

Динамика извержения вулкана Сноу (о. Чирпой, Курильские острова) в 2012–2017 гг.: результаты применения алгоритма VIIRS Nightfire

Д. В. Мельников¹, М. Н. Жижин^{2,3,4}, Г. М. Трифонов⁵, А. А. Пойда⁵

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия
E-mail: dvm@ksnet.ru*

² *Университет Колорадо, Брумфилд, 80020, США*

³ *Национальный информационный центр по окружающей среде НОАА
Болдер, 80305, США*

⁴ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

⁵ *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Москва, 123098, Россия*

В статье представлены результаты успешного применения спутниковых данных VIIRS для мониторинга и восстановления истории извержения вулкана Сноу (о. Чирпой, Курильские острова) в 2012–2017 гг. Поставленные задачи решались с использованием алгоритма Nightfire. Он существенно отличается от существующих аналогичных систем за счёт одновременного использования множества диапазонов инфракрасного спектра (от ближнего до дальнего) совместно с данными видимого спектра, в то время как большинство алгоритмов (например, MODVOLC и MIROVA) используют один или два диапазона из средней и дальней частей инфракрасного спектра. Проведённые исследования показали, что для извержения вулкана Сноу максимальная мощность теплового излучения (МВт) приходится на период с ноября 2012 по январь 2013 г. В этот период произошло излияние первой, наиболее объёмной порции лавового потока. Также выделяются ещё четыре хорошо выраженных периода: сентябрь–октябрь 2013 г.; март–июнь 2014 г.; август–ноябрь 2014 г.; апрель–июнь 2015 г. Они соответствуют импульсам излияния свежих порций лавы. Однако мощность этих лавовых потоков была меньше по сравнению с первым периодом.

Ключевые слова: VIIRS, Nightfire, вулкан, извержение, лавовый поток, Курильские острова, Сноу, Чирпой

Одобрена к печати: 21.12.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-69-79

Введение

Методы оперативного мониторинга вулканической активности стремительно развиваются на протяжении последней четверти века (Harris, 2013). Это связано с увеличением количества и возможностей спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (AVHRR, MODIS, VIIRS, Himawari и др.). Первой общедоступной глобальной системой, ориентированной на постоянный мониторинг вулканической активности, является алгоритм MODVOLC (Wright, 2016). Эта система опирается на данные спутников Terra и Aqua, оснащённых мультиспектральным сенсором MODIS. Спутники были запущены в рамках программы NASA EOS в 1999 и 2002 гг. соответственно. Алгоритм MODVOLC непрерывно работает более 15 лет и считается классической базой для сравнения подобных систем, хотя и не лишённой недостатков. Более новым примером подобных систем является алгоритм MIROVA (Coppola et al., 2016), также основанный на данных MODIS, но расширяющий функциональность MODVOLC.

С запуском спутников, оснащённых сенсорами нового поколения, появляются возможности существенного улучшения качества мониторинга вулканической активности. Так, например, сенсор VIIRS спутника SuomiNPP (первый спутник в программе JPSS) собирает

данные в большем числе спектральных каналов, с лучшим пространственным разрешением и с большей чувствительностью, чем сенсор MODIS. Это даёт возможность более точного построения дискретной спектрограммы наблюдаемого источника теплового потока, что, в свою очередь, позволяет оценить его дополнительные характеристики, например температуру и площадь.

Для работы с данными сенсора VIIRS был разработан автоматический алгоритм Nightfire (Жижин и др., 2017), который осуществляет обнаружение и выявление свойств субпиксельных источников инфракрасного излучения. Первоначальной целью разработки алгоритма был мониторинг объёмов сжигания попутного природного газа в местах добычи и переработки углеводородов. Выгодным отличием алгоритма Nightfire от предшествовавших решений является одновременное использование множества диапазонов инфракрасного спектра (от близкого до дальнего) совместно с данными видимого спектра, в то время как большинство предшествующих алгоритмов используют один или два диапазона из средней и дальней частей инфракрасного спектра.

На территории Камчатки и Курильских островов расположено 66 действующих вулканов (Новейший..., 2005), некоторые из которых представляют потенциальную опасность для населения и безопасности полётов авиации. Однако слабое развитие сети наземных наблюдений затрудняет проведение мониторинга вулканической активности. На сегодняшний момент только различные спутниковые системы позволяют непрерывно наблюдать за активными вулканами Камчатки и Курильских островов (Gordeev et al., 2016).

В этой публикации мы демонстрируем успешное использование алгоритма Nightfire для мониторинга и анализа динамики извержения вулкана Сноу (о. Чирпой, Курильские острова) в 2012–2017 гг.

Вулкан Сноу

Остров Чирпой (рис. 1, см. с. 33) входит в группу островов Чёрные братья (Курильские острова). Его размер составляет 3,5×6 км. На острове находится два действующих вулкана — Чёрного и Сноу. Вулкан Сноу имеет усечённую форму конуса высотой 395 м над уровнем моря. На вершине вулкана расположен кратер диаметром 300 м. Образовался вулкан Сноу, вероятно, после 1770 г. (Горшков, 1967). Склоны вулкана сложены многочисленными лавовыми потоками. Наиболее свежий лавовый поток спускается из вершинного кратера в юго-западном направлении, достигая берега моря. Излияние этого потока произошло в 1879 г. (Горшков, 1967). Кроме этого, исторические извержения происходили в 1811, 1854 (?) гг. (Горшков, 1967). В 1960 и 1982 гг. происходили кратковременные эксплозивные извержения (Горшков, 1967; Иванов и др., 1984).

Остров Чирпой в настоящее время является необитаемым. На нём отсутствуют системы непрерывного наблюдения за вулканической активностью (нет сейсмических, GNSS и других станций).

Очередное извержение началось после 30-летнего периода покоя. По сообщению Сахалинской группы реагирования на вулканические извержения (Sakhalin Volcanic Eruption Response Team (SVERT)), 10 ноября 2012 г. в районе вулкана Сноу на спутниковом снимке TerraMODIS впервые наблюдалась термальная аномалия (Рыбин и др., 2016; Чибисова и др., 2016). 11 ноября термальная аномалия в районе вулкана была зарегистрирована по спутниковым данным MODIS алгоритмами MODVOLC и MIROVA (Bulletin..., 2017; <https://volcano.si.edu/showreport.cfm?doi=10.5479/si.GVP.BGVN201701-290150>). В августе 2015 г. сотрудниками Института морской геологии и геохимии ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск) были проведены краткосрочные полевые работы на о. Чирпой (Рыбин и др., 2016; Чибисова и др., 2016). В ходе визуальных наблюдений удалось определить, что извержение происходило из побочного лавово-экструзивного конуса, расположенного на юго-восточном склоне вулкана Сноу. Из конуса медленно изливался поток глыбовой лавы. Фронтальная часть потока достигала прибрежной акватории.

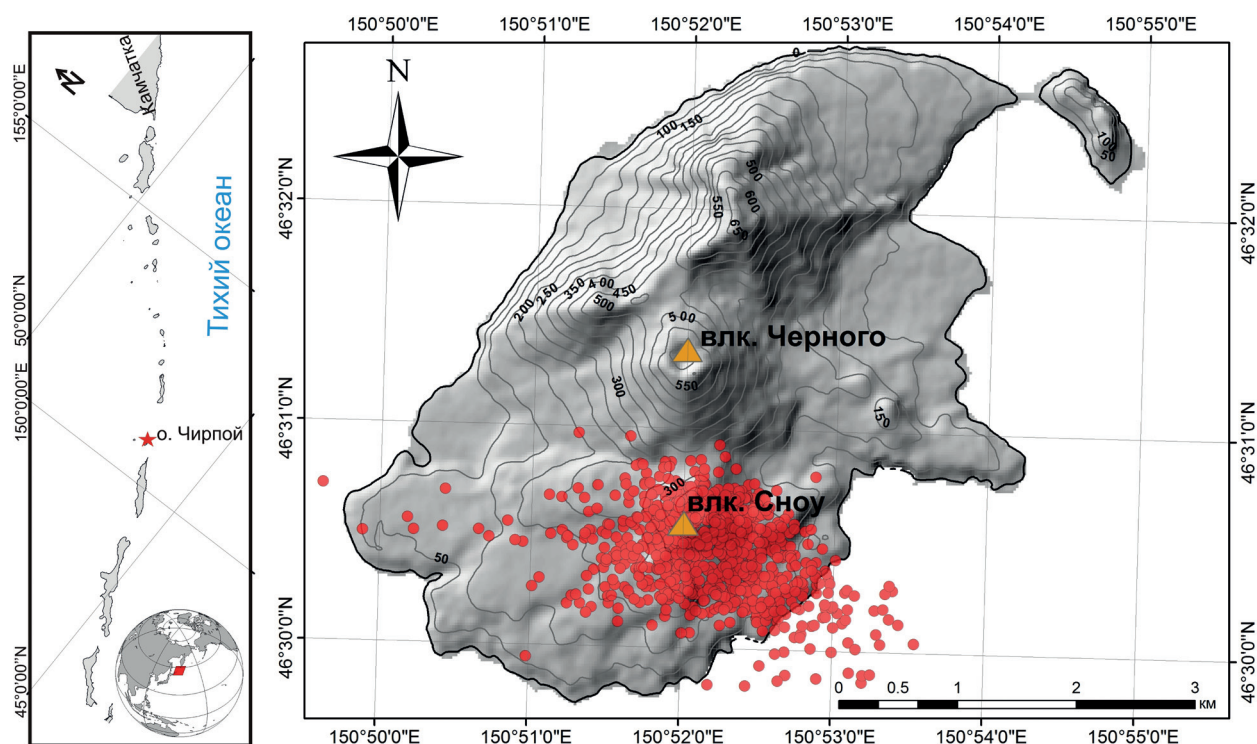


Рис. 1. Карта расположения о. Чирпой и вулкана Сноу. Кружками показаны детекции «горячих точек» по данным алгоритма Nightfire

Также из побочного конуса периодически происходили парогазовые выбросы. Продукты извержения в основном представлены глыбовыми лавами андезитового состава (Чибисова и др., 2016). Согласно данным SVERT (Рыбин и др., 2017; Bulletin..., 2017), извержение вулкана продолжалось до августа 2016 г.

Методы исследований

Для задач детального изучения этапов извержения вулкана Сноу в 2012–2017 гг. был использован новый метод анализа термальных аномалий Nightfire по данным сенсора VIIRS (спутник Suomi NPP). Для распознавания и описания «горячих точек» на ночной поверхности Земли алгоритм Nightfire использует весь инфракрасный диапазон электромагнитного излучения в пределах от 1 до 12 мкм. Для работы алгоритма используются данные, собираемые инфракрасным мультиспектральным радиометром VIIRS, обеспечивающим разрешение от 750 м/пиксел в надири до 1500 м/пиксел по краям сканов. Было замечено, что в ночное время «горячие точки» видны в коротком ИК (SWIR) диапазоне с максимальным отношением «сигнал/шум» (Elvidge et al., 2013). На дневных изображениях в этом диапазоне сигнал с «горячих точек» перекрывается солнечным светом, и поэтому на SWIR-изображениях со средним разрешением ~1 км/пиксель они не распознаются. Этим объясняется тот факт, что на протяжении 25 лет с момента публикации «классического» метода (Dozier, 1981), используемого с небольшими изменениями во всех алгоритмах ДЗЗ (Wooster et al., 2005), за исключением Nightfire, источники горения на поверхности Земли и днём, и ночью ищутся в среднем ИК (MWIR) диапазоне. Однако в среднем ИК «горячие точки» всегда наблюдаются на тепловом фоне с поверхности Земли и облаков, что существенно влияет на чувствительность как по размеру, так и по температуре детектируемых источников горения.

SWIR-каналы M7, M8 и M10 ночью содержат лишь тепловой шум сенсора и точечные сигналы от горячих источников на поверхности Земли. Поэтому в SWIR-диапазоне можно использовать пороговый детектор полезного сигнала с условием, что порог детектирования плавно повышается от левого к правому краю изображения, следуя за нарастанием уровня теплового

шума (Elvidge et al., 2013). Специальный алгоритм для детектирования сигнала в среднем ИК-диапазоне должен выделять горячие точки на фоне температурных помех от более холодных поверхностей рельефа, воды, облаков. Метод использует корреляцию значений в близких по длине волны каналах M12 и M13.

Используя нелинейную регрессию и приближая наблюденные значения в ИК-спектре к спектру излучения абсолютно чёрного тела, можно определить не только положение, но также и температуру и размер субпиксельного источника теплового излучения.

Высокая чувствительность алгоритма Nightfire при детектировании ИК-источников горения на ночной поверхности Земли обуславливает большой объём точечных данных по результатам детекций. За одну ночь (земные сутки) алгоритм фиксирует порядка 20 тыс. событий, которые можно условно разделить на «горячие» ($T > 1300$ К, электрические огни и газовые факелы) и «тёплые» ($400 \text{ К} < T < 1300 \text{ К}$, пожары, вулканы и высокотемпературные производства, например плавильные или цементные печи).

Агрегация наблюдений из базы данных ИК-источников по пространству и времени позволяет уточнить координаты источника с точностью до 50 м. Агрегация позволяет делать выборку в окрестности вулканов для оценки статистики или регрессии.

Поскольку Nightfire является алгоритмом субпиксельной пирометрии, большие температурные аномалии (больше размеров одного пиксела сенсора) выглядят как несколько соседствующих «горячих» пикселов. Размер пиксела в инфракрасных (М) диапазонах у сенсора достаточно мал для того, чтобы многие температурные аномалии, вызванные излияниями лавовых потоков, попадали более чем в один пиксел. Для выделения аномалий большой площади производится пространственная кластеризация «горячих» пикселов за каждый день. Для кластеризации пикселов применяется алгоритм DBSCAN (Ester et al., 1996) с параметрами ϵ (максимальная дистанция соседства) = 2000 м и minPts (минимальное число соседей в ядре кластера) = 1. Порог в 2000 м выбран из соображений максимального размера пиксела. Расчёт реального размера каждого отдельно взятого пиксела возможен, но формула достаточно сложна, так как помимо увеличения поперечного размера пиксела необходимо также учитывать уровни агрегации пикселов сенсора VIIRS.

Результаты и их обсуждение

На основе описанного выше метода за период с ноября 2012 г. по февраль 2017 г. в районе вулкана Сноу было зарегистрировано 859 детекций «горячих точек» (см. *рис. 1*). При этом первая детекция датируется 9 ноября 2012 г. в 16:12 UTC, что как минимум на сутки раньше, чем отмечалось по данным SVERT, а также алгоритмам MODVOLC и MIROVA. Наибольшая интенсивность тепловой эмиссии приходится на период с ноября по конец декабря 2012 г., постепенно уменьшаясь вплоть до середины апреля 2013 г. (*рис. 2*, см. с. 35). Максимум значений приходится на период с 11 по 30 ноября, что соответствует излиянию первой, наиболее мощной порции лавы. Об этом свидетельствуют и показатели площади «горячих точек» (*рис. 3*, см. с. 35) с максимальными значениями до 2000 м². Вероятно, в этот период произошло формирование основного русла лавового потока. Косвенно это может подтвердить спутниковый снимок ASTER Terra за 24 ноября 2012 г. 11:55 UTC (*рис. 4*, см. с. 36). Это первый с начала извержения безоблачный снимок высокого разрешения, на котором можно определить морфологию лавового потока. На снимке в инфракрасном (TIR) диапазоне определяется вытянутый лавовый поток, протягивающийся на расстояние ~1,1 км в юго-восточном направлении от привершинной части вулкана Сноу. Площадь потока ~0,37 км².

К середине апреля 2013 г. интенсивность тепловой эмиссии значительно снизилась, а в период с 15 апреля по 24 мая 2013 г. «горячие точки» методом Nightfire не были зафиксированы. С конца мая по конец ноября 2013 г. вновь наблюдается импульс увеличения тепловой эмиссии, что, вероятно, связано с излиянием новой порции лавы. За весь период извержения (график кумулятивной мощности излучения на *рис. 5*, см. с. 36) мы наблюдаем пять похожих периодов: ноябрь 2012 — январь 2013 г.; сентябрь — октябрь 2013 г.; март — июнь

2014 г.; август–ноябрь 2014 г.; апрель–июнь 2015 г. Интересным является резкое увеличение тепловой эмиссии 6 апреля 2016 г. в 15:50 UTC. Для этого снимка было зарегистрировано 12 детекций в районе вулкана Сноу, что является максимальным количеством за весь период наблюдений. При этом на снимке MODIS Aqua за 15:35 UTC (6 апреля 2016 г.) термальной аномалии не наблюдалось. Также на снимках в последующие несколько дней (7–20 апреля) тепловая эмиссия и количество детекций были существенно ниже. Вероятно, спутниковый снимок VIIRS за 6 апреля пришёлся на момент эксплозивного события, произошедшего в кратере побочного купола. Взрыв мог частично разрушить постройку купола, обнажив слагающий его горячий материал. Если бы произошло излияние значительной порции свежей лавы, то процесс её остывания растянулся бы на продолжительное количество дней, чего мы не наблюдаем на последующих спутниковых снимках. После этого события на графике кумулятивной мощности излучения (см. *рис. 5*) чётко видна пологая линия, свидетельствующая о слабой тепловой эмиссии. Последнее по дате зафиксированное событие приходится на 25 февраля 2017 г. Событие слабое по своей тепловой мощности. Вероятно, оно связано либо с разрушением части лавового потока (например, фронтальной части), либо просадки лавовода в побочном куполе, что привело к обнажению относительно горячих пород.

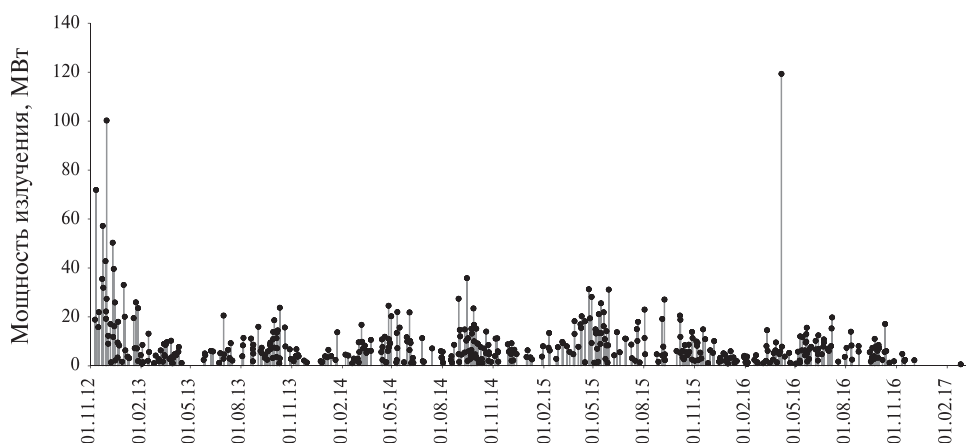


Рис. 2. График распределения тепловой мощности излучения (МВт) извержения вулкана Сноу за период 2012–2017 гг. (по данным алгоритма Nightfire, сенсор VIIRS)

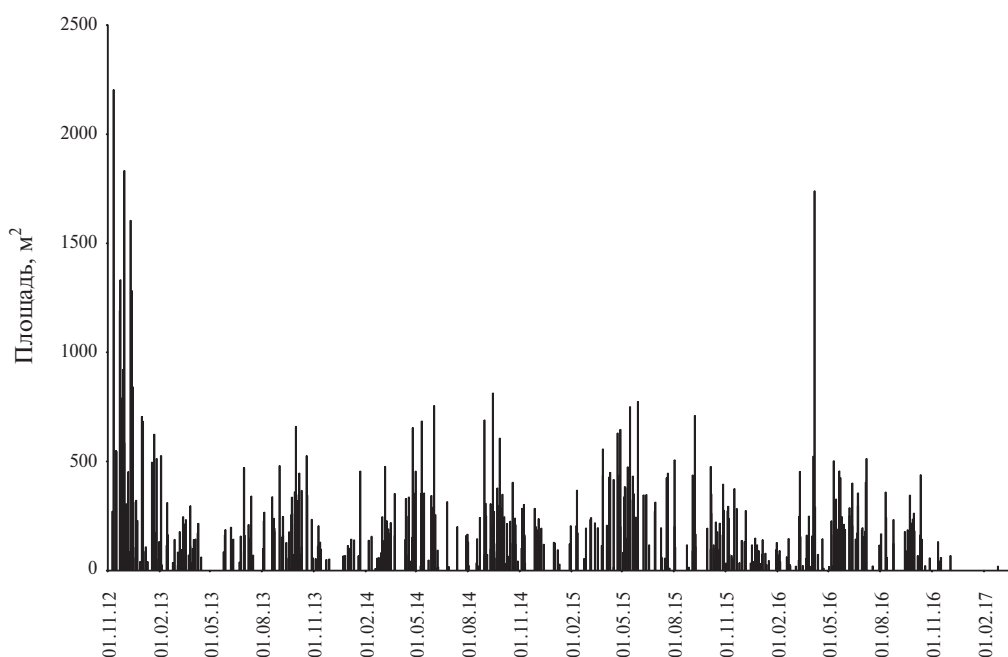


Рис. 3. График распределения площадей «горячих точек»

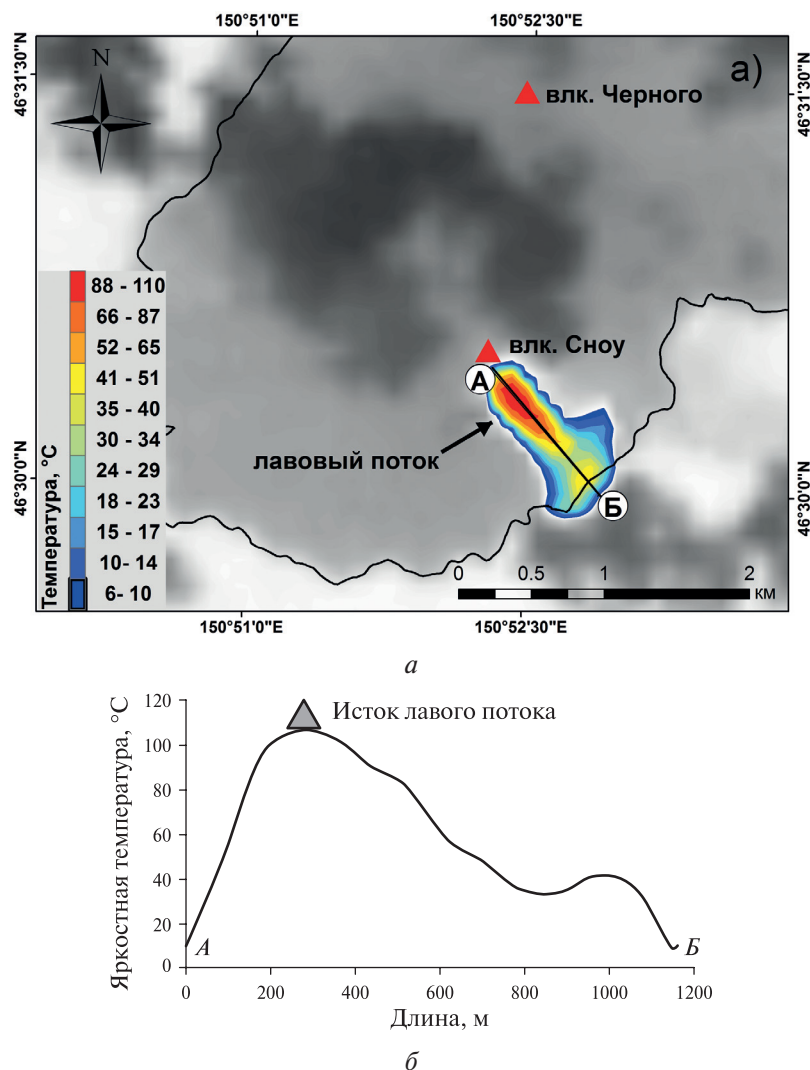


Рис. 4. Спутниковый снимок ASTER Terra за 24 ноября 2012 г. 11:55 UTC, тепловой ИК-канал (TIR). Показано распределение яркостной температуры в пределах изливающегося лавового потока вулкана Сноу (а). Продольный профиль (по линии А–В) лавового потока (б)

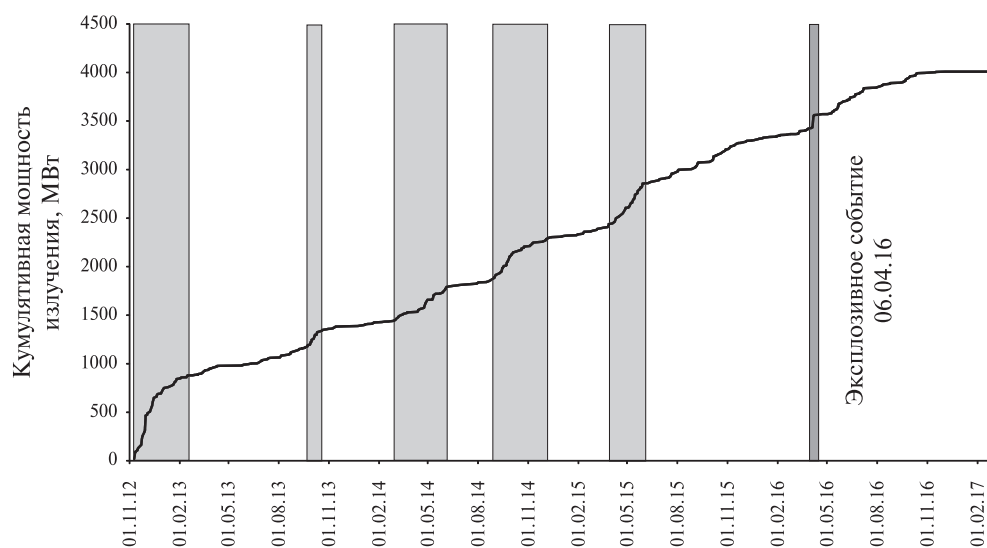


Рис. 5. Кумулятивный график мощности излучения (МВт) извержения вулкана Сноу за период 2012–2017 гг. (по данным алгоритма Nightfire, сенсор VIIRS). Прямоугольными областями показаны основные этапы извержения

Как было показано выше, алгоритм Nightfire способен определять фактическую температуру «горячей точки». Это существенно отличает его от предыдущих алгоритмов (MODVOLC, MIROVA). Показатель физической температуры объекта имеет ключевое значение для определения характера извержения вулканов. В частности, мы можем определить фазу излияния лавовых потоков либо выжимания вязких куполов.

Температура лавовых потоков крайне вариативна (Harris, 2013). Как правило, максимальные температуры фиксируются в зоне истока лавы, где она наиболее свежая и горячая. Было показано (Hon et al., 1994), что высокотемпературные базальтовые лавы (1070°C) охлаждаются до 800°C уже через 1 с после поступления на поверхность и контакта с атмосферой. Для андезитовых вулканов, к которым относится Сноу, диапазон температур составляет $750\text{--}1000^{\circ}\text{C}$.

Пирометрические исследования (Orpenheimer et al., 1993) на андезитовом вулкане Ласкар (Чили) зафиксировали максимальные температуры свежего лавового потока в 940°C . При этом средние значения температур лавовых потоков находились в диапазоне $350\text{--}500^{\circ}\text{C}$.

На гистограмме (рис. 6) показано распределение температур для извержения вулкана Сноу по данным алгоритма Nightfire. Средний показатель температур составил $\sim 630^{\circ}\text{C}$. Данная температура вполне характерна для вязкого андезитового лавового потока. Для температур в диапазоне $800\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ характерна очень маленькая площадь «горячей точки» (рис. 7). Вероятно, это самые свежие порции лавы, выжимавшейся из кратера побочного купола. По мере движения лавового потока его площадь увеличивалась, а температура уменьшалась. Это хорошо видно по яркостной температуре в инфракрасном (TIR) канале ASTER Terra за 24 ноября 2012 г. 11:55 UTC (см. рис. 4).

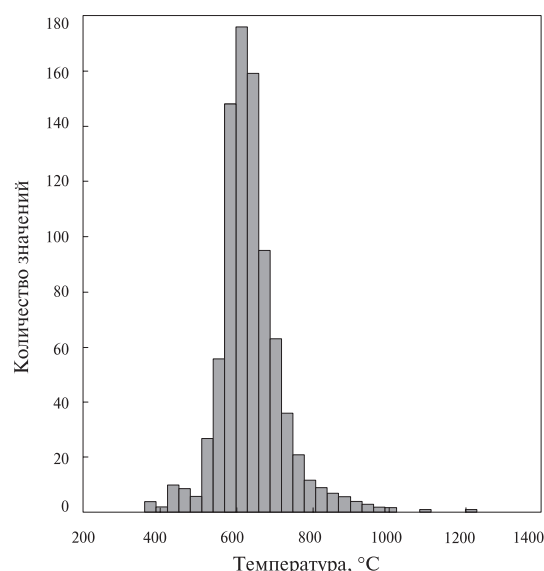


Рис. 6. Гистограмма распределения температур «горячих точек» в пределах лавового потока

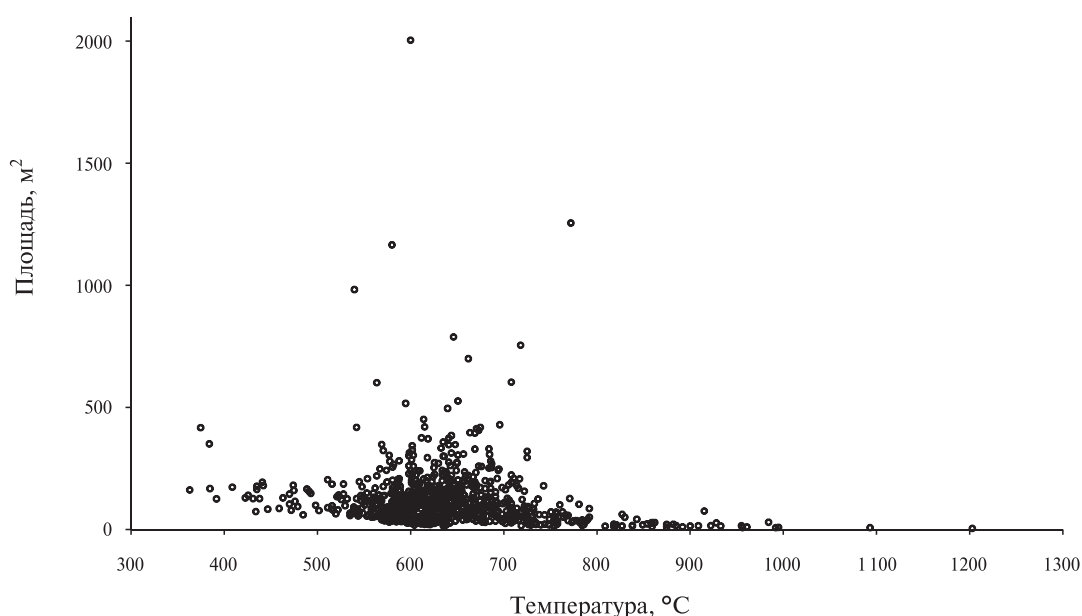


Рис. 7. График отношения площади и температуры «горячих точек» в пределах лавового потока

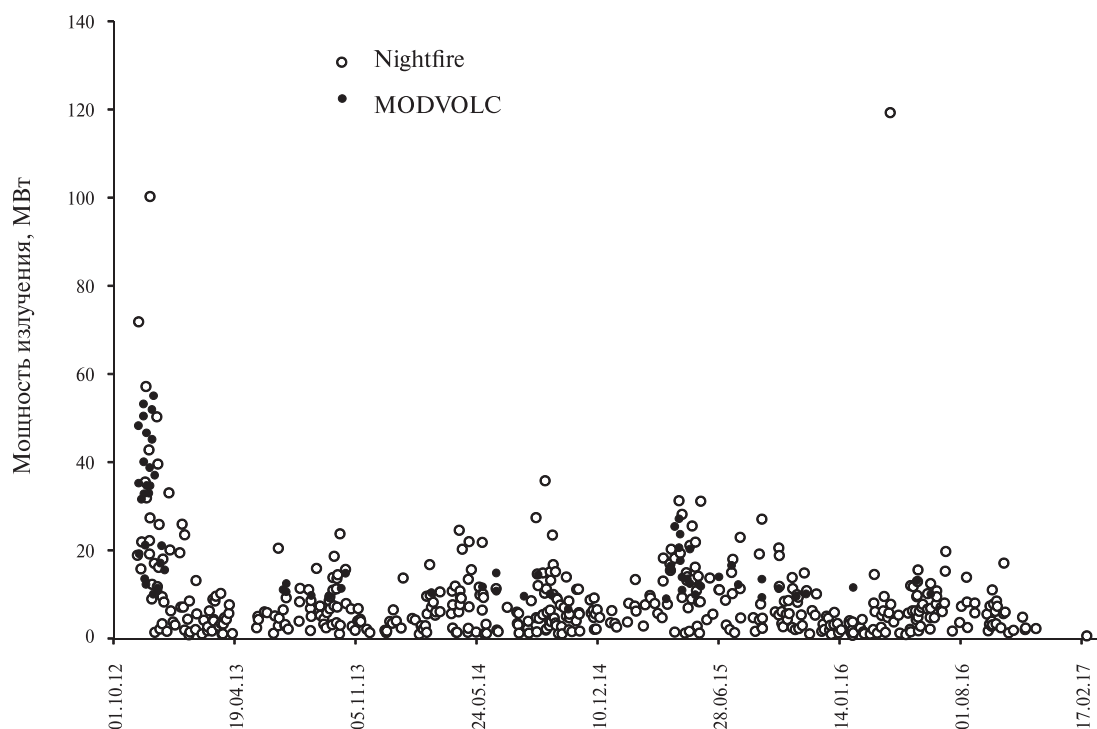


Рис. 8. График соотношения зарегистрированных детекций «горячих точек» для извержения вулкана Сноу по данным алгоритмов Nightfire и MODVOLC

Максимальные температуры расположены у истока лавового потока, к его фронтальной и боковым частям эти показатели уменьшаются. Продольный профиль демонстрирует значительное снижение температуры по мере движения и остывания потока. Тем не менее на фронтальной части потока наблюдается небольшое увеличение температуры. Причиной этого является то, что фронт потока подвижен, интенсивно разрушается, что приводит к обнажению внутренних, более горячих частей.

Таким образом, алгоритм Nightfire не только показал уникальную возможность фиксировать источник термальной аномалии, но и позволил определять физические параметры этапов вулканических извержений. Также алгоритм оказался более информативным по сравнению с аналогичной системой оперативного мониторинга вулканической активности MODVOLC. На графике (рис. 8) показано соотношение зафиксированных детекций для извержения вулкана Сноу по данным Nightfire и MODVOLC (<http://modis.higp.hawaii.edu/>), которое составляет 859 к 80 соответственно. При этом MODVOLC использует два сенсора MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua, а Nightfire — сенсор VIIRS только на одном спутнике SuomiNPP.

Заключение

Проведена успешная работа по использованию данных автоматического алгоритма выявления и анализа термальных аномалий Nightfire для задач изучения динамики извержения вулкана Сноу (о. Чирпой, Курильские острова) в 2012–2017 гг. Необитаемость острова, его удалённость от населённых пунктов, а также отсутствие наземных систем мониторинга (сейсмические станции, GNSS и т.д.) существенно затрудняют изучение этого извержения. Основным источником информации являлись спутниковые данные. Однако проведённые ранее работы (Рыбин и др., 2016; Чибисова и др., 2016) не показали динамической картины извержения. В настоящей работе мы продемонстрировали результаты использования алгоритма Nightfire для задач мониторинга и реконструкции истории извержения. Алгоритм Nightfire существенно отличается от существующих аналогичных систем (MODVOLC,

MIROVA) за счёт одновременного использования множества диапазонов инфракрасного спектра (от близкого до дальнего) совместно с данными видимого спектра, в то время как большинство алгоритмов используют один или два диапазона из средней и дальней частей инфракрасного спектра.

В результате удалось уточнить дату начала извержения вулкана на одни сутки по отношению к информации группы SVERT и на двое суток — к данным автоматического анализа MODVOLC. Выделены пять импульсов увеличения интенсивности излияния лавового потока, что может быть связано с динамикой развития магматического очага. Показано, что определяемые алгоритмом температуры на основе нелинейной регрессии спектров источников «горячих точек» вполне соответствуют физическим характеристикам лавовых потоков. Это позволяет детально анализировать динамику извержения, оценивать скорость и интенсивность излияния свежего магматического вещества.

В ближайшее время на сенсоре VIIRS должен быть включён канал M11 (2,1 мкм) для ночных наблюдений. Полоса чувствительности этого канала наиболее близка к спектральному диапазону, в котором извержения проявляются наиболее сильно. Это позволит повысить качество мониторинга. Кроме этого, 18 ноября 2017 г. был выведен на орбиту второй спутник (JPSS-1), несущий сенсор VIIRS, что даст возможность получить более частое по времени покрытие.

Работа выполнялась при поддержке Минобрнауки России (Государственный контракт 14.607.21.0165, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI60716X0165).

Литература

1. Горшков Г. С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 287 с.
2. Жижин М. Н., Элвидж К. Д., Пойда А. А. Мультиспектральное дистанционное зондирование ночной поверхности Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 9–26.
3. Иванов Б. В., Чирков А. М., Дубик Ю. М., Хренов А. П., Двигало В. Н., Разина А. А., Степанов В. В., Чубарова О. С. Состояние действующих вулканов Камчатки и Курильских островов в 1982 г. // Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 104–110.
4. Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. ред. Н. П. Лаверов. М.: Наука, 2005. 604 с.
5. Рыбин А. В., Дегтерев А. В., Чибисова М. В., Гурьянов В. Б., Коротеев И. Г. Вулканическая активность на Курильских островах в 2012–2015 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 2. Вып. 30. С. 77–87.
6. Рыбин А. В., Чибисова М. В., Дегтерев А. В. Активность вулканов Курильских островов в 2016 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 1. Вып. 33. С. 83–88.
7. Чибисова М. В., Рыбин А. В., Дьяков С. Е. Активность вулканов Сноу (о. Чирпой) и Чиринкотан (о. Чиринкотан) в 2015 году: спутниковые и полевые наблюдения по данным группы SVERT // 19-я ежегодная научная конференция «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященная Дню вулканолога: сб. тез. конф. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 146–151.
8. Bulletin of the Global Volcanism Network / ed. E. Venzke. Smithsonian Institution, 2017. V. 42. No. 1.
9. Coppola D., Laiolo M., Cigolini C., Delle Donne D., Ripepe M. Enhanced volcanic hot-spot detection using MODIS IR data: results from the MIROVA system // Geological Society. London. Special Publications. 2016. V. 426(1). P. 181–205. DOI: 10.1144/SP426.5.
10. Dozier J. A. Method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution // Remote Sensing of Environment. 1981. V. 11. P. 221–229.
11. Elvidge C. D., Zhizhin M. N., Hsu F. C., Baugh K. E. VIIRS Nightfire: Satellite Pyrometry at Night // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 5. P. 4423–4449. DOI: 10.3390/rs5094423.
12. Ester M., Kriegel H. P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters a density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proc. 2nd Intern. Conf. Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96). AAAI Press, 1996. P. 226–231.
13. Gordeev E. I., Girina O. A., Lupyayev E. A., Sorokin A. A., Kramareva L. S., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Uvarov I. A., Burtsev M. A., Romanova I. M., Mel'nikov 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.
14. Harris A. Thermal Remote Sensing of Active Volcanoes: a User's Manual. Cambridge university press, 2013.
 15. Hon K., Kauahikaua J., Denlinger R., McKay K. Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: observations and measurements of active lava flows on Kilauea volcano, Hawaii // *Geological Society of America Bulletin*. 1994. V. 106. P. 351–370.
 16. Oppenheimer C., Francis P. W., Rothery D. A., Carlton R. W. T., Glaze L. S. Infrared image analysis of volcanic thermal features: Lascar Volcano, Chile // *J. Geophysical Research*. 1993. V. 98. Iss. B3. P. 4269–4286.
 17. Wooster M. J., Roberts G., Perry G. L. W., Kaufman Y. J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // *J. Geophysical Research*. 2005. V. 110. D24311. DOI: 10.1029/2005JD006018.
 18. Wright R. MODVOLC: 14 years of autonomous observations of effusive volcanism from space // *Geological Society. London. Special Publications*. 2016. V. 426. Iss. 1. P. 23–53. DOI: 10.1144/SP426.12.

Dynamics of Snow volcano eruption (Chirpoi Island, Kuriles) in 2012–2017: results of VIIRS Nightfire algorithm application

D. V. Melnikov¹, M. N. Zhizhin^{2,3,4}, G. M. Trifonov⁵, A. A. Poyda⁵

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

² *University of Colorado, Broomfield 80020, USA*

³ *NOAA National Centers for Environmental Information, Boulder 80305, USA*

⁴ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

⁵ *National Research Center Kurchatov Institute, Moscow 123098, Russia*

Here we present the results of the successful application of VIIRS satellite data for monitoring and reconstruction of the eruption history of Snow volcano (Chirpoi Island, Kuriles) in 2012–2017. We used Nightfire algorithm to accomplish our tasks. This algorithm differs significantly from the other similar systems due to simultaneous usage of numerous diapasons of the infrared spectra (from near to long ranges) together with the data of the visible spectra, while most of the other algorithms (for example, MODVOLC and MIROVA) use one or two diapasons from the middle or long parts of the infrared spectra. Our research shows that the maximal thermal radiation power (MW) was observed from November 2012 to January 2013. During this period, first and most voluminous portion of lava flow was produced. There are four more well-distinguished periods of this eruption: September–October 2013; March–June 2014; August–November 2014; April–June 2015. All of them correspond to the impulses of the fresh lava eruptions, although the thickness of these lava flows is smaller compared to the first period.

Keywords: VIIRS, Nightfire, volcano, eruption, lava flow, Snow, Chirpoi Island, Kuriles

Accepted: 21.12.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-69-79

References

1. Gorshkov G. S., *Vulkanizm Kuril'skoi ostrovnnoi dugi* (Volcanism of Kuril island arc), Moscow: Nauka, 1967, 287 p.
2. Zhizhin M. N., Elvidge C. D., Poyda A. A., Mul'tispektral'noe distantsionnoe zondirovanie nochnoy poverkhnosti Zemli (Multispectral nighttime remote sensing of the Earth), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 9–26.

3. Ivanov B. V., Chirkov A. M., Dubik Yu. M., Khrenov A. P., Dvigalo V. N., Razina A. A., Stepanov V. V., Chubarova O. S., Sostoyanie deystvuyushchikh vulkanov Kamchatki i Kuril'skikh ostrovov v 1982 g. (Active volcanoes of Kamchatka and Kurile Islands: status in 1982), *Volcanology and Seismology*, 1988, Vol. 6, pp. 623–634.
4. *Noveishii i sovremenniy vulkanizm na territorii Rossii* (The newest and modern volcanism in Russia), Moscow: Nauka, 2005, 604 p.
5. Rybin A. V., Degterev A. V., Chibisova M. V., Gur'yanov V. B., Koroteev I. G., Vulkanicheskaya aktivnost' na Kuril'skikh ostrovakh v 2012–2015 gg. (Volcanic activity in the Kurile Islands in 2012–2015), *Vestnik KRAUNTS, Nauki o Zemle*, 2016, No. 2, Issue 30, pp. 77–87.
6. Rybin A. V., Chibisova M. V., Degterev A. V., Aktivnost' vulkanov Kuril'skikh ostrovov v 2016 g., *Vestnik KRAUNTS, Nauki o Zemle*, 2017, No. 1, Issue 33, pp. 83–88.
7. Chibisova M. V., Rybin A. V., D'yakov S. E., Aktivnost' vulkanov Snou (o. Chirpoi) i Chirinkotan (o. Chirinkotan) v 2015 godu: sputnikovye i polevyie nablyudeniya po dannym gruppy SVERT (Activity of Snow (Chirpoi Isl.) and Chirinkotan (Chirinkotan Isl.) volcanoes in 2015: satellite and field observations according to data of SVERT), *19-ya konf. "Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy"* (19th Conf. "Volcanism and associated processes"), Book of Abstracts, Petropavlovsk-Kamchatskii: IViS DVO RAN, 2016, pp. 146–151.
8. *Bulletin of the Global Volcanism Network*, E. Venzke (ed.), Smithsonian Institution, 2017, Vol. 42, No. 1.
9. Coppola D., Laiolo M., Cigolini C., Delle Donne D., Ripepe M., Enhanced volcanic hot-spot detection using MODIS IR data: results from the MIROVA system, *Geological Society*, London, Special Publications, 2016, Vol. 426, No. 1, pp. 181–205, DOI: 10.1144/SP426.5.
10. Dozier J. A., Method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution, *Remote Sensing of Environment*, 1981, Vol. 11, pp. 221–229.
11. Elvidge C. D., Zhizhin M. N., Hsu F. C., Baugh K. E., VIIRS Nightfire: Satellite Pyrometry at Night, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 5, pp. 4423–4449, DOI: 10.3390/rs5094423.
12. Ester M., Kriegel H. P., Sander J., Xu X., A density-based algorithm for discovering clusters a density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise, *Proc. 2nd Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96)*, AAAI Press, 1996, pp. 226–231.
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., Mel'nikov 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.
14. Harris A., *Thermal Remote Sensing of Active Volcanoes. A User's Manual*, Cambridge university press, 2013.
15. Hon K., Kauahikaua J., Denlinger R., McKay K., Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: observations and measurements of active lava flows on Kilauea volcano, Hawaii, *Geological Society of America Bulletin*, 1994, Vol. 106, pp. 351–370.
16. Oppenheimer C., Francis P. W., Rothery D. A., Carlton R. W. T., Glaze L. S., Infrared image analysis of volcanic thermal features: Lascar Volcano, Chile, *J. Geophys. Res.*, 1993, Vol. 98, Issue B3, pp. 4269–4286.
17. Wooster M. J., Roberts G., Perry G. L. W., Kaufman Y. J., Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release, *J. Geophys. Res.*, 2005, Vol. 110, D24311, DOI: 10.1029/2005JD006318.
18. Wright R., MODVOLC: 14 years of autonomous observations of effusive volcanism from space, *Geological Society*, London, Special Publications, 2016, Vol. 426, Issue 1, pp. 23–53, DOI: 10.1144/SP426.12.