

Непрерывный мультиспутниковый мониторинг вулканов для обнаружения извержений на примере бокового прорыва вулкана Ключевской в феврале 2021 г.

О. А. Гирина¹, Д. В. Мельников¹, Е. А. Лупян²,
А. Г. Маневич¹, А. А. Сорокин³, Л. С. Крамарева⁴

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия
E-mail: girina@kscnet.ru*

² *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

³ *Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия*

⁴ *Дальневосточный центр «НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия*

Вулкан Ключевской — один из наиболее активных вулканов мира. В 2019–2021 гг. произошло два вершинных взрывно-эффузивных извержений вулкана с перерывом в 88 дней. 17 февраля 2021 г., спустя 9 дней после окончания вершинного извержения, на высоте 2,8 км н. у. м. на северо-западном склоне вулкана появился боковой прорыв. Его обнаружение произошло благодаря непрерывному мониторингу вулкана с помощью спутниковых данных низкого, среднего и высокого разрешения, доступных в информационной системе «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView, <http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru>). Термальная аномалия в районе прорыва была обнаружена по спутниковым снимкам среднего разрешения, подтверждение извержения выполнено по снимкам высокого разрешения, динамика развития прорыва — по снимкам низкого разрешения (Himawari-8). В районе прорыва образовались две трещины, из которых вытекали лавовые потоки. К 21–22 февраля лавовые потоки начали внедряться в ледник Эрмана. Грязевые потоки от фронтов лавовых потоков по р. Крутенькой прошли в 7 км от пос. Ключи в направлении к р. Камчатке. К 28 февраля нижняя трещина прекратила работу, но извержение бокового прорыва активно продолжается: растёт шлаковый конус, увеличивается площадь лавового поля. Прорыв 2021 г. назван именем чл.-корр. АН СССР Г. С. Горшкова.

Ключевые слова: вулкан, Ключевской, извержение, боковой прорыв, видеоданные, спутниковый мониторинг, VolSatView, Камчатка

Одобрена к печати: 11.03.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-261-267

Введение

Ключевской — один из активнейших вулканов мира, его продуктивность достигает в среднем 60 млн т в год (Khrenov et al., 1991). Вулкан относится к Ключевской группе вулканов, расположен в 30 км от пос. Ключи на правом берегу р. Камчатки, в 360 км от Петропавловска-Камчатского.

Эруптивная деятельность вулкана известна с 1697 г. (Гирина и др., 2018; Озеров, 2019; Пийп, 1956; Ozerov et al., 2020). Для вулкана характерны как вершинные взрывно-эффузивные извержения, так и боковые прорывы на высотах от 500 до 4500 м над уровнем моря (н. у. м.) с образованием от одного до десяти шлаковых конусов высотой до 100 м и протяжённостью лавовых потоков до 11 км от центра извержения (Озеров, 2019; Пийп, 1956; Khrenov et al., 1991; Ozerov et al., 2020). Предыдущий боковой прорыв, образовавшийся в 2016 г. в Апахончичском жёлобе в привершинной части вулкана, носит имя вулканолога Е. К. Мархина (Giрина et al., 2019).

Визуальные наблюдения за Ключевским осуществляются с 1 сентября 1935 г., с помощью видеокамер — с 9 октября 2000 г. (Гирина и др., 2018; Sorokin et al., 2016). В настоящее время информацию о Ключевском можно получить с пяти видеокамер (более 3000 видеоизображений

в сутки). Спутниковый мониторинг вулкана проводится учёными Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (KVERT — Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН) с 2002 г. (Гирина и др., 2018; Gordeev, Girina, 2014). С 2014 г. он выполняется с помощью информационной системы (ИС) «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView, <http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru>) (Гирина и др., 2018, 2019; Gordeev et al., 2016). Для мониторинга вулканов в VolSatView имеются оперативно обновляемые данные среднего разрешения спутниковых систем: NOAA-18/19 (прибор AVHRR — *англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer), Terra и Aqua (MODIS — *англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), Suomi NPP (*англ.* National Polar-orbiting Partnership) и JPSS-1 (*англ.* Joint Polar Satellite System) (VIIRS — *англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), Sentinel-3A/B (SLSTR — *англ.* Sea and Land Surface Temperature Radiometer). С 15 марта 2016 г. в ИС поступают данные с геостационарного спутника Himawari-8 (прибор АИИ — *англ.* Advanced Himawari Imager), обновляемые каждые 10 мин. Детальное изучение извержений в VolSatView возможно с помощью спутников Landsat-7 (ETM+ — *англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus), Landsat-8 (OLI — *англ.* Operational Land Imager и TIRS — *англ.* Thermal Infrared Sensor), EO-1 (*англ.* Earth Observing One Mission) (Hyperion), Sentinel-2B (MSI — *англ.* MultiSpectral Instrument) и др. (Гирина и др., 2018; Лупян и др., 2019). В настоящее время в рамках мониторинга влк. Ключевской доступны для анализа около 200 спутниковых снимков в сутки.

Побочный прорыв Ключевского в 2021 г.

Вершинное эксплозивно-эффузивное извержение вулкана происходило с 30 сентября 2020 г. по 8 февраля 2021 г. Казалось, что вулкан успокоился (температура термальной аномалии в районе вершины постепенно снижалась), но 17 февраля на северо-западном склоне вулкана примерно на высоте 2,8 км н.у.м. на спутниковых снимках среднего разрешения была обнаружена новая термальная аномалия, температура и размер которой начали ежедневно повышаться. Например, хотя наблюдения за извержением и осложняла циклоническая активность в районе Камчатки, выяснено, что температура аномалии на склоне вулкана начала повышаться с 17 февраля, разность значений температуры аномалии и фона в районе прорыва к 18 февраля повысилась до 82,9 °С (в 15:36 GMT на снимке JPSS-1), а к 20 февраля — до 112,2 °С (в 16:39 GMT на снимке JPSS-1). Стало ясно, что произошёл прорыв лавы на склоне вулкана, об этом 21 февраля была опубликована первая информация на сайте KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2021-28>).

19 февраля на спутниковом снимке Landsat-7 было отмечено и затем 21 февраля на снимке Sentinel-2A в ИС VolSatView подтверждено, что прорыв имеет два центра: более мощный верхний и слабый нижний (*рис. 1*, см. с. 263). 18 февраля на спутниковом снимке Sentinel-2A в 00:30 GMT в районе прорыва отмечалась повышенная парогазовая эмиссия (см. *рис. 1а*).

Сразу после образования двух трещин из них начала изливаться лава, на верхней трещине стал формироваться шлако-лавовый конус. К 23 февраля лавовые потоки растопили значительное количество снега и льда, и грязевые потоки полосой в 400 м спускались в районе р. Крутенькой по склону вулкана. Грязевые потоки по этой реке прошли в 7 км от пос. Ключи. 21–22 февраля основные лавовые потоки начали внедряться в ледник Эрмана — самый мощный ледник Ключевской группы вулканов, занимающий плато между вулканами Ключевской, Камень, Ушковский и Крестовский и спускающийся с перевала крупным языком на 11 км в сторону р. Камчатки.

Площадь лавовых потоков, оценённая в ИС VolSatView по снимкам Sentinel-2, составляла: 21 февраля — 0,5 км², 23 февраля — 0,91 км², 26 февраля — 1,36 км² (см. *рис. 1*). На протяжении 10 дней активность извержения постоянно росла: увеличивалась площадь лавового поля, подрастал шлаковый конус на верхней трещине — на спутниковых снимках отмечалась крупная высокотемпературная термальная аномалия (см. *рис. 1*).

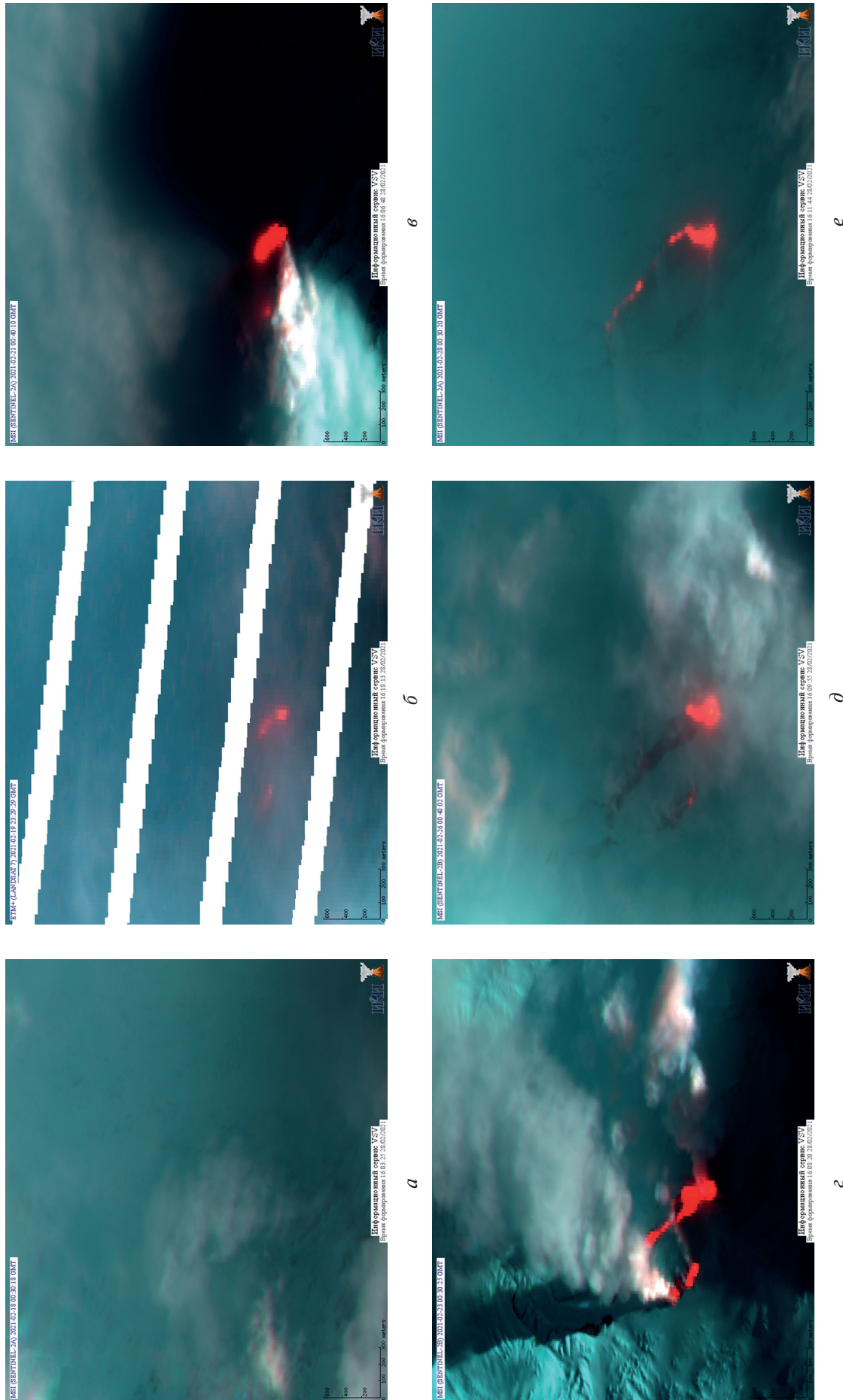


Рис. 1. Район бокового прорыва на северо-западном склоне влк. Ключевской на высоте 2,8 км н. у. м. вблизи ледника Эрмана на спутниковых снимках из ИС VoISatView в 2021 г.: *a* — парогазовая эмиссия в районе прорыва на Sentinel-2A, 18.02.2021, 00:30 GMT; две трещины прорыва на данных: *б* — Landsat-7, 19.02.2021, 23:29 GMT; *в* — Sentinel-2A, 21.02.2021, 00:40 GMT; *г* — Sentinel-2B, 23.02.2021, 00:30 GMT; *д* — Sentinel-2B, 26.02.2021, 00:40 GMT; *е* — Sentinel-2A, 28.02.2021, 00:30 GMT

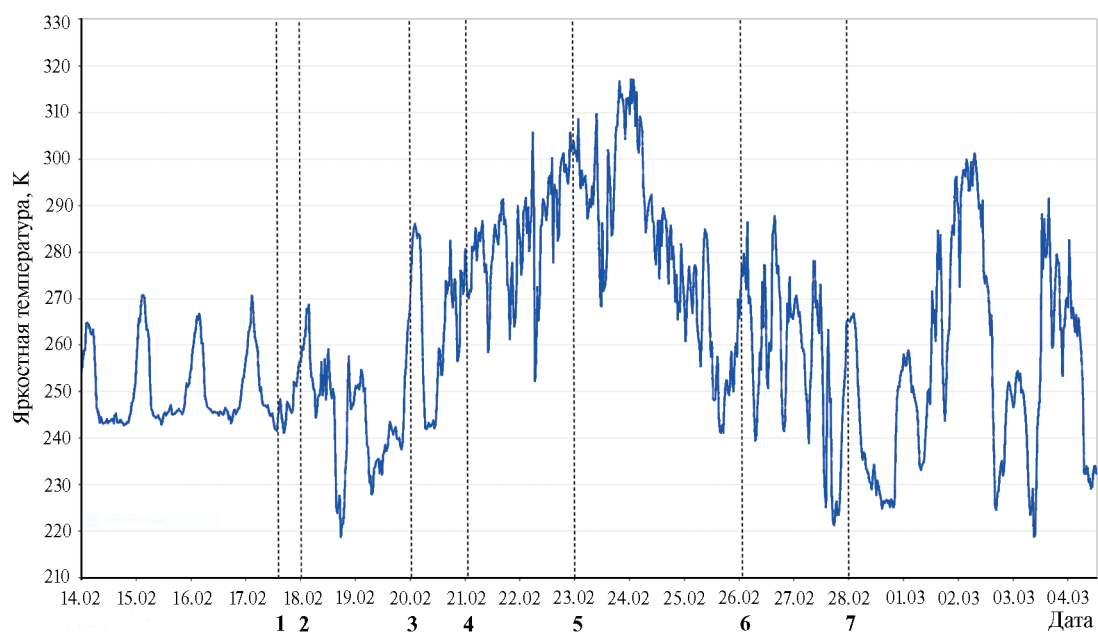


Рис. 2. Изменение яркостной температуры в канале 3,9 мкм прибора АНІ спутника Himawari-8 в районе бокового прорыва влк. Ключевской с 15 февраля по 4 марта 2021 г. 1 — первые признаки изменения температуры в зоне прорыва; 2 — парогазовая эмиссия в районе прорыва на Sentinel-2A, 18.02.2021, 00:30 GMT (здесь и далее см. рис. 1); две трещины прорыва на данных: 3 — Landsat-7, 19.02.2021, 23:29 GMT; 4 — Sentinel-2A, 21.02.2021, 00:40 GMT; 5 — Sentinel-2B, 23.02.2021, 00:30 GMT; 6 — Sentinel-2B, 26.02.2021, 00:40 GMT; 7 — Sentinel-2A, 28.02.2021, 00:30 GMT (продолжается работа верхней трещины прорыва)

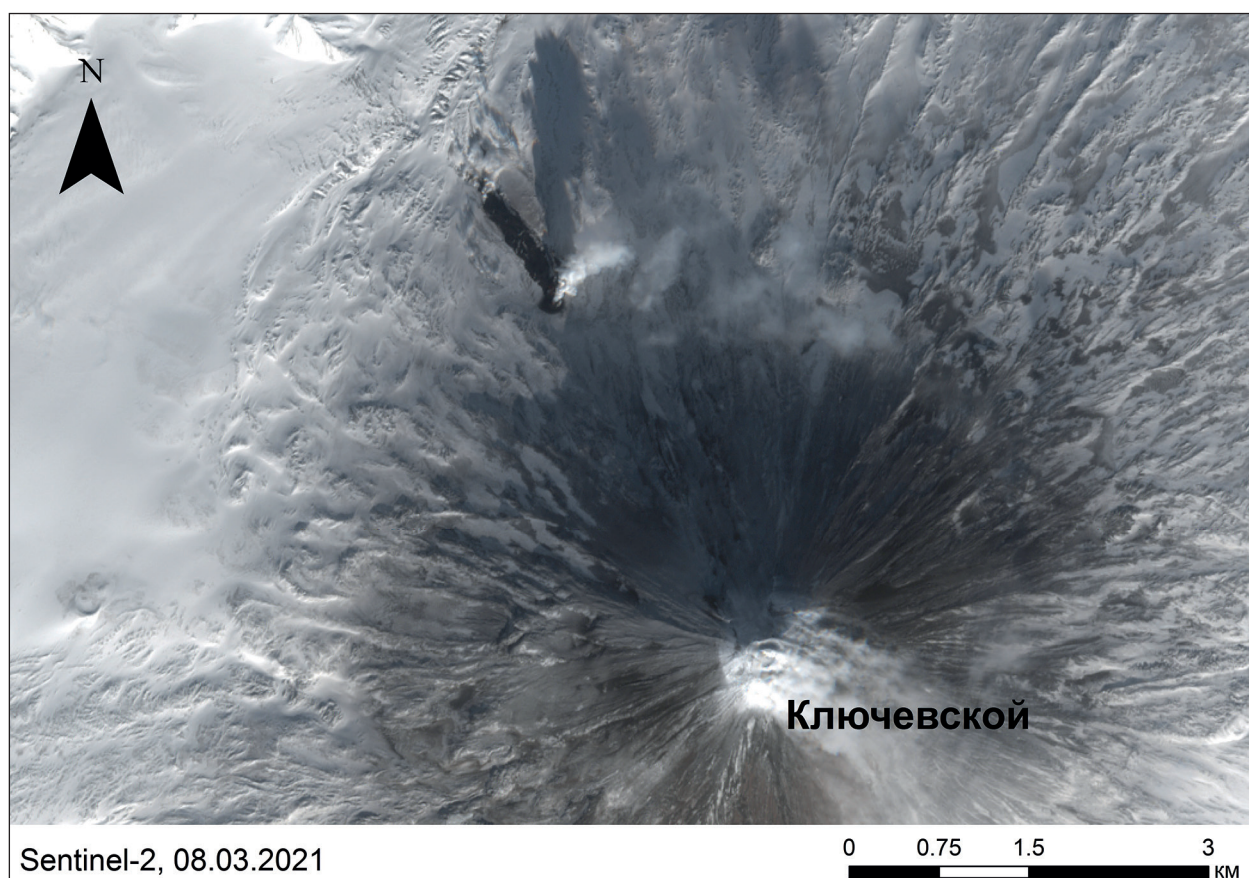


Рис. 3. Боковой прорыв имени чл.-корр. АН СССР Г. С. Горшкова и его лавовый поток на северо-западном склоне влк. Ключевской 8 марта 2021 г.

Динамика активности извержения бокового прорыва влк. Ключевской хорошо прослеживается по изменению яркостной температуры в точке постоянных наблюдений со спутника Himawari-8 (рис. 2, см. с. 264). Хотя 19 и 26–28 февраля вулкан накрывала непогода, яркостная температура аномалии быстро росла вплоть до 24 февраля и оставалась достаточно высокой в другие дни. Когда погода наладилась (2 марта), яркостная температура уменьшилась на 20 К относительно максимальной величины 24 февраля — 320 К и в дальнейшем понемногу снижалась (см. рис. 2). Это хорошо согласуется со спутниковыми данными высокого разрешения: изначальная высокоинтенсивная эффузивная деятельность обеих трещин (истечение лавовых потоков); фонтанирование лавы на верхней кромке крупной трещины, благодаря которому шлак и вулканические бомбы наращивали шлаковый конус; постепенное снижение расхода лавы из нижней трещины и прекращение её работы к 28 февраля; снижение теплового потока с поверхности лавового поля в связи с его некоторым остыванием (см. рис. 1, 2).

2 марта на изображениях с видеокамер наблюдался парогазовый столб над верхним шлако-лавовым конусом прорыва и фреатические взрывы над фронтом его лавового потока, внедрявшегося в ледник Эрмана. Пепел при фреатических взрывах поднимался до 3,5–4,0 км н.у.м. 2 марта вулканологи, в том числе соавтор статьи Д. Мельников, побывали на прорыве. Высота шлакового конуса достигала 50 м, длина агломератового (типа а-а) лавового потока от конуса до ледника Эрмана составляла 1,2 км.

По предложению директора ИВиС ДВО РАН д-ра геол.-минерал. наук А.Ю. Озерова, прорыв назван именем чл.-корр. АН СССР Г.С. Горшкова (<http://www.kscnet.ru/ivs/memory/gorshkov/>) — вулканолога, который впервые в мировой практике определил глубину магматического очага под вулканами Ключевской группы. Извержение бокового прорыва активно продолжается (рис. 3, см. с. 264).

Обнаружение побочного извержения влк. Ключевской стало возможным благодаря ежедневному мониторингу вулкана с помощью спутниковых данных в ИС VolSatView и видеонаблюдений. Работа ИС VolSatView осуществляется благодаря ресурсам Дальневосточного центра НИЦ «Планета», Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (при поддержке Минобрнауки РФ, Институт космических исследований РАН, тема «Мониторинг», госрегистрация № 01.20.0.2.00164) и ЦКП «Центр данных ДВО РАН» (Вычислительный центр ДВО РАН) (Лупян и др., 2014, 2019; Sorokin et al., 2017). Видеомониторинг вулканов Камчатки проводится с помощью алгоритмов и компьютерной системы, разработанных в том числе при поддержке научного проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-37-70008.

Литература

1. Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Мельников Д.В., Романова И.М., Кашицкий А.В., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П., Маневич А.Г., Крамарева Л.С. Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. 192 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37061627>.
2. Гирина О.А., Лупян Е.А., Мельников Д.В., Кашицкий А.В., Уваров И.А., Бриль А.А., Константинова А.М., Бурцев М.А., Маневич А.Г., Гордеев Е.И., Крамарева Л.С., Сорокин А.А., Мальковский С.И., Королев С.П. Создание и развитие информационной системы «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 249–265. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265.
3. Лупян Е.А., Милехин О.Е., Антонов В.Н., Крамарева Л.С., Бурцев М.А., Балашов И.В., Толпин В.А., Соловьев В.И. Система работы с объединенными информационными ресурсами, получаемыми на основе спутниковых данных в центрах НИЦ «Планета» // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 89–97.
4. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг»)

- // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. *Озеров А. Ю.* Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. М.: Геос, 2019. 306 с.
 6. *Пуйн Б. И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Тр. Лаб. вулканологии. 1956. Вып. 11. 311 с.
 7. *Girina O. A., Manevich A. G., Melnikov D. V., Nuzhdaev A. A., Petrova E. G.* The 2016 Eruptions in Kamchatka and on the North Kuril Islands: The Hazard to Aviation // *J. Volcanology and Seismology*. 2019. V. 13. No. 3. P. 157–171. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0742046319030047>.
 8. *Gordeev E. I., Girina O. A.* Volcanoes and their hazard to aviation // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2014. V. 84. No. 1. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1019331614010079>.
 9. *Gordeev E. I., Girina O. A., Lupyayev E. A., Sorokin A. A., Kramareva L. S., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Uvarov I. A., Burtsev M. A., Romanova I. M., Melnikov D. V., Manevich A. G., Korolev S. P., Verkhoturov A. L.* The VolSatView information system for Monitoring the Volcanic Activity in Kamchatka and on the Kuril Islands // *J. Volcanology and Seismology*. 2016. V. 10. No. 6. P. 382–394. DOI: <https://doi.org/10.1134/S074204631606004X>.
 10. *Khrenov A. P., Dvigalo V. N., Kirsanov I. T., Fedotov S. A., Gorelchik V. I., Zharinov N. A.* Klyuchevskoy Volcano // *Active Volcanoes of Kamchatka*. М.: Nauka, 1991. In 2 vol. V. 1. P. 106–153.
 11. *Ozerov A. Yu., Girina O. A., Zharinov N. A., Belousov A. B., Demyanchuk Yu. V.* Eruptions in the Northern Group of Volcanoes, in Kamchatka, during the Early 21st Century // *J. Volcanology and Seismology*. 2020. V. 14. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0742046320010054>.
 12. *Sorokin A., Korolev S., Romanova I., Girina O., Urmanov I.* The Kamchatka Volcano Video Monitoring System // *Proc. 6th Intern. Workshop on Computer Science and Engineering (WCSE 2016)*. Tokyo, Japan. 2016. P. 734–737.
 13. *Sorokin A. A., Makogonov S. I., Korolev S. P.* The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia // *Scientific and Technical Information Processing*. 2017. V. 4. P. 302–304.

Continuous multi-satellite monitoring of volcanoes to detect eruptions using the example of Klyuchevskoy volcano flank eruption in February 2021

O. A. Girina¹, D. V. Melnikov¹, E. A. Loupian²,
A. G. Manevich¹, A. A. Sorokin³, L. S. Kramareva⁴

¹ *Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS
Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia
E-mail: girina@kscnet.ru*

² *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

³ *Computing Center FEB RAS, Khabarovsk 680000, Russia*

⁴ *Far Eastern Center of SRC “Planeta”, Khabarovsk 680000, Russia*

Klyuchevskoy Volcano is one of the most active volcanoes in the world. In 2019–2021, there were two summit explosive-effusive volcanic eruptions with an interval of 88 days. On February 17, 2021, 9 days after the end of the second summit eruption, at an altitude of 2.8 km a. s. l. a lateral eruption appeared on the northwestern slope of the volcano. Its discovery was due to continuous monitoring of the volcano using satellite data of low, medium and high resolution available in the information system “Remote monitoring of the activity of the volcanoes of the Kamchatka and the Kuriles” (VolSatView, <http://kamchatka.volcanoes.smlab.ru>). The thermal anomaly in the area of the lateral break was detected using medium-resolution satellite images, the eruption was confirmed using high-resolution images, the dynamics of the break development — using low-resolution images (Himawari-8). Two fissures formed on the volcanic flank, from which lava flows effuse. By 21–22 February, lava flows began to intrude into the Erman glacier. Mud flows from the fronts of lava flows along the Krutenkaya River passed 7 km from the Klyuchi Village in the direction of the Kamchatka River. By 28 February, the lower fissure stopped working, but the eruption of the lateral break is actively continuing: the

cinder cone is growing; the area of the lava field is increasing. The 2021 lateral break is named after Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences G. S. Gorshkov.

Keywords: volcano, Klyuchevskoy, lateral break, video data, satellite monitoring, VolSatView, Kamchatka

Accepted: 11.03.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-261-267

References

1. Girina O. A., Loupian E. A., Sorokin A. A., Melnikov D. V., Romanova I. M., Kashnitskii A. V., Uvarov I. A., Malkovsky S. I., Korolev S. P., Manevich A. G., Kramareva L. S., *Kompleksnyi monitoring eksplozivnykh izverzhenii vulkanov Kamchatki* (Comprehensive monitoring of explosive volcanic eruptions of kamchatka), Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS DVO RAN, 2018, 192 p., available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37061627>.
2. Girina O. A., Loupian E. A., Melnikov D. V., Kashnitskii A. V., Uvarov I. A., Bril A. A., Konstantinova A. M., Burtsev M. A., Manevich A. G., Gordeev E. I., Kramareva L. S., Sorokin A. A., Malkovsky S. I., Korolev S. P., Sozdanie i razvitie informatsionnoi sistemy "Distsionnyi monitoring aktivnosti vulkanov Kamchatki i Kuril" (Creation and development of the information system "Remote Monitoring of Kamchatka and Kuril Islands Volcanic Activity"), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 249–265, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265.
3. Loupian E. A., Milekhin O. E., Antonov V. N., Kramareva L. S., Burtsev M. A., Balashov I. V., Tolpin V. A., Soloviev V. I., Sistema raboty s ob'edinennymi informatsionnymi resursami, poluchaemymi na osnove sputnikovyykh dannykh v tseentrakh NITs "Planeta" (System of operation of joint information resources based on satellite data in the Planeta Research Centers for Space Hydrometeorology), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, No. 12, pp. 89–97.
4. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Opyt ekspluatatsii i razvitiya tsentra kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovyykh dannykh (TsKP "IKI-Monitoring") (Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. Ozerov A. Yu., *Klyuchevskoi vulkan: veshchestvo, dinamika, model* (Klyuchevskoy volcano: rocks, dynamics, model), Moscow: Geos, 2019, 306 p.
6. Piip B. I., Klyuchevskaya sopka i ee izverzheniya v 1944–1945 gg. i v proshlom (Klyuchevskaya Sopka and its eruptions in 1944–1945 and in the past), *Trudy Laboratorii Vulkanologii*, 1956, Vol. 11, 311 p.
7. Girina O. A., Manevich A. G., Melnikov D. V., Nuzhdaev A. A., Petrova E. G., The 2016 Eruptions in Kamchatka and on the North Kuril Islands: The Hazard to Aviation, *J. Volcanology and Seismology*, 2019, Vol. 13, No. 3, pp. 157–171, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0742046319030047>.
8. Gordeev E. I., Girina O. A., Volcanoes and their hazard to aviation, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2014, Vol. 84, No. 1, pp. 1–8, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1019331614010079>.
9. Gordeev E. I., Girina O. A., Loupian E. A., Sorokin A. A., Kramareva L. S., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Uvarov I. A., Burtsev M. A., Romanova I. M., Melnikov D. V., Manevich A. G., Korolev S. P., Verkhoturov A. L., The VolSatView information system for Monitoring the Volcanic Activity in Kamchatka and on the Kuril Islands, *J. Volcanology and Seismology*, 2016, Vol. 10, No. 6, pp. 382–394, DOI: <https://doi.org/10.1134/S074204631606004X>.
10. Khrenov A. P., Dvigalo V. N., Kirsanov I. T., Fedotov S. A., Gorel'chik V. I., Zharinov N. A., Klyuchevskoy Volcano, *Active Volcanoes of Kamchatka*, Moscow: Nauka, 1991, in 2 Vol., Vol. 1, pp. 106–153.
11. Ozerov A. Yu., Girina O. A., Zharinov N. A., Belousov A. B., Demyanchuk Yu. V., Eruptions in the Northern Group of Volcanoes, in Kamchatka, during the Early 21st Century, *J. Volcanology and Seismology*, 2020, Vol. 14, pp. 1–17, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0742046320010054>.
12. Sorokin A., Korolev S., Romanova I., Girina O., Urmanov I., The Kamchatka Volcano Video Monitoring System, *Proc. 6th Intern. Workshop on Computer Science and Engineering (WCSE 2016)*, Tokyo, Japan, 2016, pp. 734–737.
13. Sorokin A. A., Makogonov S. I., Korolev S. P., The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia, *Scientific and Technical Information Processing*, 2017, Vol. 4, pp. 302–304.