

**Алгоритм автоматического анализа спутниковых снимков MODIS для мониторинга активности вулканов Камчатки и Курильских островов***Д.В. Мельников, А.Г. Маневич, О.А. Гирина**Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,  
e-mail: dvm@kscnet.ru*

Методы оперативного мониторинга вулканической активности стремительно развиваются на протяжении последнего десятилетия. Это связано с увеличением количества спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (AVHRR, MODIS, VIIRS, Himawari и др.). Рассматриваемый метод основан на анализе энергетической яркости, излучаемой высокотемпературной субпиксельной поверхностью в коротковолновой и тепловой инфракрасной области электромагнитного спектра. В этом направлении хорошую продуктивность продемонстрировали данные инструмента MODIS, установленного на борту ИСЗ Тегга и Аква, находящихся на орбите с 1999 и 2002 гг., соответственно. В Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в 2015 г. установлена приёмная станция УниСкан-36 (Сканэкс), которая позволяет производить приём и обработку спутниковых данных MODIS (от 4 до 8 снимков в сутки) в режиме реального времени. Авторами реализован алгоритм автоматической обработки снимков MODIS для обнаружения и количественной оценки термальных аномалий на действующих вулканах Камчатки и Курильских островов.

**Метод исследований**

Важным аспектом осуществления оперативного мониторинга вулканической активности является задача автоматического определения тепловых аномалий. Существуют различные методы решения этой задачи. Одним из них является алгоритм глобального мониторинга вулканической активности - MODVOLC [3, 5, 6]. Он основан на поиске высокотемпературных аномалий в 22 (3,95 мкм) или 21 (3,95 мкм) и 32 (12 мкм) каналах MODIS. Производится нормирование значений энергетической яркости каждого пикселя для указанных каналов [5-6]. Нормализованный тепловой индекс (НТИ) определяется как:

$$\text{НТИ} = (\text{канал } 22 - \text{канал } 32) / (\text{канал } 22 + \text{канал } 32) \quad (1)$$

Пороговое значение НТИ (-0,80) используется для определения аномально горячих пикселей, т.е. НТИ, превышающий пороговое значение, определяется как «горячая точка». Как правило, для НТИ выше порогового значения характерны высокотемпературные проявления открытых вулканических систем – лавовые потоки, Stromboli-анская активность, свежие экструзии.

Пример соотношения значений НТИ и температуры пикселей показан на рис. 1. Выше порогового значения -0,8 находятся четыре «горячих точки», соответствующих высокотемпературному лавовому потоку (пример дан для извержения Ключевского вулкана 25.09.2016).

В ИВиС ДВО РАН осуществляется приём и обработка данных MODIS в режиме реального времени с использованием наземной спутниковой станции Унискан-36 (Сканэкс). Для этих данных авторами реализован алгоритм автоматического определения НТИ для вулканов Камчатки и Курильских островов. Результаты анализа спутниковых снимков готовы через 20-30 минут после прохождения орбиты (приём исходных данных, первичная автоматическая обработка, тематический анализ, определение НТИ). Кроме этого, представленный алгоритм позволяет определять мощность вулканического излучения (VRP – Volcanic Radiative Power).

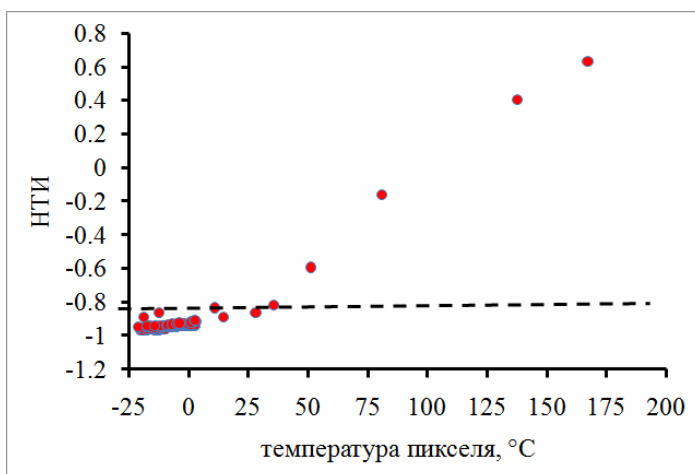


Рис. 1. Отношение нормализованного теплового индекса к температуре (°C) пикселя по 21 каналу MODIS. Пунктирной линией показана граница порогового значения НТИ -0,8

Для высокотемпературных пикселей (с пороговым значением НТИ > -0.8) определяется тепловой поток согласно методу [4]:

$$VRP=18,9 \times A_{pix} \times (L_{4alert} - L_{4bk}) \quad (2)$$

где  $A_{pix}$  – площадь пикселя, 1,89 постоянная,  $L_{4alert}$  энергетическая яркость в спектральном диапазоне 4 мкм (3,95 мкм для данных MODIS) высокотемпературного пикселя с НТИ > -0.8,  $L_{4bk}$  энергетическая яркость для пикселя с фоновым значением. Согласно [4], интегрированное значение температур для формулы (2) составляет 600-1500 °K. Соответственно, VRP не всегда коррелируется с тепловой энергией, излучаемым всей поверхностью активного лавового потока, но соответствует меньшим по площади более горячим и свежим порциям лавы.

### Результаты

Приведем результаты автоматической обработки спутниковых данных с помощью описанного алгоритма в 2016 г.

*Ключевской вулкан.* Применение алгоритма позволило отметить в апреле 2016 г. начало стромболианской фазы извержения в кратере вулкана (с 3 по 23 апреля). Для этого периода характерна средняя мощность излучения 30-50 МВт. По спутниковым снимкам 24-27 апреля было зафиксировано резкое увеличение мощности излучения до 500 МВт (рис. 2), как известно, 23 апреля произошел прорыв в привершинной части Апахончичского желоба на восточном склоне вулкана и излияние из него лавы. Интенсивность излияния лавовых потоков начала расти с июня, достигнув максимальных значений мощности излучения в 1500-1800 МВт в июле-сентябре.

На основе установленных значений VRP согласно эмпирической модели [1-2] можно определить объем изверженной лавы. При точности модели  $\pm 50\%$ , общий объем лавы извержения вулкана Ключевской в 2016 г. составил  $\sim 0,067 \text{ км}^3$  при среднем расходе лавы 2-6 м<sup>3</sup>/с (рис. 3).

*Вулкан Безымянный.* В ноябре – начале декабря 2016 г. на вершине лавового купола, вероятно, происходило выжимание экструзивного блока. В декабре 2016 г. было зафиксировано усиление активности вулкана. По данным радиолокационного спутника SENTINEL-1, экструзия появилась в период между 14.11.2016 и 15.12.2016. Диаметр экструзивного тела составлял  $\sim 100$  м, однако, по данным MODIS, на его поверхности не было зафиксировано интенсивной термальной аномалии. В период с 12 по 20 декабря из кратера произошло выжимание лавового потока на западный склон купола вулкана. При этом экструзивный блок, по спутниковым данным от 01.01.2017.

остался неразрушенным. Согласно описанному выше алгоритму, объём выжатой лавы за этот промежуток времени составил  $\sim 0,00046 \text{ км}^3 \pm 50\%$  (рис. 4 а).

*Вулкан Шивелуч.* В 2016 г. происходило выжимание экструзивных тел на лавовом куполе вулкана, сопровождавшееся обрушением раскалённых лавин. Точность оценки поступившего на поверхность объёма свежего лавового материала затруднена в связи с неравномерностью экструзивно-эффузивного процесса (рис. 4 б). Интересное событие было зафиксировано 20 мая в 10:09 UTC. В районе лавового купола вулкана было отмечено 6 высокотемпературных пикселей аномалии с суммарной мощностью 420 МВт. Однако по визуальным или спутниковым данным в этот момент не наблюдалось эксплозивных событий. Вероятно, в этот момент происходило выжимание свежей маловязкой экструзии. Мгновенный расход лавы для этого события составил  $\sim 20 \text{ м}^3/\text{с}$ .

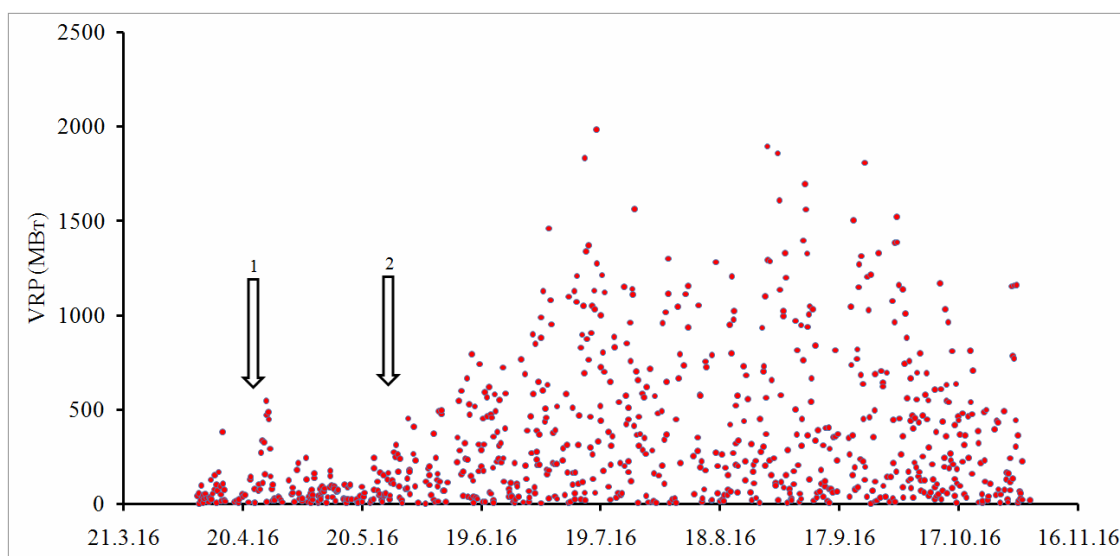


Рис. 2. Мощность излучения извержения вулкана Ключевской в 2016 г., по спутниковым данным MODIS. Стрелками отмечено: 1 – прорыв в привершинной части Апахончичского желоба; 2 – начало роста интенсивности излияния лавовых потоков.

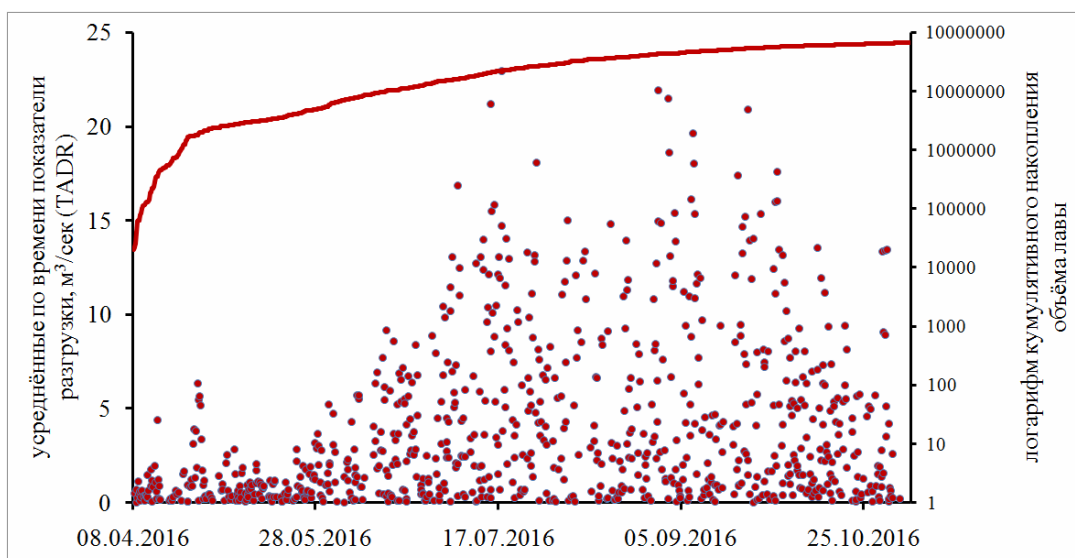


Рис. 3. Усреднённые по времени показатели расхода лавы извержения вулкана Ключевской в 2016 г. Линией показан логарифм кумулятивного накопления объёма лавы.

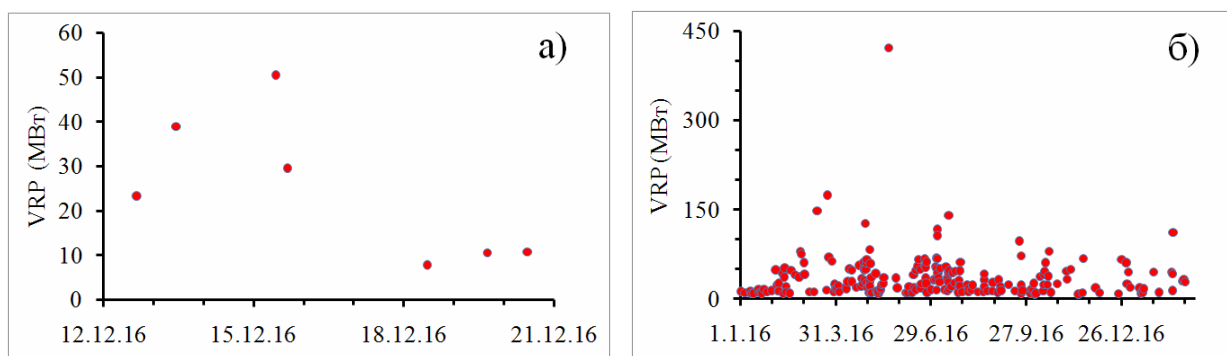


Рис. 4. Мощность теплового излучения активности вулканов Безымянный (а) и Шивелуч (б) в 2016 г. по спутниковым данным MODIS.

### Выводы

Реализованный алгоритм позволяет в оперативном режиме близком к реальному времени анализировать активность вулканов Камчатки и Курильских островов. С помощью этого метода появилась возможность оценивать тепловую эмиссию вулканов, а также расход и объём эффузивно-экструзивного материала, поступающего на поверхность земли.

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

### Список литературы

1. Coppola D., Laiolo M., Cigolini C. et al. Enhanced volcanic hot-spot detection using MODIS IR data: results from the MIROVA system// Geological Society. London. Special Publications. 2016. Vol. 426. Issue 1. P. 181-205. doi: 10.1144/SP426.5
2. Coppola D., Laiolo M., Piscopo D., Cigolini C. Rheological control on the radiant density of active lava flows and domes// Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. Vol. 249. P. 39-48. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.09.005.
3. Flynn, LP, Wright, R, Garbeil, H, et al. A global thermal alert using MODIS: initial results from 2000-2001// Advances in Environmental Monitoring and Modeling. 2002. Vol. 1. P. 5-36.
4. Wooster M.J., Zhukov B., Oertel D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products// Remote Sensing of Environment. 2003. Vol. 86. Issue 1. P. 83-107. doi: 10.1016/S0034-4257(03)00070-1
5. Wright, R., Flynn, LP, Garbeil, H, et al. Automated volcanic eruption detection using MODIS// Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 82. P. 135-155.
6. Wright, R., Flynn, LP, Garbeil, H, et al. MODVOLC: near-real-time thermal monitoring of global volcanism// Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2004. Vol. 135. P. 29-49.