Характеристика событий эксплозивного извержения вулкана Безымянный 15 марта 2019 г. по спутниковым данным

О. А. Гирина¹, Д. В. Мельников¹, А. Г. Маневич¹, Е. А. Лупян², Л. С. Крамарева³

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

Вулкан Безымянный — один из наиболее активных вулканов на Камчатке и в мире. В декабре 2016 г. началась его активизация после четырёхлетнего молчания в течение 2012–2016 гг. В 2017 г. произошло три пароксизмальных эксплозивных извержения вулкана, в 2019 г. — два. В работе дано описание извержения, произошедшего 15 марта 2019 г., а также предваряющих его событий на основании изучения видеоматериалов и различных спутниковых данных. Мониторинг вулкана проводился с помощью информационной системы (ИС) «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView). Извержение было предсказано сотрудниками KVERT (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team, Камчатская группа реагирования на вулканические извержения) за 6,5 ч до его начала. Эксплозии подняли пепел до 15 км над уровнем моря, эруптивное облако перемещалось на северо-восток и восток от вулкана, основная площадь территории, на которой отмечались пеплопады, составляла около 210 410 км², в том числе на суше — 15 000 км². Показано анимированное изображение движения пеплового облака от вулкана, выполненное по серии снимков Himawari-8 в ИС VolSatView (<http://kamchatka.volcanoes.smlslab.ru/animation/1584509687.gif>). Аэрозольные облака после окончания извержения фиксировались в атмосфере на удалении до 4000 км на северо-восток от вулкана до 18 марта 2019 г. В результате извержения на всех склонах вулкана (преимущественно на восточном и юго-восточном) образовались отложения пирокластических потоков и пирокластических волн, площадь которых составила около 30 км².

Ключевые слова: вулкан, Безымянный, извержение, KVERT, прогноз, видеоданные, спутниковый мониторинг, VolSatView, Камчатка

Одобрена к печати: 19.05.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-102-114

Введение

Вулкан Безымянный, один из наиболее активных вулканов мира, расположен в центральной части Ключевской группы вулканов Камчатки. После катастрофического извержения 30 марта 1956 г. рост лавового купола в его эксплозивном кратере до конца 2012 г. продолжался почти непрерывно (Girina, 2013). В течение четырёх лет с декабря 2012 г. до декабря 2016 г. вулкан находился в состоянии относительного покоя, связанного с высокой эффузивной активностью Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН) в 2012–2013 гг. и четырёх извержений вулкана Ключевской в 2012–2013, 2013, 2015 и 2016 гг. (Гирина, 2016; Гирина и др., 2017г).

С декабря 2016 г. по середину 2018 г. отмечалось выжимание вязких лавовых потоков на западные и южный склоны лавового купола вулкана, на фоне которого произошло три сильных эксплозивных извержения с выносом пепла до 15 км над уровнем моря (н. у. м.): 9 марта, 16 июня и 20 декабря 2017 г. (Гирина и др., 2017а–в, 2018а).

В 2018 г. вулкан был относительно спокоен. К середине февраля 2018 г. температура термальной аномалии в районе вулкана значительно понизилась, что было связано с завершением выжимания вязкого лавового потока на склон купола после эксплозивного изверже-

ния 20 декабря 2017 г. С 24 марта по 5 ноября 2018 г. температура аномалии была повышенной в связи с ростом и существованием нового небольшого лавового купола, обнаруженного в кратере вулкана при облёте на вертолёт 9 июля 2018 г. (<http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/imgs/2373.jpg>). Первое в 2019 г. эксплозивное извержение вулкана произошло в 16:10 GMT (Greenwich Mean Time, среднее время по Гринвичу) 20 января: эруптивная туча поднялась до 10–12 км н. у. м. и перемещалась на северо-запад от вулкана. Площадь пеплопадов составила около 200 тыс. км², VEI (Volcanic Explosivity Index, вулканический эксплозивный индекс) извержения — 2 (Гирина и др., 2018в, 2019б).

Наблюдения за Безымянным с помощью видеокамер осуществляются с 20 августа 2003 г. (Гирина и др., 2018б). Спутниковый мониторинг вулкана проводится учёными Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (KVERT — Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) ИВиС ДВО РАН с 2002 г. (Гирина и др., 2018б; Gordeev, Girina, 2014). С 2014 г. он выполняется с помощью информационной системы (ИС) «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView) (Гирина и др., 2018б, 2019а; Gordeev et al., 2016).

Эксплозивное извержение вулкана 15 марта 2019 г.

После извержения 20 января 2019 г. на западный и северо-западный склоны купола Новый выжимание лавовых потоков продолжалось примерно до конца января (по спутниковым данным), с 27 по 30 января величина разности температуры термальной аномалии и фона понизилась с 30,8 до 7,7 °С, с 3 февраля она вновь стала понемногу повышаться (рис. 1). Согласно данным видеомониторинга вулкана, с 23 февраля в ночное время начало отмечаться свечение над кратером вулкана, а также обрушения раскалённых лавин на восточные склоны лавового купола — в кратер вулкана поступало свежее лавовое вещество. Количество раскалённых лавин постепенно увеличивалось, температура аномалии росла, было понятно, что готовится новое эксплозивное извержение вулкана.

Рис. 1. Изменение величины разности температуры термальной аномалии и фона вулкана Безымянный в феврале — апреле 2019 г. по данным обработки спутниковой информации среднего разрешения учёными KVERT в ИС VolSatView

26 февраля 2019 г. сотрудниками KVERT было выпущено предупреждение для авиации (Volcano Observatory Notice for Aviation — VONA), в котором Авиационный цветовой код (АЦК) опасности вулкана был изменён с жёлтого на оранжевый (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2019-43>). В прогнозе было указано, что эксплозивное извержение с выносом пепла до 10–15 км н. у. м. возможно в течение нескольких дней.

Количество раскалённых лавин увеличивалось, с 10 марта температура термальной аномалии начала неуклонно расти (см. *рис. 1*), 12 марта в сообщении VONA прогноз был уточнён: эксплозивное извержение с выносом пепла до 10–15 км н.у.м. может произойти в течение следующей недели (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2019-60>).

В связи со значительным увеличением количества и объёмов раскалённых лавин, спускавшихся по северо-восточному и восточному склонам купола, с 00:30 до 03:00 GMT 15 марта в парогазовых шлейфах вулкана отмечался пепел, шлейф протягивался на юго-восток от вулкана до 100 км. С 07:30 GMT 15 марта температура термальной аномалии в районе вулкана стала быстро расти (*рис. 2*). С 08:15 GMT над вулканом начала формироваться вертикальная парогазовая колонна, в которую иногда подмешивался пепел от крупных раскалённых лавин. Парогазовая колонна с содержанием пепла время от времени заслоняла всё сильнее раскалёвшийся лавовый купол, о чём свидетельствуют видеоданные и прерывистый рост яркостной температуры термальной аномалии: например, резкое снижение температуры в 14:20 GMT связано с подъёмом облака пепла от раскалённых лавин, перекрывшего лавовый купол (см. *рис. 2*). В 11:00 GMT 15 марта в сообщении VONA KVERT АЦК опасности вулкана был изменён с оранжевого на красный и в прогнозе было указано, что эксплозивное извержение с выносом пепла до 10–15 км н.у.м. возможно в течение этой ночи (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2019-63>).

Рис. 2. Изменение величины спектральной энергетической яркости и яркостной температуры района лавового купола вулкана Безымянный во время подготовки и пароксизмальной фазы эксплозивного извержения 15 марта 2019 г. по данным спутника Himawari-8 из ИС VolSatView

Пароксизмальное извержение Безымянного с выносом пепла до 15 км н.у.м. началось в 17:30 GMT 15 марта, сообщение VONA об этом было выпущено KVERT в 17:37 GMT 15 марта (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2019-64>). Реализация прогноза KVERT произошла через 6,5 ч после предупреждения.

Согласно видеоданным, в начале извержения произошло несколько мощных взрывов, в результате которых на все склоны вулкана начали обрушиваться раскалённые лавины и пирокластические потоки, над вулканом до 12 км поднялась мощная эруптивная колонна, постепенно трансформировавшаяся в пепловый шлейф, перемещавшийся на северо-восток и восток от вулкана (см. анимированное изображение движения пеплового облака от вулкана Безымянный 15–16 марта 2019 г., выполненное по серии снимков Himawari-8 в ИС VolSatView, <http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru/animation/1584509687.gif>).

Детальное изучение видеоданных показало, что первые раскалённые лавины начали обрушиваться на западные склоны купола примерно с 16:30 GMT 15 марта, тогда же пепел стал

всё больше подмешиваться в парогазовую колонну, сформированную над вулканом. Взрывы в кратере лавового купола Безымянного и крупные раскалённые лавины, которые обрушивались на его восточные склоны, начали наблюдаться с 17:10 GMT 15 марта. В 17:22 GMT произошёл мощный взрыв (лавовый купол был ослепительно белым в темноте ночи от огромного количества раскалённого пирокластического материала, обрушившегося на все его склоны), и над вулканом начала подниматься вертикальная эруптивная колонна, которая к 17:27 GMT достигла 10–12 км н. у. м. В 17:29–17:45 GMT произошла серия наиболее сильных, вероятно, направленных взрывов, в результате которых эруптивное облако поднялось до 15 км н. у. м. и стало стремительно двигаться на северо-восток от вулкана (рис. 3).

Рис. 3. Эруптивная колонна и облако вулкана Безымянный во время извержения 15 марта 2019 г., на переднем плане — конус вулкана Ключевской. Видеоданные KVERT ИВиС ДВО РАН

По спутниковым данным из ИС VolSatView, в момент главного взрыва в 17:40 GMT максимальные величины характеристик термальной аномалии в районе купола вулкана Безымянный достигали: разница температуры термальной аномалии и фона — 117°C , яркостная температура — $398,7\text{ K}$, спектральная энергетическая яркость — $12,7\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ср}^{-1}\cdot\text{мкм}^{-1}$ (см. рис. 1, 2). Во время следующих сильных взрывов с мощной подсветкой купола пепловый шлейф перемещался на восток от вулкана. Существенное снижение яркостной температуры аномалии в районе купола вулкана было отмечено в 20:00 GMT 15 марта (см. рис. 2).

Непрерывный вынос пепла из вулкана, формирование пирокластических потоков и пеплового шлейфа происходили, согласно видео- и спутниковым данным, примерно до 00:10 GMT 16 марта, т. е. эксплозивная фаза извержения продолжалась около 7,5 ч, далее на протяжении нескольких дней наблюдалась мощная парогазовая активность вулкана.

Согласно спутниковым данным из ИС VolSatView, азимут распространения пеплового облака вначале был 54° , через десять минут — 66° , затем ещё через десять минут — 70° , т. е. эруптивное облако постепенно смещалось к востоку (рис. 4, см. с. 106). Азимут его распространения 15 марта в 18:00 GMT составлял 74° , в 18:30 GMT — 80° , в 19:00 GMT — 85° , в 19:30 GMT — 88° , в дальнейшем, например до 05:00 GMT 16 марта, азимут распространения эруптивного облака варьировался в пределах $88\text{--}92^{\circ}$ (<http://kamchatka.volcanoes.smislab.ru/animation/1584509687.gif>).

Скорость распространения пеплового облака изменялась от 60 до 80 км/ч в первые два часа извержения (на расстоянии фронта облака до 150 км от вулкана) до 100–120 км/ч на расстоянии от вулкана от 300 до 1300 км, когда облако находилось над океаном.

Рис. 4. Изменение конфигурации и азимута распространения эруптивного облака вулкана Безымянный во время извержения 15 марта 2019 г. Данные из ИС VolSatView: изображения облака на снимках спутника Himawari-8 в 14-м канале в 17:30 GMT (а), 17:40 (б), 18:00 (в), 18:30 GMT (г) 15 марта 2019 г.

На спутниковых снимках Himawari-8 хорошо видно, что непрерывный пепловый шлейф перемещался на восток от вулкана, но примерно в 20:20 GMT 15 марта пепловое облако, сформированное в результате первых взрывов, практически отделилось от общего шлейфа и стало перемещаться с большей скоростью по сравнению со шлейфом. Примерно к 22:30 GMT 15 марта южный край пеплового шлейфа достиг северной части о. Беринга (Командорские о-ва), к 02:00 GMT 16 марта пепловое облако уже полностью перекрывало остров, пеплопад на котором продолжался, вероятно, примерно до 04:00 GMT 16 марта. Выполненный анализ данных со спутника Himawari-8 в ИС VolSatView показал, что с 17:30 GMT 15 марта до 03:00 GMT 16 марта площадь эруптивного облака вулкана Безымянный увеличилась с 1200 до 107 072 км² (рис. 5, 6, см. с. 107).

Рис. 5. Изменение площади эруптивного облака вулкана Безымянный во время извержения с 17:30 GMT 15 марта до 03:00 GMT 16 марта 2019 г. Данные из ИС VolSatView

Рис. 6. Визуализация в ИС VolSatView распространения пеплового шлейфа во время извержения вулкана Безымянный с 17:30 GMT 15 марта до 03:00 GMT 16 марта 2019 г. по данным Himawari-8

Общая площадь пеплопадов, связанных с распространением эруптивного облака Безымянного, к 03:00 GMT 16 марта составляла $210\,410\text{ км}^2$, в том числе на суше — $15\,000\text{ км}^2$ (см. рис. 6). Благодаря наложению контуров пеплового облака, зафиксированного в разное время его движения, хорошо видно, что основным является восточное направление движения — непрерывный вынос пепла из вулкана сформировал протяжённый пепловый шлейф (см. рис. 6). Дугообразные контуры облака севернее «главного эруптивного шлейфа» связаны с движением пеплового облака, сформированного во время эксплозий, направленных на северо-восток от вулкана. К 23:20 GMT 16 марта первое (фронтальное) пепловое облако достигло района вулкана Вениаминов на п-ове Аляска, тогда как следовавший за ним шлейф практически рассеялся.

Как показал анализ проб тефры, отобранных сотрудниками Камчатской вулканологической станции им. Ф. Ю. Левинсона-Лессинга, ближе к краю пеплопада (16 км от вулкана) вес пепла был 280 г/м^2 , на ст. Апахончич (16 км от вулкана) — $1,1\text{ кг/м}^2$, ближе к оси распространения отложений тефры (в 18–23 км от вулкана) её вес составлял от 3,6 до $4,4\text{ кг/м}^2$. Преобладающие фракции в отложениях тефры на краю пеплопада — 0,5–1,0 мм, ближе к оси её распространения — 2–4 мм, т. е. материал тефры был крупно- и грубозернистый.

Оценка количества пепла, поступившего в атмосферу в ходе извержения, была выполнена по снимку с прибора VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), установленного на спутнике Suomi NPP, принятому ст. Унискан-36 (СканЭкс) ИВиС ДВО РАН. Определялась плотность пеплового облака методом «обратного поглощения» (Prata, 1989), затем был использован стандартный алгоритм VIIRS Volcanic Ash Retrievals (Pavolonis, Qi, 2017), являющийся частью программного комплекса обработки (Community Satellite Processing Package) таких снимков. По состоянию на 01:11 GMT 16 марта 2019 г. масса находящегося в атмосфере пепла составляла 581 135 т, облако перемещалось на высоте 5 км н. у. м. (рис. 7, см. с. 108). Следует отметить, что с начала извержения прошло 8 ч, т. е. часть пепла уже выпала из облака на поверхность земли.

По данным Системы оповещения о вулканическом пепле и SO_2 в рамках Службы поддержки авиации (Support Aviation Control Service — SACS, <http://sacs.aeronomie.be/>), количество диоксида серы (SO_2) в пепловом облаке менялось; например, в 22:25 GMT 15 марта оно составляло 8,8 DU (Dobson Unit — единица Добсона), в 09:56 GMT 16 марта — 2,4 DU и в 20:52 GMT 16 марта — 5,2 DU (рис. 8, см. с. 108). В связи с высокой циклонической активностью в районе северной части Тихого океана и Берингова моря аэрозольные облака вулкана Безымянный продолжали наблюдаться в 07:55 и 08:24 GMT 17 марта в районе о. Нунивак возле Аляски на $60\text{--}63^\circ\text{ с. ш.}$ (1980 км от вулкана), в 19:58 GMT 17 марта на севере п-ова Аляска на 70° с. ш. (2600 км от вулкана), в 17:54 GMT 18 марта в районе островов северной части Канады на $71\text{--}76^\circ\text{ с. ш.}$ (3900–4000 км от вулкана).

Рис. 7. Распределение массы пепла в эруптивном облаке вулкана Безымянный в 01:11 GMT 16 марта 2019 г. по данным прибора VIIRS со спутника Suomi NPP (описание в тексте)

Рис. 8. Содержание SO_2 в аэрозольном шлейфе вулкана Безымянный во время извержения 15 марта 2019 г. по данным SACS (<http://sacs.aeronomie.be/>)

Рассмотрим более детально изменения положения аэрозольных облаков вулкана Безымянный 16 и 17 марта 2019 г. по данным атмосферного инфракрасного зонда AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), установленного на спутнике Aqua. Исходные данные AIRS были обработаны согласно стандартному алгоритму (Prata, Bernardo, 2007). Высота облаков определялась методом восстановления обратных траекторий движения воздушных масс в течение 72 ч с начала извержения по модели HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) (Stein et al., 2015). Масса диоксида серы в аэрозольных облаках вулкана Безымянный

16 марта в 01:47 GMT составляла 4400 т, в 13:35 GMT — 3000 т, 17 марта в 12:41 GMT — 1500 т (рис. 9). Согласно модели, аэрозольные облака располагались на высотах от 8 до 12 км н. у. м., наиболее ярко разная высотность облаков проявилась в 13:35 GMT 16 марта 2019 г.

Рис. 9. Положение аэрозольных облаков вулкана Безымянный по данным атмосферного инфракрасного зонда AIRS в 01:47 и 13:35 GMT 16 марта 2019 г. и 12:41 GMT 17 марта 2019 г. Линиями показаны траектории движения воздушных масс по модели HYSPLIT, чёрные кружки на них — отметки времени получения спутникового снимка

По спутниковым данным, полученным 16 марта 2019 г., образования пирокластики наблюдались на большой территории, значительная их часть отложилась на юго-восточных, восточных и северо-восточных склонах вулкана (рис. 10, см. с. 110). Следует отметить, что пирокластические потоки во время извержения двигались преимущественно по каньонам, долинам и ложбинам, тогда как пирокластические волны имели площадное распространение. На спутниковых снимках протяжённые отложения пирокластических потоков чётко очерчены, образования пирокластических волн покрывают тонким слоем пространства между отложениями пирокластических потоков. По данным из ИС VolSatView, протяжённость отложений пирокластических потоков в долине Восточной была около 8 км, на юго-восточном склоне в каньоне у экструзии Лохматый — 7 км (см. рис. 10). Площадь образований пирокластических потоков и пирокластических волн на склонах вулкана Безымянный составила около 30 км². Полевые исследования отложений в июле 2019 г. позволили оценить их мощность: для пирокластических потоков она варьировалась от 1,5 до 20 м, для пирокластических волн — до 2 м. Объём отложений пирокластических потоков и волн этого извержения оценивается в 0,1–0,2 км³.

Анализ снимка со спутника Landsat-8 от 10:38 GMT 19 марта 2019 г. в инфракрасном канале (10,9 мкм) показал распределение яркостной температуры в районе лавового купола вулкана и отложений пирокластических потоков извержения 15 марта (рис. 11, см. с. 110). Температура фона снимка варьируется от –24 до –26 °С. Спустя 4 сут после извержения периферийные части отложений пирокластических потоков, занятые в основном маломощными отложениями пирокластических волн и тефры, имели яркостную температуру близкую к фоновой (от –23 до –22 °С), на что также повлияли, вероятно, сильный ветер в районе вулкана 17–18 марта и снегопад днём 19 марта.

Рис. 10. Отложения пирокластических потоков и волн на склонах вулкана Безымянный после извержения 15 марта 2019 г. Снимок со спутника Sentinel-2B в 00:30 GMT 16 марта 2019 г. из ИС VolSatView

Рис. 11. Распределение яркостной температуры в районе купола вулкана Безымянный и его пирокластических отложений, сформированных во время извержения 15 марта 2019 г. Данные со спутника Landsat-8 от 10:38 GMT 19 марта 2019 г. (инфракрасный канал 10,9 мкм). В качестве фона используется цифровая модель рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

Основные отложения пирокластических потоков (в каньонах на юго-восточном склоне вулкана, в долинах Восточная и Южная) хорошо выделяются благодаря высоким значениям яркостной температуры, особенно на участках отложений, мощность которых превышает

ет 10–15 м. Такую же температуру имеют отложения на северо-восточном склоне вулкана — вероятно, они связаны с направленными взрывами купола и состоят из крупных горячих глыб лавы и грубой пирокластики. Наиболее высокая температура наблюдается в центральной и западно-северо-западной частях лавового купола Безымянного. В центральной части купола выделяется кратер, из которого поднимается высокотемпературная парогазовая колонна; в западно-северо-западной части купола (в атрио вулкана) находится наиболее мощная толща грубой (глыбы и крупные обломки лавы, вулканические бомбы, вулканический песок и т.д.) горячей пирокластики, сформированная во время многочисленных эксплозий 15 марта.

После окончания извержения в районе кратера вулкана в течение нескольких месяцев продолжала фиксироваться яркая термальная аномалия (см. *рис. 1*), в тёмное время суток отмечалось свечение его вершины, что являлось отражением вероятного истечения фумарольных газов и выжимания нового лавового потока на северо-западный склон купола Безымянного.

Заключение

Пароксизмальное извержение вулкана Безымянный 15 марта 2019 г. с выносом пеплов до 15 км н.у.м. и пирокластических продуктов около $0,1\text{--}0,2\text{ км}^3$ было самым сильным за последние три года. Оно произошло спустя 47 дней после предыдущего извержения, наблюдавшегося 20 января 2019 г.

Эксплозивное извержение было предсказано сотрудниками KVERT за 6,5 ч до его начала.

Общая площадь пеплопадов, связанных с распространением эруптивного облака Безымянного, к 03:00 16 марта составляла $210\,410\text{ км}^2$, на территории Камчатки пепел отложился на площади порядка $15\,000\text{ км}^2$.

Аэрозольные облака после окончания извержения фиксировались в атмосфере на удалении до 4000 км на северо-востоке от вулкана до 18 марта 2019 г.

По спутниковым данным из информационной системы VolSatView, протяжённость отложений пирокластических потоков в долине Восточной и на юго-восточном склоне в каньоне у экструзии Лохматый достигала 8 км. Площадь образований пирокластических потоков и пирокластических волн на склонах вулкана Безымянный составила около 30 км^2 . Для этого извержения индекс VEI оценивается как 3.

Следует отметить, что работа ИС VolSatView осуществляется благодаря распределённым вычислительным 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), в которых используются технологии хранения и обработки спутниковой информации, созданные в том числе при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-29-07953) (Лупян и др., 2014, 2015).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00042).

Литература

1. Гирина О.А. Спутниковые данные высокого разрешения для уточнения положения разломных зон в пределах Ключевской группы вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 148–156. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-148-156.
2. Гирина О.А., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Уваров И.А., Кашницкий А.В., Буцев М.А., Марченков В.В., Брилль А.А., Мазуров А.А. (2017а) Применение данных спутника Himawari для мониторинга вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 65–76. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-65-76.

3. Гирина О. А., Лупян Е. А., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Кашицкий А. В., Бриль А. А., Сорокин А. А. (2017б) Извержения Северной группы вулканов Камчатки 14–18 июня 2017 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 317–323. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-317-323.
4. Гирина О. А., Мельников Д. В., Демянчук Ю. В., Маневич А. Г. (2017в) Извержение вулкана Безымянный в 2016–2017 гг. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы 20-й Региональной научной конф., посвящённой Дню вулканолога. 30–31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 14–17.
5. Гирина О. А., Мельников Д. В., Маневич А. Г. (2017г) Спутниковый мониторинг вулканов Камчатки и Северных Курил // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 194–209. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-194-209.
6. Гирина О. А., Лупян Е. А., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Сорокин А. А., Крамарева Л. С., Уваров И. А., Кашицкий А. В. (2018а) Извержение вулкана Безымянный 20 декабря 2017 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 88–99. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-88-99.
7. 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. (2018б) Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки / отв. ред. О. А. Гирина. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. 192 с.
8. Гирина О. А., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Демянчук Ю. В., Нурждаев А. А. (2018в) Вулкан Безымянный в 2016–2018 гг. по данным KVERT // Вулканизм и связанные с ним процесс: материалы 21-й Региональной научной конф., посвящённой Дню вулканолога. 29–30 марта 2018 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. С. 28–31.
9. 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. (2019а) 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.
10. Гирина О. А., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Мальковский С. И., Уваров И. А., Марченков В. В. (2019б) Извержение вулкана Безымянный 20 января 2019 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы 22-й Всероссийской научной конф., посвящённой Дню вулканолога. 28–29 марта 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 59–62. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38576505>.
11. 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.
12. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
13. Girina O. A. Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956–2010 // J. Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 22–41. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2013.05.002.
14. 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: 10.1134/S1019331614010079.
15. 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. V. 10. No. 6. P. 382–394. DOI: 10.1134/S074204631606004X.
16. Pavolonis M., Qi H. NOAA JPSS Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Volcanic Ash Detection and Height Environmental Data Record (EDR) from NDE / NOAA National Centers for Environmental Information. 2017. DOI: 10.7289/V5BK19KS.
17. Prata A. J. Observation of volcanic ash clouds in the 10–12 micron window using AVHRR/2 Data // Intern. J. Remote Sensing. 1989. V. 10(4–5). P. 751–761.
18. Prata A. J., Bernardo C. Retrieval of volcanic SO₂ column abundance from Atmospheric Infrared Sounder data // J. Geophysical Research. 2007. V. 112. D20204. DOI: 10.1029/2006JD007955.
19. Stein A. F., Draxler R. R., Rolph G. D., Stunder B. J. B., Cohen M. D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // Bull. American Meteorological Society. 2015. V. 96. P. 2059–2077. URL: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.

The characteristics of Bezymianny volcano explosive eruption events on March 15, 2019, inferred from satellite data

O. A. Girina¹, D. V. Melnikov¹, A. G. Manevich¹, E. A. Loupian², L. S. Kramareva³

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

Bezymianny is one of the most active volcanoes in Kamchatka and in the world. In December 2016, activity of the volcano began to intensify after four years of silence during 2012–2016. In 2017, three, and in 2019, two paroxysmal explosive eruptions of the volcano occurred. The work describes the eruption that occurred on March 15, 2019, as well as the events preceding it, based on the study of video and various satellite data. The volcano was monitored using the information system (IS) "Remote monitoring of the activity of Kamchatka and Kurile volcanoes" (VolSatView). The eruption had been predicted by KVERT (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) staff 6.5 hours before it began. Explosions raised ash up to 15 km above sea level, the eruptive cloud moved northeast and east of the volcano, the main area of the territory where ashfalls were observed was about 210,410 km², including 15,000 km² on land. An animated image of the ash cloud movement from the volcano is shown, made according to a series of images of Himawari-8 in the IS VolSatView (<http://kamchatka.volcanoes.smis-lab.ru/animation/1584509687.gif>). After the eruption, aerosol clouds were recorded in the atmosphere at a distance of up to 4000 km in the northeast of the volcano until March 18, 2019. As a result of the eruption, deposits of pyroclastic flows and pyroclastic surges formed on all slopes of the volcano (mainly on the eastern and southeastern), the area of which reached about 30 km².

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

Accepted: 19.05.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-102-114

References

1. Girina O. A., Sputnikovye dannye vysokogo razresheniya dlya utochneniya polozheniya razlomnykh zon v predelakh Klyuchevskoi gruppy vulkanov Kamchatki (Satellite high-resolution data used to clarify the position of fault zones within the Klyuchevskaya volcanic group of Kamchatka), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 148–156, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-148-156.
2. Girina O. A., Kramareva L. S., Loupian E. A., Sorokin A. A., Melnikov D. V., Manevich A. G., Uvarov I. A., Kashnitskii A. V., Burtsev M. A., Marchenkov V. V., Bril' A. A., Mazurov A. A. (2017a), Primene-nie dannykh sputnika Himawari dlya monitoringa vulkanov Kamchatki (The use of Himawari satellite data for monitoring Kamchatka volcanoes), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmo-sa*, 2017, Vol. 14, No. 7, pp. 65–76, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-65-76.
3. Girina O. A., Loupian E. A., Melnikov D. V., Manevich A. G., Kashnitskii A. V., Bril' A. A., Sorokin A. A. (2017b), Izverzheniya Severnoi gruppy vulkanov Kamchatki 14–18 iyunya 2017 goda (Eruptions of Kam-chatka Northern volcanic group on 14–18 June, 2017), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 317–323, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-317-323.
4. Girina O. A., Melnikov D. V., Demyanchuk Yu. V., Manevich A. G. (2017c), Izverzhenie vulkana Bezy-myannyi v 2016–2017 gg. po dannym KVERT (2016–2017 Bezymianny volcano eruption according to KVERT data), *Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy* (Volcanism and associated processes), Proc. XX Regional Scientific Conf., 30–31 March 2017, Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS DVO RAN, 2017, pp. 14–17.
5. Girina O. A., Melnikov D. V., Manevich A. G. (2017d), Sputnikovi monitoring vulkanov Kamchatki i Severnykh Kuril (Satellite monitoring of Kamchatkan and Northern Kuriles volcanoes), *Sovremennye*

- problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 194–209, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-194-209.
6. Girina O.A., Loupian E.A., Melnikov D.V., Manevich A.G., Sorokin A.A., Kramareva L.S., Uvarov I.A., Kashnitskii A.V. (2018a), Izverzhenie vulkana Bezymianny 20 dekabrya 2017 goda (Bezymianny volcano eruption on December 20, 2017), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 88–99, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-88-99.
7. 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. (2018b), *Kompleksnyi monitoring eksplozivnykh izverzenii vulkanov Kamchatki* (Comprehensive Monitoring of Explosive Volcanic Eruptions of Kamchatka), Girina O.A. (ed.), Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS DVO RAN, 2018, 192 p., available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37061627>.
8. Girina O.A., Melnikov D.V., Manevich A.G., Demyanchuk Yu.V., Nuzhdaev A.A. (2018c), Vulkan Bezymiannyi v 2016–2018 gg. po dannym KVERT (Bezymianny volcano in 2016–2018 according to KVERT data), *Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy* (Volcanism and associated processes), Proc. XXI Regional Scientific Conf., 29–30 March 2018, Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS DVO RAN, 2018, pp. 28–31.
9. 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. (2019a), Sozdanie i razvitie informatsionnoi sistemy "Distantsionnyi 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.
10. Girina O.A., Melnikov D.V., Manevich A.G., Malkovsky S.I., Uvarov I.A., Marchenkov V.V. (2019b), Izverzhenie vulkana Bezymiannyi 20 yanvarya 2019 g. (Bezymianny volcano eruption on January 20, 2019), *Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy* (Volcanism and associated processes), Proc. XXII All-Russia Scientific Conf., 28–29 March 2019, Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS DVO RAN, 2019, pp. 59–62, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38576505>.
11. Loupian E.A., Milekhin O.E., Antonov V.N., Kramareva L.S., Burtsev M.A., Balashov I.V., Tolpin V.A., Solov'ev 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.
12. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskii A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovyykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
13. Girina O.A., Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956–2010, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 2013, Vol. 263, pp. 22–41, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2013.05.002.
14. 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: 10.1134/S1019331614010079.
15. 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: 10.1134/S074204631606004X.
16. Pavolonis M., Qi H. *NOAA JPSS Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Volcanic Ash Detection and Height Environmental Data Record (EDR) from NDE*, NOAA National Centers for Environmental Information, 2017, DOI: 10.7289/V5BK19KS.
17. Prata A.J., Observation of volcanic ash clouds in the 10–12 micron window using AVHRR/2 Data, *Intern. J. Remote Sensing*, 1989, Vol. 10(4–5), pp. 751–761.
18. Prata A.J., Bernardo C., Retrieval of volcanic SO₂ column abundance from Atmospheric Infrared Sounder data, *J. Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, D20204, DOI: 10.1029/2006JD007955.
19. Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F., NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. American Meteorological Society*, 2015, Vol. 96, pp. 2059–2077, available at: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.