

## СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ VIIRS NIGHTFIRE

*Пойда А.А.<sup>1</sup>, Жижин М.Н.<sup>2,3,4</sup>, Трифионов Г.М.<sup>5</sup>, Мельников Д.В.<sup>6</sup>*

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия,  
Poyda\_AA@nrcki.ru*

<sup>2</sup>*Университет Колорадо, Болдер, США*

<sup>3</sup>*Национальный информационный центр по окружающей среде НОАА, Болдер, США*

<sup>4</sup>*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

<sup>5</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>6</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, П.-Камчатский, Россия*

### **Введение**

Наблюдения за вулканической активностью со спутников ведутся с 1965 года. Преимущества спутникового мониторинга очевидны: широкий охват территории, включая труднодоступные районы и регулярность наблюдений.

Первой общедоступной глобальной системой ориентированной на постоянный мониторинг вулканической активности является MODVOLC [5]. 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 годах соответственно. Система MODVOLC непрерывно работает более 15 лет [8] и считается классической базой сравнения подобных систем, хотя она и не лишена недостатков. Более новым примером подобных систем является система Mirova [2] также основанная на данных MODIS, однако расширяющая функциональность MODVOLC.

Инструмент MODIS является переходным звеном между долгосрочными научными программами DMSP и JPSS. С появлением спутников, оснащенных сенсорами нового поколения, появляются возможность существенно улучшить качество мониторинга. Так, например, сенсор VIIRS спутника Suomi NPP (первый спутник в программе JPSS) собирает данные в большем числе спектральных каналов и с большей чувствительностью, чем сенсор MODIS. Это дает возможность более точного построения дискретной спектрограммы наблюдаемого источника, что в свою очередь позволяет оценить его дополнительные характеристики, например температуру. Но чтобы использовать возможности, предоставляемые сенсорами нового поколения, потребовались новые алгоритмы.

Первым алгоритмом, успешно использующим преимущество сенсоров нового поколения, является алгоритм Nightfire. Алгоритм Nightfire осуществляет обнаружение и выявление свойств источников инфракрасного излучения субпиксельной величины посредством данных сенсора VIIRS[4], получаемых с ночной стороны земли. Первоначальной целью разработки алгоритма, являлся мониторинг объемов сжигания попутного природного газа в местах добычи и переработки углеводородов. Выгодным отличием 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 алгоритмов используют один или два диапазона из средней и дальней частей инфракрасного спектра.

В рамках представленной работы авторы адаптировали алгоритм Nightfire для мониторинга вулканической активности. Исследования, проводимые на вулканах Камчатского региона в течение последних полутора лет, показали, что результаты детектирования имеют высокую чувствительность.

### **Способ детектирования температурных аномалий методом VIIRS Nightfire**

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 метров на пиксел в надири до 1500 метров на пиксел – по краям сканов. Было замечено [4], что в ночное время "горячие точки" видны в коротком ИК (SWIR) диапазоне с максимальным отношением сигнал-шум. Разница в соотношении сигнал-шум между SWIR (каналы M7, M8 и M10) и MWIR (каналы M12 и M13) от газовых факелов в Ираке хорошо видна на рисунке 1. На дневных изображениях в этом диапазоне

сигнал с “горячих точек” перекрывается солнечным светом, и поэтому на SWIR изображениях со средним разрешением  $\sim 1$  км/пиксель они не распознаются. Этим объясняется то, что на протяжении 25 лет с момента публикации “классического” метода Dozier в 1981 [3], используемого с небольшими изменениями во всех алгоритмах ДЗЗ [7] за исключением Nightfire, источники горения на поверхности Земли и днем 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.

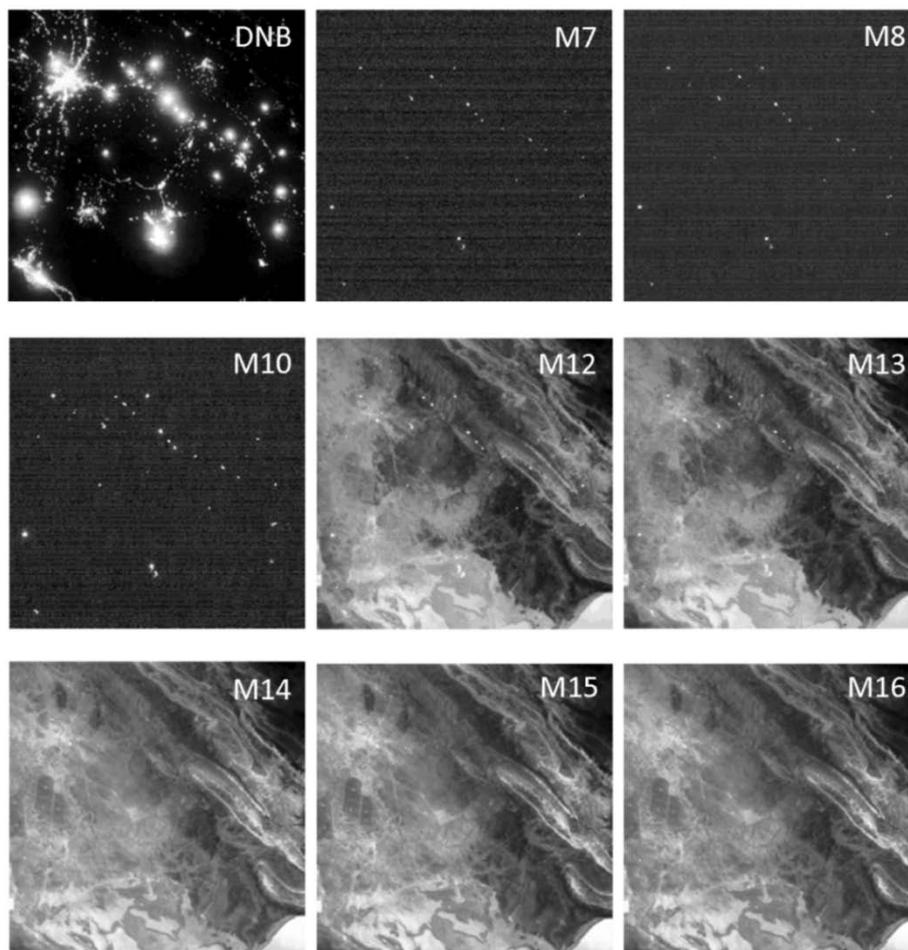


Рис. 1. Изображения в видимом и ИК каналах для ночных огней городов и газовых факелов в Ираке

Как видно на рисунке 1, 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 [4]. Специальный алгоритм для детектирования сигнала в среднем ИК диапазоне должен выделять горячие точки на фоне температурных помех от более холодных рельефа, воды, облаков. Метод использует корреляцию значений в близких по длине волны каналах M12 и M13.

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

Высокая чувствительность алгоритма Nightfire при детектировании ИК источников горения на ночной поверхности Земли обуславливает большой объем точечных данных по результатам детекций. За одну ночь (земные сутки) алгоритм детектирует порядка 20 тыс. событий, которые можно условно разделить на “горячие” ( $T > 1300K$ , электрические огни и газовые факелы) и “теплые” ( $400K < T < 1300K$ , пожары, вулканы и высокотемпературные производства, напр. плавильные или цементные печи).

Агрегация наблюдений из базы данных ИК источников по пространству и по времени позволяет уточнить координаты источника с точностью до 50 м. Агрегация позволяет делать выборку около вулканов для оценки статистики или регрессии. На рисунке 2 представлены результаты детектирования вулканической активности в районе вулканов: Шивелуч, Толбачик, Ключевская сопка.

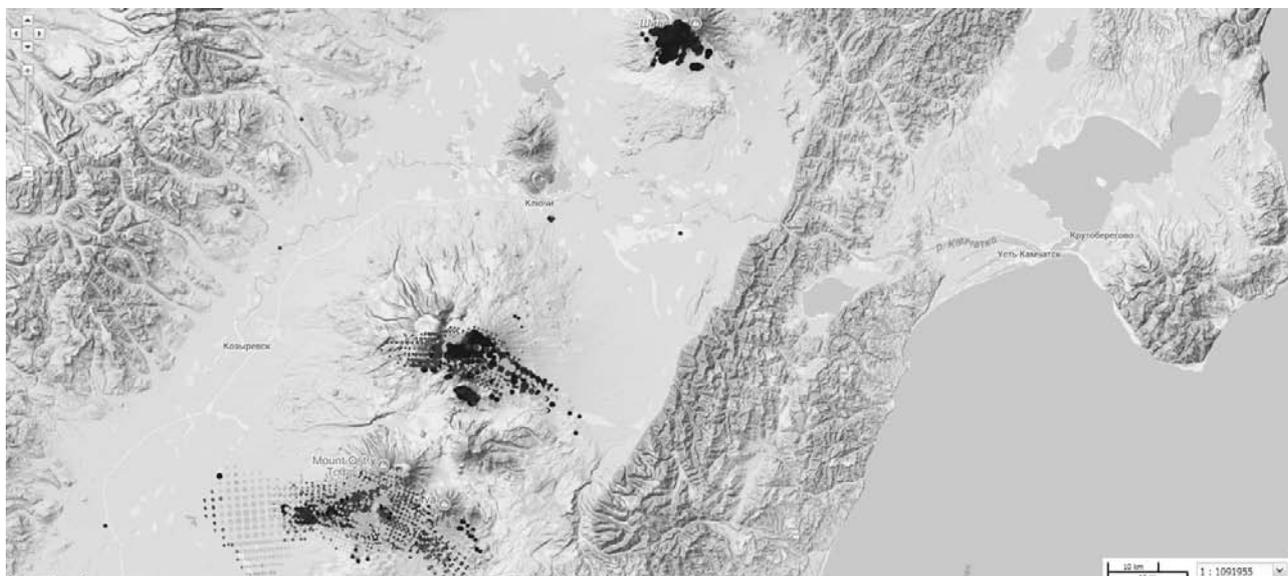


Рис. 2. Детекции вулканической активности в районе вулканов: Шивелуч, Толбачик, Ключевская сопка

### **Использование алгоритмов VIIRS Nightfire для мониторинга извержений**

Для мониторинга вулканических извержений используется программный конвейер, состоящий из следующих основных блоков:

1. Получение исходных данных.
2. Детектирование температурных аномалий при помощи VIIRS Nightfire алгоритмов.
3. Выделение кластеров горячих пикселей.
4. Идентификация событий.
5. Выделение событий вулканической активности.

Для работы с вулканами камчатского региона мы использовали данные, получаемые со станции прямого доступа, установленной в институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский).

Детектирование температурных аномалий производится при помощи VIIRS Nightfire алгоритмов, описанных в предыдущем разделе. Поскольку Nightfire является алгоритмом субпиксельной пирометрии, то большие (более размеров одного пиксела сенсора) температурные аномалии выглядят как несколько соседствующих "горячих" пикселей. Размер пиксела в инфракрасных (M) диапазонах у сенсора достаточно мал, чтобы многие температурные аномалии вызванные излияниями лавовых потоков попадали более чем в один пиксел. Для выделения подобных больших аномалий производится пространственная кластеризация горячих пикселей за каждый день. Для кластеризации пикселей применяется алгоритм DBSCAN, с параметрами (максимальная дистанция соседства) = 2000 метров и minPts (минимальное число соседей) = 1. Порог в 2000 метров выбран из соображений максимального размера пиксела, хотя расчёт реального размера каждого отдельно взятого пиксела возможен, но формула, используемая для этого, достаточно сложна, т.к. помимо увеличения поперечного размера пиксела необходимо также учитывать уровни агрегации пикселей сенсора VIIRS.

В рассматриваемом регионе (Камчатка), за 2016 год DBSCAN находит от 0 до 187 кластеров в сутки, в среднем обнаруживается 32.2 кластера в сутки, с общим числом в 11756 кластеров за весь год.

На этапе идентификации событий производится объединение кластеров найденных на предыдущем этапе в цепочки временных серий с целью выявления продолжительных событий. В рассматриваемом регионе (Камчатка), за 2016 год было выявлено 9074 события. Из них большинство - это вырожденные события, состоящие из одной (7694) или двух (1146) горячих пикселей. Среди оставшихся 234 событий присутствуют события, наблюдавшиеся в течение всего года, а

максимальное число горячих пикселей в событии равно 5871. Суммарное число пикселей по всем событиям равно 24630. Наиболее долгоживущие события с большим числом пикселей, как правило, соответствуют стабильным температурным аномалиям.

На этапе выделения событий вулканической активности система производит сопоставление найденных событий вулканическим вершинам. Существующие открытые системы подобного класса, представленные во введении, используют фиксированные регионы, центрированные по вулканическим вершинам. Однако данный подход имеет существенный недостаток. При применении региона достаточно большого размера, происходит наложение регионов для ряда расположенных в непосредственной близости друг от друга вулканических вершин (например, вершины сопки Ключевской и вулкана Безымянный на Камчатке), что приводит к отнесению одних и тех же пикселей сразу к двум и более вулканам. В то же время, регионы малого размера могут быть недостаточны для охвата всех лавовых полей.

В данной работе предлагается метод поздней привязки температурных аномалий к вулканическим вершинам. Каждая температурная аномалия представлена в виде события (временного ряда наблюдений – пространственных кластеров горячих пикселей с различным экстендом). Сопоставление событий и вулканических вершин производится путём проверки попадания вулканической вершины в экстенд каждого кластера события с последующим отнесением к той вершине, число попаданий которой оказалось наибольшим. Подобный подход позволяет точнее сопоставить горячие пиксели вулканической вершине и в ряде случаев избежать двойных сопоставлений.

В результате сопоставления за 2016 год в камчатском регионе были выделены события соотнесённые вулканам: Алаид, Бархатная сопка, Беленькая, Безымянный, Карымский, Кекурный, Ключевская сопка, Козыревский, Кроноцкая сопка, Мутновский, Пиратковский, Фусса и Шивелуч. Среди перечисленных вулканов существенную активность за 2016 год проявили: Алаид (рис. 3), Безымянный, Ключевская сопка (рис. 4) и Шивелуч (рис. 5), что хорошо согласуется с отчётом камчатской группы реагирования на вулканические извержения [1] и контролировавшимися вручную выборками [6].

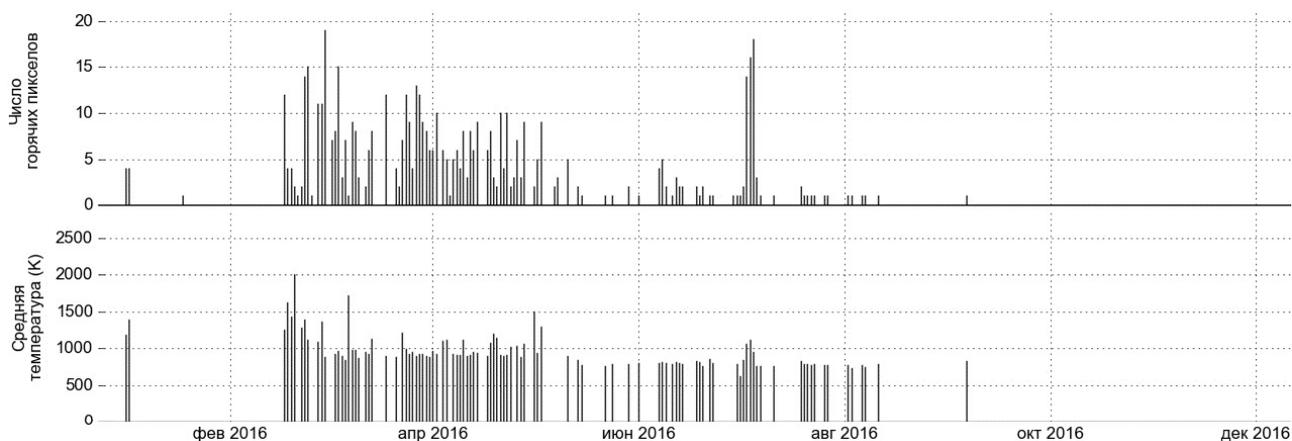


Рис. 3. Статистика по событию на вулкане Алаид

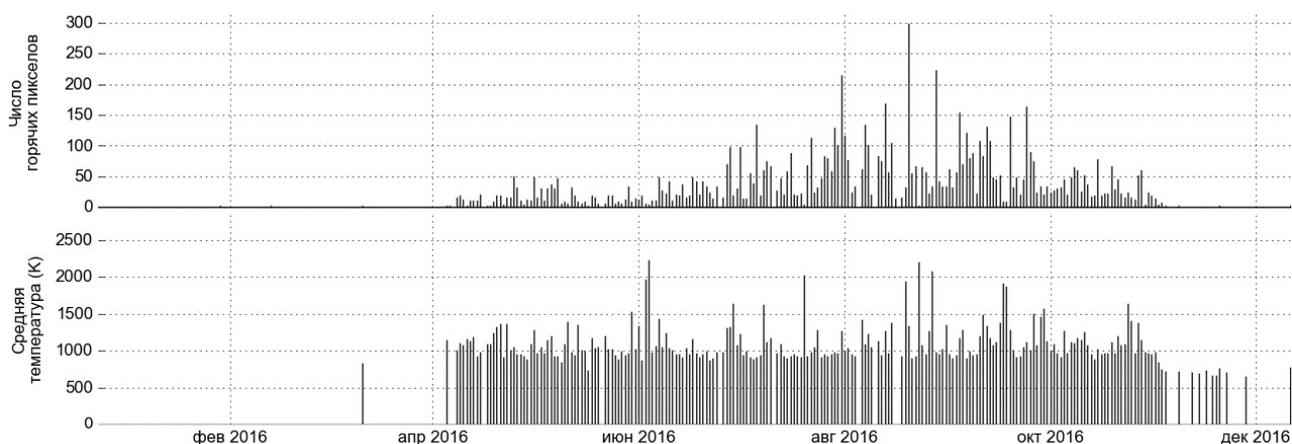


Рис. 4. Статистика по событию на вулкане Ключевская сопка

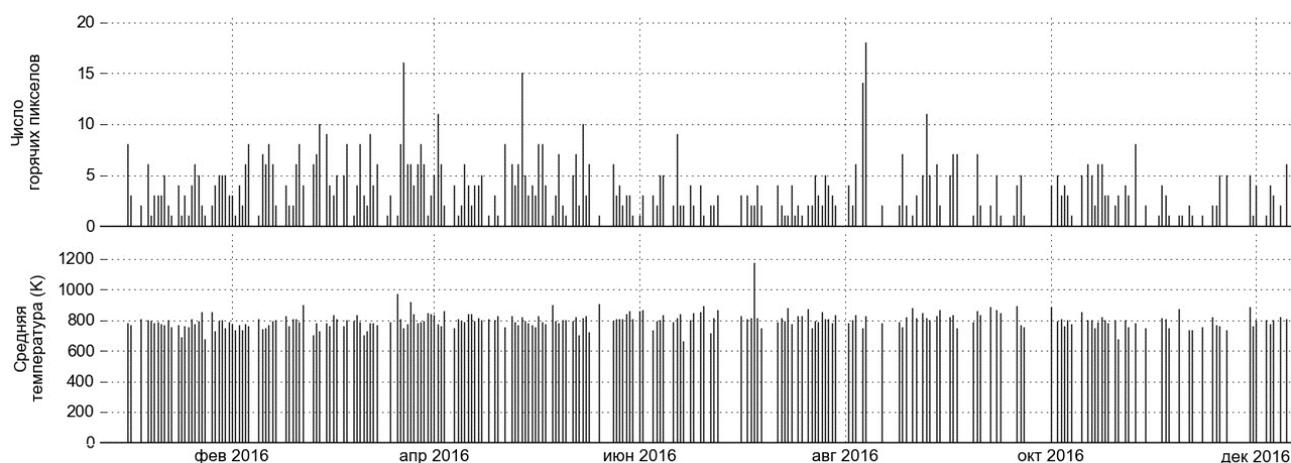


Рис. 5. Статистика по событию на вулкане Шивелуч

### Заключение

За год эксплуатации алгоритма в режиме мониторинга вулканов Камчатского региона было выделено 9074 событий, ряд из которых в свою очередь были отнесены к вулканической активности вулканов, как Алаид, Бархатная сопка, Беленькая, Безымянный, Карымский, Кекурный, Ключевская сопка, Козыревский, Кроноцкая сопка, Мутновский, Пиратковский, Фусса и Шивелуч.

Основные трудности были вызваны тем, что в середине лета ночь на Камчатке недостаточно темная. Чтобы решить эту проблему, требуется провести модификацию алгоритма для работы в зоне терминатора.

В данной работе мы провели исследования только с вулканами камчатского региона. В дальнейшем мы планируем расширить область эксперимента и на другие регионы.

Использование предложенного алгоритма позволяет детектировать яркие источники излучения, такие как извержения и разливы лавы. Но мы не детектируем дымовые шлейфы – это не задача данного исследования.

В ближайшее время на сенсоре VIIRS должен быть включен 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. Также в ближайшее время планируется запуск второго спутника, несущего сенсор VIIRS, что позволит получить более частое по времени покрытие.

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

### Список литературы

1. *Гурина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуржаев А.А., Демянчук Ю.В.* Активность вулканов Камчатки и Северных Курил в 2016 г. по данным KVERT. 2017. URL: [http://www.kscnet.ru/ivs/publication/volc\\_day/2017/art1.pdf](http://www.kscnet.ru/ivs/publication/volc_day/2017/art1.pdf).
2. *Coppola D. и др.* Enhanced volcanic hot-spot detection using MODIS IR data: results from the MIROVA system // Geological Society of London. 2015.
3. *Dozier J.A.* Method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution // Remote Sensing of Environment. 1981. Vol. 11. P. 221–229.
4. *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. P. 4423–4449. doi:10.3390/rs5094423.
5. *Andrew Harris.* Thermal Remote Sensing of Active Volcanoes. A User's Manual // Cambridge university press, 2013. ISBN: 978-0-521-85945-5.
6. *Trifonov Grigory, Zhizhin Mikhail, Melnikov Dmitry, Poyda Alexey.* One year of Kamchatka volcanoes live observation with VIIRS Nightfire. 2017. Электронный ресурс. URL: [http://presentations.copernicus.org/EGU2017-11553\\_presentation.pdf](http://presentations.copernicus.org/EGU2017-11553_presentation.pdf).
7. *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 // Journal of Geophysical Research. 2005. Vol. 10. doi:10.1029/2005JD006018.
8. *Wright Robert* MODVOLC: 14 years of autonomous observations of effusive volcanism from space // B: Geological Society London Special Publications. 2015.