


ФИЗИКА

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-47-2-106-116>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 551.524.7



Лидарные исследования вертикального распределения аэрозоля в стратосфере над Томском в 2023 г.

*В. Н. Маричев**, *Д. А. Бочковский*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 634055, г. Томск,
площадь Академика Зуева, д. 1, Россия

Аннотация. В статье представлены исследования внутригодовой изменчивости вертикально-временной структуры фонового аэрозоля и его интегрального наполнения в стратосфере на основе анализа оптических характеристик аэрозоля. Результаты получены на лидарном комплексе станции высотного зондирования атмосферы ИОА СО РАН за 2023 г. Зондирование проводилось в ночное время суток, диапазон высот зондирования - от 10 до 50 км. В качестве параметра, описывающего вертикальную стратификацию аэрозоля, представлена оптическая характеристика $R(H)$ — отношение аэрозольного рассеяния. По данным мониторинга, как и в предыдущие годы, установлена устойчивая тенденция накопления аэрозоля в нижней стратосфере в холодный период года с максимальным содержанием в январе ($R \approx 1.5$ на высотах 10–30 км). В марте начинается убывание, и вертикальная стратификация аэрозоля оценивается средним значением $R \approx 1.2$ в слое 10-20 км, до практического отсутствия в июне-июле ($R \leq 1.1$). С сентября начинается рост содержания аэрозоля в нижней стратосфере до его максимального значения в зимний период. В верхней стратосфере (30-50 км) в течение всего года фоновый аэрозоль практически отсутствует. В качестве сравнительного анализа и контроля за временной динамикой аэрозольного наполнения стратосферы в статье приводится параметр B - интегральный коэффициент обратного аэрозольного рассеяния за период с 2017 – начало 2024 гг. В целом по годам максимальные аэрозольные наполнения стратосферы происходит в зимние месяцы и центрируются относительно января. Вместе с тем оно неравномерно распределено по годам и отмечается резкими и значительными колебаниями.

Ключевые слова: стратосфера, аэрозоль, лидар

Получение: 18.06.2024; Исправление: 12.08.2024; Принятие: 17.08.2024; Публикация онлайн: 26.08.2024

Для цитирования. Маричев В. Н., Бочковский Д. А. Лидарные исследования вертикального распределения аэрозоля в стратосфере над Томском в 2023 г. // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2024. Т. 47. № 2. С. 106-116. EDN: FDVVKM. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-47-2-106-116>.

Финансирование. НИР выполнена в рамках проекта государственного задания ИОА СО РАН

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

***Корреспонденция:**  E-mail: marichev@iao.ru


Контент публикуется на условиях *Creative Commons Attribution 4.0 International License*

© Маричев В. Н., Бочковский Д. А., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)



PHYSICS

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-47-2-106-116>

Research Article

Full text in Russian

MSC 86A10



Lidar studies of the vertical distribution of aerosol in the stratosphere over Tomsk in 2023

*V. N. Marichev**, *D. A. Bochkovsky*

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS), 634055, Tomsk, Academician Zuev square, 1, Russia

Abstract. The article presents studies of the intra-annual variability of the vertical-temporal structure of the background aerosol and its integral content in the stratosphere based on an analysis of the optical characteristics of the aerosol. The results were obtained at the lidar complex of the station for high-altitude atmospheric sounding of the IAO SB RAS for 2023. The sounding was carried out at night, the sounding altitude range was from 10 to 50 km. The optical characteristic $R(H)$ — aerosol scattering ratio — is presented as a parameter describing the vertical stratification of the aerosol. According to monitoring data, as in previous years, a stable tendency for aerosol accumulation in the lower stratosphere during the cold period of the year with maximum content in January ($R \approx 1.5$ at altitudes of 10–30 km) has been established. In March, a decrease begins, and the vertical stratification of aerosol is estimated at an average value of $R \approx 1.2$ in the 10-20 km layer, to virtual absence in June-July ($R \leq 1.1$). From September, the aerosol content in the lower stratosphere begins to increase to its maximum value in winter. In the upper stratosphere (30-50 km) there is virtually no background aerosol throughout the year. As a comparative analysis and control over the temporal dynamics of the aerosol filling of the stratosphere, the article provides parameter B — the integral aerosol backscatter coefficient for the period from 2017 to the beginning of 2024. In general, over the years, the maximum aerosol filling of the stratosphere occurs in the winter months and is centered relative to January. At the same time, it is unevenly distributed over the years and is marked by sharp and significant fluctuations.

Key words: stratosphere, aerosol, lidar.

Received: 18.06.2024; Revised: 12.08.2024; Accepted: 17.08.2024; First online: 26.08.2024

For citation. Marichev V. N., Bochkovsky D. A. Lidar studies of the vertical distribution of aerosol in the stratosphere over Tomsk in 2023. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 47: 2, 106-116. EDN: FDVVKM. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-47-2-106-116>.

Funding. The research was carried out within the framework of the project of the state assignment of the IOA SB RAS
Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: marichev@iao.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Marichev V. N., Bochkovsky D. A., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

В 2023 г. на лидарном комплексе ИОА СО РАН продолжались наблюдения за поведением аэрозольной компоненты стратосферы над Томском в различные месяцы года. Для указанного периода, как и периода предыдущих нескольких лет, характерным являлось отсутствие мощных вулканических извержений, которые могли бы оказывать влияние на заметное возмущение аэрозольной компоненты стратосферы Северного полушария, включая регион Западной Сибири. Поэтому имелась возможность проследить особенности вертикально-временной изменчивости наполнения стратосферы фоновым аэрозолем и его интегральным содержанием для Западной Сибири, включая приведенные в работах [1–3] исследования предыдущих лет за достаточно длительный временной интервал. Используемая для анализа первичная информация состояла из массива данных из 75 суммарных сигналов, накопленных в отдельные ночи 2023 г. Для сравнительно анализа были взяты результаты лидарного мониторинга стратосферы за 2017 – начало 2024 гг.

Аппаратура, условия проведения мониторинга, определяемые параметры

Измерения проводились на лидарном комплексе, передатчиком которого являлся лазер LS-2137U-UV3 на АИГ:Nd3+ с излучением на длине волны 532 нм, энергией импульсов 400 мДж с частотой генерации 10 Гц. Обратнорассеянное излучение поступало на телескоп системы Ньютона с приемным зеркалом диаметром 1 м и фокусным расстоянием 2 м. Прием световых сигналов проводился по двум каналам с разделением в соотношении 10% и 90% в целях уменьшения динамического диапазона (ближняя и дальняя зона приема). Разделенные оптические сигналы поступали на фотосенсорные модули (фирма Hamamatsu), где происходило их преобразование в электрические сигналы в режиме счета фотонов. Далее производилась их регистрация в счетчике фотонов с дальнейшей передачей данных в компьютер для сбора и накопления. Зондирование проводится в ночное время суток. Диапазон высот зондирования - от 10 до 50 км. Используемое вертикальное разрешение измерения сигнала (длина строба) составляет 192 м. Единичная серия измерений равнялась 10 мин., а среднее время проведения измерений за ночь – около двух часов. В качестве параметра, описывающего вертикальную стратификацию аэрозоля, представлена оптическая характеристика $R(H)$ – отношение аэрозольного рассеяния.

$$R(H) = \frac{\beta(H)}{\beta_M(H)} = \frac{\beta_M(H) + \beta_A(H)}{\beta_M(H)} = 1 + \frac{\beta_A(H)}{\beta_M(H)},$$

где, H – текущая высота, $\beta_M(H)$, $\beta_A(H)$ – коэффициенты молекулярного и аэрозольного обратного рассеяния света.

Контроль за временной динамикой аэрозольного наполнения стратосферы проводился с использованием параметра B – интегрального коэффициента

обратного аэрозольного рассеяния, определяемого по формуле:

$$B = \int_{H_1}^{H_2} \beta(h) dh,$$

где, $H_1 = 10$ км, $H_2 = 30$ км.

Данные параметры R и B широко используются в мировой практике лидарного мониторинга атмосферы для исследования пространственно-временной динамики аэрозольной компоненты [4].

Результаты наблюдений

Профили стратификации аэрозоля для холодного периода года, (январь, февраль), представлены на рис. 1. Из-за неблагоприятных погодных условий (облачное небо) измерения были ограничены пятью отдельными ночами наблюдений. Несмотря на значительный временной разрыв в измерениях (в среднем 10 суток), в январе наблюдается устойчивая структура вертикальной стратификации аэрозоля с основным содержанием в нижней стратосфере (10-30 км). Для февраля отмечается аналогичная ситуация с некоторым уменьшением содержания аэрозоля в нижней половине стратосферы (на высоте 15 км $R = 1.2-1.3$ для февраля по сравнению с $R = 1.4$ для января) и высоты слоя основного аэрозольного наполнения до 20-25 км.

Вертикальное распределение аэрозоля в весенний период показано на рис. 2.

Следует отметить заметную динамику вертикальной стратификации аэрозоля в весенний период 2023 года, в отличие от наблюдений прошлых лет. Так, в марте вертикальная стратификация аэрозоля оценивается средним значением $R \simeq 1.2$ в слое 10-20 км и основным содержанием аэрозоля в слое от 10 до 30 км., в апреле отношение рассеяния на в слое 10-20 км испытывает заметные колебания от 1.1 до 1.3, а слой основного аэрозольного наполнения стратосферы остается постоянным (10-30 км.). В мае слой основного содержания аэрозоля сокращается до высоты 25 км, вместе с тем наблюдаются дни с повышенным содержанием аэрозоля (3, 10, 11 мая) с $R \simeq 1.5$ на высоте 10 км. Данное обстоятельство, вероятнее всего, связано с заносом пирокумулятивных облаков от лесных пожаров.

Летний периода года (рис. 3) характерен низким значением аэрозольной компоненты в стратосфере, при котором отмечаются случаи незначительного содержания аэрозоля в отдельных участках слоя 15-25 км ($R \leq 1.1$). Ниже 15 км наблюдаемые всплески аэрозольного рассеяния могут быть. Следует отметить заметную динамику вертикальной стратификации аэрозоля в весенний период 2023 года, в отличие от наблюдений прошлых лет. Выше 25 км присутствие аэрозоля не наблюдается.

Далее с сентября происходит рост аэрозольного наполнения нижней стратосферы (рис. 4). Особняком выделяется случаи резкого увеличение содержания аэрозоля в отдельные даты осеннего периода, которое в отдельных

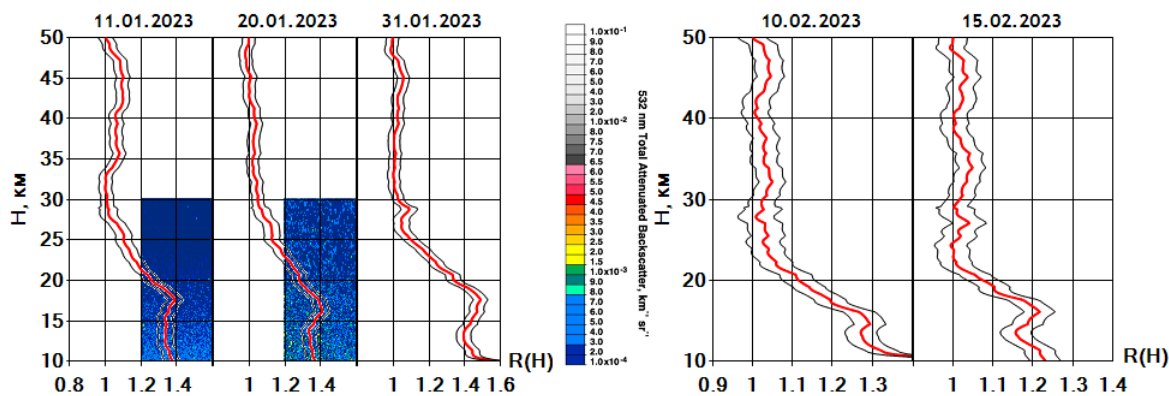


Рис. 1. Профили вертикальной стратификации аэрозоля за январь - февраль 2023 г., выраженные через параметр отношение рассеяния R (кривые красного цвета, черного - коридор стандартного отклонения). Цветовой градацией обозначена стратификация аэрозоля, выраженная через коэффициент обратного рассеяния, полученная спутником Калипсо

[Figure 1. Profiles of vertical stratification of aerosol for January - February 2023, expressed in terms of the scattering ratio parameter R (curves in red, black - the standard deviation corridor). The color gradation indicates the stratification of the aerosol, expressed in terms of the backscattering coefficient obtained by the Calypso satellite]

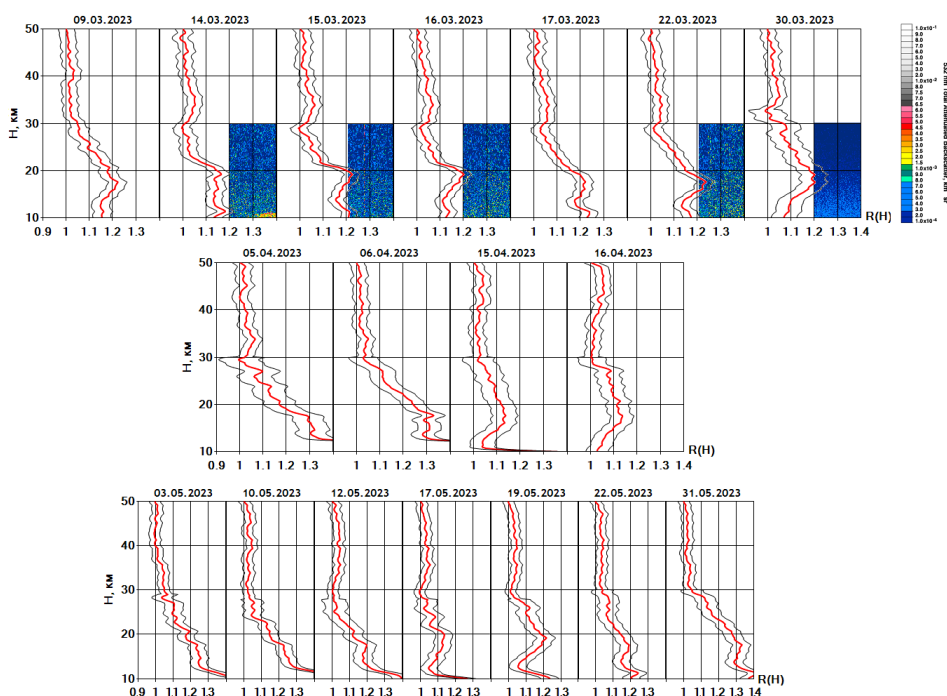


Рис. 2. Профили вертикальной стратификации аэрозоля весны 2023 г.

[Figure 2. Profiles of vertical stratification of aerosol in spring 2023]

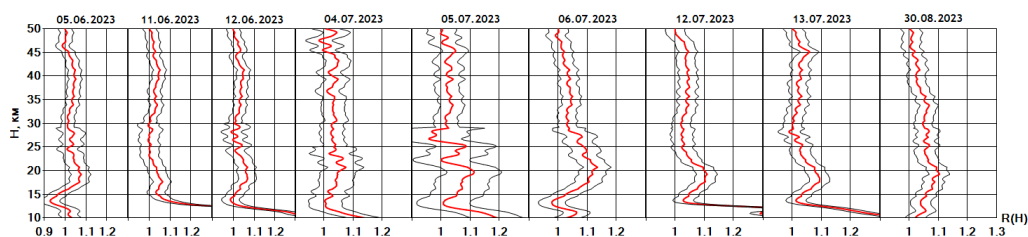


Рис. 3. Стратификация аэрозольного наполнения в июне – августе 2023 г.
 [Figure 3. Stratification of aerosol filling in June – August 2023]

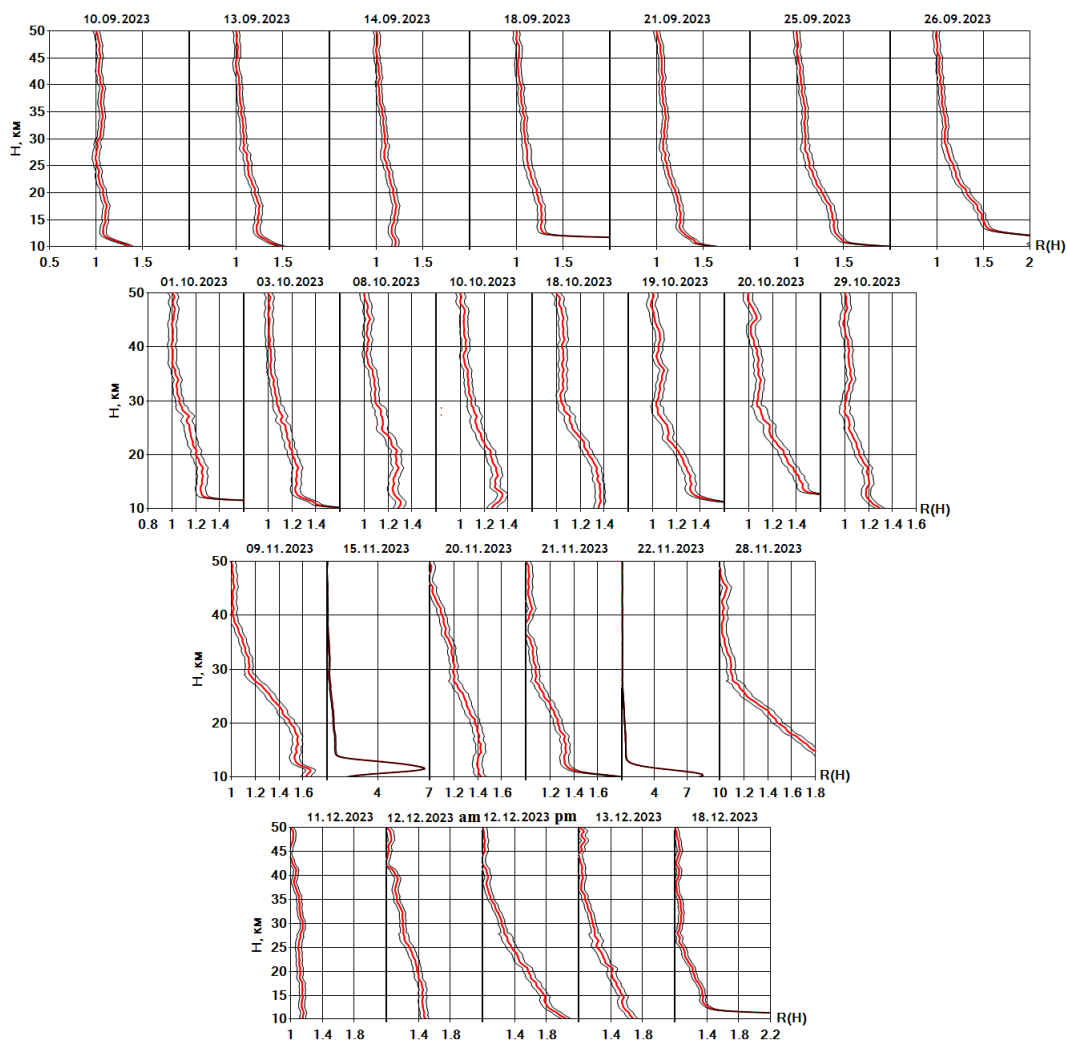


Рис. 4. Стратификация аэрозольного наполнения в сентябре – декабре 2023 г.
 [Figure 4. Stratification of aerosol filling in September – December 2023]

случаях превышает его максимальные значения декабря-января, наблюдаемых обычно как в предыдущие годы, так и в этом году. Вероятнее всего, данный факт, как и отмечалось выше, связан с заносом аэрозоля, образовавшегося от пожаров в Восточной Сибири. Заметим, что одним из наиболее впечатляющих явлений, исследования которого стали развиваться в последние два десятилетия

– это выброс аэрозолей горения в нижнюю стратосферу при образовании мощных пирокумулятивных кучево-дождевых облаков [4–11]. В декабре происходит максимальное наполнение стратосферы аэрозолем до высот 40 км.

Временная динамика полного наполнения стратосферы фоновым аэрозолем с началом от 2017 до 2022 гг. и дополненная наблюдениями 2023 г., выраженная через параметр интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния B , представлена на рис. 5.

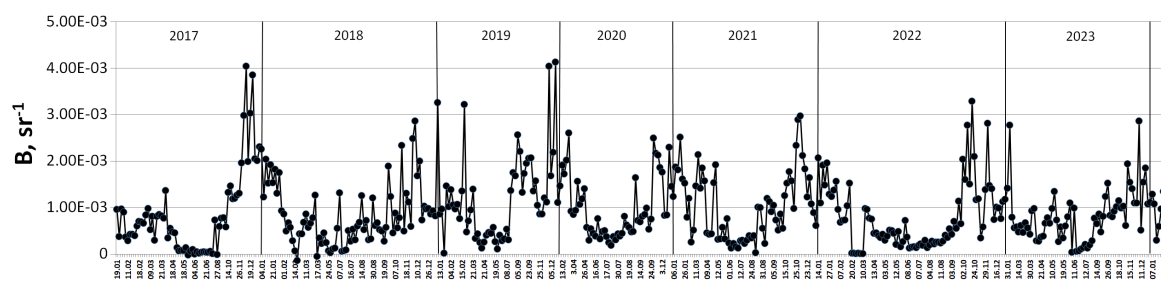


Рис. 5. Временной ход интегрального коэффициента обратного рассеяния над Томском.

[Figure 5. The time course of the integral backscattering coefficient over Tomsk]

В целом по годам максимальные аэрозольные наполнения стратосферы, как видно из рисунка, происходит в зимние месяцы и центрируются относительно января. Вместе с тем оно неравномерно распределено по годам и отмечается резкими и значительными колебаниями. Последние наиболее проявились с конца 2017 г. по начало 2020 г. В период 2020–2023 гг. амплитуда колебаний заметно снизилась. Для наглядности в виде цветовой градации на рис. 6 представлена внутригодовая динамика вертикального наполнения стратосферы аэрозолем.

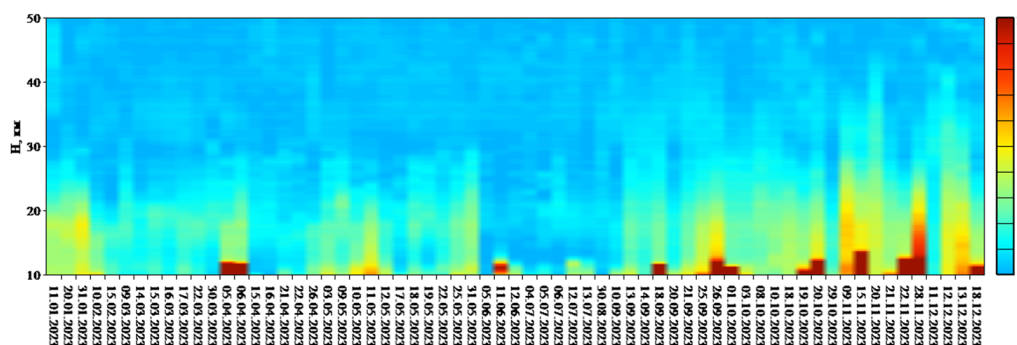


Рис. 6. Динамика вертикальной стратификации аэрозоля за 2023 г., выраженная через оптический параметр отношения рассеяния R

[Figure 6. The dynamics of the vertical stratification of the aerosol in 2023, expressed in terms of the optical parameter of the scattering ratio R]

Из рис.6 видны даты с заметным содержанием аэрозоля в нижнем слое стратосферы 10-15 км, который, как отмечалось неоднократно, может быть вызван

возникновением аэрозоля от лесных пожаров и появлением циррусов. Подобные случаи с всплесками аэрозольного содержания преимущественно наблюдались во второй половине года. В целом аэрозольное наполнение ограничивается преимущественно высотой 30 км, выше наблюдается молекулярное наполнение.

Заключение

По результатам лидарного мониторинга стратосферы Западной Сибири за 2023 г. подтвержден факт максимального наполнения нижней стратосферы (10-30 км) фоновым аэрозолем зимой, его малым содержанием, вплоть до полного отсутствия, летом и промежуточным значением с убыванием весной и ростом осенью. В верхней стратосфере (30-50 км) фоновый аэрозоль в летний период года практически отсутствует. Тем самым, включая подтверждение данного факта предыдущими многолетними измерениями, выявляется внутригодовая цикличность аэрозольного наполнения стратосферы Западной Сибири.

Список литературы

1. Маричев В. Н., Бочковский Д. А., Елизаров А. И. Оптические характеристики стратосферного аэрозоля Западной Сибири по результатам лидарного мониторинга в 2010–2021 гг., *Оптика атмосферы и океана*, 2022. Т. 35, №9(404), С. 717–721 DOI: 10.15372/AOO20220904.
2. Marichev V. N., Bochkovsky D. A. Study of variability of the background aerosol content in the stratosphere over tomsk by lidar measurement data in 2016-2019. / *Atmospheric physics 2020*, Proceedings of 26th international symposium on atmospheric and ocean optics, 06–10 jule 2020, vol. 11560. Moscow, SPIE, 2020, pp. 1766–1770 DOI: 10.1117/12.2575300.
3. Marichev V. N., Bochkovskii D. A. Monitoring the Variability of the Stratospheric Aerosol Layer over Tomsk in 2016–2018 Based on Lidar Data., *Russian meteorology and hydrology*, 2021. vol. 46, no. 1, pp. 43–51 DOI: 10.3103/S1068373921010064.
4. Trickl T., Giehl H., Jaeger H., Vogelmann H. 35 Yr of stratospheric aerosol measurements at Garmisch-Partenkirchen: From Fuego to Eyjafjallajökull, and beyond, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013. vol. 13, no. 10, pp. 5205–5225 DOI: 10.5194/acp-13-5205-2013.
5. Cheremisin A. A., Marichev V. N., Bochkovskii D. A., Novikov P. V., Romanchenko I. I. Stratospheric Aerosol of Siberian Forest Fires According to Lidar Observations in Tomsk in August 2019, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2022. vol. 35, no. 1, pp. 57–64 DOI: 10.1134/S1024856022010043.
6. Vaughan G., Ricketts H. M., Schultz D. M., Draude A. P., Adam M., Sugier J., Wareing D. P. Transport of Canadian forest fire smoke over the UK as observed by lidar, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018. vol. 18, no. 15, pp. 11375–11388 DOI: 10.5194/acp-18-11375-2018.
7. Ansmann A., Baars H., Haarig M., Seifert P., Engelmann R., Wandinger U., Chudnovsky A., Mattis I., Veselovskii I. Extreme levels of Canadian wildfire smoke in the stratosphere over central Europe on 21–22 August 2017, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018. vol. 18, no. 16, pp. 11831–11845 DOI: 10.5194/acp-18-11831-2018.
8. Khaykin S. M., Godin-Beekmann S., Hauchecorne A., Pelon J., Ravetta F., Keckhut P. Stratospheric smoke with unprecedentedly high backscatter observed by lidars above southern France, *Geophysical Research Letters*, 2018. vol. 45, no. 15, pp. 1639–1646 DOI: 10.1002/2017gl076763.
9. Siddaway J. M., Petelina S. V. Transport and evolution of the 2009 Australian Black Saturday bush fire smoke in the lower stratosphere observed by OSIRIS on Odin, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011. vol. 116, no. D6 DOI: 10.1029/2010JD015162.
10. Fromm M., Alfred J., Hoppel K., Hornstein J., Bevilacqua R., Shettle E., Servranckx R., Li Z., Stocks B. Observations of boreal forest fire smoke in the stratosphere by POAM III, SAGE II, and lidar in 1998, *Geophysical Research Letters*, 2000. vol. 27, no. 9, pp. 1407–1410 DOI: 10.1029/1999GL011200.

11. Korshunov V. A., Zubachev D.S. Characteristics of Stratospheric Aerosol from Data of Lidar Measurements over Obninsk in 2012–2015, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2017. vol. 30, no. 3, pp. 226–233 DOI: 10.1134/S1024856017030083.

Информация об авторах



Маричев Валерий Николаевич ✉ – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН), г. Томск, Россия, [ORCID 0000-0002-7367-6605](https://orcid.org/0000-0002-7367-6605).



Бочковский Дмитрий Андреевич ✉ – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН), г. Томск, Россия, [ORCID 0000-0002-9127-2065](https://orcid.org/0000-0002-9127-2065).

References

- [1] Marichev V.N., Bochkovsky D.A., Elizarov A.I. Optical-aerosol model of the Western Siberian stratosphere based on lidar monitoring results, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2022, vol. 35, no. 9(404), pp. 717–721. DOI: 10.15372/AOO20220904 (In Russian).
- [2] Marichev V.N., Bochkovsky D.A. Study of variability of the background aerosol content in the stratosphere over tomsk by lidar measurement data in 2016-2019, In: *Proceedings of 26th international symposium on atmospheric and ocean optics(06–10 jule 2020)*, Part 11560, *Atmospheric physics 2020*, 2020, pp. 1766–1770. DOI: 10.1117/12.2575300
- [3] Marichev V.N., Bochkovskii D.A. Monitoring the Variability of the Stratospheric Aerosol Layer over Tomsk in 2016–2018 Based on Lidar Data, *Russian meteorology and hydrology*, 2021, vol. 46, no. 2, pp. 43–51. DOI: 10.3103/S1068373921010064
- [4] Trickl T., Giehl H., Jaeger H., Vogelmann H. 35 Yr of stratospheric aerosol measurements at Garmisch-Partenkirchen: From Fuego to Eyjafjallajökull, and beyond, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, vol. 13, no. 10, pp. 5205–5225. DOI: 10.5194/acp-13-5205-2013
- [5] Cheremisin A.A., Marichev V.N., Bochkovskii D.A., Novikov P.V., Romanchenko I.I. Stratospheric Aerosol of Siberian Forest Fires According to Lidar Observations in Tomsk in August 2019, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2022, vol. 35, no. 1, pp. 57–64. DOI: 10.1134/S1024856022010043
- [6] Vaughan G., Ricketts H. M., Schultz D. M., Draude A. P., Adam M., Sugier J., Wareing D. P. Transport of Canadian forest fire smoke over the UK as observed by lidar, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, vol. 18, no. 15, pp. 11375–11388. DOI: 10.5194/acp-18-11375-2018
- [7] Ansmann A., Baars H., Haarig M., Seifert P., Engelmann R., Wandinger U., Chudnovsky A., Mattis I., Veselovskii I. Extreme levels of Canadian wildfire smoke in the stratosphere over central Europe on 21–22 August 2017, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, vol. 18, no. 16, pp. 11831–11845. DOI: 10.5194/acp-18-11831-2018
- [8] Khaykin S.M., Godin-Beekmann S., Hauchecorne A., Pelon J., Ravetta F., Keckhut P. Stratospheric smoke with unprecedentedly high backscatter observed by lidars above southern France, *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, no. 15, pp. 1639–1646. DOI: 10.1002/2017gl076763
- [9] Siddaway J.M., Petelina S.V. Transport and evolution of the 2009 Australian Black Saturday bush fire smoke in the lower stratosphere observed by OSIRIS on Odin, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, vol. 116, no. D6. DOI: 10.1029/2010JD015162
- [10] Fromm M., Alfred J., Hoppel K., Hornstein J., Bevilacqua R., Shettle E., Servranckx R., Li Z., Stocks B. Observations of boreal forest fire smoke in the stratosphere by POAM III, SAGE II, and lidar in 1998, *Geophysical Research Letters*, 2000, vol. 27, no. 9, pp. 1407–1410. DOI: 10.1029/1999GL011200
- [11] Korshunov V.A., Zubachev D.S. Characteristics of Stratospheric Aerosol from Data of Lidar Measurements over Obninsk in 2012–2015, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2017, vol. 30, no. 3, pp. 226–233. DOI: 10.1134/S1024856017030083

Information about the authors



Marichev Valeriy Nikolaevich✉ – D. Sci. (Phys. & Math.), Professor, Chief scientific researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS), Tomsk, Russia, [ORCID 0000-0002-7367-6605](#).



Bochkovskiyy Dmitriy Andreevich✉ – PhD (Tech.), Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS), Tomsk, Russia, [ORCID 0000-0002-9127-2065](#).