

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ПОДЪЕМ ДНА КРАТЕРА ВУЛКАНА ПИК САРЫЧЕВА (ОСТРОВ МАТУА, КУРИЛЫ) В 2017–2019 гг., ВЫЯВЛЕННЫЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ, КАК ПРЕДВЕСТНИК НОВОГО СИЛЬНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ

© 2021 г. С. Ю. Гришин\*

Федеральный научный центр биоразнообразия ДВО РАН, Владивосток, Россия

\*E-mail: grishin@biosoil.ru

Поступила в редакцию 27.04.2021 г.

Лавовая пробка в кратере вулкана Пик Сарычева (Курильские острова) в июне 2009 г. была вынесена взрывами в ходе сильного извержения, после чего положение дна кратера резко снизилось. По спутниковым снимкам и изображениям, полученным при облете кратера на вертолете в 2016 г., измерен уровень опускания дна: около 190–220 м от кромки кратера. Дно находилось в стабильном состоянии до осени 2017 г., после чего начался его подъем, выявленный по спутниковым изображениям. По состоянию на осень 2019 г. дно кратера поднялось приблизительно на 150 м. Объем кратера, заполненный в ходе поднятия, составляет около 10 млн м<sup>3</sup>. Циклы опускание/подъем дна за последние ~75 лет происходили трижды в связи с каждым сильным (существенным) извержением. Очередной подъем вероятно сигнализирует о подготовке вулкана к новому, потенциально опасному эруптивному событию.

*Ключевые слова:* вулканизм, динамика среды, опасные процессы, мониторинг, Курильские острова

DOI: 10.31857/S0205961421050043

#### ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Пик Сарычева, расположенный на о. Матуа (рис. 1) в центральной части Курильских о-вов, является одним из наиболее активных на архипелаге. По интенсивности и продуктивности извержений он сравним лишь с Алаидом – крупнейшим вулканом Курил, однако превосходит последний по степени опасности своих проявлений. В XX в. на о. Матуа произошло около десятка эруптивных событий, в том числе заметные и сильные эксплозивные извержения произошли в 1928, 1930, 1946, 1960, 1976 гг. (последнее – эффузивно-эксплозивное) (Горшков, 1967; Андреев и др., 1978). В результате извержений существенно менялось положение дна кратера. Впервые глубина дна была оценена в 1954 г. (Горшков, 1967) величиной около 200 м.

В ходе сильного эффузивно-эксплозивного извержения вулкана Пик Сарычева в июне 2009 г. лавовая пробка, которая запечатывала кратер до его кромки (рис. 2, а), была разрушена (Гришин, 2011; Urai, Ishizuka, 2011). Твердый материал был раздроблен и вынесен мощными взрывами. Уровень дна кратера резко снизился, на дне сформировался округлый лавовый щит (рис. 2, б). Такое состояние дна продолжалось более 8 лет, при этом достаточно часто отмечался вынос парогазо-

вых шлейфов из кратера. Данные о современных измерениях глубины кратера отсутствуют, кроме оценки в 100 м (вероятно, глазомерной, сделанной с гребня кратера в июне 2017 г.) (Чибисова,



Рис. 1. Остров Матуа. Фото с ИСЗ WorldView-4 от 24.10.2018. Виден парогазовый шлейф к северу от кратера и полоса маломощных пепловых отложений на снегу к юго-востоку от кратера.



**Рис. 2.** Кратер вулкана Пик Сарычева: *a* – вид с кромки на север. Август 2007 г. Фото А.К. Клитина; *б* – вид с вертолета на север–северо-восток. Июнь 2016 г. Изображение получено из видеосъемки А.Г. Лукьянова. Слева видна выемка-понижение на северо-западном склоне, справа – вершина вулкана, внизу – дно кратера. Пунктиром показано положение дна кратера в сентябре 2018 г.

Дегтярев, 2019). Как показано ниже, эта величина мало соответствовала действительности. По спутниковым изображениям удалось зафиксировать реальную глубину кратера в период июнь 2009 г. – сентябрь 2017 г., выявить начавшийся в 2017 г. подъем лавовой пробки, измерить высоту подъема дна, а также определить период, в течение которого он произошел.

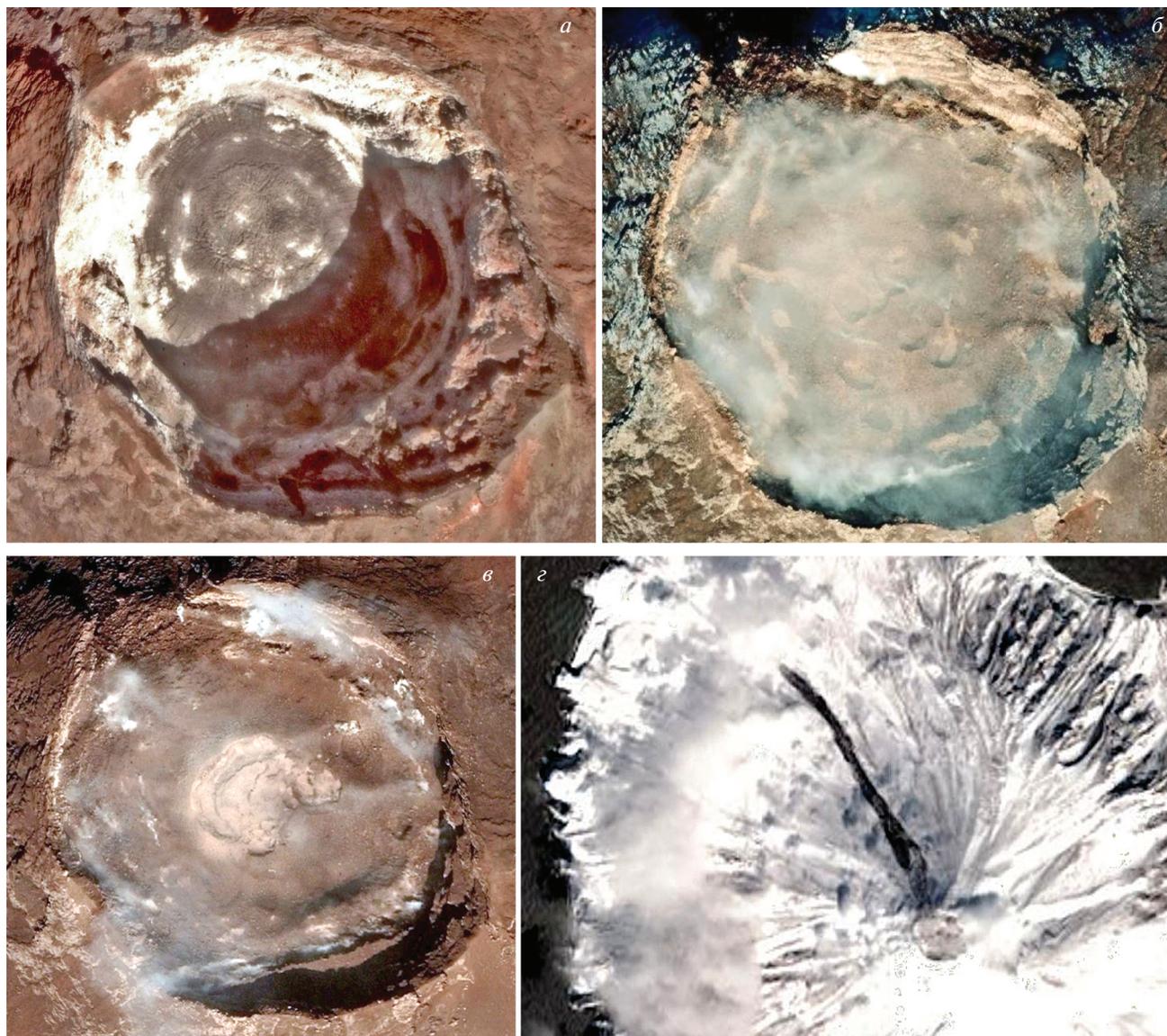
### ПАРАМЕТРЫ КРАТЕРА И ПОЛОЖЕНИЕ ЕГО ДНА ДО ПОДЪЕМА

Относительная высота кромки кратера неоднородна: северный и восточный края выше, чем южный и западный. Нижней точкой кромки являлась обратнотрапецевидная выемка шириной в основании около 60 м, расположенная в северо-западной части кратера, а высшей точкой – скалистый лавовый останец (1446 м) в юго-восточной части. Разница в высоте между ними в период 2009–2017 гг. составляла, по-видимому, около 150

м. Отметим, что такая высотная структура кромки, включая выемку, существовала и в 1950-х гг., до извержений 1976 и 2009 гг., судя по перспективному аэрофотоснимку (рис. 33: Горшков, 1967). Размер поперечника кратера, измеренный по кромке, составлял  $\sim 375 \times 425$  м (длинная ось расположена в направлении северо-запад–юго-восток, короткая – вкрест длинной). Таким образом, средний диаметр составлял  $\sim 400$  м; таким же он был до извержения 2009 г. Впервые эта (или близкая) величина была выявлена по космоснимкам (Гришин, Мелекесцев, 2010; Urai, Ishizuka, 2011).

Положение дна кратера сразу после извержения 2009 г., выявленное по снимку с ИСЗ ALOS от 22 июня 2009 ([https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img\\_up/1\\_pan\\_sarychev\\_090622.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img_up/1_pan_sarychev_090622.htm)), было снижено, по разным оценкам, на  $\sim 50$  м (Miyagi, 2010) или на  $\sim 200$  м (Гришин, Мелекесцев, 2010). После появления качественных спутниковых изображений кратера, глубина его дна была измерена автором двумя методами. По снимкам WorldView-3 от 21 июля 2015 г. и WorldView-2 от 31 августа 2016 г. (рис. 3, *a*) глубина была вычислена по измеренной длине тени от кромки кратера, падающей на дно, и известному углу высоты солнца в момент съемки, с учетом азимута падения тени. Помимо этого, измерить глубину дна кратера, включая ее изменение, удалось в результате совмещения плановых спутниковых изображений и перспективных аэрофотоснимков. Вид внутренних субвертикальных стенок кратера был получен в результате обработки видеосъемки, выполненной с вертолета в июне 2016 г. (рис. 2, *б*). Изображения стенок по опознанным элементам рельефа были привязаны к спутниковым снимкам. Результаты измерений, полученных обоими методами, оказались сходными. Глубина дна в 2016 г. составила около 220 м относительно приподнятой юго-восточной кромки (измерено по тени) и около 190 м относительно северо-северо-восточной кромки (измерено по внутренней стенке кратера).

На спутниковых изображениях, начиная с 2011 г., на дне виден слабовыпуклый лавовый щит. В последующий период до сентября 2017 г. дно, по-видимому, находилось в стабильном положении. Об этом можно судить (по имеющимся снимкам 2015–2017 гг.), в частности, по положению отдельных опознаваемых глыб и светлых пятен (по-видимому, фумарольных возгонов) на темном лавовом щите. Стенки кратера в 2009–2017 гг. были субвертикальными (при этом кратер заметно расширялся в верхней части), представлены чередованием многометровых светлых слоев лавовых потоков (крупнейший горизонт слоев превышал по мощности 40 м), с участием прослоев красноватого шлака в верхней части обнажения (рис. 2, *б*).



**Рис. 3.** Кратер вулкана Пик Сарычева: *а* – 31.08.2016, ИСЗ WorldView-2; *б* – 05.10.2018, ИСЗ WorldView-4; *в* – 07.09.2019, ИСЗ GeoEye-1; *г* – кратер и лавовый поток на склоне, 16.04.2021, ИСЗ WorldView-2.

На дне кратера до сентября 2017 г. наблюдалась лавовая “лепешка” темного цвета, округлой формы, диаметром около 230 м, в целом слабовыпуклая, состоящая из трех концентрически расположенных зон – центральной, промежуточной и краевой (рис. 3, *а*). Центральная и краевая зоны, судя по тени от их краев, были слегка приподняты (на 1–1,5 м). Краевая зона дна имела ширину 25–30 м и была покрыта сетью радиальных трещин, которые были распределены почти регулярно, с шагом 3–5 м. Центральная зона, диаметром около 100 м, в 2016 г. была густо и хаотично покрыта трещинами, в результате чего ее поверхность была отчасти похожа на вспененный материал бродящей жидкости. К трещинам, окаймляющим центральную зону, была приурочена часть фума-

рол. За пределами лавовой “лепешки”, между краевой зоной и стенками кратера была выражена транзитная зона, до 20–25 м шириной, светло-серого (местами – палево-желтоватого) цвета, с выходами парящих фумарол, усеянная обломками и глыбами породы.

#### ПОДЪЕМ ДНА КРАТЕРА

Спутниковые изображения 2018 и 2019 гг. (рис. 3, *б*, *в*) показали резкий подъем уровня дна кратера. Подъем начался, по-видимому, осенью 2017 г. Если на снимке ИСЗ WorldView-4 от 7 сентября 2017 г. ясно виден лавовый щит на дне и тень на большой глубине кратера, то на снимках WorldView-4 от 21 и 25 октября 2017 г. виден кра-

тер с предположительно изменившейся конфигурацией дна; вероятно, в этот период шел процесс заполнения кратера лавой. На снимках ИСЗ TERRA (MODIS) от 21 октября 2017 г. была выявлена термальная аномалия, которая (со слабыми парогазовыми выбросами с пеплом) отмечалась до середины ноября 2017 г. (Чибисова, Дегтерев, 2019). Эти проявления, по-видимому, были связаны именно с подъемом лавовой пробки. Состоявшееся изменение положения дна фиксируется на снимках ИСЗ WorldView-4 от 31 марта и 18 апреля 2018 г., Sentinel-2 от 4 апреля 2018 г.

Измерения нового высотного положения дна выполнены на северной и северо-восточной стенках кратера (стенки имеют, соответственно, южную и юго-западную экспозиции) (рис. 2, б). Они показали подъем на 140–145 м к октябрю 2018 г. и небольшой дополнительный подъем (по-видимому, не более 5–10 м) к сентябрю 2019 г. В результате кратер оказался заполнен примерно на 3/4 высоты (относительно положения дна в период 2009–2017 г.), причем перекрытой оказалась основная часть с наиболее крутыми субвертикальными стенками. Частично перекрытой оказалась и выемка в северо-западной части кратера. Заполненный объем можно приблизительно оценить как объем усеченного конуса высотой 150 м, имеющего нижний диаметр 240 м и верхний — 330 м; он равен около 10 млн м<sup>3</sup>.

На снимке от 5 октября 2018 г. (рис. 3, б) сквозь пары фумарол видно достаточно плоское дно, покрытое рыхлым обломочным материалом. Короткая тень от приподнятого юго-восточного края кратера показывает глубину около 60 м относительно кромки. Далее, по направлению к центру кратера, виден уступ, с падением около 15–20 м. В центральной части дно (возможно, слабоогнутое) испещрено углублениями овальной или округлой формы, до 20–30 м в поперечнике. Их глубина, определенная по тени, не превышает 3–6 м. Возможно, это структуры проседания в рыхлом материале, образовавшем толщу поверх лавовой пробки в ходе небольшого извержения. Оно произошло летом–осенью 2018 г. (Гирина и др. 2018). Фумаролы приурочены в основном к периферийной части дна, в полосе шириной до 30–40 м, примыкающей к стенкам кратера. Возможно, они отражают зону трещин в полосе напряжения, по которой происходит смещение дна.

На снимке от 7 сентября 2019 г. (рис. 3, в) зона фумарол отчетливо видна в краевой полосе на дне кратера. В центре кратера видна неправильно-округлая структура, в поперечнике около 80–100 м. Западную ее половину по дуге ограничивает вал рыхлых отложений шириной 30–40 м, с пологим внешним склоном и относительно крутой внутренней стенкой. Западная внутренняя стенка вала освещена солнцем, тени нет, но по деталям ре-

льефа можно предположить, что она имеет глубину не менее 10 м. Вероятно, структура в центре кратера — это частично засыпанный рыхлыми отложениями кратерный колодец. На изображении с ИСЗ Sentinel-2 от 28 сентября 2019 г. в этой части кратера обнаружена термальная зона (Global Volcanism Program, 2019).

### ДИНАМИКА ДНА КРАТЕРА И ПРИБЛИЖЕНИЕ НОВОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ

Периодическое изменение положения дна в течение последних 75 лет, начиная с сильного извержения вулкана 1946 г., изучено по данным аэрофотосъемки 1950–1980 гг., спутниковой съемки 1994–2021 гг., а также по наблюдениям исследователей и очевидцев, поднимавшихся к кратеру, включая их фотографии. В целом выявлено, что опускание дна кратера происходило трижды, после каждого сильного или существенного извержения 1946, 1976 и 2009 гг. Затем, соответственно, дно трижды поднималось: перед извержениями 1976, 2009 гг. и в настоящее время. При этом, если для новейшей ситуации выявлено, что дно кратера поднялось (в значительной мере) через 8 лет после извержения 2009 г., то в предшествующий период интервалы времени, в течение которых дно могло быть как опущено, так и поднято, превышали 20 лет. Так, согласно фото очевидцев, поднимавшихся на вершину вулкана в 1989 и в 2007 гг., дно кратера почти доходило до его кромки (рис. 2, а) и лишь через 20 лет после 1989 г. произошло сильное извержение.

В последние годы, в связи с подъемом дна кратера в 2017–2018 г., а также после него, наблюдается определенная активность вулкана (Гирина и др., 2019; Чибисова, Дегтерев, 2019; Global Volcanism Program, 2019, 2021). Осенью 2018 г. несколько раз происходили небольшие выбросы пепла, а в кратере была обнаружена термоаномалия (Global Volcanism Program, 2019). На снимке с ИСЗ Sentinel-2 от 20 января 2021 г. выявлено излияние лавы из центральной части кратера на расстояние около 400 м (Global Volcanism Program, 2021). По-видимому, лава частично заполнила кратер, после чего лавовый поток вытек из кратера на склон через трапецевидное понижение в северо-западном секторе, не полностью перекрытое в ходе поднятия дна в 2017–2019 гг. К 24 января 2021 г. поток достиг высоты ~800 м на северо-западном склоне, пройдя около 800–900 м от кромки кратера (снимок с ИСЗ WorldView-2). На 25 февраля 2021 г. видно, что поток прошел ~2000 м от кромки кратера, спустившись до высоты ~380 м (снимок с ИСЗ WorldView-3). Ширина потока в нижней части не превышает 100 м, при этом он, по-видимому, прошел по лавовому потоку 1976 г., продвинувшись ниже его языка на

~500 м. Объем лавы 2021 г. ~3 млн м<sup>3</sup>. После излияния в центре кратера виден темный контур диаметром ~50 м, вероятно, это жерло (снимок с ИСЗ WorldView-2 от 16 апреля 2021 г., рис. 3, з). Для вулкана Пик Сарычева в целом характерна сильная эксплозивная деятельность, сочетаемая с эпизодическими эксплозивно-эффузивными извержениями, такими как эруптивные события 1976 и 2009 г. Однако есть данные и об относительно спокойном излиянии лавы, произошедшем в 1878–1879 г. (Горшков, 1967). Аналогичное событие, по-видимому, произошло зимой 2021 г.

Динамика дна кратера, выявленная за минувшие 75 лет, показывает, что цикл “опускание—подъем дна” заканчивается масштабным извержением, опасным для населения, инфраструктуры и экосистем о. Матуа. События 1946 и 1976 гг. вызвали массовую эвакуацию людей с острова; в 2009 г. Матуа был необитаем (иначе эвакуация, по-видимому, также бы состоялась). Небольшие извержения, подобные произошедшим в 2018–2021 гг. (образование жерла, его эпизодическая проработка эксплозиями с выбросами пепла, заполнение лавой кратера и последующее излияние лавы за пределы кратера), являются, вероятно, лишь промежуточными эпизодами в цикле “опускание—подъем”. Такие события вряд ли могут быть предвестниками сильного извержения (при этом, возможно, они могут отложить его приближение). В отличие от них, поднятие дна кратера в 2017–2019 гг. (которое явно еще не завершилось), по-видимому, сигнализирует о подготовке вулкана к новому, потенциально разрушительному извержению. Эти сигналы могут быть важны для оценки вулканической опасности, учитывая, что для о. Матуа в последние годы появились новые проекты освоения.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарю А.К. Клитина за фотоснимки кратера 2007 г., М.Г. и А.Б. Белоусовых за конструктивные

замечания, а также А.Г. Лукьянова за разрешение использовать кадры его видеосъемки, выполненной с вертолета в 2016 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев В.Н., Шанцер А.Е., Хренов А.П. и др. Извержение вулкана Пик Сарычева в 1976 г. // Бюл. вулканол. станций. 1978. № 55. С. 35–40.

Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.В. Извержение вулкана Пик Сарычева в 2018 г. // Вестн. КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2019. № 1. Вып. 41. С. 12–14.

Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.

Гришин С.Ю. Воздействие на окружающую среду мощного извержения вулкана Пик Сарычева (Курильские острова, 2009 г.) по данным космической съемки // Исслед. Земли из Космоса. 2011. № 2. С. 92–96.

Гришин С.Ю., Мелекесцев И.В. Лавовые потоки (извержение 2009 г.) вулкана Пик Сарычева (центральные Курилы) // Вестн. КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2010. № 1. С. 232–239.

Чибисова М.В., Дегтерев А.В. Активность вулкана Пик Сарычева (о. Матуа, Средние Курилы) в 2017–2018 гг.: по спутниковым и визуальным данным // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 1. С. 144–148.

Miyagi Y. Earthquake and Volcano Monitoring by ALOS and its operation // 53th Intern. Workshop on Progress of Research for Disaster Mitigation of Earthquakes and Volcanic Eruptions in the North Pacific Region. Sapporo, Japan: Hokkaido Univ., 2010. P. 99–103.

Ural M., Ishizuka Y. Advantages and challenges of spaceborne remote sensing for Volcanic Explosivity Index (VEI): The 2009 eruption of Sarychev Peak on Matua Island, Kuril Islands, Russia // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2011.

Global Volcanism Program, 2019. Report on Sarychev Peak (Russia). / E. Venzke (ed.) // Bulletin of the Global Volcanism Network. Smithsonian Institution.

Global Volcanism Program, 2021. Report on Sarychev Peak (Russia). In: S.K. Sennert (ed.), Weekly Volcanic Activity Report, 20 January–26 January 2021. Smithsonian Institution and US Geological Survey.

[https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img\\_up/l\\_pan\\_sarychev\\_090622.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img_up/l_pan_sarychev_090622.htm) (обращение 26.04.2021).

## The Rise of the Bottom of the Crater of the Sarychev Peak Volcano (Matua Island, Kuriles) in 2017–2019, Revealed by Satellite Images, as a Precursor of a New Strong Eruption

S. Yu. Grishin

Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

The lava plug in the crater of the Sarychev Peak volcano (Kuril Islands) was carried away by explosions during a strong eruption in June 2009, after which the position of the crater bottom lowered sharply. Based on satellite images and images obtained during a flyby of the crater by helicopter in 2016, the level of the bottom subsidence was measured: about 190–220 m from the edge of the crater. The bottom was in a stable state until the fall of 2017, as identified by satellite images, after which it began to rise. As of autumn, 2019, the crater

bottom has risen by about 150 m. The volume of the crater, filled during the uplift, is about 10 million m<sup>3</sup>. The bottom rise/decrease cycles have occurred three times over the past ~75 years in connection with each strong (significant) eruption. The modern rise probably signals the volcano's preparation for a new, potentially dangerous eruptive event.

*Keywords:* volcanism, environmental dynamics, hazardous processes, monitoring, Kuril Islands

## REFERENCES

- Andreev V.N., Shancer A.E., Hrenov A.P. i dr.* Izverzhenie vulkana Pik Sarycheva v 1976 g. // Byul. vulkanol. stancij. 1978. № 55. S. 35–40.
- Girina O.A., Mel'nikov D.V., Manevich A.V.* Izverzhenie vulkana Pik Sarycheva v 2018 g. // Vestn. KRAUNC. Seriya Nauki o Zemle. 2019. № 1. Vyp. 41. S. 12–14.
- Gorshkov G.S.* Vulkanizm Kuril'skoj ostrovnnoj dugi. M.: Nauka, 1967. 288 s.
- Grishin S.Yu.* Vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredu moshchnogo izverzheniya vulkana Pik Sarycheva (Kuril'skie ostrova, 2009 g.) po dannym kosmicheskoy s''emki // Issledovanie Zemli iz Kosmosa. 2011. № 2. S. 92–96.
- Grishin S.Yu., Melekescev I.V.* Lavovye potoki (izverzhenie 2009 g.) vulkana Pik Sarycheva (central'nye Kurily) // Vestn. KRAUNC. Seriya Nauki o Zemle. 2010. № 1. S. 232–239.
- Chibisova M.V., Degterev A.V.* Aktivnost' vulkana Pik Sarycheva (o. Matua, Srednie Kurily) v 2017–2018 gg.: po sputnikovym i vizual'nym dannym. Geosistemy perekhodnyh zon. 2019. T. 3. № 1. S. 144–148.
- Miyagi Y.* Earthquake and Volcano Monitoring by ALOS and its operation // 53th Intern. Workshop on Progress of Research for Disaster Mitigation of Earthquakes and Volcanic Eruptions in the North Pacific Region. Sapporo, Japan: Hokkaido Univ., 2010. P. 99–103.
- Urail M., Ishizuka Y.* Advantages and challenges of spaceborne remote sensing for Volcanic Explosivity Index (VEI): The 2009 eruption of Sarychev Peak on Matua Island, Kuril Islands, Russia // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2011. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2011.07.010.
- Global Volcanism Program, 2019. Report on Sarychev Peak (Russia) / E. Venzke (ed.) // Bulletin of the Global Volcanism Network. 44: 11. Smithsonian Institution.
- Global Volcanism Program, 2021. Report on Sarychev Peak (Russia). In: S.K. Sennert (ed.), Weekly Volcanic Activity Report, 20 January–26 January 2021. Smithsonian Institution and US Geological Survey.
- [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img\\_up/l\\_pan\\_sarychev\\_090622.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img_up/l_pan_sarychev_090622.htm) (26.04.2021).