

Дистанционный мониторинг вершинного и побочного извержений вулкана Ключевской (Камчатка) в 2020–2021 гг.

О. А. Гирина¹, Е. А. Лупян², А. Г. Маневич¹, Д. В. Мельников¹, А. А. Сорокин³,
Л. С. Крамарева⁴, И. М. Романова¹, А. А. Нуждаев¹, И. А. Уваров²,
С. И. Мальковский³, С. П. Королев³

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 2020–2021 гг. вершинное эксплозивно-эффузивное извержение вулкана продолжалось 4 мес, затем, после перерыва в 9 дней, на северо-западном склоне вулкана произошёл боковой прорыв, работавший в течение месяца. Вершинное эксплозивное извержение проявлялось преимущественно в стромболианской и изредка в вулканской активности. Эксплозии поднимали пепел до 8 км над уровнем моря, пепловые шлейфы перемещались до 500 км в различных направлениях от вулкана. Эффузивная фаза извержения началась 4 октября 2020 г. и продолжалась до окончания извержения, лавовые потоки двигались по Апахончичскому и Козыревскому вулcano-тектоническим желобам. Перемещение лавовых потоков по Апахончичскому жёлобу часто сопровождалось крупными обвалами тефры с его бортов, пепел при этом поднимался до 9,6 км над уровнем моря. Боковой прорыв представлял собой образование двух трещин на северо-западном склоне вулкана, заполнившихся лавой, и формирование в верхней части западной трещины шлакового конуса. Лавовый поток протянулся на 1,2 км, грязевой поток — на 30 км. Детальное описание хода извержения стало возможным благодаря мониторингу вулкана в реальном времени с помощью различных спутниковых данных в информационной системе «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView, <http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru>) и видеонаблюдений.

Ключевые слова: вулкан, Ключевской, Камчатка, извержение, видеонаблюдения, спутниковый мониторинг, VolSatView, KVERT

Одобрена к печати: 01.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-153-161

Введение

Ключевской — один из активнейших вулканов мира, является типичным стратовулканом с конусом правильной формы (*рис. 1*, см. с. 154), сложенным лавовыми потоками и пирокластическим материалом базальтового и андезибазальтового состава, его продуктивность достигает в среднем 60 млн т в год (Пийп, 1956; Khrenov et al., 1991). Вершинный кратер вулкана диаметром около 700 м постоянно меняет свою морфологию как во время извержений (различная глубина кратера, наличие в нём разного количества центров выноса магматического вещества), так и в периоды покоя (отток магмы приводит к формированию глубокого кратера). Вулкан относится к Ключевской группе вулканов, расположен в 30 км от пос. Ключи на правом берегу р. Камчатка, в 360 км от г. Петропавловска-Камчатского.

Активность вулкана представлена эксплозивными (стромболианского и вулканского типа) и эксплозивно-эффузивными извержениями продолжительностью от нескольких месяцев до полутора лет, сведения о которых известны с 1697 г. (Гирина и др., 2018; Озеров, 2019; Пийп, 1956; Ozerov et al., 2020). Для вулкана характерны как вершинные извержения с формированием внутри кратера до двух шлаковых конусов высотой до 50 м и лавовых потоков на различных его склонах (преимущественно в Крестовском, Апахончичском или

Козыревском желобах) протяжённостью до 3,5 км, так и боковые прорывы на высотах от 500 до 4500 м н. у. м. (над уровнем моря) 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).



Рис. 1. Эксплозивно-эффузивное извержение влк. Ключевской в 2020–2021 гг. по состоянию на 24 декабря 2020 г.: стромболианская активность — фонтан лавы над шлаковым конусом внутри кратера вулкана; движение лавового потока по Козыревскому жёлобу на юго-западном склоне вулкана. Фото Ю. Демянчука

Ключевской постоянно сейсмически активен. Между извержениями основные сейсмические события сосредоточены на глубинах около 20–35 км под вулканом. Во время подготовки извержений наблюдается миграция очагов вулканических землетрясений снизу вверх — в постройки вулкана, а при ослаблении вулканической активности отмечается обратная миграция землетрясений — сверху вниз на уровень глубинного очага (Горельчик, Гарбузова, 2001). Непосредственный вынос вещества из кратера вулкана характеризуется вулканическим дрожанием (Токарев, 1981).

Визуальные наблюдения за Ключевским осуществляются с 1 сентября 1935 г., с помощью пяти видеокамер — с 9 октября 2000 г. (Гирина и др., 2018; Sorokin et al., 2016). Спутниковый мониторинг вулкана проводится учёными Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (*англ.* Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team — KVERT) Института вулканологии и сейсмологии (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 и низкого разрешения спутниковых систем: NOAA-18/19 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США), Terra и Aqua,

Suomi NPP (англ. National Polar-orbiting Partnership) и JPSS-1 (англ. Joint Polar Satellite System), Sentinel-3A/B, Himawari-8. В настоящее время для мониторинга влк. Ключевской доступно более 200 спутниковых снимков в сутки. Детальное изучение событий и продуктов извержения вулкана в VolSatView проводилось с помощью снимков со спутников Landsat-7/8, «Канопус-В», «Ресурс-1/2», EO-1 (англ. Earth Observing-1), Sentinel-2B.

Предыдущее вершинное эксплозивно-эффузивное извержение влк. Ключевской продолжалось с 1 ноября 2019 г. по 3 июля 2020 г., боковой прорыв в Апахончичском жёлобе в привершинной части вулкана действовал с 26 апреля по 6 ноября 2016 г. (Гирина и др., 2021а, б; Озеров и др., 2021; Girina et al., 2019).

Извержение вулкана Ключевской в 2020–2021 гг.

Новое вершинное извержение вулкана началось 30 сентября 2020 г. и закончилось 8 февраля 2021 г. 30 сентября было отмечено резкое повышение температуры термальной аномалии в районе кратера вулкана. С этого дня и в течение всего извержения непрерывно наблюдалась активность стромболианского типа (см. рис. 1). Разность температур термальной аномалии и фона постоянно была высокой и достигала 127 °C (рис. 2).

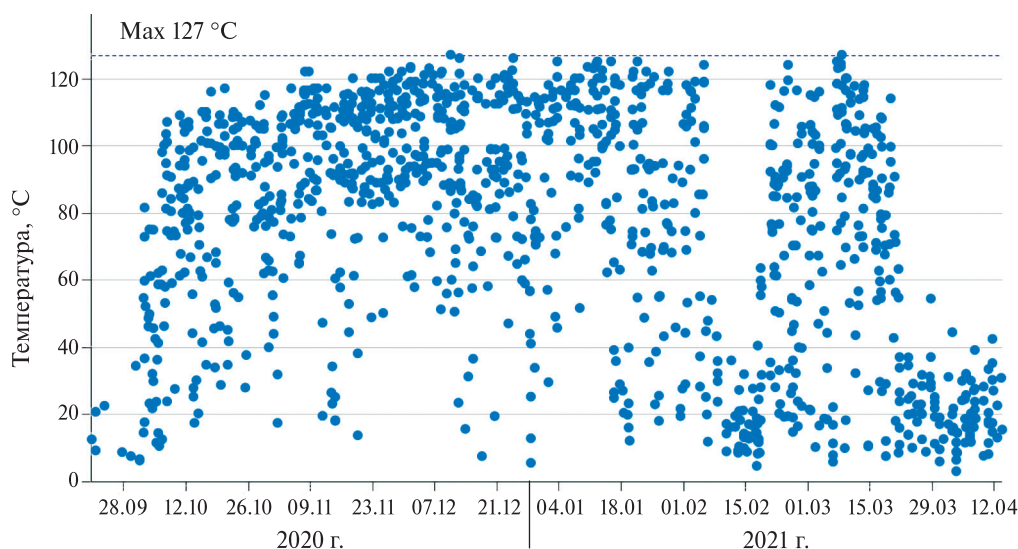


Рис. 2. Изменение величины разницы температуры термальной аномалии и фона влк. Ключевской в течение вершинного извержения 2020–2021 гг. и бокового прорыва 2021 г. по данным обработки спутниковой информации среднего разрешения учёными KVERT в ИС VolSatView

С 4 октября по Апахончичскому жёлобу на юго-восточном склоне вулкана начал двигаться лавовый поток, по состоянию на 10 ноября 2020 г. его длина, измеренная в ИС VolSatView по снимкам Sentinel-2B, составляла 2,8 км.

На фоне постоянной парогазовой деятельности вулкана с 8 октября время от времени начала проявляться активность вулканского типа — наблюдался вынос пепла из вулкана преимущественно до 6 км н. у. м. (рис. 3, см. с. 156), парогазовые шлейфы, содержавшие различное количество пепла, протяжённостью до 350 км отмечались на спутниковых снимках: 3 дня в октябре (8, 9, 18), 15 дней в ноябре (6–9, 16–21, 23–24, 26, 28, 29), 14 дней в декабре (2–4, 6, 7, 13, 19, 21–27), 7 дней в январе (2, 6–7, 16, 18, 24, 29) и 3 дня в феврале (1, 4, 7) (рис. 4а, см. с. 156). В основном в течение извержения пепловые шлейфы перемещались на восток и северо-восток от вулкана (рис. 4б). 18–19 ноября 2020 г. и 18 января 2021 г. наблюдалось усиление эксплозивной активности вулкана — пепловые облака поднимались до 7–7,5 км н. у. м. (см. рис. 3). Например, согласно спутниковым данным (JPSS-1, 15m16), 18 января в 16:15 GMT (англ. Greenwich Mean Time) пепловое облако размером 190×170 км находилось в 490 км на запад от вулкана (см. рис. 4).

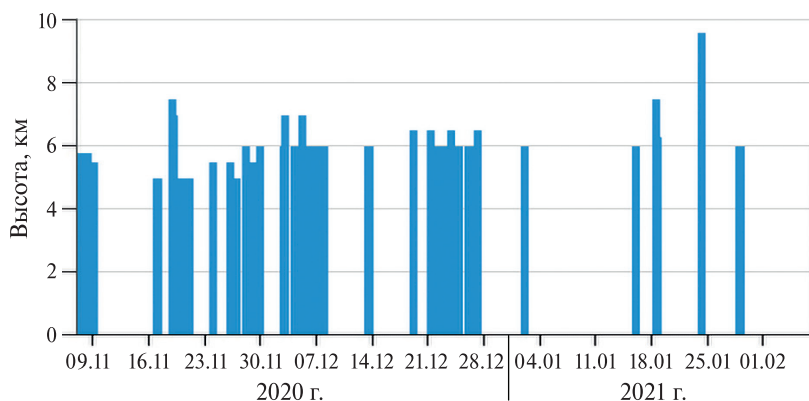


Рис. 3. Высота подъёма пепловых шлейфов влк. Ключевской во время извержения 2020–2021 гг. Данные из ИС KVERT

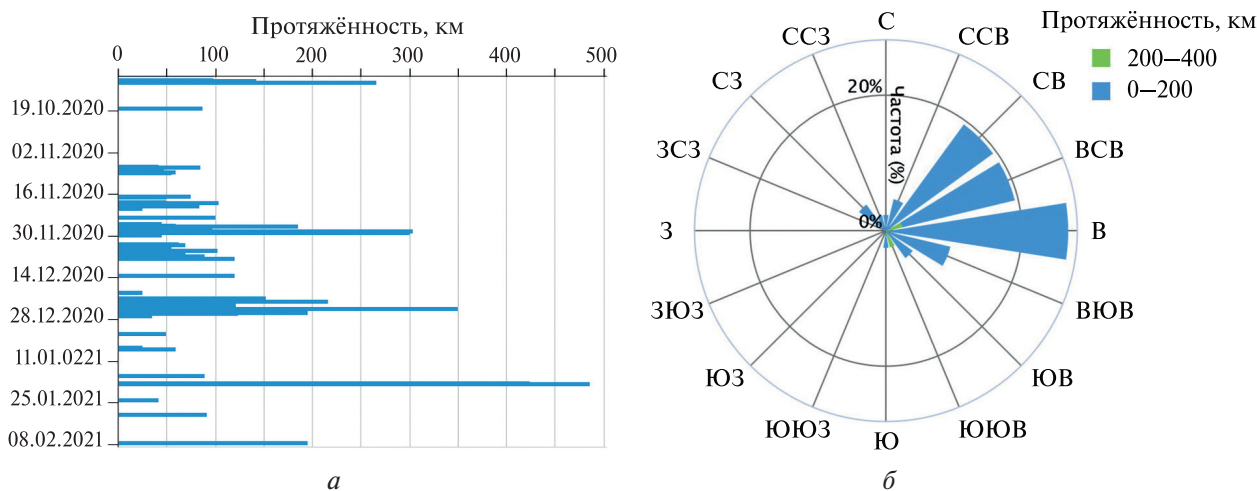


Рис. 4. Эксплозивная активность влк. Ключевской в течение извержения 2020–2021 гг.: а — протяжённость парогазовых шлейфов, содержавших различное количество пепла; б — направления их перемещения. Данные из ИС VolSatView и ИС KVERT (Гирина и др., 2018)

В течение извержений вулкана в 2016–2020 гг. под действием многочисленных лавовых потоков Апахончичский жёлоб всё более углублялся и расширялся, обнажались погребённые в толщах пирокластики ледники и снежники, контакт с ними новых лавовых потоков приводил к фреатическим взрывам и обрушениям отложений тефры с бортов жёлоба. Например, в результате фреатического взрыва 6 октября 2020 г. парогазовый с пеплом столб поднимался со склона вулкана до 5 км н. у. м., 23 января 2021 г. — до 6 км н. у. м. Наиболее мощные обрушения отложений тефры с бортов Апахончичского жёлоба наблюдались с 05:38 GMT 24 января 2021 г. — плотное пепловое облако поднималось до 9,6 км н. у. м. и перемещалось на северо-запад от вулкана (рис. 5, см. с. 157). К 06:00 GMT этого же дня пепловое облако опустилось до 5 км н. у. м.

Лавовый поток из вершинного кратера вулкана двигался по Апахончичскому жёлобу с 4 октября по 8 декабря 2020 г. Кроме того, с 7 декабря лава начала изливаться из кратера по Козыревскому жёлобу на юго-западном склоне вулкана, по состоянию на 4 января длина лавового потока, измеренная в ИС VolSatView по снимкам Sentinel-2В, составляла 1,7 км. По Козыревскому жёлобу лава изливалась по 28 января 2021 г., но с 22 января по 8 февраля 2021 г. лавовый поток снова двигался по Апахончичскому жёлобу. В связи с тем, что лавовые потоки изливались непрерывно в течение извержения, в районе вулкана постоянно регистрировалась крупная яркая термальная аномалия (см. рис. 2). Площадь отложений лавовых потоков составила около 0,5 км².

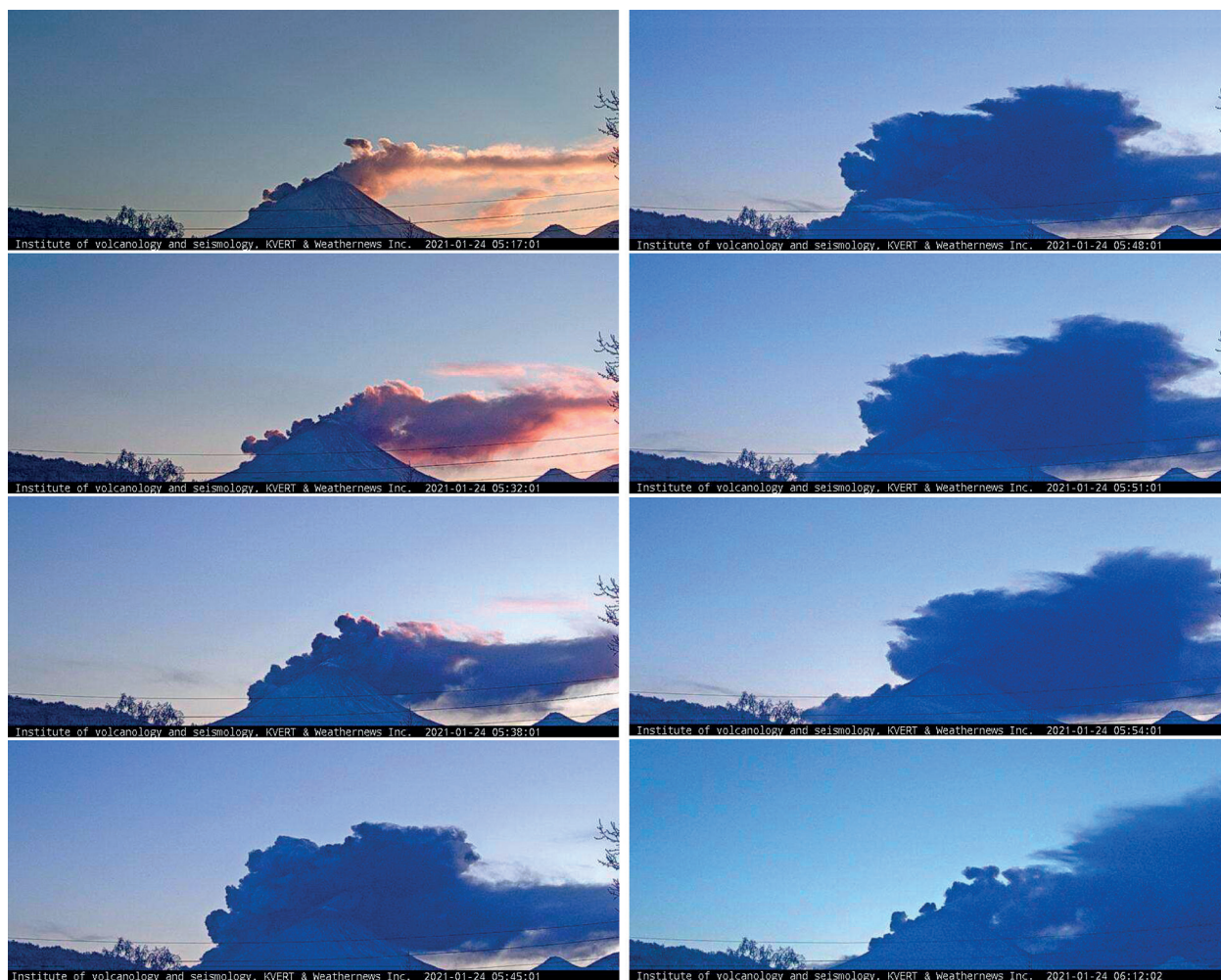


Рис. 5. Динамика обрушений отложений тefры с бортов Апахончичского жёлоба с 05:17 до 05:54 GMT 24 января 2021 г. Видеоданные ИВиС ДВО РАН, KVERT

8 февраля активность вулкана прекратилась: взрывных явлений не отмечалось, перестал изливаться лавовый поток; температура термальной аномалии в районе кратера вулкана резко понизилась (см. рис. 2). Вершинное извержение влк. Ключевской закончилось.

После перерыва в 9 дней 17 февраля 2021 г. в интервале от 23:00 до 24:00 GMT на северо-западном склоне вулкана произошёл боковой прорыв, названный именем член-корр. АН СССР Г. С. Горшкова (Гирина и др., 2021б; Озеров и др., 2021). Из двух параллельных трещин северо-западного простирания изливалась лава, на высоте 2,8 км н. у. м. в результате взрывной активности стромболианского типа вырос шлаковый конус, 2 марта его высота достигала 50 м. В течение извержения температура термальной аномалии в районе прорыва была высокой, разность температур термальной аномалии и фона была такой же, как и во время вершинного извержения — достигала 127 °С (см. рис. 2).

К 23 февраля потоки лавы, продвинувшись на 1,2 км, достигли ледника Эрмана. По р. Крутенькой начал изливаться грязекаменный поток, отложения которого сформировали конус выноса шириной 2 км в 28–30 км от вулкана. 20 марта извержение закончилось — температура термальной аномалии резко снизилась до фоновых значений (см. рис. 2).

Заключение

Взрывно-эффузивное вершинное извержение влк. Ключевской в 2020–2021 гг. продолжалось 4 мес и 9 дней (с 30 сентября 2020 г. по 8 февраля 2021 г.). Постоянно наблюдалась его стромболианская и реже вулканическая активность. Взрывы поднимали пепел

до 7,5 км н. у. м. (до 2,5 км над кратером вулкана), пепловые шлейфы протягивались до 500 км в различных направлениях от вулкана, преимущественно на восток и северо-восток. Ближе к окончанию извержения в Апахончичском жёлобе наблюдались мощные фреатические взрывы и обрушения отложений тефры с бортов Апахончичского жёлоба, пепловые облака поднимались до 9,6 км н. у. м., но в течение получаса опускались до уровня вершины вулкана. Лавовый поток из вершинного кратера вулкана двигался по Апахончичскому жёлобу с 4 октября по 8 декабря 2020 г. и с 22 января по 8 февраля 2021 г. и по Козыревскому жёлобу с 7 декабря 2020 г. по 28 января 2021 г. Протяжённость лавовых потоков достигала 2,8 км, площадь их отложений составила около 0,5 км². Для этого извержения VEI (*англ.* Volcanic Explosivity Index — вулканический эксплозивный индекс) оценивается как 2.

Детальное описание хода извержения Ключевского стало возможным благодаря мониторингу вулкана в реальном времени с помощью различных спутниковых данных в ИС VolSatView и видеонаблюдений. Отметим, что работа ИС VolSatView осуществляется благодаря ресурсам Дальневосточного центра НИЦ «Планета», Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8) (Институт космических исследований РАН) и ЦКП научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-663 (Вычислительный центр ДВО РАН) (Лупян и др., 2019; Luryan et al., 2014; 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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265>.
3. Гирина О. А., Лупян Е. А., Маневич А. Г., Мельников Д. В., Сорокин А. А., Крамарева Л. С., Романова И. М., Нуздаев А. А., Кашицкий А. В., Марченков В. В., Уваров И. А., Мальковский С. И., Королев С. П. (2021a) Дистанционные наблюдения эксплозивно-эффузивного извержения вулкана Ключевской в 2019–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 81–91. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-81-91>.
4. Гирина О. А., Мельников Д. В., Лупян Е. А., Маневич А. Г., Сорокин А. А., Крамарева Л. С. (2021b) Непрерывный мультиспутниковый мониторинг вулканов для обнаружения извержений на примере бокового прорыва вулкана Ключевской в феврале 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 261–267. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-261-267>.
5. Горельчик В. И., Гарбузова В. И. Сейсмичность Ключевского вулкана как отражение его современной магматической деятельности (хроника событий 1987–1996 гг. и особенности связанной с ними сейсмичности) // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 352–372.
6. 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. 6. № 3. С. 151–170. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170>.

7. *Озеров А. Ю.* Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. М.: Геос, 2019. 306 с.
8. *Озеров А. Ю., Гирина О. А., Мельников Д. В., Нuzhдаев И. А., Черкашин Р. И., Демянчук Ю. В., Цветков В. А.* Вулкан Ключевской: новый побочный прорыв им. Г. С. Горшкова, 2021 г. (п-ов Камчатка) // *Вестн. Камчатской регион. ассоциации «Учебно-науч. центр»*. Сер.: Науки о Земле. 2021. Вып. 49. № 1. С. 5–9. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-1-49-5-9>.
9. *Пуйн Б. И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // *Тр. Лаб. вулканологии*. 1956. Вып. 11. 311 с.
10. *Токарев П. И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
11. *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. <https://doi.org/10.1134/S0742046319030047>.
12. *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. <https://doi.org/10.1134/S1019331614010079>.
13. *Gordeev E. I., Girina O. A., Lupyay 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. <https://doi.org/10.1134/S074204631606004X>.
14. *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.
15. *Lupyay E. A., Milekhin O. E., Antonov V. N., Kramareva L. S., Burtsev M. A., Balashov I. V., Tolpin V. A., Solov'ev V. I.* System of operation of joint information resources based on satellite data in the Planeta Research Centers for Space Hydrometeorology // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2014. V. 39. P. 847–853. <https://doi.org/10.3103/S1068373914120103>.
16. *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. <https://doi.org/10.1134/S0742046320010054>.
17. *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.
18. *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.

Remote monitoring of the 2020–2021 summit and lateral eruptions of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka

O. A. Girina¹, E. A. Loupian², A. G. Manevich¹, D. V. Melnikov¹, A. A. Sorokin³,
L. S. Kramareva⁴, I. M. Romanova¹, A. A. Nuzhdaev¹, I. A. Uvarov²,
S. I. Malkovsky³, S. P. Korolev³

¹ *Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS
Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia
E-mail: girina@ksnet.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. The 2020–2021 summit explosive-effusive eruption of the volcano lasted 4 months. After a break of 9 days, a lateral eruption occurred on the northwestern slope of the volcano, which lasted a month. The summit explosive eruption manifested itself in Strombolian and, more rarely, Vulcanian activity. Explosions raised ash up to 7.5 km above sea level, and ash plumes moved up to 500 km in different directions from the volcano. The effusive phase of the eruption began on October 4, 2020, and continued until the end of the eruption; lava flows moved along the Apakhonchich and Kozyrevs volcano-tectonic chutes. The movement

of lava flows along the Apakhonchich chute was often accompanied by large collapses of tephra from its sides, while the ash rose up to 9.6 km above sea level. The lateral eruption was the formation of two fissures on the northwestern slope of the volcano, filled with lava, and the formation of a cinder cone in the upper part of the western fissure. The lava flow stretched for 1.2 km, the mud flow — for 30 km. A detailed description of the eruption course became possible thanks to real-time monitoring of the volcano using various satellite data in the information system “Remote monitoring of the activity of volcanoes in Kamchatka and the Kuriles” (VolSatView, <http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru>) and video observations.

Keywords: volcano, Klyuchevskoy, Kamchatka, eruption, video data, satellite monitoring, VolSatView, KVERT

Accepted: 01.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-153-161

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., *Comprehensive Monitoring of Explosive Volcanic Eruptions of Kamchatka*, Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS DVO RAN, 2018, 192 p. (in Russian), 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., 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 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265>.
3. Girina O.A., Loupian E.A., Manevich A.G., Melnikov D.V., Sorokin A.A., Kramareva L.S., Romanova I.M., Nuzhdaev A.A., Kashnitskii A.V., Marchenkov V.V., Uvarov I.A., Malkovskii S.I., Korolev S.P. (2021a), Remote observations of the 2019–2020 explosive-effusive eruption of Klyuchevskoy volcano, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 81–91 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-81-91>.
4. Girina O.A., Melnikov D.V., Loupian E.A., Manevich A.G., Sorokin A.A., Kramareva L.S. (2021b), Continuous multi-satellite monitoring of volcanoes to detect eruptions using the example of Klyuchevskoy volcano flank eruption in February 2021, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 261–267 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-261-267>.
5. Gorchik V.I., Garbuzova V.I., Seismicity of Klyuchevskoy Volcano as a Reflection of Its Modern Magmatic Activity (Chronicle of the 1987–1996 Events and Features of Associated Seismicity), In: *Geodinamika i vulkanizm Kurilo-Kamchatskoi ostrovoduzhnoi sistemy*, Petropavlovsk-Kamchatskii: IVGiG DVO RAN, 2001, pp. 352–372 (in Russian).
6. 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., 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 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170>.
7. Ozerov A. Yu., *Klyuchevskoi vulkan: veshchestvo, dinamika, model* (Klyuchevskoy volcano: rocks, dynamics, model), Moscow: Geos, 2019, 306 p. (in Russian).
8. Ozerov A. Yu., Girina O.A., Melnikov D.V., Nuzhdaev I.A., Cherkashin R.I., Demyanchuk Yu.V., Tsvetkov V.A., Klyuchevskoy volcano: new flank eruption named after G.S. Gorshkov, 2021 (Kamchatka), *Vestnik Kamchatskoi regional'noi assotsiatsii "Uchebno-nauchnyi tsentr"*, Ser.: *Nauki o Zemle*, 2021, Vol. 49, No. 1, pp. 5–9 (in Russian), <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-1-49-5-9>.
9. Piip B.I., Klyuchevskaya Sopka and its eruptions in 1944–1945 and in the past, *Trudy Laboratorii vulkanologii*, 1956, Vol. 11, 311 p. (in Russian).
10. Tokarev P.I., *Vulkanicheskie zemletraseniya Kamchatki* (Volcanic earthquakes of Kamchatka), Moscow: Nauka, 1981, 164 p. (in Russian).
11. 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, <https://doi.org/10.1134/S0742046319030047>.
12. 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, <https://doi.org/10.1134/S1019331614010079>.

13. Gordeev E. I., Girina O. A., Lupyan 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, <https://doi.org/10.1134/S074204631606004X>.
14. Khrenov A. P., Dvigalo V. N., Kirsanov I. T., Fedotov S. A., Gorelchik V. I., Zharinov N. A., Klyuchevskoy Volcano, In: *Active Volcanoes of Kamchatka*, 1991, Moscow: Nauka, in 2 Vol., Vol. 1, pp. 106–153.
15. Lupyan E. A., Milekhin O. E., Antonov V. N., Kramareva L. S., Burtsev M. A., Balashov I. V., Tolpin V. A., Solov'ev V. I., System of operation of joint information resources based on satellite data in the Planeta Research Centers for Space Hydrometeorology, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2014, Vol. 39, pp. 847–853, <https://doi.org/10.3103/S1068373914120103>.
16. 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, <https://doi.org/10.1134/S0742046320010054>.
17. 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.
18. 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.