположить величину гидротермальной разгрузки (вулканического притока) близкой к 60 кг/с. Данного притока недостаточно для существенного прогрева озера Бирюзовое при его стабильном объеме около 0.11 км<sup>3</sup>.

Автор благодарит Л.В. Котенко (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН) и В.Н. Молостова за участие в полевых работах. Работа выполнена в рамках НИР ИВиС ДВО РАН тема № FWEW-2019-0001 «Комплексное исследование крупных уникальных геотермальных систем, источники тепла и металлоносных флюидов».

### Список литературы

1. Вакин Е.А., Сугробов В.М. Гидрогеологические особенности вулканических структур и современные гидротермальные системы // Гидрогеология СССР. 1972. Т. XXIX: Камчатка, Курильские и Командорские острова. С. 169-196.
2. Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 287 с.
3. Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Новые данные по морфологии внутрикальдерных озер островов Кунашир и Симушир // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2009. № 2. Вып. 14. С. 159-164.
4. Котенко Т.А. Первые результаты инфракрасной съемки с БПЛА термальных объектов Курильских островов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2024. Вып. 62. № 2. С. 66-78. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-2-62-66-78>
5. Мархинин Е.К. Извержение вулкана Заварицкого на острове Симушир осенью 1957 г. // Бюллетень вулканологической станции. 1960. № 29. С. 7-15.
6. Мархинин Е.К., Стратула Д.С. Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 1977. 212 с.
7. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 34. Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. 352 с.
8. Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. ред. Н.П. Лаверов. М: Наука, 2005. 604 с.
9. Соловьев А.И. Курильские острова. М., Л.: Главсевморпуть, 1947. 306 с.
10. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. 84 с.
11. Чирков А.М., Барабанов Л.Н., Башарина Л.А., Зеленов К.К. Состояние некоторых вулканов Курильских островов летом 1970 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1972. № 48. С. 33-39.
12. 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 // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. V. 218. Art. 106257. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106257>
13. Hutchison W., Sugden P., Burke A. et al. The 1831 CE mystery eruption identified as Zavaritskii caldera, Simushir Island (Kurils) // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2025. V. 122. № 1. Art. e2416699122 <https://doi.org/10.1073/pnas.2416699122>
14. Pasternack G., Varekamp J.C. Volcanic lake systematics, I. Physical constraints // Bulletin of Volcanology. 1997. V. 58. P. 528-538.
15. Ryan P.J., Harleman D.R., Stolzenb K.D. Surface heat loss from cooling ponds // Water Resources Research. 1974. V. 10. P. 930-938.