

**Вулкан Райкоке: геометрия кратера и оценка термального режима кратерного озера по спутниковым данным**

*Малышева А.С., Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г.*

**Raikoke volcano: crater geometry and assessment of crater lake thermal regime based on satellite data**

*Malysheva A.S., Girina O.A., Melnikov D.V., Manevich A.G*

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

*e-mail: malysheva\_nastasya@list.ru*

На основании спутниковых данных определены характеристики кратерного озера вулкана Райкоке после извержения 2019 г. Выяснено, что глубина озера составляет ~70 м. Зеркало озера находится на уровне моря, это согласуется с ранее сделанным предположением о его морском происхождении.

**Введение**

Стратовулкан Райкоке (абсолютная высота 551 м) находится в Центральных Курилах, в 16-18 км от о. Матуа, его постройка протягивается на 2-2.5 км, на его вершине находится кратер диаметром 700 м и глубиной 200 м [5]. В июне 2019 г. произошло эксплозивное извержение вулкана Райкоке [1]. Извержение сопровождалось перестройкой морфологии вулкана, в кратере сформировалось озеро [2].

Кратерные озера являются чувствительными индикаторами состояния гидротермальной системы вулкана. Их температурный режим определяется сочетанием эндогенного теплового потока, геометрии кратера и внешних метеорологических факторов. Численные исследования показывают, что геометрия кратера, в частности, форма поперечного сечения и углы наклона его внутренних стенок, существенно влияет на тепловой режим озер и на изменения субаквальной тепловой активности [7].

Целью настоящей работы является анализ морфологии кратера вулкана Райкоке после извержения 2019 г., оценка морфологической глубины сформировавшегося кратерного озера, а также анализ изменений температуры поверхности кратерного озера на основании спутниковых данных.

**Методы исследования**

Для оценки геометрии кратера вулкана Райкоке до извержения 2019 г. была получена и обработана цифровая модель рельефа (Digital Elevation Model, DEM) на основании данных спутника ALOS PRISM за 2006-2011 гг. методом стереофотограмметрии [6]. Цифровая модель рельефа представляет собой регулярную пространственную сетку, в узлах которой задана абсолютная высота земной поверхности, что позволяет описывать форму рельефа, строить топографические профили и вычислять геометрические параметры кратера [6].

Модель была приведена к прямоугольной метрической системе координат UTM zone 57N (EPSG:32657). Построена серия диаметральных топографических профилей (рис. 1), проходящих через центр кратера с шагом  $10^\circ$  по азимуту, что позволило выявить азимутальную изменчивость формы кратера без избыточной корреляции между соседними направлениями. Для каждого профиля координата была приведена к симметричной системе отсчета, в которой центр кратера соответствует  $x=0$ , а отрицательные и положительные значения  $x$  описывают противоположные стороны кратера.

На основании этой же цифровой модели рельефа была построена карта углов наклона склонов вулкана Райкоке, которые вычислялись по модулю градиента высоты (рис. 2). Рельеф рассматривался как функция  $z=f(x,y)$  в метрической системе координат UTM. Частные производные высоты по направлениям  $x$  и  $y$  определялись по формуле (1) методом конечных разностей с шагом 30 м, соответствующим пространственному разрешению DEM:

$$\frac{dz}{dx}, \frac{dz}{dy} \quad (1)$$

Модуль градиента вычислялся по формуле (2):

$$|\nabla z| = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}, \quad (2)$$

угол наклона поверхности, выраженный в градусах, определялся по формуле (3):

$$\alpha = \arctan(|\nabla z|). \quad (3)$$

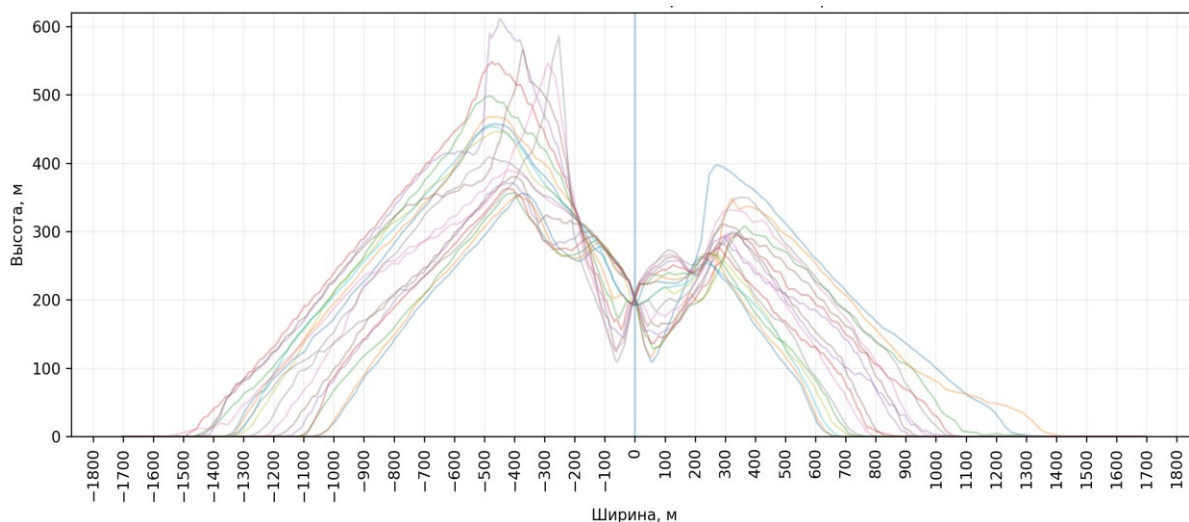


Рис. 1. Морфологические профили склонов вулкана Райкоке и его кратера. Вертикальная линия – положение центра кратера, высота вулкана показана от уровня моря.

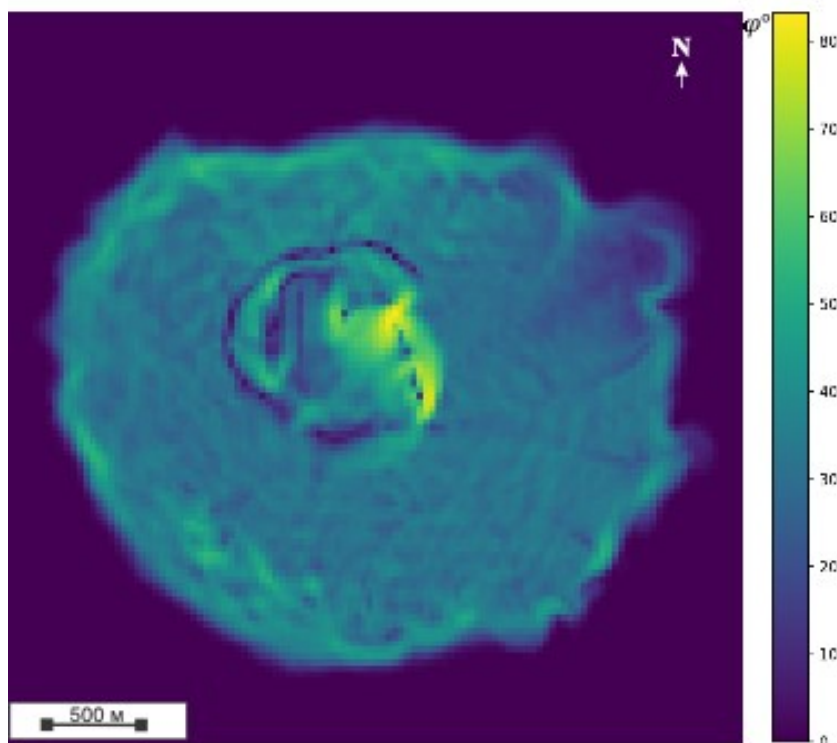


Рис. 2. Карта углов наклона склонов кратера вулкана Райкоке, рассчитанная по цифровой модели рельефа AW3D30. Цветовая шкала соответствует углу наклона поверхности в градусах.

Площадь зеркала кратерного озера определялась по оптическим спутниковым данным в программе Copernicus Data Space Ecosystem, в частности, по изображениям со спутников Sentinel-2 (<https://dataspace.copernicus.eu/>) за 2020-2025 гг. В результате обработки множества изображений выяснено, что контур открытой воды имел

устойчивую конфигурацию, характерная площадь зеркала озера составила  $\sim 0.11 \text{ км}^2$ . Это значение принято в качестве площади для дальнейших геометрических расчетов.

Глубина озера оценивалась по цифровой модели рельефа AW3D30 (<https://opentopography.org>). В пределах чаши кратера задавалась маска, соответствующая зоне бортов кратера вулкана Райкоке (рис. 1). Согласно спутниковым данным, диаметр кратера почти не изменился после извержения вулкана в 2019 г. С помощью моделирования определялось число пикселей, соответствующее площади озера. Максимальная глубина рассчитывалась как разность между уровнем воды и минимальной отметкой рельефа в пределах чаши. Объем озера определялся суммированием разностей между уровнем воды и отметками рельефа для пикселей зеркала озера. Дополнительно был выполнен анализ чувствительности результатов к радиусу маски для оценки влияния геометрии чаши на расчет глубины.

Для анализа термальной активности кратерного озера использовалась величина Разности Температуры термальной Аномалии и Фона (РТАФ) [3], полученная по данным из информационной системы (ИС) VolSatView [4] за период с середины 2019 по 2025 гг. (рис. 3а). В результате анализа установлено, что возбужденный режим кратерного озера наблюдался с июня 2019 г. до конца 2021 г., тогда как с 2022 г. система перешла в квазистационарное состояние, в пределах которого и проводилась оценка фоновой термальной активности вулкана (РТАФ  $\sim 14 \text{ }^\circ\text{C}$ ), как 95-й перцентиль распределения величины РТАФ, что соответствует верхней границе устойчивого термального режима системы и исключает влияние кратковременных экстремальных всплесков. На основе полученного фонового значения была рассчитана доля дней превышения фона термальной активности вулкана (рис. 3б). Для этого в скользящем окне длительностью 365 суток определялось процентное отношение числа дней, в которые величина РТАФ превышала фоновый уровень, к общему числу валидных наблюдений в окне. Такой показатель отражает частоту проявления величины РТАФ, характеризуя степень теплового возбуждения гидротермальной системы озера.

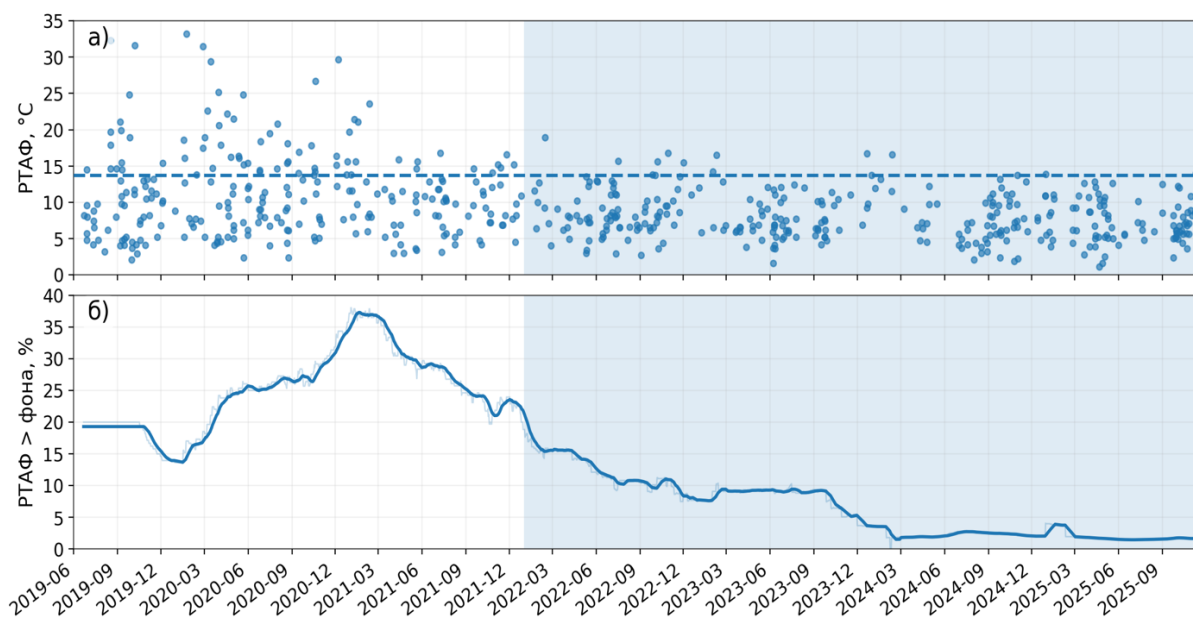


Рис. 3. Термальная активность вулкана Райкоке по спутниковым данным из ИС VolSatView. Пунктирной линией обозначен фон термальной активности вулкана (а); сглаженный ряд величины РТАФ в окне 365 суток (б).

### Результаты

Согласно построенным топографическим профилям вулкана Райкоке, дно кратера до извержения 2019 г. находилось на  $\sim 150\text{-}250 \text{ м}$  над уровнем моря (н.у.м.),

высота кромки кратера достигала ~ 600 м н.у.м. (рис. 1). Морфологическая глубина кратера составляла ~400 м. Диаметр кратера оценивался как ~300-800 м.

Асимметрия кратера вулкана Райкоке проявляется в бортах кратера, центральная его часть имела близкую к симметричной форму: в пределах радиусов до ~200 м глубина дна практически одинакова во всех направлениях.

До извержения вулкана восточный борт кратера был значительно выше и имел более крутой профиль по сравнению с западным. Наибольшие значения углов наклона (>60-80°) приурочены к восточным стенкам кратера (рис. 2).

Согласно геометрическим построениям и расчетам, выполненным по спутниковым данным Sentinel-2 (<https://dataspace.copernicus.eu/>), морфологическая глубина кратера до зеркала озера составляет ~450-550 м. Следовательно, зеркало озера находится на уровне моря, это согласуется с ранее сделанным предположением [2], что озеро имеет морское происхождение. По данным цифрового моделирования, глубина кратерного озера оценивается в 70 м.

Важным результатом работы является определение фона термальной активности вулкана, величина РТАФ равна ~14 °С.

Наблюдаемая динамика температуры кратерного озера Райкоке (рис. 3) отражает релаксацию вулканической системы после извержения 2019 г. В 2020-2021 гг. термальный режим вулкана связан с остаточным магматическим тепловыделением и дегазацией, что проявляется в повышенных и высоко вариабельных положительных аномалиях температуры. С 2022 г. происходит переход к квазистационарному фоновому состоянию, при котором эндогенный тепловой вклад существенно ослаблен, а температурные колебания определяются, преимущественно, внешними метеорологическими и гидрологическими факторами.

Работа выполнена в рамках темы ИВиС ДВО РАН «Комплексный мониторинг активных вулканов Камчатки ...» (госрегистрация № 124031400008-3).

### Список литературы

1. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Уваров И.А., Крамарева Л.С.* Извержение вулкана Райкоке 21 июня 2019 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 303-307. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-303-307>
2. *Мельников Д.В., Гирина О.А., Маневич А.Г., Лупян Е.А.* Геолого-геоморфологические результаты извержения вулкана Райкоке (Курильские острова) по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 390. <https://doi.org/10.21046/17DZZconf-2019a>
3. *Girina O.A., Manevich A.G., Loupian E.A. et al.* Monitoring the thermal activity of Kamchatkan volcanoes during 2015–2022 using remote sensing // Remote Sensing. 2023. V. 15(19). Art. 4775. <https://doi.org/10.3390/rs15194775>
4. *Gordeev E.I., Girina O.A., Lupyay E.A et al.* The VolSatView information system for monitoring the volcanic activity in Kamchatka and on the Kuril Islands // Journal of Volcanology and Seismology. 2016. V. 10. No. 6. P. 382-394. <https://doi.org/10.1134/S074204631606004X>
5. *Gorshkov G.S.* Catalogue of the active volcanoes of the World including solfatara fields. P. VII. Kurile Islands. Inter. Volcanological Assoc. Napoli, Italia, 1958. 99 p.
6. *Tadono T., Ishida H., Oda F. et al.* Precise global DEM generation by Alos Prism // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. II-4, 2014. ISPRS Technical Commission IV Symposium. 14–16 May 2014. Suzhou. China. P. 71-76. <https://doi.org/10.5069/G94M92HB>
7. *Terada A., Hashimoto T.* Variety and sustainability of volcanic lakes: Response to subaqueous thermal activity predicted by a numerical model // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2017. V. 122. P. 6108-6130. <https://doi.org/10.1002/2017JB014387>