

Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем

О. А. Гирина¹, Е. А. Лупян², А. Хорват³, Д. В. Мельников¹, А. Г. Маневич¹,
А. А. Нуждаев¹, А. А. Бриль², А. Ю. Озеров¹, Л. С. Крамарева⁴, А. А. Сорокин⁵

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 *Метеорологический институт Гамбургского университета
Гамбург, 20146, Германия*

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

⁵ *Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия*

Шивелуч — наиболее активный вулкан Камчатки. Пароксизмальное эксплозивное извержение вулкана, разрушившее лавовый купол в кратере, происходило 10–13 апреля 2023 г. Согласно различным спутниковым данным, высота подъёма отдельных эруптивных облаков, вероятно, превышала 15 км над уровнем моря. Мощный циклон, во власти которого находился весь п-ов Камчатка, вытягивал эруптивное облако на запад, поворачивал его на юг, растягивал на север и направлял на восток от вулкана. Динамика развития пепловых и аэрозольных облаков этого извержения отражена на анимационных картинах, выполненных по сериям снимков спутника Himawari-9 в информационной системе «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (ИС VolSatView) с 08:00 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время) 10 апреля до 07:50 UTC 14 апреля (http://d33.infospace.ru/jr_d33/materials/2023v20n2/283-291/1683110898.webm) и данных спутника «Арктика-М» № 1 с 16:00 до 21:30 UTC 10 апреля (http://d33.infospace.ru/jr_d33/materials/2023v20n2/283-291/1683821166.webm). Отмечено, что эруптивная колонна во время извержения не была вертикальной: например, в начальный момент извержения 10 апреля в 13:20 UTC она отклонялась на северо-северо-восток, 11 апреля в 12:00 UTC — на северо-запад, 12 апреля в 07:00 UTC — на юго-запад. Во время пароксизмального извержения в атмосферу постоянно поступал диоксид серы, максимальное количество которого выделилось 10–11 апреля, связано это с эксплозивным разрушением лавового купола влк. Шивелуч. Пепловые облака вместе с аэрозольными 10–13 апреля были растянуты в полосу длиной более 3500 км с запада на северо-восток. 21–22 апреля аэрозольное облако Шивелуча отмечалось в районе Скандинавского п-ова. Общая площадь территории Камчатки и Тихого океана, на которой были зарегистрированы пепловые и аэрозольные шлейфы и облака в течение извержения 10–13 апреля, составляла около 3280 тыс. км². Пароксизмальное извержение Шивелуча относится к субплинианскому типу, так как имеет высокие параметры подъёма пепловых облаков и продолжительности события. Для этого извержения VEI (*англ.* Volcanic Explosivity Index — вулканический эксплозивный индекс) оценивается как 3–4. Детальное описание пароксизмального эксплозивного извержения вулкана и распространения пеплового облака было выполнено на основании изучения данных различных спутниковых систем (Himawari-9, NOAA-18/19, GOES-18, Terra, Aqua, JPSS-1, Suomi NPP, «Арктика-М» № 1 и др.) в ИС VolSatView (<http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru>).

Ключевые слова: вулкан, Шивелуч, пароксизмальное эксплозивное извержение, спутниковый мониторинг, VolSatView, KVERT, Камчатка

Одобрена к печати: 27.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291

Введение

Шивелуч — наиболее активный вулкан Камчатки, расположенный в северной части Центральной Камчатской депрессии, в 50 км от пос. Ключи и в 450 км от г. Петропавловска-Камчатского (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volc?name=Sheveluch>). Это одно из крупнейших

вулканических сооружений Камчатки: поперечник основания вулкана достигает 45–50 км, площадь — не менее 1300 км² (Melekestsev et al., 1991). Современная постройка включает три главных элемента: Старый Шивелуч (3283 м), древнюю кальдеру и Молодой Шивелуч (2800 м). В кратере Молодого Шивелуча с августа 1980 г. растёт лавовый купол, активность которого представлена экструзивными, эффузивными и эксплозивными (вулканского типа) извержениями (Melekestsev et al., 1991; Ozerov et al., 2020). Наиболее мощные эксплозивные извержения вулкана, связанные с ростом лавового купола, наблюдались в 2001, 2004, 2005 и 2010 гг. (Гирина и др., 2006, 2007; Овсянников, Маневич, 2010; Федотов и др., 2004).

Спутниковый мониторинг вулкана проводится учёными из Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (*англ.* Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team — KVERT) Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН с 2002 г. (Гирина и др., 2018; Gordeev, Girina, 2014). С 2014 г. он выполняется с помощью информационной системы «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (ИС VolSatView) (<http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru>) (Гирина и др., 2018, 2019; Gordeev et al., 2016; Lupyay et al., 2014).

Для Шивелуча характерны периоды очень сильной активности и периоды относительного покоя. Например, с 10 февраля по 17 декабря 2018 г. отмечалась только фумарольная активность вулкана. В начале 2022 г. вулкан был также относительно спокоен, но с 10 июня интенсивность роста лавового купола начала повышаться: количество раскалённых лавин, обрушивающихся на склоны купола, увеличилось. С 21 октября и вплоть до начала пароксизмального извержения 10 апреля 2023 г. разность значений температуры термальной аномалии и фона, определённая по спутниковым снимкам среднего разрешения, постоянно была выше 100 °С. Это явно указывало на поступление на дневную поверхность земли ювенильного вещества и на возможность в любое время крупного эксплозивного извержения вулкана.

Детальное описание пароксизмального эксплозивного извержения влк. Шивелуч и распространения его пепловых и аэрозольных облаков было выполнено на основе анализа данных различных спутниковых систем (Himawari-9, NOAA-18/19 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США), GOES-18 (*англ.* Geostationary Operational Environmental Satellite), Terra, Aqua, JPSS-1 (*англ.* Joint Polar Satellite System), Suomi NPP (*англ.* National Polar-orbiting Partnership), «Арктика-М» № 1 и др.) в ИС VolSatView.

Пароксизмальное эксплозивное извержение вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 г.

Согласно данным со спутника Himawari-9 из ИС VolSatView, в 10:10 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время) 10 апреля появилось аэрозольное облако размером 12×30 км, поднявшееся до 6 км н. у. м. (над уровнем моря) и переместившееся к 10:50 UTC на 35 км на северо-северо-запад (азимут 354°) от вулкана. С 12:10 UTC 10 апреля из вулкана начался вынос некоторого количества пепла: на северо-запад (азимут 309°) от него стал протягиваться парогазовый с содержанием пепла шлейф, к 13:00 UTC достигший 40 км.

В 13:10 UTC 10 апреля началось пароксизмальное эксплозивное извержение влк. Шивелуч, сильно разрушившее лавовый купол в его кратере. На снимке со спутника Himawari-9 из ИС VolSatView в 13:20 UTC было обнаружено пепловое облако размером 35×20 км с «шапкой» аэрозолей, дальняя кромка которого находилась на северо-востоке (азимут 15°) от вулкана (*рис. 1а*, см. *рис. 285*). В дальнейшем эруптивное облако было развёрнуто и стало перемещаться на запад-северо-запад от вулкана (см. *рис. 1*). По данным спутника Himawari-9 за 13:20 UTC 10 апреля в ИС VolSatView, эруптивное облако поднялось примерно до 10 км н. у. м. Консультативный центр по вулканическому пеплу в Токио (*англ.* Volcanic Ash Advisory Center — VAAC) определил высоту этого пеплового облака на 13:10 UTC как 15,8 км н. у. м. (https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/TextData/2023/20230410_30027000_0192_Text.html). Учёные из KVERT выпустили предупреждение об опасности извержения влк. Шивелуч для авиации (*англ.* Volcano Observatory Notice for Aviation — VONA) с изменени-

ем авиационного цветового кода с оранжевого на красный в 19:29 UTC 10 апреля (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2023-51>).

Эксплозивное извержение продолжалось почти непрерывно в течение 10–13 апреля. Мощный циклон, во власти которого находился весь п-ов Камчатка, вытягивал пепловое облако на запад, поворачивал его на юг, растягивал на север и направлял на восток от вулкана. Динамика развития пепловых и аэрозольных облаков этого извержения представлена на анимациях, построенных средствами ИС VolSatView на основе данных спутника Himawari-9 в период с 08:00 UTC 10 апреля до 07:50 UTC 14 апреля (http://d33.infospace.ru/jr_d33/materials/2023v20n2/283-291/1683110898.webm) и данных спутника «Арктика-М» № 1 с 16:00 до 21:30 UTC 10 апреля (http://d33.infospace.ru/jr_d33/materials/2023v20n2/283-291/1683821166.webm).

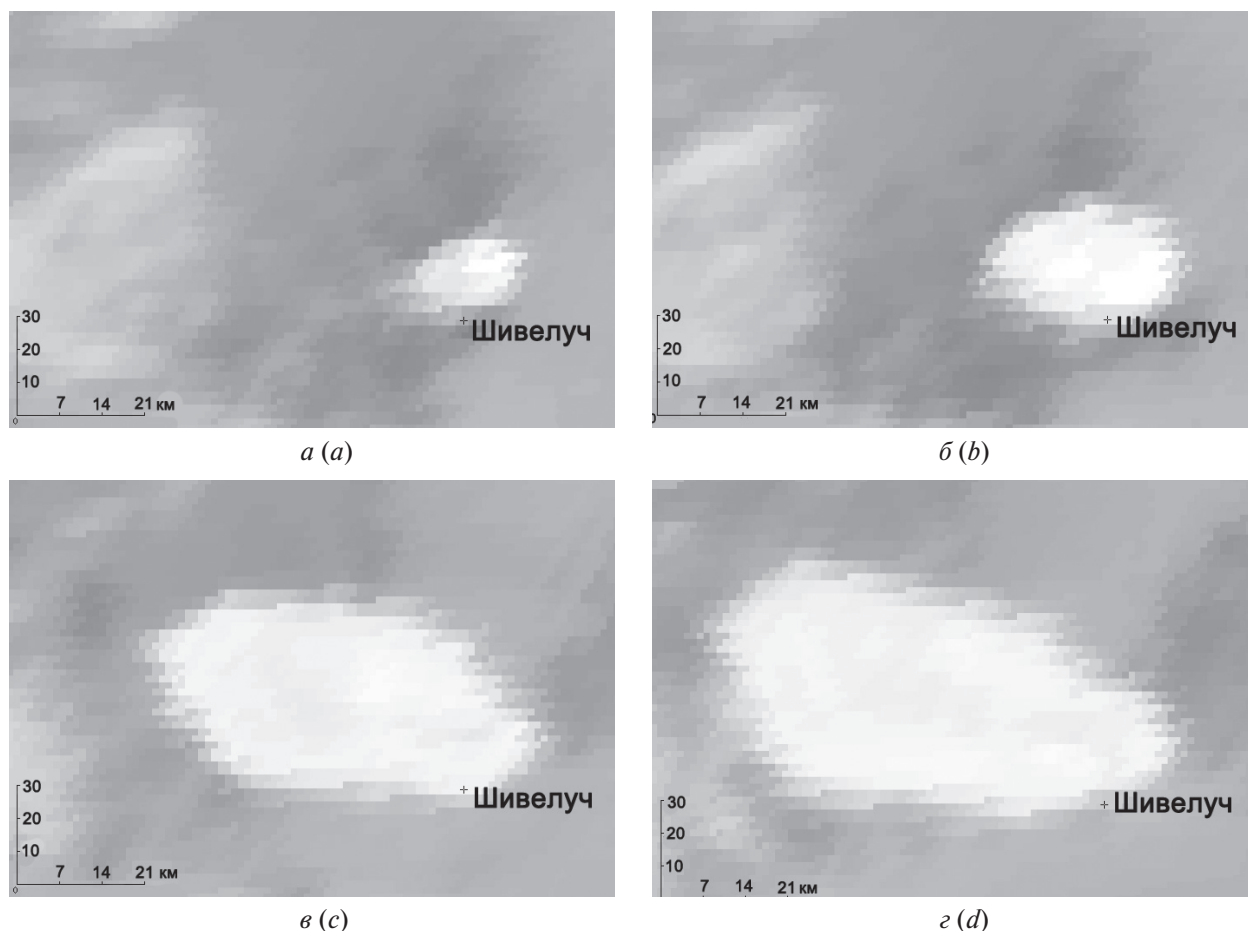


Рис. 1. Изменение конфигурации и азимута распространения эруптивного облака влк. Шивелуч во время извержения 10 апреля 2023 г. Данные из ИС VolSatView: изображения облака на снимках спутника Himawari-9 в 14-м канале в 13:20 UTC (а), 13:30 UTC (б), 14:00 UTC (в), 14:20 UTC (г) 10 апреля 2023 г.

Fig. 1. Changes in the configuration and propagation azimuth of the Sheveluch eruptive cloud during the April 10, 2023, eruption. Data from the VolSatView Information System: the eruptive clouds on Himawari-9 satellite images in channel 14 at 13:20 UTC (a), 13:30 UTC (b), 14:00 UTC (c), 14:20 UTC (d) on April 10, 2023.

Наряду с непрерывным выносом пепла из кратера вулкана и образованием расширяющегося эруптивного облака, высота которого была преимущественно ограничена тропопаузой (~10 км н. у. м.), время от времени происходили мощные эксплозии, пеплы которых поступали в стратосферу. Например, по данным со спутника Himawari-9 такие эксплозии отмечены в 15:10 UTC (площадь облака $S = 110 \text{ км}^2$), 15:30 UTC ($S = 826 \text{ км}^2$), 16:50 UTC ($S = 430 \text{ км}^2$), 17:50 UTC ($S = 975 \text{ км}^2$), 19:00 UTC ($S = 82 \text{ км}^2$), 19:20 UTC ($S = 177 \text{ км}^2$) 10 апреля. Сравнение данных приборов MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (спутник

Aqua) в 14:50 UTC и АНИ (англ. Advanced Himawari Imager) (спутник Himawari-9) в 15:10 UTC позволило получить предварительную оценку высоты эксплозии порядка 15–16 км.

С 16:50 UTC 10 апреля в результате серии мощных эксплозий эруптивное облако стало расширяться, плотный пепловый шлейф был развернут на юг от вулкана. В 19:00 UTC произошла очередная мощная эксплозия пепла, высота которой, согласно совместному предварительному анализу спутниковых данных «Арктика-М» № 1 (http://d33.infospace.ru/jr_d33/materials/2023v20n2/283-291/1682090840.webm) и Himawari-9 (http://d33.infospace.ru/jr_d33/materials/2023v20n2/283-291/1681247449.webm), превысила 13 км н. у. м. Оценка высоты этой эксплозии, выполненная по данным спутника GOES-18 по методике из работы (Horváth et al., 2021), показала ~18 км н. у. м. Предыдущие, эта и следующие мощные эксплозии привели к формированию плотного пеплового шлейфа, направленного на юго-запад от вулкана, пепел из которого отложился в пос. Ключи и окрестностях слоем около 8 см. В течение 10–13 апреля пепловые шлейфы вулкана меняли направления согласно развитию циклона в районе Камчатки. Территории, на которых отмечались такие шлейфы и облака, имели примерную площадь: 10 апреля — 172 тыс. км²; 11 апреля — более 942 тыс. км², в том числе 205 тыс. км² на п-ове Камчатка; 12 апреля — до 2115 тыс. км².

На спутниковом снимке Sentinel-2A за 00:40 UTC 12 апреля наблюдается пепловый шлейф, протянувшийся от влк. Шивелуч на юго-запад (рис. 2). Вероятно, в это время продолжали формироваться пирокластические потоки, так как на востоке от шлейфа в районе вулкана находилась пелена разреженных пеплов. На снимке также ярко выражена зона, покрытая значительным слоем пепла в течение извержения 10–11 апреля. Площадь этой зоны по первым грубым оценкам составила более 60 тыс. км². Общая площадь территории Камчатки и Тихого океана, на которой отмечались пепловые и аэрозольные шлейфы и облака в течение извержения Шивелуча 10–13 апреля, по состоянию на 14 апреля составляла около 3280 тыс. км².

Следует отметить, что эруптивная колонна во время извержения не была вертикальной: например, в начальный момент извержения 10 апреля в 13:20 UTC она отклонялась на северо-северо-восток, в этот же день в 19:00 UTC — на северо-восток, 11 апреля в 12:00 UTC — на северо-запад, 12 апреля в 07:00 UTC — на юго-запад.

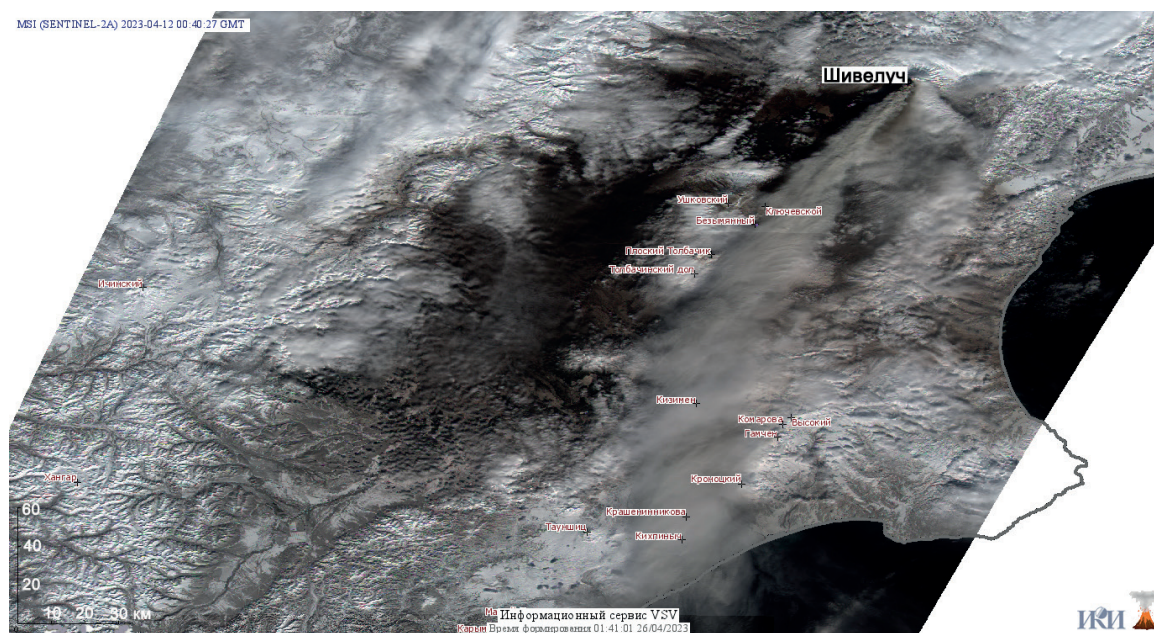


Рис. 2. Мощный пепловый шлейф влк. Шивелуч и зона загрязнения, связанная с пеплопадами, на спутниковом снимке Sentinel-2A по состоянию на 00:40 UTC 12 апреля 2023 г.

Fig. 2. Powerful ash plume of Sheveluch volcano and ashfall-related pollution zone in the Sentinel-2A satellite image at 00:40 UTC April 12, 2023

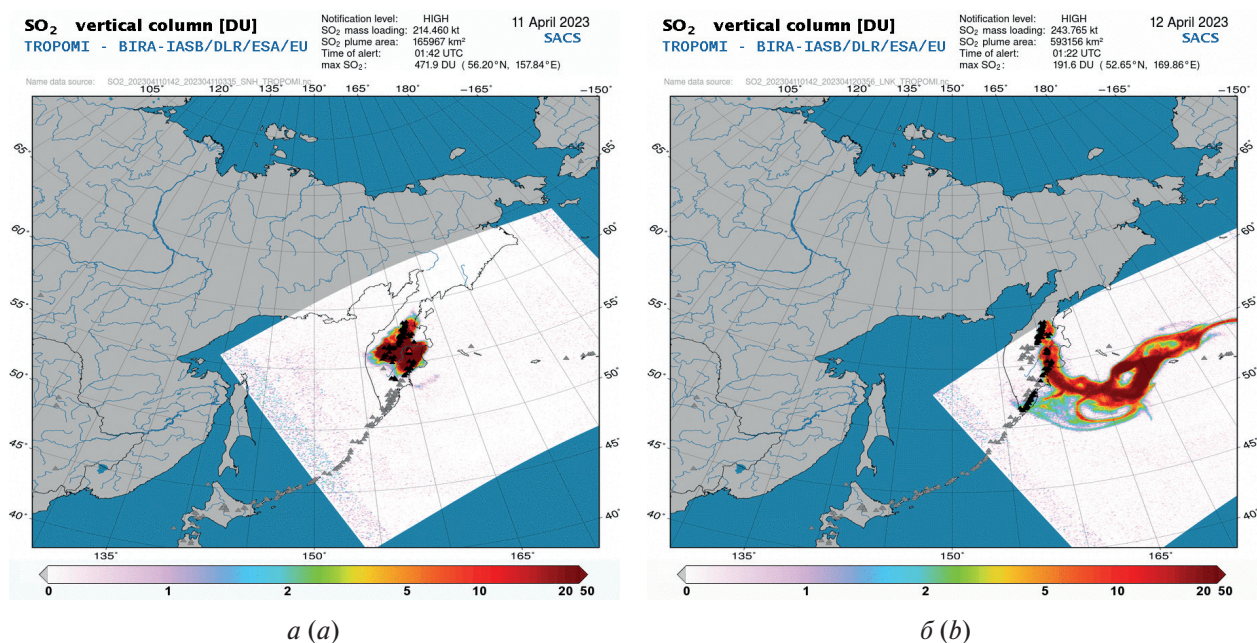


Рис. 3. Содержание SO₂ в аэрозольном шлейфе влк. Шивелуч во время извержения 11 апреля (а) и 12 апреля (б) 2023 г. по данным SACS (<http://sacs.aeronomie.be/>)

Fig. 3. SO₂ content in the aerosol plume during the Sheveluch volcano eruption on April 11 (a) and April 12 (b), 2023, according to SACS data (<http://sacs.aeronomie.be/>)

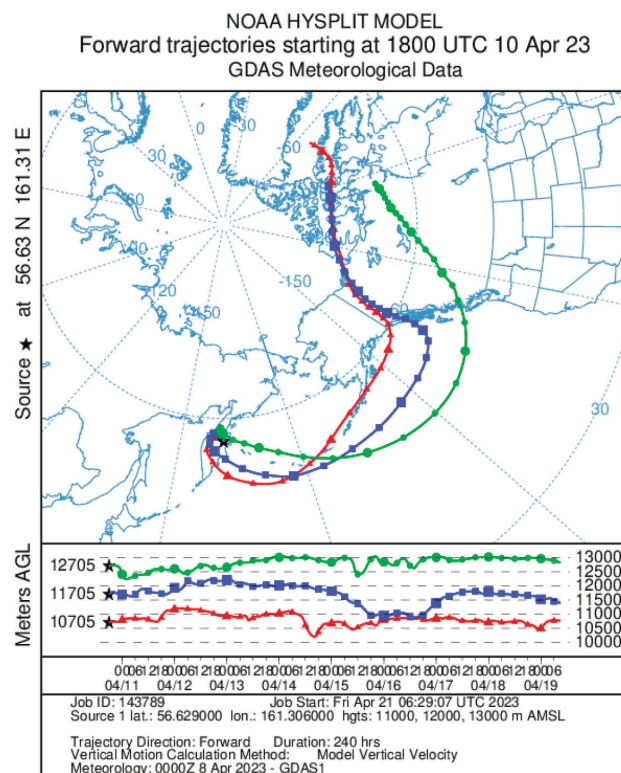


Рис. 4. Траектории движения аэрозольных облаков извержения влк. Шивелуч на уровнях 11, 12 и 13 км н. у. м. в период с 10 по 18 апреля 2023 г. по данным модели HYSPLIT (англ. Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>)

Fig. 4. The trajectories of aerosol clouds movement of the Sheveluch volcano eruption at levels 11, 12 and 13 km a.s.l. in the period from April 10 to 18, 2023, according to the HYSPLIT model (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>)

В течение всего извержения взрывные события сопровождалось выносом большого количества диоксида серы (SO_2). Согласно данным Системы оповещения о вулканическом пепле и SO_2 Службы поддержки авиации (*англ.* Support Aviation Control Service (SACS) SO_2 and Ash Notification System, <http://sacs.aeronomie.be>), с помощью инструмента TROPOMI (*англ.* Tropospheric Ozone-Monitoring Instrument) над Камчаткой были зарегистрированы облака диоксида серы, высота которых превышала 20 км н.у.м. По состоянию на 01:42 UTC 11 апреля такие облака занимали площадь 165 967 км², масса SO_2 в них составляла 214,46 кт, концентрация диоксида серы достигала 471,9 DU; на 01:22 UTC 12 апреля площадь таких облаков равнялась 593 156 км², масса SO_2 в них — 243,765 кт, концентрация диоксида серы — 191,6 DU (*рис. 3*, см. с. 287). В дальнейшем площадь аэрозольных облаков увеличивалась, но концентрация SO_2 в них снижалась (например, https://sacs.aeronomie.be/nrt/TropomiNrt/2023/04.orb/12/tropomi_vcd20230412_112_lr.gif; https://sacs.aeronomie.be/nrt/TropomiNrt/2023/04.orb/13/tropomi_vcd20230413_101_lr.gif; https://sacs.aeronomie.be/nrt/TropomiNrt/2023/04.orb/14/tropomi_vcd20230414_102_lr.gif).

К 20 апреля аэрозольное облако достигло западной части о. Гренландия (https://sacs.aeronomie.be/nrt/TropomiNrt/2023/04.orb/20/tropomi_vcd20230420_105_lr.gif), 21 апреля оно полосой протянулось от о. Исландия вдоль Скандинавского п-ова (https://sacs.aeronomie.be/nrt/TropomiNrt/2023/04.orb/21/tropomi_vcd20230421_106_lr.gif).

Согласно данным модели NOAA HYSPLIT, 19 апреля в районе о. Гренландия аэрозольные облака находились на высоте 11–13 км н.у.м. (*рис. 4*, см. с. 287).

Апрельское эруптивное событие Шивелуча было одним из самых сильных взрывных извержений, связанных с ростом лавового купола в кратере вулкана с 1980 г. По предварительной оценке, для этого извержения VEI (*англ.* Volcanic Explosivity Index — вулканический взрывной индекс) оценивается как 3–4.

Заключение

Пароксизмальное взрывное извержение влк. Шивелуч непрерывно продолжалось 10–13 апреля 2023 г. Оно началось на фоне постоянной эмиссии пепла из вулкана, отмечавшейся в течение 3 ч. Высота подъёма отдельных пепловых облаков, вероятно, превышала 15 км н.у.м. По некоторым оценкам, изредка взрывы могли поднимать пеплы до 18 км н.у.м. Точные значения высоты подъёма эруптивных облаков можно будет оценить на основе детального анализа данных различных спутниковых систем.

Согласно спутниковым данным, эруптивная колонна во время извержения не была вертикальной: в начальный момент извержения она имела наклон на северо-северо-восток, в дальнейшем преимущественно на запад и на юг — в момент очередной взрывной облака фиксировались не строго над вулканом, а в стороне от его кратера.

В связи с высокой циклонической активностью, господствовавшей над п-овом Камчатка, эруптивное облако Шивелуча было растянуто в полосу длиной более 3500 км с запада на северо-восток от вулкана. Аэрозольное облако 21–22 апреля отмечалось в районе Скандинавского п-ова. Во время пароксизмального извержения в атмосферу постоянно поступал диоксид серы, максимальное количество которого выделилось 10–11 апреля, связано это с взрывным разрушением лавового купола влк. Шивелуч. Общая площадь территории Камчатки и Тихого океана, на которой отмечались пепловые и аэрозольные шлейфы и облака в течение 10–13 апреля, по состоянию на 14 апреля составляла около 3280 тыс. км².

Это извержение Шивелуча относится к субплинианскому типу, так как имеет высокие параметры подъёма эруптивных облаков и продолжительности события. Для этого извержения VEI оценивается как 3–4.

Работа ИС VolSatView (Гирина и др., 2018, 2019; Gordeev et al., 2016; Luryan et al., 2014), с помощью которой преимущественно выполнено настоящее исследование, осуществляется благодаря ресурсам: Дальневосточного центра НИЦ «Планета»; Центра коллективного поль-

зования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг», поддерживаемого и развиваемого Институтом космических исследований РАН в рамках темы «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8 (Лупян и др., 2019); ЦКП научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-663, поддерживаемого и развиваемого Вычислительным центром ДВО РАН (Sorokin et al., 2017).

Литература

1. Гирина О. А., Демянчук Ю. В., Мельников Д. В., Ушаков С. В., Овсянников А. А., Сокоренко А. В. Пароксизмальная фаза извержения вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 27 февраля 2005 г. (предварительное сообщение) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 16–23. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9188257>.
2. Гирина О. А., Ушаков С. В., Демянчук Ю. В. Пароксизмальное извержение вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 9 мая 2004 г. // Вестн. Камчатской регион. ассоциации Учебно-науч. центр (КРАУНЦ). Сер.: Науки о Земле. 2007. Вып. 10. № 2. С. 65–73. http://www.kscnet.ru/kraesc/2007/2007_10/art9.pdf.
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., 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.
5. 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.
6. Овсянников А. А., Маневич А. Г. Извержение вулкана Шивелуч в октябре 2010 г. // Вестн. Камчатской регион. ассоциации Учебно-науч. центр (КРАУНЦ). Сер.: Науки о Земле. 2010. Т. 16. № 2. С. 7–9. <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/article/view/446/pdf>.
7. Федотов С. А., Жаринов Н. А., Двигало В. Н., Селиверстов Н. И., Хубуня С. А. Эруптивный цикл вулкана Шивелуч в 2001–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 3–14. <http://elibrary.ru/item.asp?id=17338146>.
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. <https://doi.org/10.1134/S1019331614010079>.
9. 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>.
10. Horváth Á., Carr J. L., Girina O. A., Wu D. L., Bril A. A., Mazurov A. A., Melnikov D. V., Hoshyaripour G. A., Buehler S. A. Geometric estimation of volcanic eruption column height from GOES-R near-limb imagery — Part 1: Methodology // Atmospheric Chemistry and Physics. 2021. V. 21. P. 12189–12206. <https://doi.org/10.5194/acp-21-12189-2021>.
11. 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>.
12. Melekestsev I. V., Volynets O. N., Ermakov V. A., Kirsanova T. P., Masurenkov Y. P. Sheveluch Volcano // Active Volcanoes of Kamchatka. М.: Nauka, 1991. V. 1. P. 98–103.
13. 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>.
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.

Analysis of the development of the paroxysmal eruption of Sheveluch volcano on April 10–13, 2023, based on data from various satellite systems

O. A. Girina¹, E. A. Loupian², A. Horvath³, D. V. Melnikov¹, A. G. Manevich¹,
A. A. Nuzhdaev¹, A. A. Bril², A. Yu. Ozerov¹, L. S. Kramareva⁴, A. A. Sorokin⁵

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 *Meteorological Institute, Hamburg University, Hamburg 20146, Germany*

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

⁵ *Computing Center FEB RAS, Khabarovsk 680000, Russia*

Sheveluch volcano is the most active volcano in Kamchatka. The paroxysmal explosive eruption of the volcano that destroyed the lava dome in the volcanic crater continued on April 10–13, 2023. According to various satellite data, the height of the separate eruptive clouds probably exceeded 15 km a.s.l. A powerful cyclone, which dominated the entire Kamchatka Peninsula, pulled the eruptive cloud to the west, turned it to the south, stretched it to the north and directed it to the east from the volcano. The dynamics of the development of ash and aerosol clouds of this eruption is reflected in the animations made from a series of Himawari-9 satellite images in the VolSatView IS from 08:00 UTC (Coordinated Universal Time) on April 10 to 07:50 UTC on April 14 (http://d33.infospace.ru/jr_d33/materials/2023v20n2/283-291/1683110898.webm) and of the Arctica-M1 satellite from 16:00 to 21:30 UTC April 10 (http://d33.infospace.ru/jr_d33/materials/2023v20n2/283-291/1683821166.webm). It was noted that the eruptive column was not vertical: for example, at the initial moment of the eruption on April 10 at 13:20 UTC, it deviated to the north-northeast, on April 11 at 12:00 UTC to the northwest, and on April 12 at 07:00 UTC to the southwest. During the paroxysmal eruption, sulfur dioxide continuously entered the atmosphere, the maximum amount of which was released on April 10–11, as a result of the explosive destruction of the lava dome of the Sheveluch volcano. Ash clouds along with aerosol clouds on April 10–13 were stretched into a strip more than 3500 km long from west to northeast. On April 21–22, the Sheveluch aerosol cloud was observed in the region of the Scandinavian Peninsula. The total area of the territory of Kamchatka and the Pacific Ocean where ash and aerosol plumes and clouds were observed during the April 10–13 eruption was about 3280 thousand km². The paroxysmal eruption of Sheveluch volcano belongs to the sub-Plinian type because it is characterized by a big height of eruptive cloud and a long event duration. For this eruption, the VEI (Volcanic Explosivity Index) is estimated to be 3–4. A detailed description of the paroxysmal explosive eruption of Sheveluch volcano and the spread of the eruptive cloud was performed based on data from various satellite systems (Himawari-9, NOAA-18/19, GOES-18, Terra, Aqua, JPSS-1, Suomi NPP, Arctica-M1 etc.) in the information system “Remote monitoring of the activity of the volcanoes of the Kamchatka and the Kuriles” (VolSatView, <http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru>).

Keywords: volcano, Sheveluch, paroxysmal explosive eruption, satellite monitoring, VolSatView, KVERT, Kamchatka

Accepted: 27.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291

References

1. Girina O. A., Demyanchuk Yu. V., Melnikov D. V., Ushakov S. V., Ovsyannikov A. A., Sokorenko A. V., The paroxysmal phase of the February 27, 2005 eruption of Young Shiveluch volcano, Kamchatka. A preliminary report, *Volcanology and Seismology*, 2006, No. 1, pp. 16–23 (in Russian), <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9188257>.
2. Girina O. A., Ushakov S. V., Demyanchuk Yu. V., The paroxysmal eruption of the Young Sheveluch volcano, Kamchatka on May 10, 2004, *Bull. Kamchatka Regional Association “Educational-Scientific*

- Center". *Earth Sciences*, 2007, Vol. 10, No. 2, pp. 65–73 (in Russian), available at: http://www.kscnet.ru/kraesc/2007/2007_10/art9.pdf.
3. 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), <https://elibrary.ru/item.asp?id=37061627>.
 4. 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), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265.
 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., 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), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
 6. Ovsyannikov A. A., Manevich A. G., The October 2010 eruption of Sheveluch Volcano, *Bull. Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences*, 2010, Vol. 16, No. 2, pp. 7–9 (in Russian), <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/article/view/446/pdf>.
 7. Fedotov S. A., Zharinov N. A., Dvigalo V. N., Seliverstov N. I., Khubunaya S. A., The 2001–2004 eruptive cycle of Shiveluch volcano, *Volcanology and Seismology*, 2004, No. 6, pp. 3–14 (in Russian). <http://elibrary.ru/item.asp?id=17338146>
 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, <https://doi.org/10.1134/S1019331614010079>.
 9. 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, Vol. 10, No. 6, pp. 382–394, <https://doi.org/10.1134/S074204631606004X>.
 10. Horváth Á., Carr J. L., Girina O. A., Wu D. L., Bril A. A., Mazurov A. A., Melnikov D. V., Hoshyari-pour G. A., Buehler S. A., Geometric estimation of volcanic eruption column height from GOES-R near-limb imagery — Part 1: Methodology, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, Vol. 21, pp. 12189–12206, <https://doi.org/10.5194/acp-21-12189-2021>.
 11. 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>.
 12. Melekestsev I. V., Volynets O. N., Ermakov V. A., Kirsanova T. P., Masurenkov Y. P., *Sheveluch Volcano, Active Volcanoes of Kamchatka*, Moscow: Nauka, 1991, Vol. 1, pp. 98–103.
 13. 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>.
 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.