

Дистанционные наблюдения эксплозивно-эффузивного извержения вулкана Ключевской в 2019–2020 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, А. В. Кашницкий²,
В. В. Марченков², 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 2019–2020 гг. эксплозивно-эффузивное извержение вулкана продолжалось 8 мес. Эксплозивное извержение проявлялось в стромболианской активности и реже — в вулканской. Эксплозии поднимали пепел до 7 км над уровнем моря, пепловые шлейфы перемещались до 500 км в различных направлениях от вулкана. Основная площадь территории, на которой отмечались пеплопады, составляла более 60 тыс. км². Эффузивная фаза извержения началась 18 апреля 2020 г. и продолжалась почти 2,5 мес вплоть до окончания извержения. 18–30 апреля была отмечена наиболее высокая температура термальной аномалии в районе вулкана и наиболее плотные пепловые шлейфы, в которые помимо свежего пепла примешивался материал обвалов с бортов Апахончичского жёлоба. Протяжённость лавового потока составила 1,5 км; грязевые отложения покрыли территорию на площади около 1,7 км². В работе дано описание хода извержения и предвещающих его событий на основании изучения видеоматериалов и различных спутниковых данных в информационной системе «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView, <http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru>).

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

Одобрена к печати: 30.10.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-81-91

Введение

Ключевской — один из активнейших вулканов мира, является типичным стратовулканом с конусом правильной формы, 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 шлаковых конусов), 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. Камчатки, в 360 км от г. Петропавловска-Камчатского.

Эруптивная деятельность вулкана представлена эксплозивными и эксплозивно-эффузивными извержениями (рис. 1, см. с. 82) 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). Основные типы эксплозивных извержений — стромболианский и вулканский. Для вулкана характерны как вершинные (терминальные) 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

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).



Рис. 1. Эксплозивно-эффузивное извержение влк. Ключевской в 2019–2020 гг. по состоянию на 10 июня 2020 г.: стромболианская активность — фонтан лавы над новым шлаковым конусом, выросшим внутри кратера вулкана; движение лавового потока по Апакончическому жёлобу на юго-восточном склоне вулкана. Фото Е. Сафоновой

Ключевской практически постоянно сейсмически активен. Между извержениями основные сейсмические события сосредоточены на глубинах около 20–35 км под вулканом, при подготовке извержений наблюдается миграция очагов вулканических землетрясений снизу вверх — в постройку вулкана, а при ослаблении вулканической активности — 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 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 видеозображений в сутки). Спутниковый мониторинг вулкана проводится учёными Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (KVERT — Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) Дальневосточного отделения (ДВО) Российской академии наук (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 следующих 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. В настоящее время в рамках мониторинга влк. Ключевской доступны для анализа около 200 спутниковых снимков в сутки. Детальное изучение событий и продуктов извержения 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), «Канопус-В» (МСС — многозональная съёмочная система, ПСС — панхроматическая съёмочная система), «Ресурс-1/2» (Геотон; КШМСА-ВР и КШМСА-СР — широкозахватная многоспектральная аппаратура высокого и среднего разрешения), EO-1 (*англ.* Earth Observing One Mission) (Hyperion), Sentinel-2B (MSI — *англ.* MultiSpectral Instrument).

Предыдущее эксплозивно-эффузивное извержение вулкана происходило с 3 апреля по 6 ноября 2016 г.; боковой прорыв, образовавшийся в Апахончичском жёлобе в привершинной части вулкана, носит имя вулканолога Е.К. Мархинина (Girina et al., 2019; Ozerov et al., 2020).

По окончании извержения в 2016 г. отмечался отток магмы по каналу вулкана. При значительных подвижках шлако-лаваовой массы, заполнявшей магмовод, наблюдались крупные обрушения пирокластики внутри кратера и над вершиной вулкана появлялись пепловые облака. В 2017–2018 гг. было отмечено три таких периода активности вулкана: со 2 марта по 25 августа 2017 г., с 5 декабря 2017 г. по 18 января 2018 г. и 7–14 мая 2018 г. Во время активности пепловая колонна поднималась до 10,5 км н.у.м. (14 мая 2018 г.), пепловые шлейфы протягивались до 600 км от вулкана (Ozerov et al., 2020). На спутниковых снимках в районе вулкана в эти периоды времени изредка регистрировалась лишь слабая термальная аномалия, связанная с повышенной фумарольной активностью вулкана, т.е. поступления на поверхность земли свежего магматического вещества не было.

Извержение вулкана Ключевской в 2019–2020 гг.

В 2019 г. по 2–4 дня в апреле, июне, июле и октябре наблюдался вынос небольшого количества пепла из кратера Ключевского до 5 км н.у.м., лишь 24 октября эксплозии поднимали пепел до 6 км н.у.м. Парогазовые шлейфы, содержавшие пепел, протягивались до 185 км в различных направлениях от вулкана, преимущественно на восток и запад-северо-запад (*рис. 2*, см. с. 84). 3–5 июля и 26 октября отмечались слабая стромболианская активность вулкана и повышенная температура термальной аномалии в районе его кратера, что указывало на подъём магматической колонны по каналу вулкана и на подготовку нового извержения Ключевского.

Согласно видеоданным, с 14:09 GMT 1 ноября стромболианская активность вулкана наблюдалась постоянно, на спутниковых снимках температура термальной аномалии в районе кратера Ключевского с этого дня начала неуклонно расти (*рис. 3*, см. с. 84), поэтому 1 ноября 2019 г. считаем началом извержения вулкана в 2019–2020 гг.

С этого времени ярко стала проявляться стромболианская активность вулкана, в результате которой шлаковый конус внутри кратера увеличивался в размерах (см. *рис. 1* и *4*, см. с. 85). Кроме этого, наблюдались эпизоды вулканской деятельности: 11, 22 и 29–30 декабря на спутниковых снимках отмечались пепловые шлейфы длиной до 150 км от кратера на высоте до 5,5 км н.у.м. (*рис. 5, 6*, см. с. 85, 86).

В феврале–марте 2020 г. стромболианская активность вулкана усилилась: фонтаны лавы достигали 500 м над кратером с разлётом вулканических бомб по склонам вулкана на 1–1,5 км от кратера (до 3,5–4 км н.у.м.) (см. *рис. 4*). Это нашло отражение в повышении температуры термальной аномалии, более выраженном по спутниковым данным среднего разрешения (см. *рис. 3а*).

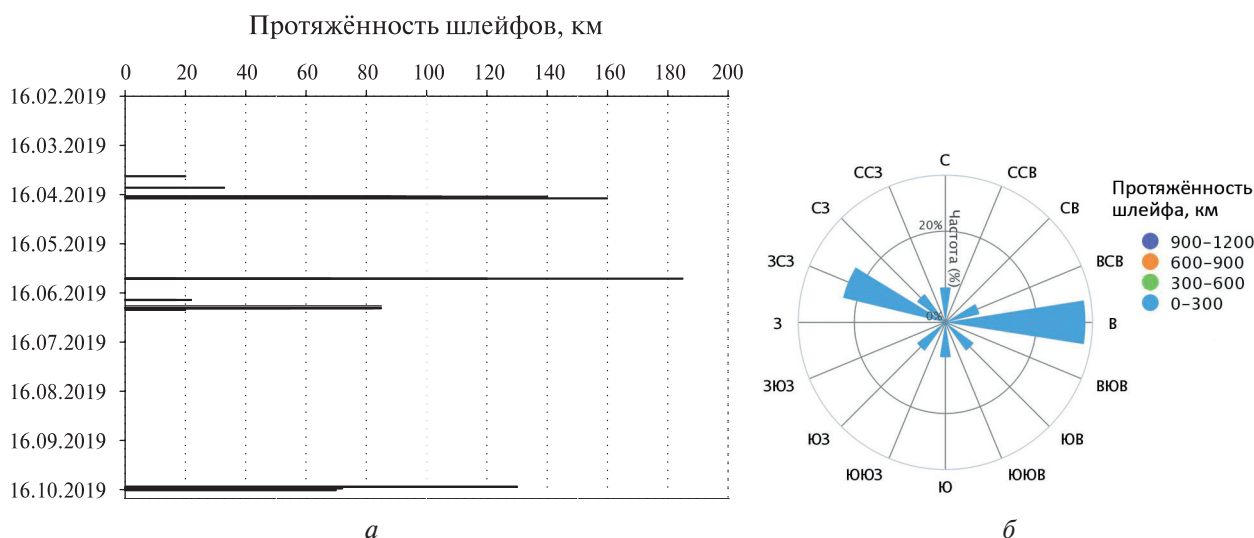


Рис. 2. Эксплозивная активность влк. Ключевской, предварявшая извержение вулкана в 2019–2020 гг.: протяжённость (а) и направления перемещения (б) парогазовых шлейфов, содержавших пепел. Данные из ИС KVERT (Гирина и др., 2018)

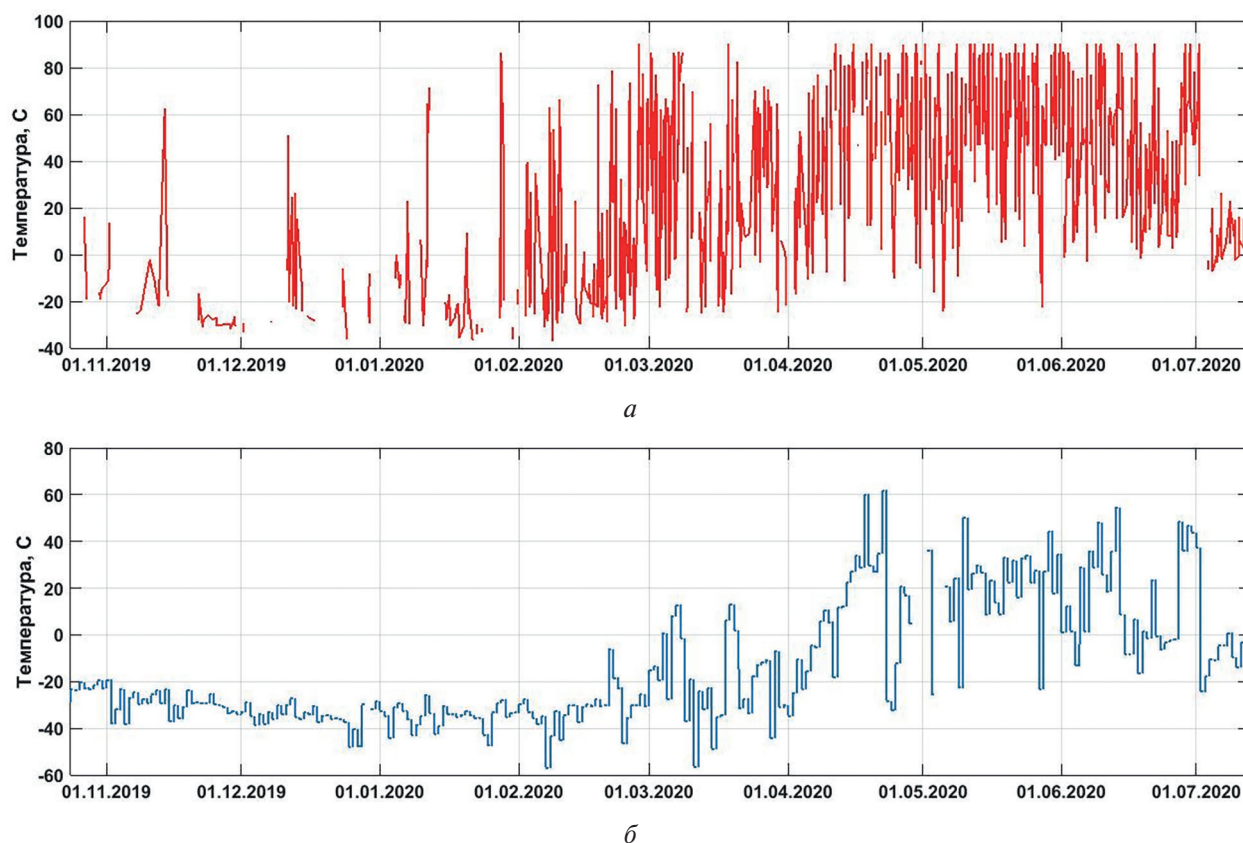


Рис. 3. Температура термальной аномалии влк. Ключевской в период извержения в 2019–2020 гг. по информации из ИС VolSatView: а — по данным приборов AVHRR, MODIS, VIIRS (спутники NOAA, Terra, Aqua, NPP, JPSS-1); б — в точке постоянных наблюдений в районе кратера по данным прибора АНИ (спутник Himawari-8)

Время от времени в парогазовых шлейфах вулкана наблюдалось небольшое количество пепла. Протяжённые шлейфы с повышенным содержанием пепла регистрировались на спутниковых снимках 6, 21–22 и 30 января (до 464 км от вулкана 22 января); 4 и 23 февраля (до 120 км); 2, 8–10, 12, 15, 19–20, 25 и 29–30 марта (до 455 км 30 марта); 6–22 и 26–30 апреля

(до 470 км 18 апреля); 2, 8, 10, 13, 15–17, 21–22, 25–26, 28–29 и 31 мая (до 400 км 29 мая); 1, 6–7, 9 и 11 июня до 40 км от вулкана, перемещались они в различных направлениях от вулкана, но преимущественно в восточных (см. *рис. 6*). Эксплозии, в результате которых формировались пепловые шлейфы, поднимали пепел в основном до 5,0–5,5 км н. у. м., усиления вулканской деятельности Ключевского с выносом пепла до 6 км н. у. м. в 2020 г. наблюдались 2, 20 и 29 марта, 9–10, 13–16, 21–22 и 30 апреля, 10 и 28 мая и 9 июня. Наиболее сильная эксплозивная деятельность вулкана была отмечена 13 апреля: пепел поднимался до 7 км н. у. м. (см. *рис. 5*).

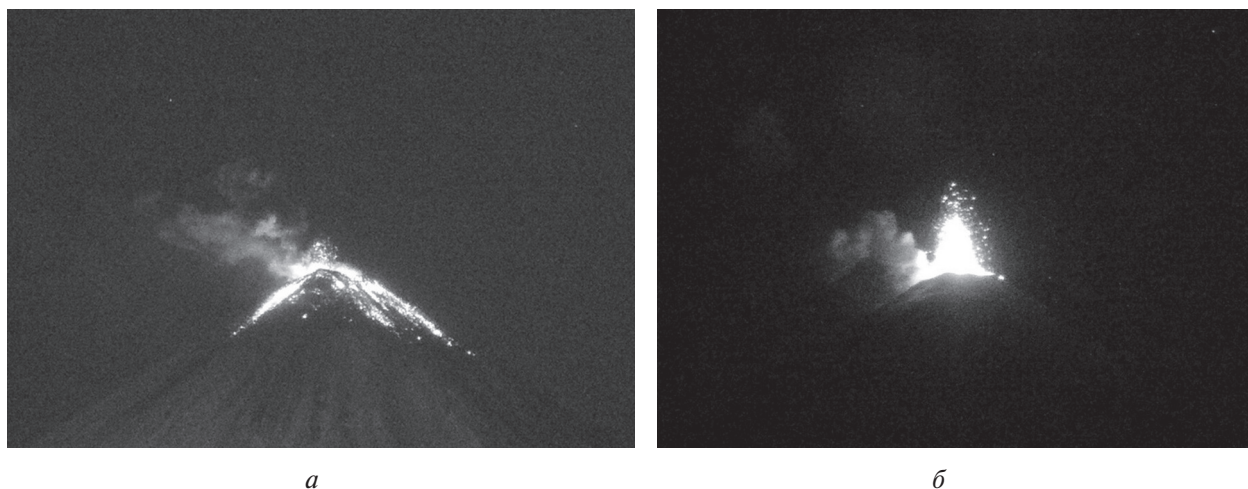


Рис. 4. Стромболианская активность влк. Ключевской по видеоданным KVERT ИВиС ДВО РАН: *а* — в 08:36 GMT 8 марта 2020 г. (обрушение раскалённых обломков на склоны вулкана); *б* — в 10:32 GMT 10 апреля 2020 г.

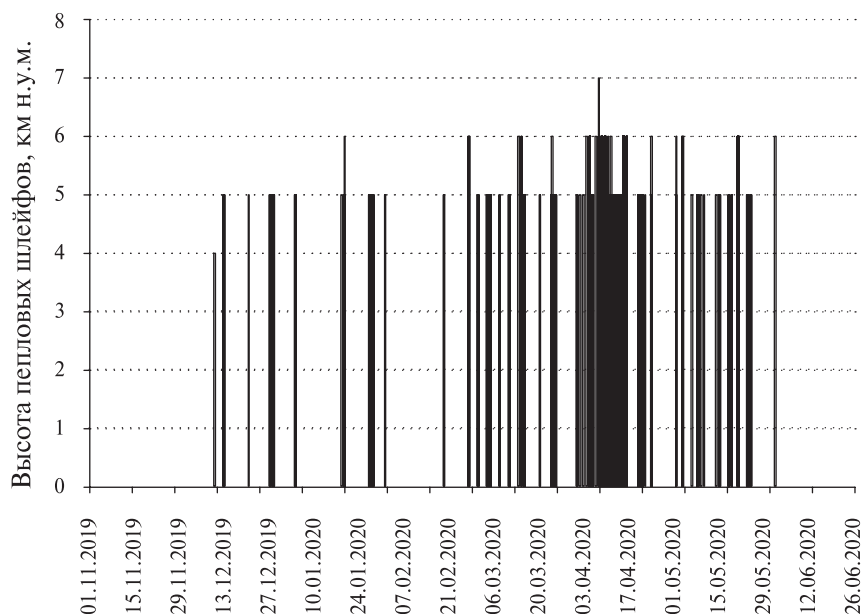


Рис. 5. Вынос пепла из влк. Ключевской во время извержения 2019–2020 гг., данные из ИС KVERT (Гирина и др., 2018)

В начале извержения в ноябре–декабре 2019 г. величина вулканического дрожания (отношение амплитуды к периоду — $(A/T)_{\text{max}}$) составляла 0,5–2 мкм/с, в феврале 2020 г. в связи с усилением стромболианской деятельности вулкана она повысилась до 3–5 мкм/с; с середины марта — на порядок, и 10 апреля она была максимальной (31,7 мкм/с) (Черкашин и др.,

2020). Величина вулканического дрожания оставалась высокой вплоть до окончания извержения 3 июля 2020 г., когда с 1 на 2 июля она резко упала с 13,52 до 4,06 мкм/с, и далее в течение недели понизилась до 1–0,5 мкм/с (данные с сайта КФ ФИЦ ЕГС РАН, <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>).

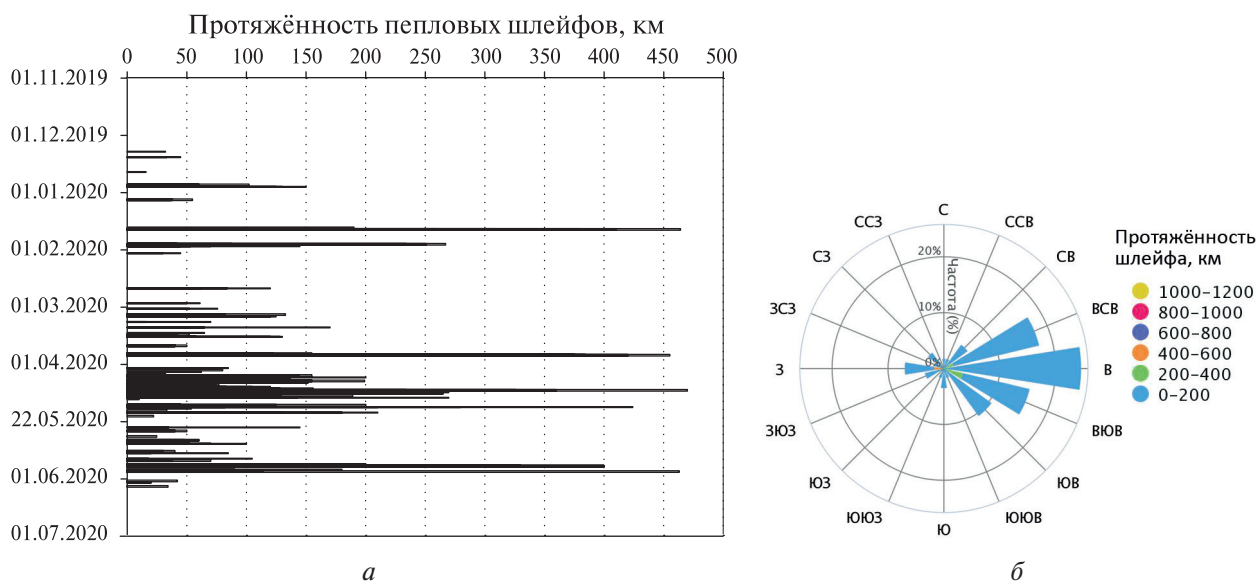


Рис. 6. Эксплозивная активность влк. Ключевской в течение извержения 2019–2020 гг.: протяжённость (а) и направления перемещения (б) парогазовых шлейфов, содержащих пепел. Данные из ИС KVERT (Гирина и др., 2018)



Рис. 7. Обрушение стенки кратера влк. Ключевской 18 апреля 2020 г. в 07:48 GMT во время прорыва лавового потока в Апахончичский жёлоб. Видеоданные KVERT ИВиС ДВО РАН

Лавовый поток из вершинного кратера вулкана начал изливаться с 18 апреля 2020 г. Под напором лавы в 07:42 GMT 18 апреля стала обрушиваться стенка кратера (рис. 7), и лава хлынула в Апахончичский жёлоб на юго-восточном склоне вулкана. В это время была отмечена наиболее высокая температура термальной аномалии в районе вулкана, она оставалась высокой вплоть до окончания извержения 3 июля 2020 г. (см. рис. 3). 18–30 апреля наблюдались

наиболее плотные пепловые шлейфы, в которые помимо свежего пепла примешивался материал обвалов с бортов Апахончичского жёлоба (см. *рис. 5*). 18–19 апреля раскалённые глыбы лавы с высокой скоростью по прямой катились по тальвегу жёлоба у его южного борта, снег превращался в пар и воду, вниз по жёлобу стекали грязевые потоки (*рис. 8*). Согласно данным со спутника JPSS-1 (прибор VIIRS, канал I4) из ИС VolSatView, 19 апреля температура в центральной части лавового потока (жёлтая зона на *рис. 8*) ближе к его истоку из кратера равнялась 54 °С; по краям потока (красная зона), где происходило его остывание при взаимодействии с холодной поверхностью склона вулкана, температура была 34–35 °С; в зоне интенсивного парообразования (в начале внедрения лавового потока в снежник) температура составляла 74,2 °С.

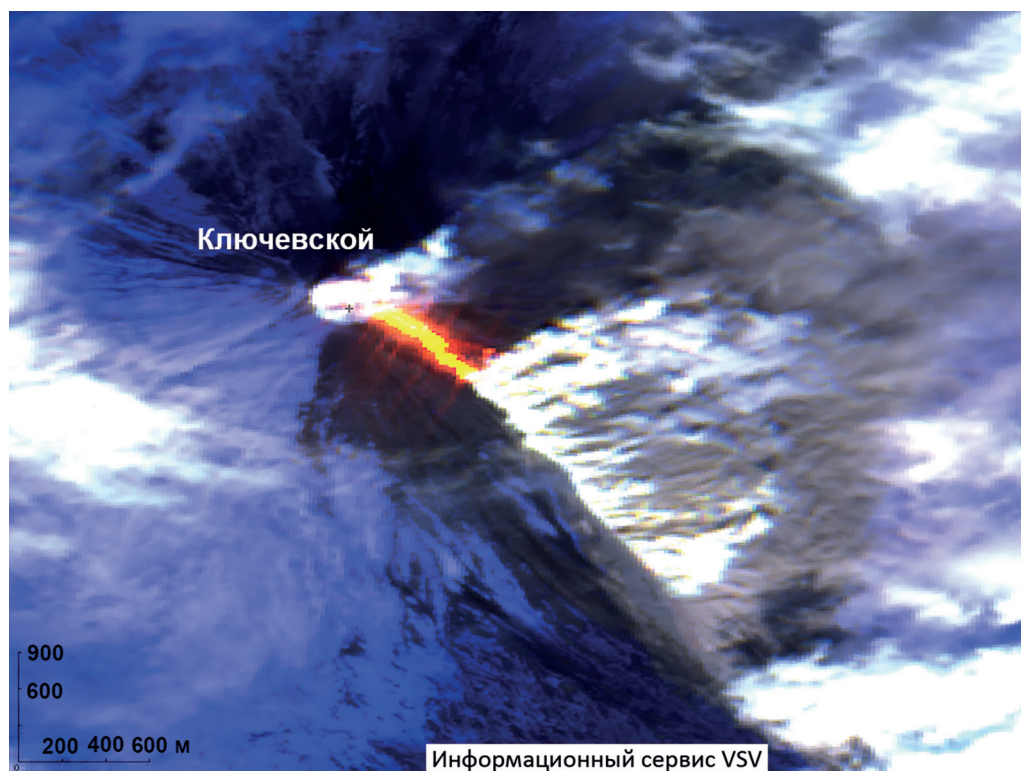


Рис. 8. Излияние лавового потока в Апахончичский жёлоб на юго-восточном склоне влк. Ключевской и формирование горячего грязевого потока (лахара) от его фронта на спутниковом снимке Sentinel-2B (синтез каналов 12 (2100–2280 нм), 11 (1565–1655 нм), 8 (785–900 нм)) в 00:30 GMT 19 апреля 2020 г. Данные из ИС VolSatView. Описание в тексте

Наблюдения начала движения лавового потока в 2020 г. на спутниковых снимках в ИС VolSatView помогли понять явление, описанное в работе (Муравьев и др., 2010) как образование 8 апреля 2010 г. радиальной трещины, протянувшейся на 1200 м по юго-западному склону Ключевского в пределах высот 3900–4600 м. Теперь ясно, что вулканологи наблюдали начало движения лавового потока и образование сопутствующего ему грязевого потока.

12–14 мая русло лавового потока мигрировало к северному борту жёлоба, отложения лавового потока 2020 г. частично перекрыли лавовые потоки 2016 г. Обвалы шлака с правого борта жёлоба, фреатические взрывы и грязевые потоки сопровождали движение лавового потока вплоть до окончания извержения вулкана. По данным со спутников Sentinel-2B и Landsat-7/8 в ИС VolSatView, протяжённость изливающегося лавового потока 21 апреля была 1,54 км (азимут 131°), 14 мая — 1,09 км (109°), 13 июня — 1,22 км (124°), 28 июня — 875 м (123°).

Анализ данных со спутника Sentinel-2B в ИС VolSatView показал, что диаметр кратера Ключевского во время извержения был около 350–360 м, в нём с некоторым смещением

к южной части выросло два шлаковых конуса: основной и меньше его раза в три. Анализ видеоданных и фотоснимков за 10 июня и 7 июля 2020 г., предоставленных Е. Сафоновой и сотрудниками Камчатского спасательного отряда Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, дал возможность оценить размеры основного шлакового конуса: диаметр его кратера составлял около 60–70 м, высота — 30–40 м над дном кратера.

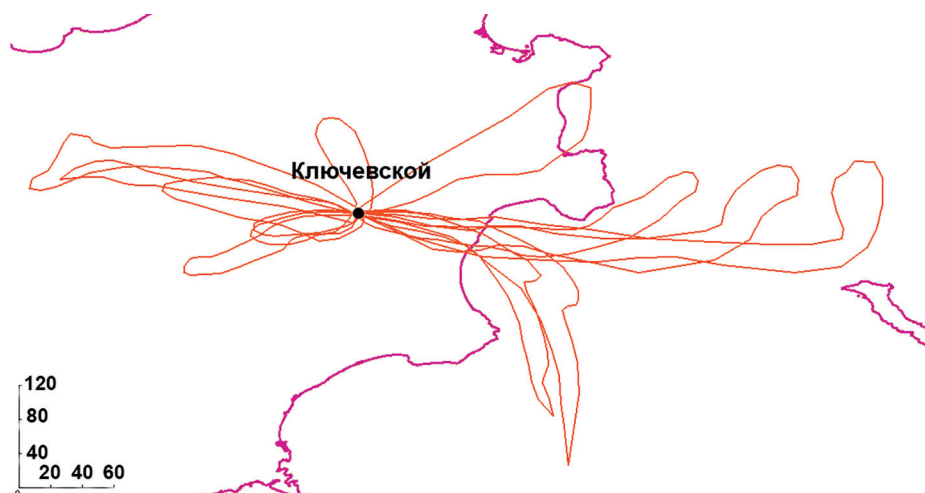


Рис. 9. Визуализация в ИС VolSatView распространения наиболее выраженных пепловых шлейфов во время извержении влк. Ключевской с 1 ноября 2019 г. до 3 июля 2020 г. по данным Himawari-8

В результате извержения на юго-восточном склоне вулкана был сформирован лавовый поток протяжённостью 1,5 км от кратера, грязевые отложения покрыли территорию на площади около 1,7 км². Площадь пеплопадов в течение извержения превышала 60 тыс. км² (рис. 9).

Заключение

Эксплозивно-эффузивное извержение влк. Ключевской в 2019–2020 гг. продолжалось 8 мес (с 1 ноября 2019 г. до 3 июля 2020 г.), наблюдалась стромболианская и реже вулканическая его активность. Эксплозии поднимали пепел до 7 км н.у.м. (до 2,3 км над кратером вулкана), пепловые шлейфы протягивались до 500 км в различных направлениях от вулкана. Основная площадь территории, на которой отмечались пеплопады, составляла более 60 тыс. км². Эффузивная фаза извержения началась 18 апреля 2020 г. и продолжалась почти 2,5 мес вплоть до окончания извержения. 18–30 апреля были отмечены наиболее плотные пепловые шлейфы, в которые помимо свежего пепла примешивался материал обвалов с бортов Апахончичского жёлоба. Протяжённость лавового потока составила 1,5 км; грязевые отложения покрыли территорию на площади около 1,7 км². VEI (*англ.* Volcanic Explosivity Index — вулканический эксплозивный индекс) извержения оценивается как 3.

Детальное описание извержения Ключевского стало возможным благодаря ежедневному мониторингу вулкана с помощью 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» (Институт космических исследований РАН) 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., Кашницкий 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., Кашницкий 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. 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.
4. 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 объединёнными информационными ресурсами, получаемыми на основе спутниковых данных в центрах НИЦ «Планета» // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 89–97.
5. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий 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.
6. Муравьев Я.Д., Овсянников А.А., Дубровская И.К. Необычный этап в динамике очередного извержения Ключевского вулкана в 2009–2010 гг. // Вестн. Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Науки о Земле. 2010. № 1. Вып. 15. С. 7–9.
7. Озеров А.Ю. Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. М.: Геос, 2019. 306 с.
8. Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Тр. Лаб. вулканологии. 1956. Вып. 11. 311 с.
9. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
10. Черкашин Р.И., Иванов В.В., Озеров А.Ю., Мельников Д.В., Демянчук Ю.В. Активность вулкана Ключевской в ноябре 2019 – июне 2020 гг. // Вестн. Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Науки о Земле. 2020. № 2(46). С. 5–9. DOI: 10.31431/1816-5524-2020-2-46-5-9.
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. DOI: <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. DOI: <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., 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>.
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. M.: Nauka, 1991. In 2 vol. V. 1. P. 106–153.
15. 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>.
16. 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.
17. 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 observations of the 2019–2020 explosive-effusive eruption of Klyuchevskoy volcano

O. A. Girina¹, E. A. Loupian², A. G. Manevich¹, D. V. Melnikov¹, A. A. Sorokin³,
L. S. Kramareva⁴, I. M. Romanova¹, A. A. Nuzhdaev¹, A. V. Kashnitskii²,
V. V. Marchenkov², I. A. Uvarov², S. I. Malkovsky³, S. P. Korolev³

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 of Far Eastern Branch RAS, Khabarovsk 680000, Russia*

⁴ *Far Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta"
Khabarovsk 680000, Russia*

Klyuchevskoy Volcano is one of the most active volcanoes in the world. The 2019–2020 explosive-effusive eruption of the volcano lasted 8 months. The explosive eruption manifested itself in Strombolian and, more rarely, Vulcanian activity. Explosions raised ash up to 7 km above sea level, and ash plumes moved up to 500 km in different directions from the volcano. The main area of the territory where ash falls were noted was more than 60 thousand km². The effusive phase of the eruption began on April 18, 2020, and lasted almost 2.5 months until the end of the eruption. On April 18–30, 2020, the highest temperature of the thermal anomaly in the volcano area and the densest ash plumes were noted, in which, in addition to fresh ash, material from collapses from the sides of the Apakhonchich chute was mixed. The lava flow was 1.5 km long; mud deposits covered an area of about 1.7 km². The paper describes the course of the eruption, and the events preceding it based on the study of video and various satellite data in the information system "Remote monitoring of the activity of the volcanoes of the Kamchatka and the Kuriles" (VolSatView, <http://kamchatka.volcanoes.smlab.ru>).

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

Accepted: 30.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-81-91

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 izverzenii 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. Gorelich V. I., Garbuzova V. I., *Seismichnost' Klyuchevskogo vulkana kak otrazhenie ego sovremennoi magmaticheskoi deyatelnosti (khronika sobytii 1987–1996 gg. i osobennosti svyazannoi s nimi seismichnosti)* (Seismicity of Klyuchevskoy Volcano as a Reflection of Its Modern Magmatic Activity (Chronicle of the 1987–1996 Events and Features of Associated Seismicity)), *Geodinamika i vulkanizm Kurilo-Kamchatskoi ostrovoduzhnoi sistemy*, Petropavlovsk-Kamchatskii: IVGiG DVO RAN, 2001, pp. 352–372.
4. 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 tsentrakh 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.

5. 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 dannyykh (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.
6. Muraviev Ya. D., Ovsyannikov A. A., Dubrovskaya I. K., Neobychnyi etap v dinamike ocherednogo izverzheniya Klyuchevskogo vulkana v 2009–2010 gg. (An unusual stage in the dynamics of the 2009–2010 eruption of Klyuchevskoy volcano), *Vestnik Kamchatskoi regional'noi assotsiatsii "Uchebno-nauchnyi tsentr". Nauki o Zemle*, 2010, No. 1, Vol. 15, pp. 7–9.
7. Ozerov A. Yu., *Klyuchevskoi vulkan: veshchestvo, dinamika, model* (Klyuchevskoy volcano: rocks, dynamics, model), Moscow: Geos, 2019, 306 p.
8. 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.
9. Tokarev P. I., *Vulkanicheskie zemletryaseniya Kamchatki* (Volcanic earthquakes of Kamchatka), Moscow: Nauka, 1981, 164 p.
10. Cherkashin R. I., Ivanov V. V., Ozerov A. Yu., Melnikov D. V., Demyanchuk Yu. V., Aktivnost' vulkana Klyuchevskoi v noyabre 2019 – iyune 2020 gg. (Klyuchevskoy volcano activity in November 2019 – June 2020), *Vestnik Kamchatskoi regional'noi assotsiatsii "Uchebno-nauchnyi tsentr". Nauki o Zemle*, 2020, No. 2, Vol. 46, pp. 5–9, DOI: 10.31431/1816-5524-2020-2-46-5-9.
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, DOI: <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, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1019331614010079>.
13. 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>.
14. 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.
15. 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>.
16. 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.
17. 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.