

## МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРНОГО СОДЕРЖАНИЯ SO<sub>2</sub> ПРИ КРУПНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЯХ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ ЗА 2007 г. ПОСРЕДСТВОМ СПУТНИКОВЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Мельников Д.В., Ушаков С.В.*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, [dvm@kscnet.ru](mailto:dvm@kscnet.ru)*

### **Введение**

Диоксид серы (SO<sub>2</sub>) является одним из основных магматических газов, эманации которого сопровождают вулканические извержения. Кроме того, он может образовываться при сжигании природного топлива на электростанциях и при выплавке металла. Диоксид серы имеет короткий период жизни в воздухе, превращаясь в аэрозоли сульфатов в течении суток близ поверхности Земли и в течении месяца в стратосфере. Мониторинг содержания SO<sub>2</sub> в атмосфере позволяет судить об энергии вулканического извержения в целом и отдельных его этапов. Мощные эмиссии SO<sub>2</sub> могут приводить к возникновению кислотных дождей и климатическим изменениям. Так, например, в результате извержения вулкана Пинатубо на Филиппинах в 1991 г. в атмосферу было выброшено диоксида серы массой 20 млн. тонн, что оказало мощное влияние на состояние озонового слоя.

Глобальный мониторинг концентраций SO<sub>2</sub> осуществляется на основе измерений в ультрафиолетовом диапазоне (UV) приборами, установленными на искусственных спутниках Земли. В настоящее время, для решения данной задачи, на околоземной орбите находится два спутника – SCIAMACHY (на борту спутника ENVISAT) и OMI (на борту спутника AURA). Наиболее предпочтительными являются данные получаемые инструментом OMI (Ozone Monitoring Instrument), который является совместной разработкой Голландского аэрокосмического агентства, Финского метеорологического института и NASA. Этот прибор в 2004 году сменил на околоземной орбите своего предшественника - TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). OMI обладает более широким спектральным и пространственным разрешением. Он способен осуществлять ежедневный глобальный мониторинг состояния атмосферы в диапазоне длин волн 270-500 нм со спектральным разрешением 0.5 нм и с пространственным разрешением 13×24 км/1 пиксель. Частота съёмки – 1 раз в сутки. Алгоритм обработки данных [2, 3] даёт информацию о повышенных концентрациях SO<sub>2</sub> на трёх высотах над уровнем моря: 2 км (антропогенный SO<sub>2</sub>), 5 км (пассивная вулканическая дегазация) и 15 км (крупные эксплозивные извержения). Метод основан на измерении спектральных характеристик солнечного света рассеянного в атмосфере и отражённого от поверхности Земли. Сравнение первоначального и отражённого спектра даёт информацию о распределении и концентрации микропримесей озона и диоксид серы, так как эти газы поглощают и рассеивают часть приходящего солнечного света. В качестве единиц измерения концентрации SO<sub>2</sub> используются Единицы Добсона (Dobson Units). Одна Единица Добсона равна 0.01 мм толщины сжатого слоя озона при 0 градусов Цельсия или  $2.69 \times 10^{20}$  молекул озона на квадратный метр. Типичное фоновое значение концентрации SO<sub>2</sub> в атмосфере составляет  $\leq 1$  Единицы Добсона. Исходные данные OMI SO<sub>2</sub> в формате HDF можно получить на официальном сайте NASA (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/>)

### **Использование данных OMI SO<sub>2</sub> для изучения извержений вулканов Камчатки**

Ежегодно от различных источников в атмосферу привносится около 102 тыс. килотонн диоксида серы. Причём доля вулканизма в общей массе не велика и составляет всего 14 тыс. килотонн в год. Наибольшая масса [5] выбросов SO<sub>2</sub> приходится на промышленное производство (около 67 тыс. килотонн в год). Для вулканизма характерно наличие двух основных механизмов дегазации диоксида серы. Первый – дегазация при извержениях, в результате которых в атмосферу поступает от 500 до 4 000 килотонн SO<sub>2</sub> в год. При этом происходит излияние лавы, выбросы пепла на высоту до 40 км за достаточно короткий период времени (часы или сутки). Второй – пассивная вулканическая дегазация, которая является источником гораздо большего количества SO<sub>2</sub> (от 5 000 до 10 000 килотонн в год). Этот тип вулканической активности характеризуется долгим временным периодом (недели-столетия), небольшой высотой дегазации

(до 5 км над уровнем моря). Эти два типа вулканической активности, сопровождаемой дегазацией  $\text{SO}_2$ , можно рассмотреть на примере некоторых вулканов Камчатки.

### Вулкан Мутновский

Ярким примером пассивной дегазации является Мутновский вулкан. Наземными инструментальными методами (COSPEC) в 1999 году было определено [4], что средний объём дегазации  $\text{SO}_2$  для этого вулкана равен примерно 50 тонн/день. На протяжении всего апреля 2007 года по данным OMI  $\text{SO}_2$  над кратером вулкана фиксировалась повышенная концентрация диоксида серы (рис. 1) которая постепенно увеличивалась и достигла максимума 17 апреля (на момент пролёта спутник в 2:50 UTC масса  $\text{SO}_2$  составляла 330 тонн), после чего пошла на убыль.

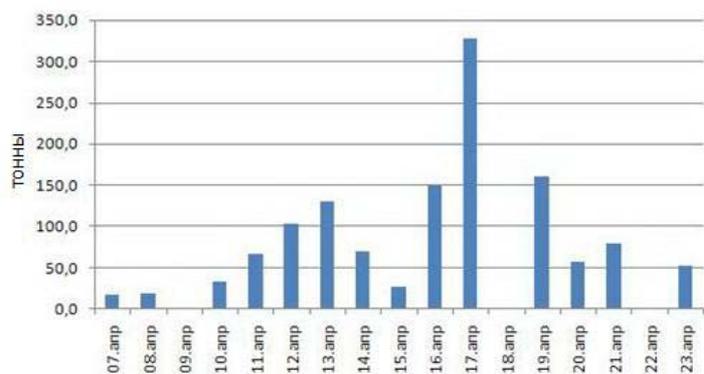


Рис. 1. График распределения концентраций  $\text{SO}_2$  (в тоннах) над Мутновским вулканом в апреле 2007 г.

Предполагается, что утром 17 апреля 2007 года (по местному времени) произошло небольшое фреатическое извержение вулкана [1]. Подтверждением этого являются визуальные данные, полученные в результате полевых работ 25-28 мая 2007 г. – западные склоны вулкана были покрыты тонким слоем резургентного пепла, а на дне Активного кратера наблюдалась новая взрывная воронка диаметром около 200 метров. Так же, данные полученные со спутников AVHRR и MODIS зафиксировали 17 апреля небольшое пепловое облако в непосредственной близости от вулкана.

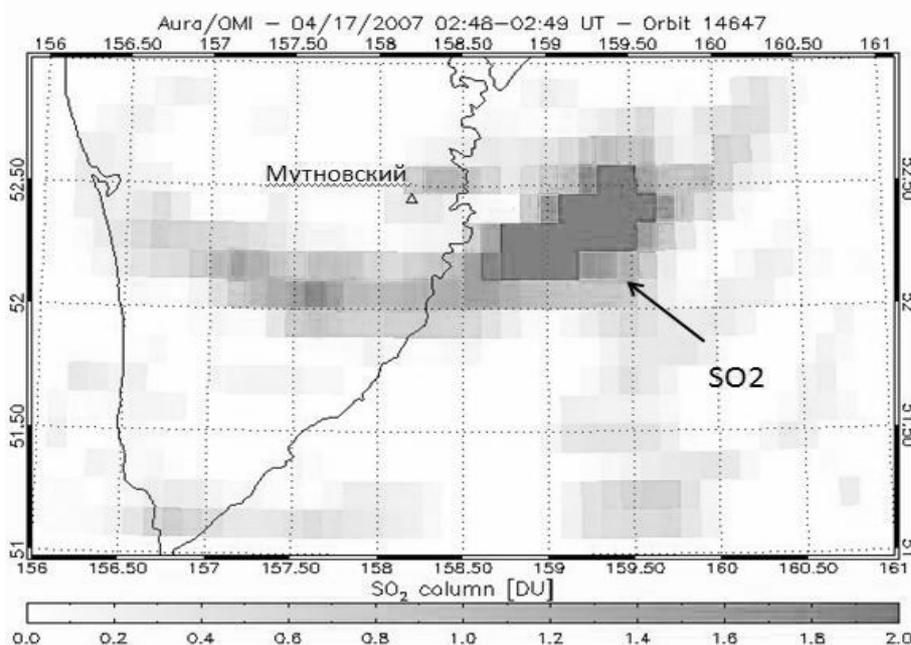


Рис. 2. Изображение облака содержащего высокие концентрации  $\text{SO}_2$ , вероятно, образовавшегося в результате фреатического извержения Мутновского вулкана. 17 апреля 2007 г. 02:48 UTC

Только к 20-м числам апреля начинает фиксироваться повышенное содержание  $\text{SO}_2$ , в этот период уже происходят излияния лавы и пепловые выбросы. Всего за активную фазу извержения в атмосферу поступило более 120 килотонн диоксида серы. Помимо концентраций  $\text{SO}_2$  данные OMI, на основе аэрозольного индекса, предоставляют информацию о наличии в атмосфере твёрдых частиц пепла (рис. 2).

### Вулкан Ключевской

Извержение Ключевского вулкана продолжалось с февраля по июль 2007 г. Наиболее активная фаза извержения была в мае-июле 2007 г. На момент начала активизации (февраль-март) вулкана концентрации  $\text{SO}_2$  были малы для их обнаружения с помощью OMI  $\text{SO}_2$ . В этот период, по визуальным данным, отмечалось умеренное свечение над кратером и мощная парогозовая

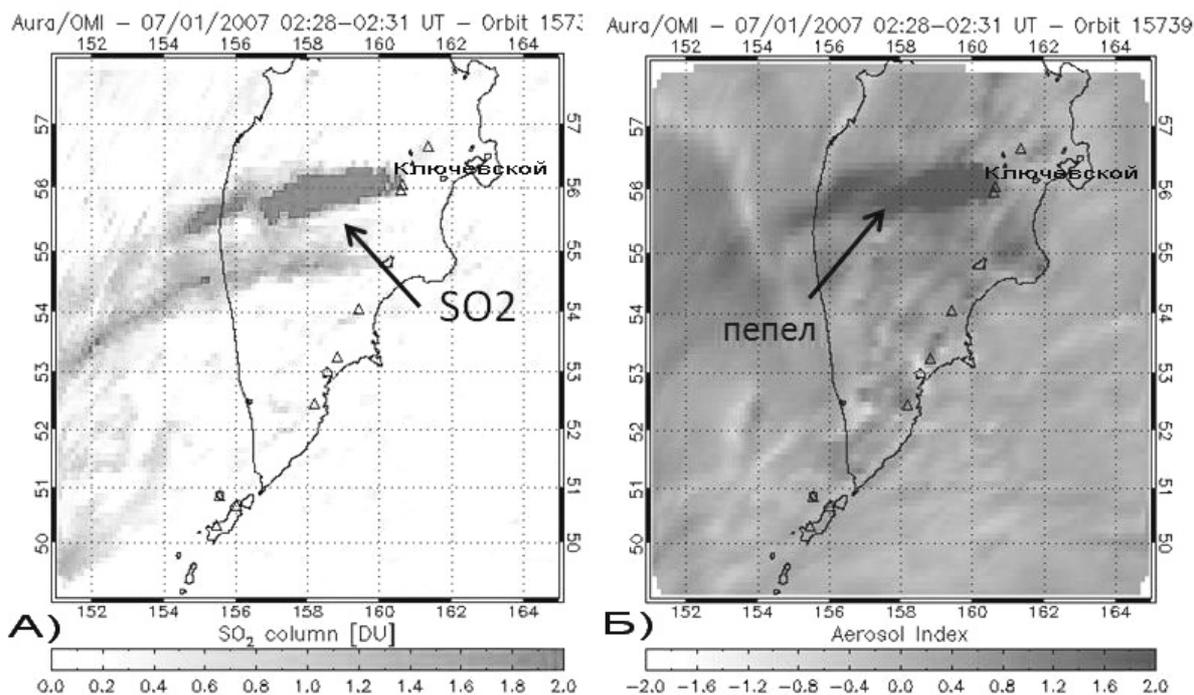


Рис. 2. Снимок ОМІ за 1 июля 2007 г. Рисунок А) показывает распределение и концентрации шлейфа содержащего  $\text{SO}_2$ . На рисунке Б) отображается аэрозольный индекс, характеризующий количество и плотность твёрдых частиц пепла.

### Вулкан Шивелуч

У вулкана существует постоянная пассивная дегазация, однако  $\text{SO}_2$  (с использованием ОМІ) регистрируется только во время крупных эксплозивных событий. Причём даже в эти периоды, концентрации  $\text{SO}_2$  незначительны. Вероятно, это связано с тем, что эксплозивные события протекают достаточно быстро (часы) и диоксид серы успеваает рассеяться в атмосфере. Учитывая тот факт, что ОМІ/Aura совершает только 1 виток в сутки над территорией Камчатки, то вероятность фиксации столь короткого события становится мала. 29 марта 2007 г. произошло крупное эксплозивное событие. Общая масса зафиксированного диоксида серы составила всего 29 тонн при наличии большого количества аэрозоля (Рис. 3).

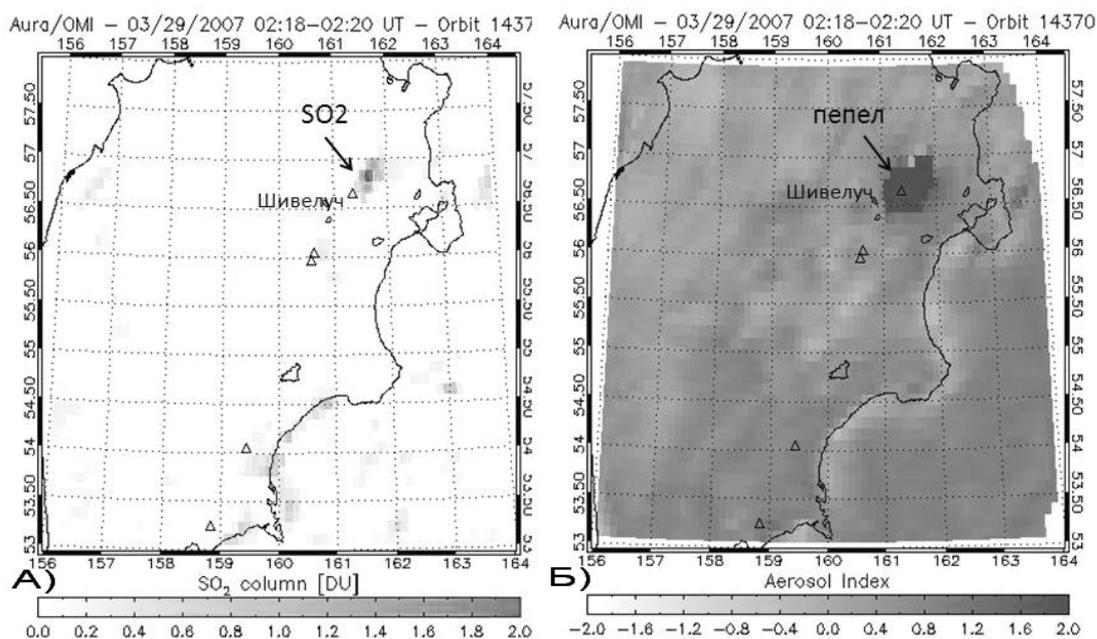
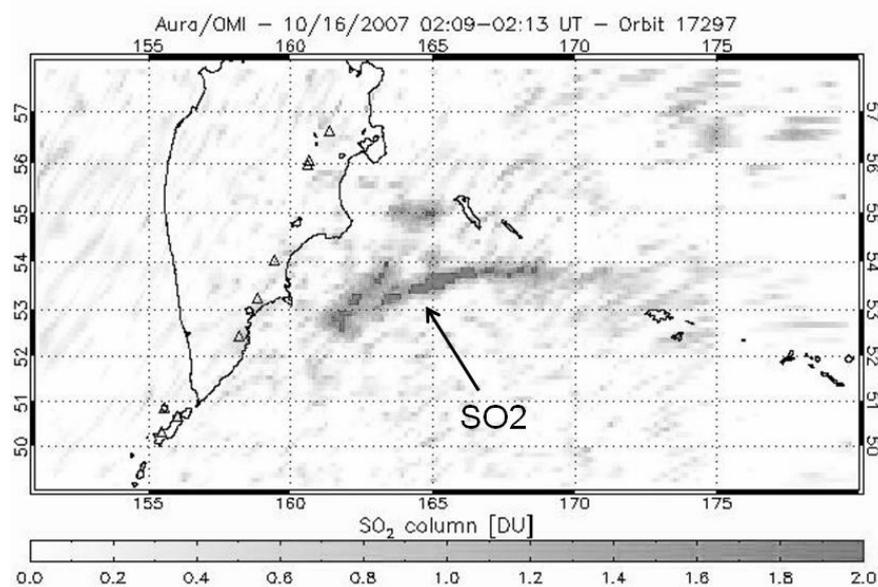


Рис. 3. Снимок ОМІ за 29 марта 2007 г. Рисунок А) показывает концентрации  $\text{SO}_2$  выделившегося при эксплозивном событии. На рисунке Б) отображается аэрозольный индекс, характеризующий количество и плотность твёрдых частиц пепла.

Можно предположить, что во время крупных эксплозивных событий выбрасывается большое количество твёрдых частиц, поэтому становится проблематичным определить истинные концентрации  $\text{SO}_2$ .

### Вулкан Безымянный

Деятельность вулкана характеризуется циклическими эксплозивными событиями (примерно 1 раз в 6 месяцев). Обычно события скоротечны (часы) и при помощи ОМІ зафиксировать диоксид



серы не удавалось. Однако, 14 октября 2007 в 14:27 UTC началось эксплозивное извержение, длившееся двое суток. В результате было извержено большое количества пепла, излился лавовый поток. Общая масса диоксида серы за период извержения составила 3 килотонны (Рис. 4).

Рис. 4. Облако, содержащее диоксид серы появившееся в результате извержения вулкана Безымянного. Данные ОМІ 16 октября 2007 г.

### Заключение

Спутниковые методы исследований являются неотъемлемой частью изучения вулканической активности. Значительно расширить эти наблюдения и предоставить новую информацию о жизни вулканов позволяют данные получаемые из космоса прибором Ozone Monitoring Instrument. При помощи ОМІ становится возможным выявлять повышенные концентрации диоксида серы в периоды пассивной вулканической дегазации и на этапе активной фазы извержений. В некоторых случаях фиксируется увеличение концентрации  $\text{SO}_2$  в предэруптивный период, что может являться прогнозным методом. За 2007 год вулканами Камчатки (Ключевской, Безымянный, Шивелуч, Карымский, Мутновский) было продуцировано в атмосферу более 150 килотонн диоксида серы (на основании измерений ОМІ  $\text{SO}_2$ ).

Хотя у данного метода существуют свои ограничения (зависимость от интенсивности солнечного света и периодичность повторения орбиты), наблюдения за концентрациями  $\text{SO}_2$  являются важным направлением исследований для понимания жизнедеятельности вулканов, климатических изменений, обеспечения здоровья населения, безопасности полётов авиации.

### Список литературы

1. Гавриленко Г.М., Мельников Д.В., Зеленский М.Е., Тавиньо Л. Многолетний гидрохимический мониторинг вулкана Мутновский (Камчатка) и фреатическое извержение вулкана в апреле 2007 г. // Вестник КРАУНЦ. Наука о Земле. 2007. № 1(9). С. 127-132
2. Krotkov, N. A., Carn, S. A., Krueger, A. J., Bhartia, P. K., Yang, K. Band residual difference algorithm for retrieval of  $\text{SO}_2$  from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI), IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, AURA Special Issue. 2006. V.44. N5. Pp.1259-1266.
3. Carn, S.A., N.A. Krotkov, K. Yang, R.M. Hoff, A.J. Prata, A.J. Krueger, S.C. Loughlin, and P.F. Levelt. Extended observations of volcanic  $\text{SO}_2$  and sulfate aerosol in the stratosphere, Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2007. N.7. Pp.57-2871
4. Fisher, J.M., Fisher, T.P., Roggensack, K., Williams, S.N. Magmatic volatiles from the Kamchatka volcanic arc // AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, Dec 11-15, 1999.
5. Andres R.J., and A.D. Kasgnoc, A time-averaged inventory of subaerial volcanic sulfur emissions, J. Geophys. Res., 1998. V.103. Pp.25251-25261.