

Извержения вулкана Ключевской в 2023–2024 годах по данным дистанционного мониторинга в информационной системе VolSatView

А. Г. Маневич¹, О. А. Гирина¹, Д. В. Мельников¹, А. А. Бриль²,
И. М. Романова¹, А. А. Сорокин³, Л. С. Крамарева⁴, С. П. Королев³

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия
E-mail: mag@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 активнейших вулканов мира. В 2023–2024 гг. произошли два вершинных извержения: эксплозивно-эффузивное с 22 июня по 5 ноября 2023 г. и эксплозивное с 27 декабря 2023 г. по 2 января 2024 г. Эксплозивные фазы извержений проявлялись преимущественно в стромболианской активности, вулканская была менее продолжительной. Во время пароксизмальной фазы извержения с 31 октября по 2 ноября 2023 г. эксплозии поднимали пепел до 14 км над уровнем моря, пепловые шлейфы протягивались более чем на 3200 км преимущественно в восточных направлениях от вулкана. Эффузивная фаза извержения продолжалась с 19 июля до 5 ноября 2023 г.: лавовые потоки изливались преимущественно по Апахончичскому и Козыревскому желобам, этот процесс часто сопровождался фреатическими взрывами и обрушениями тefры с бортов желобов, пепел при этом поднимался до 7,5 км над уровнем моря. Детальный мониторинг извержения проводился в реальном времени с помощью системы видеонаблюдения, а также различных спутниковых данных в информационной системе «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView, <http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru>).

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

Одобрена к печати: 21.05.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-94-103

Введение

Эксплозивные извержения вулканов являются наиболее опасными для населения и авиации в связи с высокой энергетикой вулканогенного процесса и слабой предсказуемостью. Каждое извержение вулкана уникально, и детальное изучение его динамики является одной из основных задач вулканологии.

Стратовулкан Ключевской (56° 3' 20" с. ш., 160° 38' 31" в. д.) расположен в северо-восточном секторе Ключевской группы вулканов Камчатки и является одним из самых активных вулканов мира и наиболее продуктивным в Курило-Камчатской островной дуге. Последние 20 лет он извергается практически ежегодно (Гирина и др., 2018). Предыдущие его извержения происходили с 17 февраля по 20 марта 2021 г. и с 16 по 26 ноября 2022 г. (Гирина и др., 2022; Girina et al., 2023).

Визуальные наблюдения за вулканом осуществляются с 1 сентября 1935 г., с помощью 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. мониторинг выполняется с помощью информационной системы (ИС) «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView, <http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru>) (Гирина и др., 2018; Girina et al., 2023; Gordeev et al., 2016). Для мо-

мониторинга вулканов в VolSatView имеются оперативно обновляемые данные среднего и низкого разрешения спутниковых систем: NOAA-18/19 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration), Terra и Aqua, Suomi NPP (*англ.* National Polar-orbiting Partnership) и JPSS-1/2 (*англ.* Joint Polar Satellite System), Sentinel-3A/B, Himawari-9. В настоящее время для мониторинга вулкана доступно более 200 спутниковых снимков в сутки. Детальное изучение событий и продуктов извержения вулкана проводилось в VolSatView с использованием снимков со спутников Landsat-8/9, «Канопус-В», «Ресурс-1/2», EO-1 (*англ.* Earth Observing-1), Sentinel-2A/B.

Цель работы — определение характеристик, геологического и социального эффекта уникальных извержений Ключевского вулкана в 2023–2024 гг. на основе детального анализа динамики вулканического процесса с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

В качестве основной характеристики активности вулкана Ключевской рассматривается разность температур термальной аномалии и фона (РТАФ) (Girina et al., 2023).

Динамика извержений вулкана Ключевской в 2023–2024 годах

На спутниковых снимках в ИС VolSatView 22 июня в 11:23 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time) появилась яркая термальная аномалия в районе вулкана: РТАФ резко повысилась с 6 до 82 °С (*рис. 1*). Согласно нашим данным мониторинга Ключевского (РТАФ фона активности вулкана не превышает 12 °С, деятельность стромболианского типа — 80–106 °С) (Girina et al., 2023), было ясно, что началось эксплозивное извержение стромболианского типа (фонтанирование лавы в кратере вулкана), поэтому этот день считаем началом вершинного извержения Ключевского.

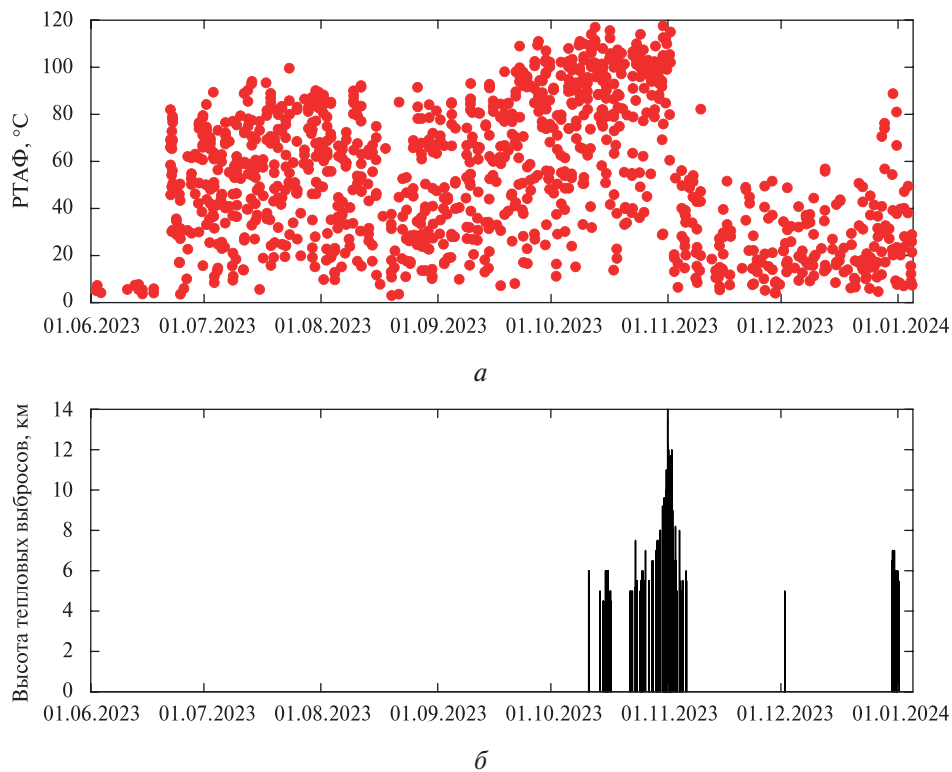
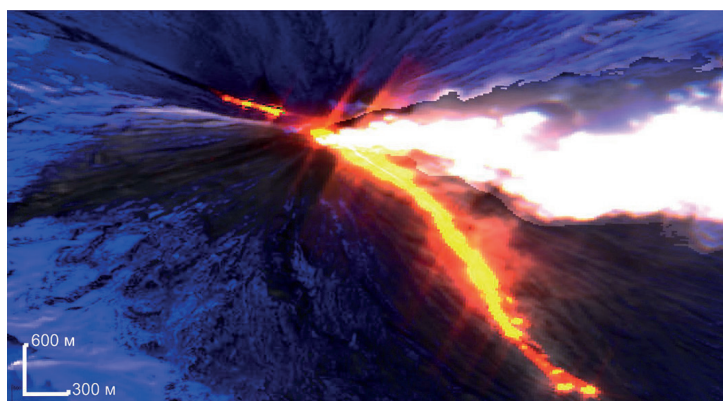


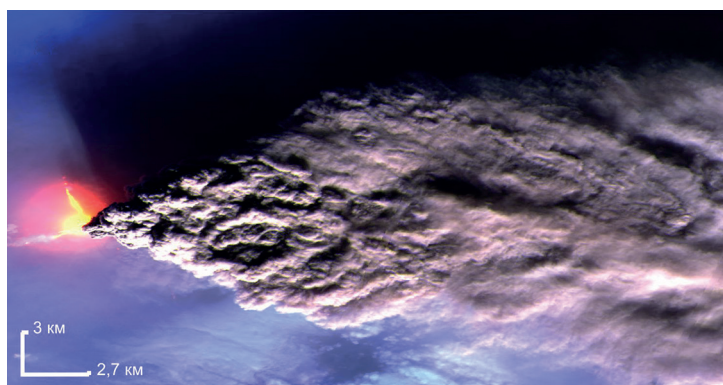
Рис. 1. Активность влк. Ключевской за период с 1 июня 2023 г. по 5 января 2024 г.: *a* — изменение величины разницы температур термальной аномалии и фона по данным обработки спутниковой информации среднего разрешения учёными KVERT в ИС VolSatView; *б* — высота тепловых выбросов, км н. у. м. (над уровнем моря)

С 11 июля РТАФ почти постоянно была выше 85 °С. С 13:00 UTC 19 июля по Апахончичскому жёлобу на юго-восточном склоне вулкана стал изливаться лавовый поток, т. е. началась эффузивная фаза извержения.

На фоне эксплозивной активности стромболианского типа (фонтанирование лавы до 300–400 м над кромкой кратера) до 12 августа продолжалось движение лавового потока по Апахончичскому жёлобу. В этот же день началось излияние потока лавы по Козыревскому жёлобу на юго-западном склоне вулкана, продлившееся по 28 сентября. Новый лавовый поток по Апахончичскому жёлобу стал изливаться с 22 сентября, РТАФ превысила 100 °С (см. *рис. 1*). Активность вулкана усилилась 11 октября: в парогазовых выбросах появилось небольшое количество пепла, эруптивная колонна поднималась до 6 км н.у.м., увеличился расход лавы. Далее, 16 октября движение лавового потока по Апахончичскому жёлобу привело к таянию снега и льда, в результате чего в жёлобе происходили обрушения пирокластического материала с бортов и мощные фреатические взрывы. В пос. Ключи выпал пепел серо-красного цвета: старый пепел предыдущих извержений вулкана, который был поднят взрывами с бортов Апахончичского жёлоба. Фреатические взрывы и обрушения пирокластики в Апахончичском жёлобе продолжались до конца извержения вулкана. По состоянию на 00:40 UTC 29 октября 2023 г. (по данным MSI-BOA (*англ.* Multispectral Instrument bottom-of-atmosphere) (Sentinel-2A)) лавовые потоки имели следующие геометрические характеристики: вдоль Апахончичского жёлоба длина 3,8 км, площадь ~1 км²; вдоль Крестовского жёлоба длина 0,9 км, площадь 0,1 км² (*рис. 2а*). С 17 октября лавовый поток вновь стал двигаться по Козыревскому жёлобу, это сопровождалось фреатическими взрывами с выносом пепла до 7,5 км н.у.м.



а



б

Рис. 2. Активность влк. Ключевской: *а* — лавовые потоки в Апахончичском жёлобе и на северо-западном склоне вулкана на спутниковом снимке MSI-BOA (Sentinel-2A) в 00:40 UTC 29.10.2023; *б* — пепловый шлейф протягивается на восток от вулкана, а также лавовые потоки изливаются по Козыревскому жёлобу и северо-западному склону вулкана на снимке OLI-TIRS (Landsat-8) в 00:14 UTC 01.11.2023

Эксплозии из вершинного кратера вулкана 30 октября поднимали пепел до 9 км н. у. м., шлейфы перемещались до 450 км в восточном направлении от вулкана, РТАФ достигла пика за всё время извержения — 117,6 °С (см. *рис. 1, 3*). Далее, 31 октября активность вулкана усилилась и переросла в пароксизмальную фазу эксплозивного извержения с подъёмом эруптивного облака до 11–12 км н. у. м. (*рис. 1б, 4*).

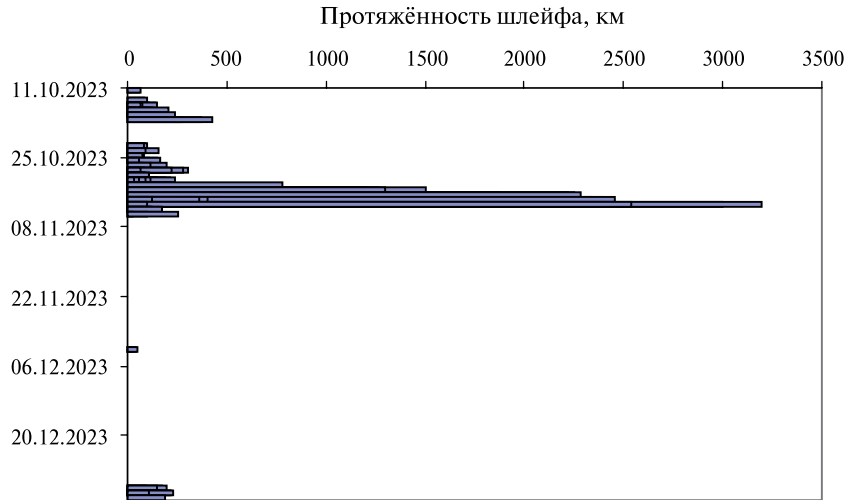


Рис. 3. Протяжённость пепловых шлейфов от влк. Ключевской в 2023–2024 гг.



Рис. 4. Кульминация извержения вулкана Ключевской: мощная эксплозивная активность вулканского типа с подъёмом эруптивной колонны до 12–14 км н. у. м. (данные видеонаблюдений KVERT ИВиС ДВО РАН)

Плотный пепловый шлейф 31 октября–1 ноября протягивался более чем на 1500 км от вулкана, меняя направление с юго-восточного на восточное (см. *рис 2б, 3*). Это сопровождалось фонтанированием лавы до 1 км над кромкой кратера и излиянием лавовых потоков одновременно по Апахончичскому и Козыревскому желобам, фреатическими взрывами и обрушениями пироклаستيку с бортов желобов и со склонов вулкана. Раскалённые лавины и узкие лавовые потоки двигались также и вдоль Крестовского жёлоба на северо-западном склоне

вулкана. В 23:20 UTC 31 октября произошёл мощный фреатический взрыв у подножия вулкана рядом с Крестовским жёлобом с выносом пепла до 14 км н. у. м. и образованием грибовидного облака (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/imgs/2944.jpg>). В течение кульминационной стадии извержения РТАФ постоянно превышала 100 °С (см. *рис. 1*).

Во время кульминации извержения лавовые потоки и лавины раскалённой пирокластики двигались преимущественно по западным и юго-западным склонам вулкана. Когда они достигли ледника Богдановича, началось мощное таяние снега и льда с последующим образованием грязекаменных потоков и выносом их в долину р. Студёная. Это привело к повреждению грязевыми потоками дорожного полотна трассы Мильково – Ключи – Усть-Камчатск. Движение для всех видов транспорта на участке с 153 до 187 км трассы 1–2 ноября было закрыто. На территории Усть-Камчатского р-на Камчатского края был введён режим чрезвычайной ситуации локального характера. В результате внедрения лавового потока в ледник Эрмана на северо-западном склоне вулкана грязекаменные потоки прошли по рекам Крутенькая и Киргурич до р. Камчатки: ими была размыта дорога восточнее пос. Ключи.

Непрерывный вынос пепла в течение двух суток во время кульминации извержения был настолько мощным (см. *рис. 2б, 4*), что на западном склоне вулкана, начиная от кратера, образовались несколько трещин длиной более 700 м, которые могут перерасти в новый жёлоб вулкана.

Протяжённость пеплового шлейфа в северо-северо-восточном направлении 1 ноября превышала 2400 км. Вынос пепла до 11 км н. у. м. продолжался и 2 ноября (<http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru/animation/1707264667.webm>). Площадь пеплового облака, определённая по спутниковому снимку Himawari-9 за 11:00 UTC 2 ноября 2023 г., составила более 250 тыс. км² (*рис. 6*, см. с. 100). К 20:00 UTC 2 ноября эруптивная колонна понизилась до 6,5 км н. у. м., пепловый шлейф смещался на северо-северо-восток от вулкана. Также 2 ноября прекратилось излияние лавовых потоков, РТАФ снизилась до 52,9 °С (см. *рис. 1*). Эруптивное облако, связанное с пароксизмальной фазой извержения, продолжало находиться над акваторией Тихого океана на расстоянии более чем 3200 км на восток и юго-восток от вулкана. Продолжали 3 ноября происходить фреатические взрывы в Апахончичском жёлобе, связанные с подвижками лавового потока на крутом склоне вулкана. Высота эруптивной колонны 4 ноября снизилась до 6 км н. у. м. Извержение 5 ноября завершилось: РТАФ снизилась до 39,2 °С, наблюдалась только фумарольная активность вулкана. Изредка происходили обрушения старой пирокластики с бортов Апахончичского и Козыревского желобов в результате подвижек ещё не остывших в них мощных лавовых потоков.

В течение кульминационной фазы извержения выносилось большое количество диоксида серы (SO₂). По данным Системы оповещения о вулканическом пепле и SO₂ Службы поддержки авиации (*англ.* Support to Aviation Control Service (SACS) SO₂ and Ash Notification System, <http://sacs.aeronomie.be>), над Камчаткой и Тихим океаном с помощью инструмента TROPOMI (*англ.* Tropospheric Monitoring Instrument) были зарегистрированы протяжённые шлейфы диоксида серы. Например, по состоянию на 1 ноября площадь аэрозольного шлейфа составляла 98 175 км², масса SO₂ в нём была равна 10,964 кт, максимальная концентрация диоксида серы достигала 53,8 DU (1 DU = 2,69·10²⁰ молекул в вертикальном столбе атмосферы площадью 1 м²) (*рис. 5*, см. с. 99).

Одиночная эксплозия с выносом пепла до 5 км н. у. м. и распространением шлейфа до 50 км на восток от вулкана была отмечена 2 декабря (см. *рис. 3*). Вероятно, она была вызвана внутрикратерными обрушениями пирокластики, связанными с продолжением формирования глубокого кратера вулкана. Вулканический эксплозивный индекс (*англ.* Volcanic Explosivity Index — VEI) извержения, продолжавшегося с 22 июня по 5 ноября 2023 г., равен трём.

На основе обработки данных прибора SLSTR (*англ.* Sea and Land Surface Temperature Radiometer) (Donlon et al., 2012) было получено распределение высоты пеплового шлейфа влк. Ключевской по состоянию на 00:04 UTC 1 ноября 2023 г.: от минимального 9120 м н. у. м. на периферии до максимального 11 577 м н. у. м. вблизи кратера вулкана (*рис. 7*, см. с. 100). Особенностью прибора является одновременное сканирование земной поверхности в двух

режимах: в надире и под углом 55° . Такой двойной обзор позволяет получать изображения одного и того же участка земной поверхности под разными углами наблюдения практически в один и тот же момент времени. Это, в частности, даёт возможность оценивать высоту выделяемых на спутниковых изображениях элементов облачности. Восстановление высоты пеплового облака осуществлялось на основе технологии, разработанной в Институте космических исследований РАН (Бриль и др., 2023).

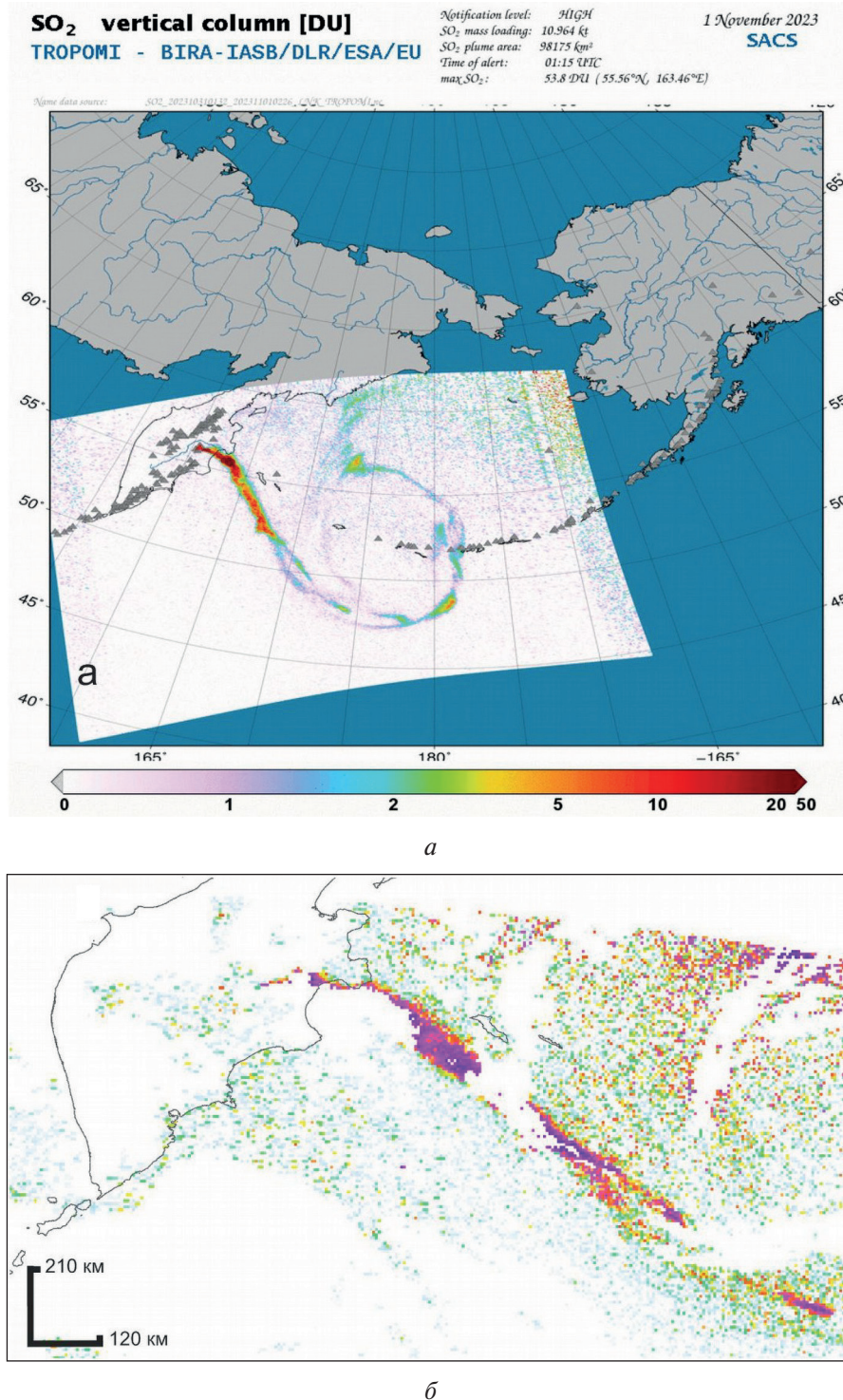


Рис. 5. Распространение диоксида серы в атмосфере в течение кульминационной фазы извержения вулкана Ключевской 1 ноября 2023 г. по данным: *a* — Support to Aviation Control Service; *b* — TROPOMI (Sentinel-5P) из VolSatView

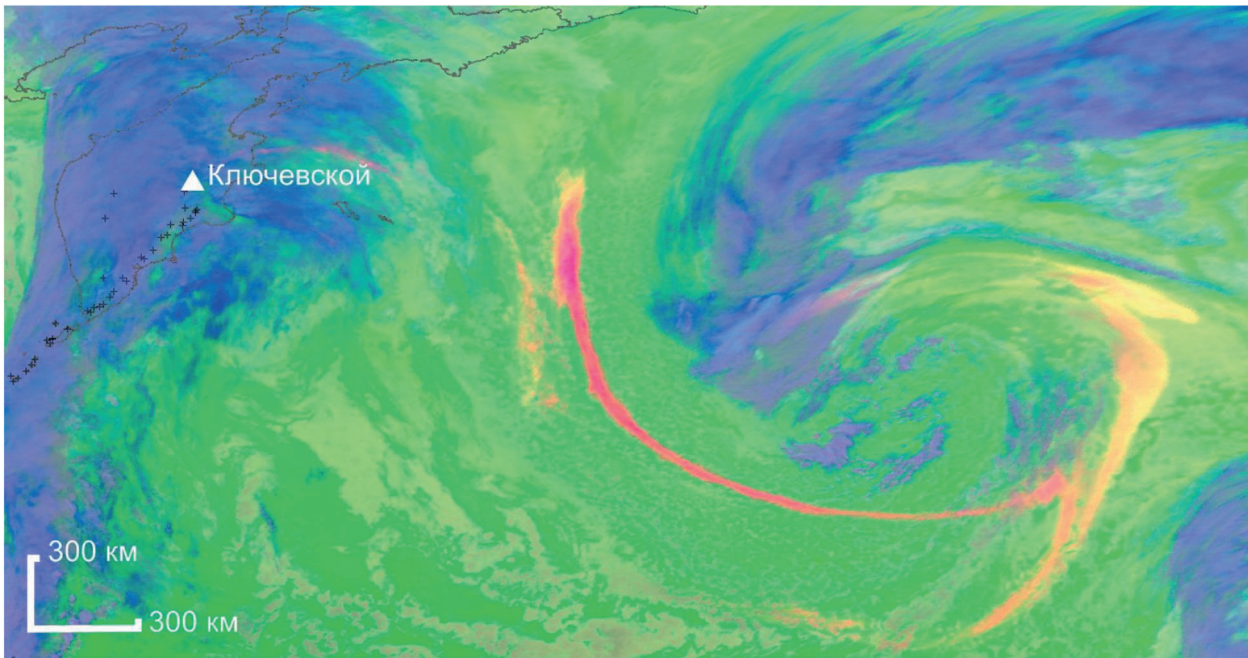


Рис. 6. Конфигурация пеплового облака (розовый цвет) влк. Ключевской на спутниковом снимке Himawari-9 на 11:00 UTC 2 ноября 2023 г.

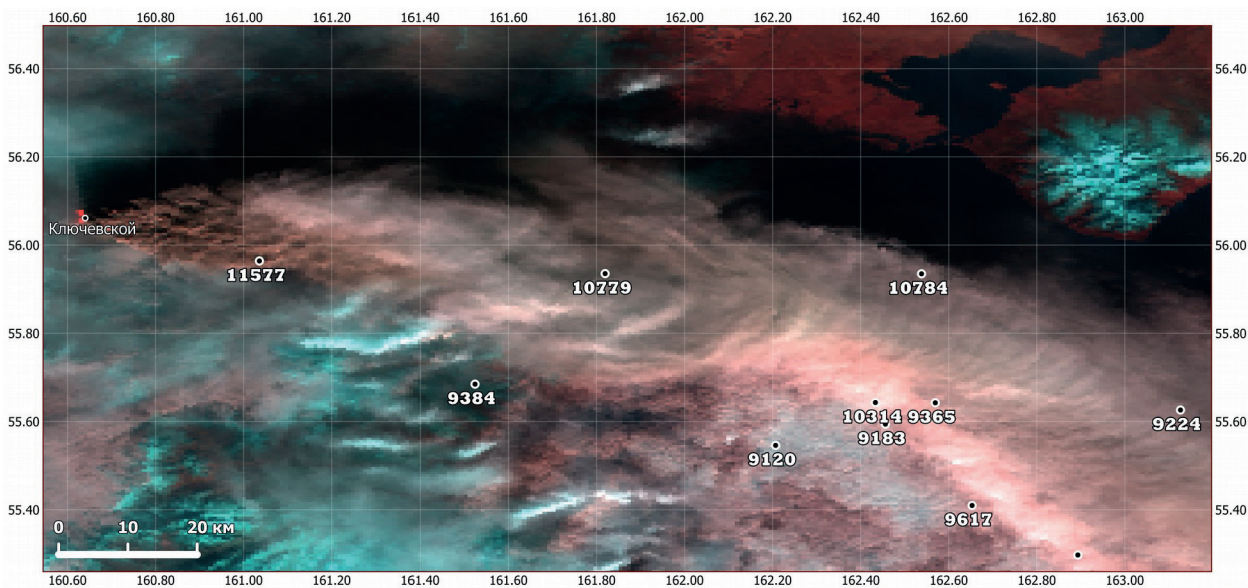


Рис. 7. Высота пеплового шлейфа влк. Ключевской по данным прибора SLSTR (Sentinel-3A) по состоянию на 00:04 UTC 1 ноября 2023 г.

После окончания пароксизмального извержения вулкана РТАФ продолжала находиться на уровне 40–50 °С, что указывало на возможность продолжения эруптивных событий, так как фоном активности Ключевского является РТАФ 12 °С (Girina et al., 2023). Новое эксплозивное извержение началось 27 декабря: наблюдалась стромболианская активность вулкана, на спутниковых снимках регистрировалась яркая термальная аномалия, РТАФ резко повысилась до 70,6 °С. Эксплозии поднимали пепел до 7 км н. у. м. 29–31 декабря и 1 января, пепловый шлейф протягивался до 230 км на северо-запад от вулкана. В течение извержения максимальная РТАФ (88,8 °С) регистрировалась 30 декабря (см. рис. 1). Извержение завершилось 2 января, РТАФ снизилась до 52,9 °С (см. рис. 1). В дальнейшем наблюдалась только фумарольная активность вулкана.

На фоне эруптивной активности влк. Ключевской, 3–5, 9–11, 22 сентября, 9–10, 12–13, 16–17 и 24 ноября с его северных склонов, на которых отложилась тефра влк. Шивелуч во время извержения 10–13 апреля 2023 г., шивелучские ресуспендированные пеплы поднимались до 4 км н. у. м., шлейфы протягивались до 330 км на восток и юго-восток от вулкана.

Активность вулкана во время извержений была опасной для международных и местных авиоперевозок.

Заключение

Эксплозивно-эффузивное вершинное извержение влк. Ключевской продолжалось 137 дней (с 22 июня по 5 ноября 2023 г.). Постоянно наблюдалась стромболианская активность, с 31 октября по 2 ноября происходила пароксизмальная фаза извержения с выносом пепла до 14 км н. у. м., пепловые шлейфы и облака перемещались более чем на 3200 км в юго-восточном направлении от вулкана. Лавовые потоки изливались: по Апахончичскому жёлобу с 19 июля по 12 августа и с 22 сентября по 2 ноября, по Козыревскому жёлобу с 12 августа по 28 сентября и с 17 октября по 2 ноября, вдоль Крестовского жёлоба с 31 октября по 2 ноября. После 50-дневного перерыва новое эксплозивное извержение Ключевского продолжалось с 27 декабря 2023 г. по 2 января 2024 г. (семь дней).

Извержение влк. Ключевской 22.06–5.07.2023 является одним из наиболее ярких наряду с извержениями 1994 г. с выносом пепла до 12–13 км н. у. м. и мощным пепловым шлейфом, протянувшимся на более чем 2000 км от вулкана, а также 2010 и 2013 гг., с выносом пепла до 12 км н. у. м. и распространением пепловых шлейфов до 2500 км от вулкана (Гирина и др., 2014; Озеров и др., 1996; Neal et al., 2014).

Детальное исследование динамики извержения Ключевского выполнено на основании анализа данных мониторинга вулкана в реальном времени с помощью системы видеонаблюдения и различных спутниковых данных в ИС VolSatView. Работа ИС VolSatView (Гирина и др., 2018; Girina et al., 2023; Gordeev et al., 2016; Lupyan et al., 2014) осуществляется благодаря ресурсам Дальневосточного центра НИЦ «Планета»; Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг», поддерживаемого и развиваемого Институтом космических исследований РАН в рамках темы «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8 (Лупян и др., 2019); ЦКП и научному оборудованию «Центра обработки и хранения научных данных ДВО РАН», действующим на базе Вычислительного центра ДВО РАН (Sorokin et al., 2017).

Литература

1. Бриль А. А., Волкова Е. Е., Бурцев М. А. Методы оценки высоты облачности с использованием возможностей системы «Арктика-М» // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2023. С. 67. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.
2. Гирина О. А., Маневич А. Г., Мельников Д. В., Нурдаев А. А., Демянчук Ю. В. Извержения вулкана Ключевской в 2012–2013 гг. // Материалы регион. конф., посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 46–52.
3. 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. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37061627>.
4. Гирина О. А., Лупян Е. А., Маневич А. Г. и др. Дистанционный мониторинг вершинного и побочного извержений вулкана Ключевской (Камчатка) в 2020–2021 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 153–161. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-153-161>.
5. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. 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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170>.

6. *Озеров А. Ю., Карпов Г. А., Дроздин В. А., Двигало В. Н., Демянчук Ю. В., Иванов В. В., Белоусов А. Б., Фирстов П. П., Гаврилов В. А., Ящук В. В., Округина А. М.* Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября – 2 октября 1994 г. (Камчатка) // *Вулканология и сейсмология*. 1996. Т. 5. С. 3–16.
7. *Donlon C., Berruti B., Buongiorno A. et al.* The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 120. P. 37–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.024>.
8. *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. Iss. 19. Article 4775. <https://doi.org/10.3390/rs15194775>.
9. *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>.
10. *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 // *J. Volcanology and Seismology*. 2016. V. 10. No. 6. P. 382–394. <https://doi.org/10.1134/S074204631606004X>.
11. *Lupyay E. A., Milekhin O. E., Antonov V. N. et al.* 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>.
12. *Neal C. A., Herrick J. A., Girina O. A., Chibisova M. V., Rybin A. V., McGimsey R. G., Dixon J.* 2010 Volcanic activity in Alaska, Kamchatka, and the Kurile Islands: Summary of events and response of the Alaska Volcano Observatory / U. S. Geological Survey, Reston, Virginia. 2014. 76 p.
13. *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)*. 2016. P. 734–737.
14. *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.

Klyuchevskoy volcano eruptions in 2023–2024 based on remote sensing data in the VolSatView information system

A. G. Manevich¹, O. A. Girina¹, D. V. Melnikov¹, A. A. Bril²,
I. M. Romanova¹, A. A. Sorokin³, L. S. Kramareva⁴, S. P. Korolev³

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

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

³ *Khabarovsk Federal Research 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 2023–2024, two summit eruptions occurred: explosive-effusive from June 22 to November 5, 2023, and explosive from December 27, 2023, to January 2, 2024. The explosive phases of the eruptions manifested themselves mainly in Strombolian activity, the Vulcanian one was less durable. During the paroxysmal phase of the eruption from October 31 to November 2, 2023, explosions raised ash to 14 km above sea level, and ash plumes stretched more than 3,200 km mainly in eastern directions from the volcano. The effusive phase of the eruption lasted from July 19 to November 5, 2023: lava flow effused out mainly along the Apakhonchichsky and Kozyrevsky chutes, this process was often accompanied by phreatic explosions and tephra collapses from the sides of the chutes, with ash rising up to 7.5 km above sea level. Detailed monitoring of the eruption was carried out in real time using a video surveillance system, as well as various satellite data in the information system “Remote Monitoring of Kamchatka and the Kuril Islands Volcanic Activity” (VolSatView, <http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru>).

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

Accepted: 21.05.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-94-103

References

1. Bril A. A., Volkova E. E., Burtsev M. A., Methods for estimating cloud height using the capabilities of the Arktika-M system, *Materialy 21-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 21th Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 2023, p. 67 (in Russian), DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.
2. Girina O. A., Manevich A. G., Melnikov D. V., Nuzhdaev A. A., Demyanchuk Yu. V., Eruptions of the Klyuchevskoy volcano in 2012–2013, *Materialy regional'noi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu vulkanologiya "Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy"* (Proc. Regional Scientific Conf. "Volcanism and related processes" dedicated to Volcanologist Day), Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS DVO RAN, 2014, pp. 46–52 (in Russian).
3. Girina O. A., Lupyan 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. (in Russian), <https://elibrary.ru/item.asp?id=37061627>.
4. Girina O. A., Lupyan E. A., Manevich A. G. et al., Remote monitoring of the 2020–2021 summit and lateral eruptions of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 153–161 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-153-161>.
5. Lupyan E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., 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>.
6. Ozerov A. Yu., Karpov G. A., Droznin V. A., Dvigalo V. N., Demyanchuk Yu. V., Ivanov V. V., Belousov A. B., Firstov P. P., Gavrilov V. A., Yaschuk V. V., Okrugina A. M., Klyuchevskoi volcano eruption of September 7 to October 2, 1994, Kamchatka, *Vulkanologiya i seismologiya*, 1996, Vol. 5, pp. 3–16 (in Russian).
7. Donlon C., Berruti B., Buongiorno A. et al., The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 120, pp. 37–57, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.024>.
8. 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, Vol. 15, Issue 19, Article 4775, <https://doi.org/10.3390/rs15194775>.
9. 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>.
10. Gordeev E. I., Girina O. A., Lupyan E. A. et al., 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>.
11. Lupyan E. A., Milekhin O. E., Antonov V. N. et al., 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>.
12. Neal C. A., Herrick J. A., Girina O. A., Chibisova M. V., Rybin A. V., McGimsey R. G., Dixon J., *2010 Volcanic activity in Alaska, Kamchatka, and the Kurile Islands: Summary of events and response of the Alaska Volcano Observatory*, U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2014, 76 p.
13. 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)*, 2016, pp. 734–737.
14. 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.