

## ЛИДАРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СТРАТОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ И ОЗОНА НАД ТОМСКОМ

А.П. Макеев, А.В. Невзоров, С.И. Долгий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук г. Томск, Россия, map@iao.ru

## LIDAR OBSERVATIONS OF STRATOSPHERIC AEROSOL AND OZONE OVER TOMSK

A.P. Makeev, A.V. Nevzorov, S.I. Dolgij

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia, map@iao.ru

**Аннотация.** В докладе приводятся и обобщаются результаты лидарных измерений на Сибирской лидарной станции (СЛС) вертикального распределения стратосферного аэрозольного слоя (СА) и озона. На основе длинного ряда наблюдений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, в Томске за 2018–2024 гг. проведен анализ изменений стратосферного аэрозольного слоя. Описан годовой ходовой ход вертикального распределения озона и зарегистрированный в марте 2023 г. довольно редкий процесс стратосферно-тропосферного переноса воздушных масс через тропопаузу.

**Ключевые слова:** Лазерное зондирование атмосферы, лидар, стратосферный аэрозоль, озон.

**Abstract.** The report presents and summarizes the results of lidar measurements of the vertical distribution of the stratospheric aerosol layer (CA) and ozone, made at the Siberian Lidar Station (SLS). Based on a long series of observations of the integral coefficient of reverse aerosol scattering, an analysis of changes in the stratospheric aerosol layer was carried out in Tomsk in 2018–2024. The annual course of the vertical distribution of ozone is described and a rather rare process of stratospheric-tropospheric transport of air masses through the tropopause was registered in March 2023.

**Keywords:** Laser sensing of the atmosphere, lidar, stratospheric aerosol, ozone.

### ВВЕДЕНИЕ

На Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы СО РАН, расположенной в Томске (56,5° с.ш., 85° в.д.), на основе методов дистанционного оптического зондирования атмосферы с 1986 года продолжается долговременный регулярный мониторинг характеристик стратосферного аэрозольного слоя (СА) и озона. Стратосферный аэрозоль (СА) является одним из существенных климатообразующих параметров атмосферы, который в основном состоит из частиц 75 % водного раствора серной кислоты субмикронного диапазона размеров. Он рассеивает солнечное излучение, частично отражая его в обратном направлении, и в то же время пропускают тепловое излучение Земли и обеспечивают отрицательный радиационный приток в определенной степени компенсируют эффект глобального потепления.

Для исследования атмосферного озонового слоя и аэрозоля в последнее время используются методы лазерного дистанционного зондирования с использованием лидарной техники, которые позволяют оперативно получать информацию по вертикальному распределению озона (ВРО) в атмосфере. Они удачно дополняют подобную информацию, получаемую со спутников MetOp, SAGE II, TERRA и др., а также с помощью контактных методов: ракет и озонозондов.

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены данные измерений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния над Томском с 2018 по 2024 гг. Здесь каждая точка является усредненным значением за 10 дней измерений (декада). Стрелками указаны взрывные извержения вулканов. Прямыми линиями

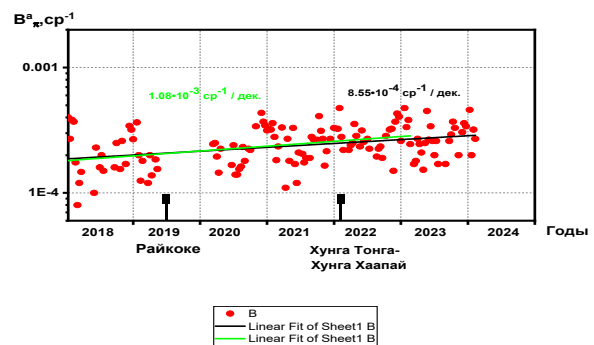


Рис. 1. Временной ход интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния на длине волны зондирования 532 нм в высотном диапазоне 15–30 км, зарегистрированный над Томском в 2018–2024 гг.

на рис. 1 обозначены тренды изменений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния  $B_{\pi}^{\alpha} B_{\pi}^{\alpha}$  на длине волны зондирования 532 нм в высотном диапазоне 15–30 км. Зеленая линия для 2018–2023 гг., черная — 2018–2024 гг.

Как показано ранее, при анализе долговременных измерений стратосферного аэрозольного слоя на СЛС ИОА СО РАН в Томске отмечен рост СА за 2018–2023 гг. со скоростью  $1.08 \cdot 10^{-3} \text{ ср}^{-1}$  за декаду (рис. 1, зеленая линия) [Nevzorov et al., 2023]. Этот рост был обусловлен глобальным влиянием взрывных извержений вулканов Райкоке в июне 2019 г., и подводного вулкана Хунга Тонга-Хунга Хаапай в январе 2022 г.

При анализе полученных результатов измерений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния над Томском с 2018 по 2024 гг. была построена линейная регрессия, которая аппроксимируется прямой вида

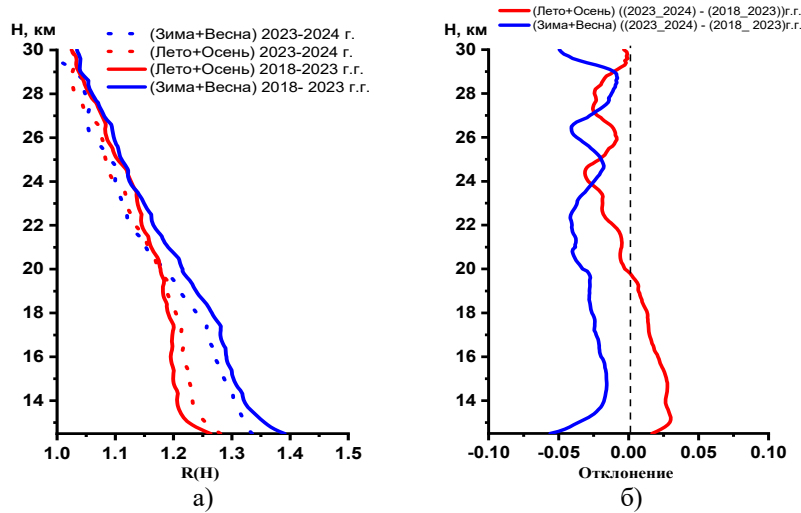


Рис. 2. а) Усредненные сезонные профили отношения рассеяния на длине волны 532 нм за 2018–2023 гг. - сплошная линия, в сравнении со средне сезонными профилями 2024 г. - пунктирная линия, полученные на СЛС. б) – Разница между профилями 2023-2024 года и профилями 2018-2023 гг.

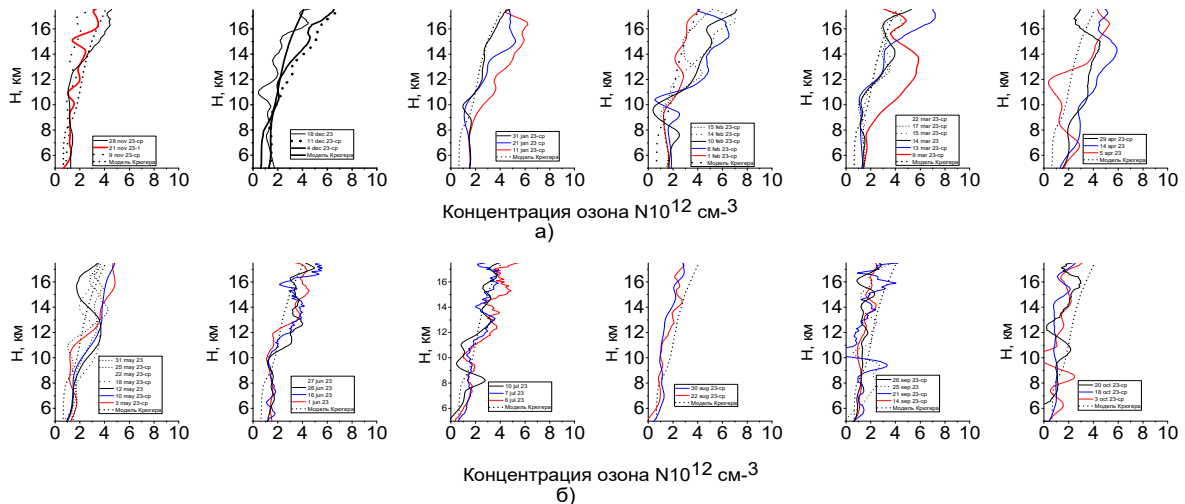


Рис. 3. Вертикальное распределение озона в 2023 году над Томском

$$B_{\pi}^a = A + B \cdot t \quad B_{\pi}^a = A + B \cdot t,$$

где  $A, B$  — константы,  $t$  — время в декадах. Построенная в 2024 г. линейная регрессия (черная кривая на рис. 1) имеет вид  $B_{\pi}^a = -3.73 + 8.55 \cdot 10^{-4} \cdot t$   $B_{\pi}^a = -3.73 + 8.55 \cdot 10^{-4} \cdot t$ , что говорит о скорости роста содержания  $B_{\pi}^a B_{\pi}^a - 8.55 \cdot 10^{-4} 8.55 \cdot 10^{-4}$  ср<sup>-1</sup> за декаду. Из рис. 1 видно, что скорость роста СА в 2024 г. начинает замедляться и происходит стабилизация наполнения стратосферным аэрозолем с уменьшением влияния взрывных извержений вулканов.

Наиболее полно вертикальную структуру стратосферного аэрозоля отражают вертикальные профили. На рис. 2а представлены усредненные по сезонам профили вертикального распределения оптических характеристик САС с 2018 по февраль 2023 гг. (сплошные красные и синие линии) в сравнении с периодом с марта 2023 по март 2024 гг. (пунктирные красные и синие линии).

Всего было обработано 107 профилей для периода 2018–2023 гг. и 26 для периода 2023–2024 гг.

зимне–весеннего (ноябрь–апрель), а также 75 профилей 2018–2023 гг. и 18 профилей 2023–2024 гг. для летне–осеннего (май–октябрь) периодов. При этом каждый профиль получен усреднением 2–3 профилей снятых за одну ночь измерений. Из рис. 2а видно, что вертикальные профили зимне–осеннего периода 2023–2024 гг. показывают уменьшение содержания стратосферного аэрозоля по всей трассе измерений по сравнению с профилями 2018–2023 гг. В то же время, профили летне–осеннего периода 2023–2024 гг. уменьшаются с высоты 20 км и увеличиваются ниже этой высоты по сравнению с профилями 2018–2023 гг. Это хорошо видно на рис. 2б, где показана разница между сезонными профилями периодов 2023–2024 гг. и 2018–2023 гг.

На рис. 3 представлено ВРО, полученное в 2023 г. на СЛС в Томске, в сравнении с моделью Крюгера [Krieger, Minzner, 1997]. Всего получено 46 результативных профили. Из рисунка видно повышенное содержание озона в зимний период:

ноябрь-апрель и его пониженное в летний: май — октябрь. В высотном диапазоне 5–8 км профили ВРО практически совпадают с моделью Крюгера, вариabельность, наблюдаемая на других высотах, всех полученных профилей относительно модельного распределения, является естественным для динамики ВРО в отдельные дни зондирования.

При зондировании ВРО 9 марта 2023 г. был зарегистрирован достаточно редкий процесс стратосферно-тропосферного переноса воздушных масс через тропопаузу. Из рис. 4 видно, что повышенное содержание озона 9 марта по сравнению с 13 и 14 марта вероятно обусловлено переносом воздушных масс из стратосферы в тропосферу. Что подтверждается практически вертикальным распределением температуры 9 марта по времени аэрозондирования в 0Z и 12Z сравнением 10 и 11 марта в 10Z и 11Z, когда на профилях температуры (рис. 4. б) отчетливо прослеживается тропопауза на высотах 9–11 км, и влажности 9 марта в 0Z и 12Z в сравнении с 10 в 12Z и 11Z. Данные по вертикальному распределению температуры и влажности взяты из аэрологического зондирования в г. Колпашево [<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>]

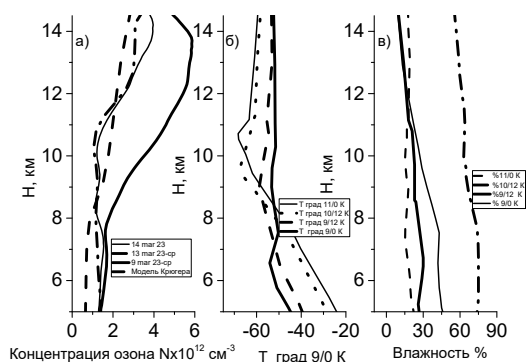


Рис. 4. Вертикальное распределение озона (а), температуры (б) и влажности (в) в атмосфере 9–14 марта

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным ряда долговременных измерений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния  $B_{\pi}^a$  для стратосферы в диапазоне 15–30 км за 2018–2024 гг. была построена линейная регрессия вида  $B_{\pi}^a = -3.73 + 8.55 \cdot 10^{-4} \cdot t$ , что в сравнении с регрессией 2018–2023 года, говорит об уменьшении скорости наполнения стратосферным аэрозолем за счет влияния взрывных извержений вулканов Райкоке в июне 2019 г. и подводного вулкана Хунга Тонга-Хунга Хаапай в январе 2022 г.

Средние по сезонам вертикальные профили отношения рассеяния за 2023–2024 гг. показывают уменьшение значений за период зима-весна и выше 20 км летом-осенью, по сравнению с профилями 2018–2023 гг. В то время как, средние профили периода лето-осень на высотах от тропопаузы до 20 км показывают рост по сравнению с профилями 2018–2023 гг.

Зондирование ВРО на показало увеличение содержания озона в зимний период и его уменьшение в летний, что соответствует данным других авторов. Совместный анализ результатов лидарных измерений и данных аэрологического зондирования температуры и влажности показал, что в марте 2023 г. был зафиксирован довольно редкий процесс стратосферно-тропосферного переноса воздушных масс.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Krueger A.J., Minzner R.A. A mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. standard atmosphere // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 81, N 24. P. 4477–4481.
- Nevzorov A.V., Dolgii S.I., Makeev A.P. et al. Stratospheric aerosol layer for period of 2018–2023 using measurements at Siberian Lidar Station in Tomsk // *Proceedings of 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2023. 127801V. doi: 10.1117/12.2688302.SPIE. 2023. V. 12780, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>