

**ПРОЦЕССЫ РАЗВИТИЯ И РЕЛАКСАЦИИ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
СТРАТОСФЕРЫ ПОСЛЕ СЕРИИ ВЗРЫВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ 2006–2012 гг.  
ПО ДАННЫМ ЛИДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ТОМСКЕ**

**А.П. Макеев, В.Д. Бурлаков, С.И. Долгий, А.В. Невзоров**

**PROCESSES OF DEVELOPMENT AND RELAXATION OF AEROSOL POLLUTION  
OF THE STRATOSPHERE AFTER A SERIES OF EXPLOSIVE VOLCANIC ERUPTIONS  
IN 2006–2012 ACCORDING TO DATA OF LIDAR MEASUREMENTS IN TOMSK**

**A.P. Makeev, V.D. Burlakov, S.I. Dolgii, A.V. Nevzorov**

Оптические и микроструктурные характеристики стратосферного аэрозоля (СА) в значительной степени влияют на радиационные, динамические, химические процессы в атмосфере Земли. Особенно ярко эффекты влияния СА проявляются после взрывных вулканических извержений, когда серосодержащие продукты выбрасываются непосредственно в стратосферу и образуют там в ряде фотохимических реакций серноокислотный аэрозоль, по своей массе в десятки раз превышающий массу фоновый аэрозоля. При анализе и прогнозировании различных стратосферных изменений необходимо определять и выделять периоды повышенного содержания СА, определять и прогнозировать долговременные тренды изменений характеристик СА.

The optical and microstructure characteristics of stratospheric aerosol (SA) influence considerably the radiation, dynamical and chemical processes in the Earth's atmosphere. The SA effects are most apparent after explosive volcanic eruptions when sulfur-containing products are emitted directly to the stratosphere and participate in a series of photochemical reactions to form sulfuric acid aerosol exceeding the background aerosol by several orders of magnitude in mass. The stratospheric changes should be analyzed by determining and identifying the periods of elevated SA content, and by evaluating and predicting the long-term trends of SA characteristics.

**Введение**

Оптические и микроструктурные характеристики стратосферного аэрозоля (СА) в значительной степени влияют на радиационные, динамические, химические процессы в атмосфере Земли [Зуев и др., 2008; Ansmann et al., 1996; Hofmann, Solomon, 1989; Labitzke, McCormick, 1992; McCormick et al., 1995]. Особенно ярко эффекты влияния СА проявляются после взрывных вулканических извержений, когда серосодержащие продукты выбрасываются непосредственно в стратосферу и образуют там в ряде фотохимических реакций серноокислотный аэрозоль, по своей массе в десятки раз превышающий массу фоновый аэрозоля. При анализе и прогнозировании различных стратосферных изменений необходимо определять и выделять периоды повышенного содержания СА, определять и прогнозировать долговременные тренды изменений характеристик СА.

**Техника и методика измерений**

Лидарные измерения оптических характеристик стратосферных аэрозолей ведутся в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН с 1986 г. на длине волны зондирования 532 нм. По данным одностороннего зондирования восстанавливаются оптические характеристики СА в определенном интервале высот  $H$ : вертикальный профиль коэффициента обратного аэрозольного рассеяния  $\beta_p^a(H)$  и отношение рассеяния  $R(H)$  – отношение суммы коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния к последнему. При наших измерениях в интервале высот 10–20 км ошибка измерений  $\beta_p^a(H)$  и  $R(H)$  изменяется от 3 до 4 %, а на высотах 30 км увеличивается до 6.5 %.

В настоящее время измерения ведутся на длинах волн 355 и 532 нм Nd:YAG лазера. На длине волн 532 нм реализуется энергия 80 мДж, на длине волн 355 нм – около 40 мДж при частоте повторения им-

пульсов 20 Гц. Оптические лидарные сигналы регистрируются приемным телескопом, который собран по схеме Ньютона на основе зеркала диаметром 30 см. Фотоэлектронная регистрация лидарных сигналов проводится в режиме счета импульсов фототока. Наиболее наглядное представление об аэрозольной стратификации дают измеряемые профили  $R(H)$ , которые отражают распределение относительного содержания аэрозоля по высоте и показывают выраженные аэрозольные слои. Критерием повышенного содержания СА является превышение модельных значений  $R(H)$ , которые получены нами на основе массива данных многолетних измерений в условиях фоновый, не возмущенный вулканическими извержениями состояния стратосферы.

Для идентификации возможного источника аэрозольных возмущений анализируются сообщения электронных ресурсов вулканических обсерваторий о взрывных извержениях вулканов и осуществляется траекторный анализ переноса воздушных масс в диапазоне высот регистрации аэрозольных аномалий между точкой наблюдений и точкой расположения вулкана. Применяется метод построения прямых и обратных траекторий с использованием модели NOAA HYSPLIT MODEL [<http://www.ready.noaa.gov>].

**Результаты измерений**

На рис. 1 приведены данные измерений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, который отражает общее аэрозольное содержание в высотном интервале 15–30 км. Стрелками указаны моменты взрывных извержений, после которых над Томском регистрировалось повышенное содержание аэрозоля в стратосфере.

С 2006 по 2012 г. в стратосфере над Томском периодически наблюдалось повышенное содержание аэрозоля вследствие серии взрывных извержений вулканов Тихоокеанского огненного кольца и Исландии.

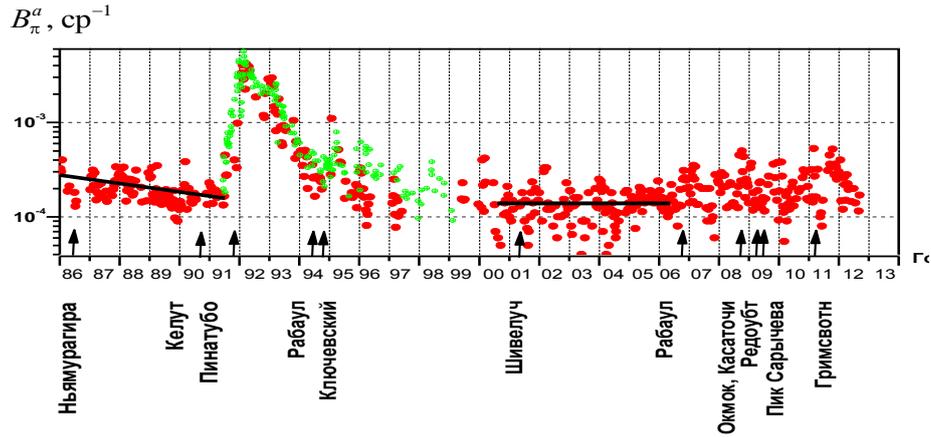


Рис. 1. Временной ход интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния на длине волны зондирования 532 нм в высотном диапазоне 15–30 км.

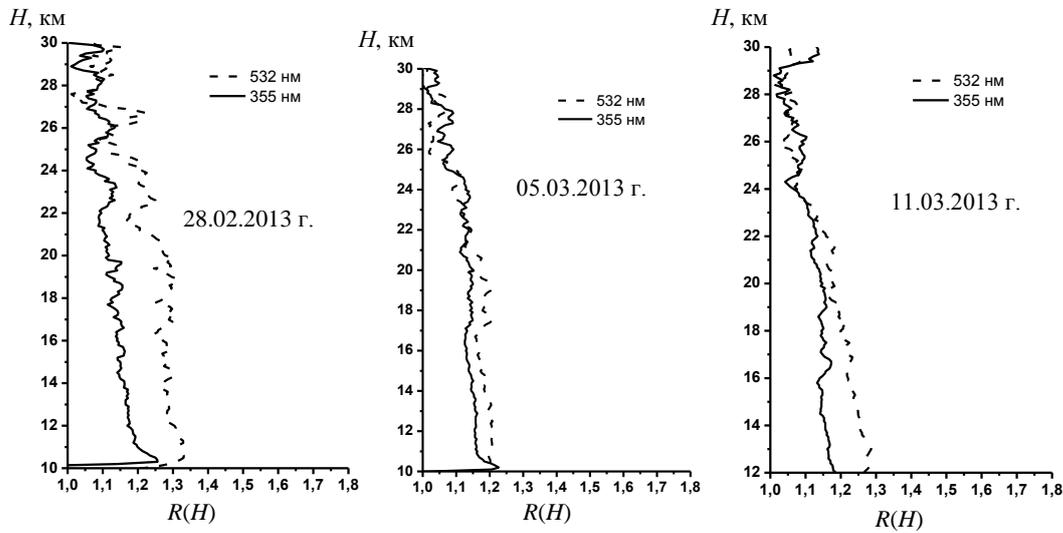


Рис. 2. Примеры профилей отношения рассеяния в стратосфере над Томском в 2013 г. на длинах волн зондирования 355 и 532 нм.

| № | Вулкан                            | Широта, град. | Долгота, град. | Дата                        | Объем Выброшенного SO <sub>2</sub> , Мг | Период аэрозольного возмущения стратосферы                          |
|---|-----------------------------------|---------------|----------------|-----------------------------|---|---|
| 1 | Рабаул (Папуа–Новая Гвинея)       | 4.3 N         | 152.2 E        | 6 октября 2006 г.           | 0.13                                    | конец октября 2006 – зима 2006/07 гг.                               |
| 2 | Ожмок (Алеутские острова)         | 53.4 N        | 168.1 W        | 12 июля 2008 г.             |   | конец июля – осень 2008 г.  |
| 3 | Касаточи (Алеутские острова)      | 52.2 N        | 175.5 W        | 6–8 августа 2008 г.         | 1.0                                     |   |
| 4 | Редубт (Аляска)                   | 60.5 N        | 152.7 W        | 18 марта – 4 апреля 2009 г. |   | апрель–май 2009 г.  |
| 5 | Пик Сарычева (Курильские острова) | 48.1 N        | 153.2 E        | 12–16 июня 2009 г.          | 0.2                                     | июль–декабрь 2009 г.  |
| 6 | Эйяфьятлайокудль (Исландия)       | 63.6 N        | 19.6 W         | 14 апреля 2010 г.           |   | Незначительное возмущение нижней стратосферы в конце апреля 2010 г. |
| 7 | Гримсвотн (Исландия)              | 64.4 N        | 17.3 W         | 21 мая 2011 г.              |   | Второе полугодие 2011 г.  |

Во второй половине 2012 г. стратосфера вернулась к фоновому содержанию аэрозоля. В начале 2013 г. также наблюдается фоновое содержание аэрозоля (рис. 2).

Хронология вулканических извержений в 2006–2012 гг., после которых над Томском регистрировалось повышенное содержание СА, представлена в таблице. Указан известный по литературным данным объем выброшенной массы двуокиси серы, по которому оценивается мощность вулканического взрыва. Так, после извержения вулкана Пинатубо (1991 г.) было выброшено около 20 Мт, т. е. наблюдаемые извержения были сравнительно слабыми. Тем не менее повышенное содержание СА наблюдалось от нескольких месяцев до полугода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракты № 14.518.11.7063, 11.519.11.6033 и соглашение № 8325).

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

Зуев В.В., Баженов О.Е., Бурлаков В.Д. и др. О влиянии вулканогенного аэрозоля на изменения стратосферного озона и  $\text{NO}_2$  по данным измерений на Сибирской лидарной станции // *Оптика атмосф. и океана*. 2008. Т. 21, № 11. С. 945–951.

Ansmann A., Wagner F., Wandinger U., et al. Pinatubo aerosol and stratospheric ozone reduction: Observations over central Europe // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 10, N D13. P. 18,775–18,785.

Hofmann D.J., Solomon S. Ozone destruction through heterogeneous chemistry following the eruption of El Chichon // *Ibid.* 1989. V. 94, N D4. P. 5029–5041.

Labitzke K., McCormick M.P. Stratospheric temperature increases due to Pinatubo aerosols // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 2. P. 207–210.

McCormick M.P., Thomason L.W., Trepte C.R. Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption // *Nature*. 1995. V. 373. P. 399–404.

<http://www.ready.noaa.gov>.

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*