

Динамика вод кратерного озера вулкана Малый Семячик за период 1999-2021 гг. по данным дистанционного зондирования

Мельников Д.В., Калачева Е.Г.

Dynamics of waters in the crater lake of Maly Semyachik volcano in 1999-2021 by remote sensing data

Melnikov D.V., Kalacheva E.G.

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

e-mail: dvm@kscnet.ru

На основе данных дистанционного зондирования за период с 1999 по 2021 гг. определены этапы изменения активности кратерного озера вулкана Малый Семячик. Показано, что изменение цветовой палитры поверхности озера является следствием изменения химического состава воды.

Вулкан Малый Семячик, входящий в Карымский вулканический центр Восточного вулканического пояса Камчатки, расположен в северной части ранее образованной кальдеры обрушения диаметром 7 км [6]. Это вулканический массив протяженностью ~3 км, вытянутый вдоль зоны разрывов северо-восточного простирания и состоящий из трех слившихся разновозрастных построек, последовательное формирование которых связано с миграцией центров извержений с северо-востока на юго-запад, к центру кальдеры [1]. Последнее крупное извержение Малого Семячика произошло ~400 лет назад и носило эксплозивный характер. В результате взрыва образовался кратер, названный впоследствии [2] кратером Троицкого. Исторические извержения приурочены к этому кратеру и происходили в 1851, 1852, 1945-1946 гг. и, возможно, в 1952 г. [3]. Судя по повсеместной гидротермальной проработке стенок кратера, в межэруптивные периоды в нем была проявлена фумарольная деятельность. Озеро в кратере Троицкого сформировалось после извержения 1945-1946 гг. [2]. Разгрузка озера происходит преимущественно за счет скрытого стока и частично за счет испарения с поверхности воды.

Гидрологический и гидрохимический режим озера зависит от состояния вулкана. За весь период наблюдения выделяются три основных этапа, связанных с изменением активности Малого Семячика, во время которых наблюдалось колебание объема и уровня озера, изменение температурного режима и химического состава воды [10]. Первый этап длился с начала наблюдений до середины 1980-х гг. и соответствовал максимальной активности вулкана, сопровождавшейся разгрузкой гидротермального газонасыщенного флюида на дне озера. Второй этап, длившийся до середины 2000-х гг., был периодом относительного покоя. В это время происходило постепенное разбавление озерной воды за счет поверхностного стока. Третий этап ассоциирован с новым периодом активности вулкана и увеличением гидротермальной подпитки озера. В целом выявлено, что, по сравнению с 1971 г., уровень водного зеркала поднялся на 43 м, и по состоянию на октябрь 2020 г. абсолютная высота береговой линии была на отметке 1195.2 м. Объем водных масс за этот период увеличился более чем в 2 раза и составил 0.0207 м^3 , площадь водного зеркала озера за последние 50 лет увеличилась на $71\,970 \text{ м}^2$ и достигла $304\,825 \text{ м}^2$ [10].

Методы исследования

Удаленность вулкана Малый Семячик не позволяет проводить частые полевые исследования. Для восполнения данных о динамике изменений озера в кратере Троицкого были использованы различные методы реанализа спутниковых снимков. Одним из методов исследований являлось определение цветовой палитры поверхности озера. Изменение цвета воды свидетельствует о протекающих химических процессах. При первом посещении кратера Троицкого цвет воды описывался в густых зеленых и зелено-желтых тонах [2]. В период 1984-1986 гг. озеро характеризуется в серо-голубых

или бирюзовых тонах, отмечается его непрозрачность (молочность) [4]. Изучение изменения цветовой гаммы озера в период с 1999 по 2021 гг. проводилось на основании анализа спутниковых снимков Landsat (NASA, USGS) по методике, подробно изложенной в [7, 9]. Всего было обработано 305 космических снимков, на которых есть четкое отображение озера. Для доступа к архиву спутниковых данных Landsat использовался сервис Google Earth Engine (GEE) [8]. Цвет озера определялся как характер отражательной способности.

Коэффициент отражения поверхности извлекался из спектральных каналов – красного, зеленого и синего цветов, что позволяет определить цвет озера в цветовом пространстве RGB. Кроме этого, определялась другая цветовая модель – HSV (Hue, Saturation, Value), которая является нелинейным преобразованием модели RGB. Эта модель более четко связывает цвет объекта с его физическими свойствами. Hue – определяет доминирующий цвет (красный, зеленый, синий, желтый и т.д.), варьирует в пределах 0-360°, однако иногда приводится к диапазону 0-100 или 0-1. Saturation описывает силу этого доминирования, варьирует в пределах 0-100 или 0-1. Чем больше этот параметр, тем «чище» цвет, поэтому этот параметр иногда называют чистотой цвета. А чем ближе этот параметр к нулю, тем ближе цвет к нейтральному серому. Value (значение цвета) – это максимальная отражательная способность в красной, зеленой или синей полосе, также задается в пределах 0-100 или 0-1.

Также для обработки спутниковых снимков применялся метод «hue stretch» [9], который оставляет неизменным hue, но выводит в максимальные значения saturation и value. Этот метод не показывает цвет объекта, наблюдаемый невооруженным взглядом. Однако он подчеркивает доминирующий оттенок, чтобы его можно было легче интерпретировать визуально.

Температура озера определялась по инфракрасным спектральным каналам Landsat. Значение температуры определялось как разница максимальной температуры на поверхности озера и температуры фона (которая определялась по береговой линии озера).

Результаты исследования

По состоянию на период 1999-2007 гг. цвет озера был стабилен, на снимках наблюдаются высокие значения «saturation», что соответствует «чистоте» цвета. Физически цвет представлен голубоватым или бирюзовым оттенком (рис. 1).

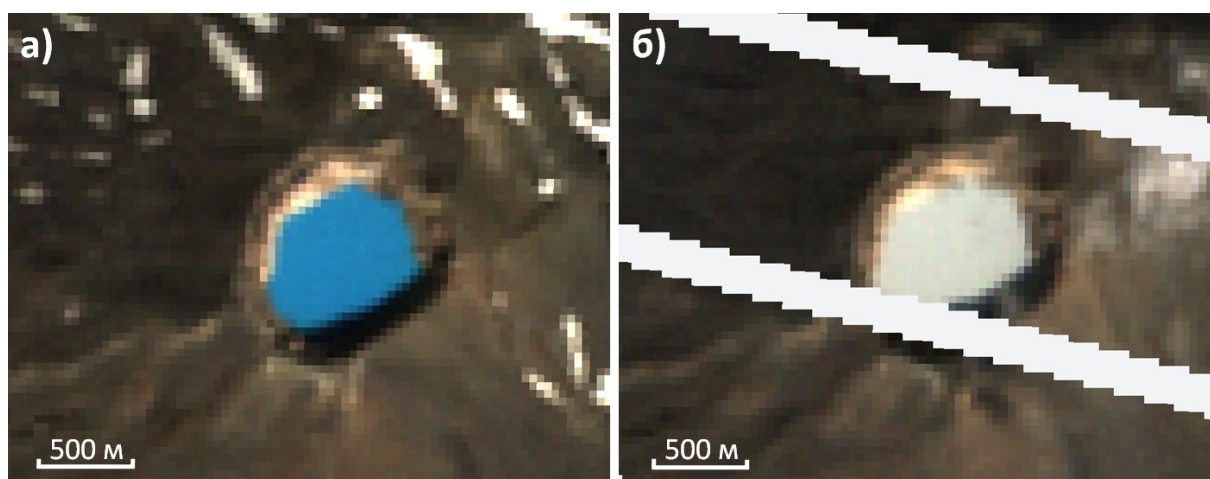


Рис. 1. Спутниковые снимки озера в кратере Троицкого, вулкан Малый Семячик: а – 08.09.2001 г. и б – 08.09.2009 г.

Выявлена некоторая сезонность в этот период. Сразу после таяния льда (июнь), «saturation» имеет более высокие значения, а ближе к осени – более низкие. Это свидетельствует о колебании отражательной способности водной поверхности за счет

изменения объемов поступающих атмосферных вод в течение теплого периода года. Зимой с 2007 по 2008 гг. озеро не замерзло. В июле 2008 г. наблюдается резкая смена цвета озера с бирюзового на серый (рис. 2).

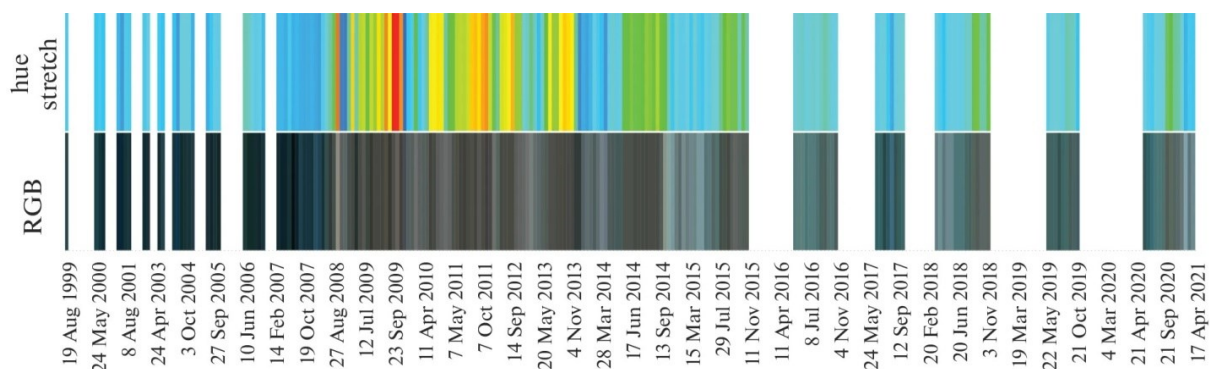


Рис. 2. Изменение цветового диапазона поверхности озера с 1999 по 2021 гг. Сверху: цвет озера в цветовой модели HSV, полученный с использованием метода растяжения оттенка [9]. Пробелы в данных (белые области) относятся к периодам, когда озеро было покрыто льдом. Внизу: цветовой диапазон (цветовое пространство RGB) озера в видимом диапазоне по данным спутника Landsat.

Также увеличивается и температура озера (рис. 3). Данная цветовая гамма сохранялась вплоть до 2015 г., затем вернулась к прежнему молочно-голубоватому оттенку, который сохраняется до настоящего времени. Зимой с 2015 по 2016 гг. озеро замерзло. Также оно замерзло зимой с 2016 по 2017 и с 2017 по 2018 гг. В марте 2018 г. произошло резкое увеличение температуры озера, что привело к таянию льда всего за несколько дней. Затем озеро замерзло зимой с 2018 по 2019 и с 2019 по 2020 гг. Осенью 2020 г. температура озера увеличилась, в результате этого озеро не замерзло зимой с 2020 по 2021 гг.

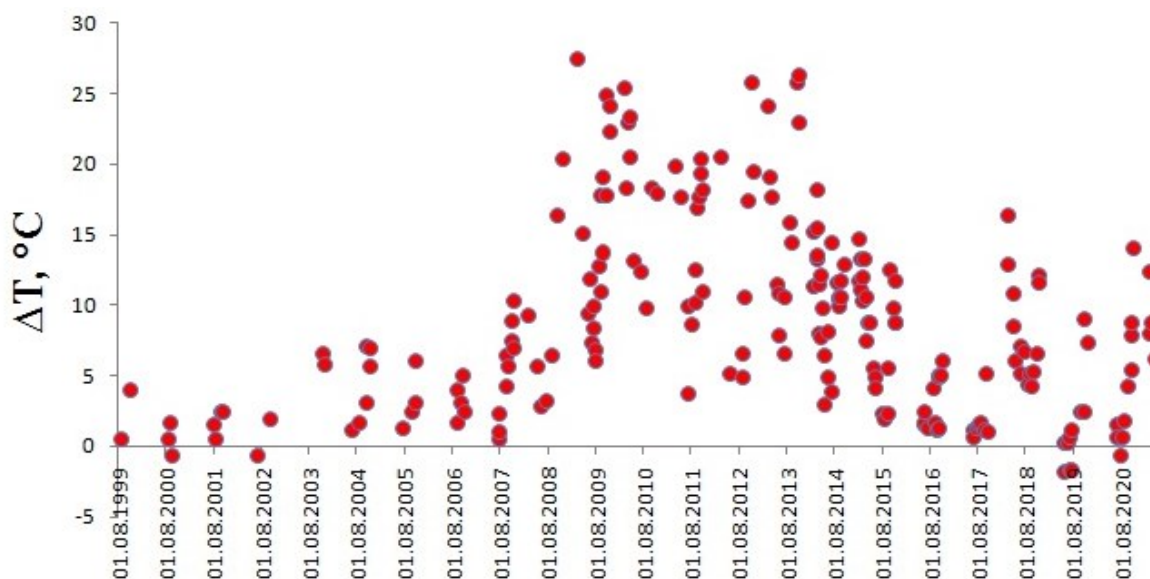


Рис. 3. Изменение температуры озера в кратере Троицкого за период с 1999 по 2021 гг. по данным спутника Landsat. Значение температуры определялось как разница максимальной температуры на поверхности озера и температуры фона (определялась по береговой линии озера).

Результаты

Таким образом, результаты анализа спутниковых снимков подтверждают, что во второй половине 2000-х гг. начался новый этап активизации вулкана, выразившийся в увеличении объема водных масс за счет поступления глубинного флюида [10].

Косвенным проявлением изменившихся условий стала и резкая смена цвета озера на свинцово-серый в 2008 г., что, вероятно, было связано с повышением содержания сероводорода в поступающем флюиде и формировании в воде сульфидных соединений, характерных для гидротермальных озера и придающих соответствующий цвет воде. В результате этого, в 2018 и 2020 гг. наблюдается повышение концентраций отдельных макрокомпонентов и минерализации в целом, а также уменьшение pH. Практически в 3 раза по сравнению с 2002-2003 гг. увеличилось содержание Cl^- и SO_4^{2-} [5].

В настоящее время происходит очередной всплеск гидротермальной активности вулкана, выражающийся в повышении содержания отдельных макрокомпонентов и минерализации в целом на фоне значительно увеличившегося объема воды в озере. По косвенным данным, включая резкое изменение цветовой палитры воды и отсутствие ледового покрова в зимнее время, новый этап в деятельности вулкана начался во второй половине 2008 г.

Вулкан Малый Семячик и его кратерное озеро требует пристального внимания и дополнительного комплексного изучения. Постоянно увеличивающийся объем воды, выявленный в работе [10], может в итоге спровоцировать обрушение внешней стенки вулкана. В результате этого более 20 миллионов литров ультракислого агрессивного раствора попадут в водосборную площадь реки Карымская, одной из нерестовых рек Камчатки.

Список литературы

1. *Брайцева О.А., Егорова И.А., Несмачный И.А., Сулержский Л.Д.* Вулкан Малый Семячик // Вулканический центр: строение, динамика, вещество. М: Наука, 1980. С. 198-235.
2. *Влодавец В.И., Морозов А.И., Троцкий В.Д.* Вулкан Малый Семячик // Бюллетень вулканологической станции. 1948. № 15. С. 17-27.
3. *Влодавец В.И., Пийп Б.И.* Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюллетень вулканологической станции. 1957. № 25. С. 5-95.
4. *Двигало В.Н., Андреев В.И., Гавриленко Г.М. и др.* Деятельность вулканов Юго-Восточной Камчатки и Северных Курил в 1985-1986 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 13-21.
5. *Калачева Е.Г., Мельников Д.В., Волошина Е.В., Карпов Г.А.* Геохимия вод кратерного озера вулкана Малый Семячик // Вулканология и сейсмология. 2022. № 3. С. 28-42. <https://doi.org/10.31857/S0203030622030026>
6. *Селянгин О.Б.* Эволюция кальдерного комплекса, ритмичность и направленность вулканического процесса в Карымской группе вулканов: Камчатка // Вулканизм и геодинамика. М: Наука, 1977. 187-201 с.
7. *Caudron C., Bernard A., Murphy S. et al.* Volcano-hydrothermal system and activity of Sirung volcano (Pantar Island, Indonesia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. V. 357. P. 186-199.
8. *Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18-27.
9. *Murphy S., Wright R., Rouwet D.* Color and temperature of the crater lakes at Kelimutu volcano through time // Bulletin of Volcanology. 2018. V. 80. Art. 2. <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1172-2>
10. *Taran Y., Kalacheva E., Dvigalo V. et al.* Evolution of the crater lake of Maly Semyachik volcano, Kamchatka (1965-2020) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2021. V. 418. Art. 107351. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107351>