# ВНУТРИГОДОВАЯ ДИНАМИКА СТРАТОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НАД ТОМСКОМ ПО ДАННЫМ ЛИДАРНОГО МОНИТОРИНГА В 2025г.

Маричев В.Н, Бочковский Д.А.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск
marichev@iao.ru, moto@iao.ru

В докладе 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 2025 г. По данным мониторинга в предыдущие годы установлена устойчивая цикличность наполнения стратосферы аэрозолем с максимальным содержанием зимой и минимальным летом с отличием в три раза. В верхней стратосфере (30-50 км) в течение всего года фоновый аэрозоль практически отсутствует. В 2025 г. наблюдалось два важных события в динамике стратосферного аэрозоля: появление полярных стратосферных облаков и пирокумулятивных облаков от лесных пожаров.

**Введение**

В 2025 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 аэрозолем (исключая вулканический аэрозоль) 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 70 суммарных сигналов, накопленных в отдельные ночи 2025 г. Для сравнительно анализа были взяты результаты лидарного мониторинга стратосферы за 2017 – 2024 гг.

**Аппаратура, условия проведения мониторинга, определяемые параметры**

Измерения проводились на лидарном комплексе, передатчиком которого являлся лазер LS-2137U-UV3 на АИГ: $Nd^{3+}$ 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 равнялось 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 (ИКОР), определяемого по формуле

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

где $H_1$ =15 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) в январе было проведено одно измерение. В данный период отмечается устойчивая структура вертикальной стратификации аэрозоля с монотонным убыванием с высотой. Основное содержание аэрозоля наблюдается в нижней стратосфере (10 - 30 км) с максимальным значением на уровне 10 км ($R \leq 1.2$). Исключением обычной динамики стратосферного аэрозоля в феврале явился факт регистрации полярных стратосферных облаков (ПСО) в первой декаде месяца. Появление ПСО над Томском – это очень редкое явление, которое в нашем мониторинге стратосферы,

проводимого с 2010 г., наблюдалось ранее лишь дважды: в январе 2010 г. и 2016 г [5,6]. Как видно из рисунка 1, 4 февраля появились ПСО на высоте около 15 км. в виде слабого двойного слоя, интенсивность которого заметно возросла 5 февраля. В эту же ночь было зарегистрировано появление второго, более мощного ПСО, также в виде двойного слоя в интервале высот 18 - 22 км. Параллельные лидарные измерения показали следующие значения температур в области локации ПСО: 4 февраля - ниже -78 °С, 5 февраля - ниже -90 °С. Указанные значения температур являются экстремально низкими, при которых образуются ПСО. В наблюдениях 6 и 7 февраля повышение температуры до -73 °С привело к исчезновению ПСО. [7]

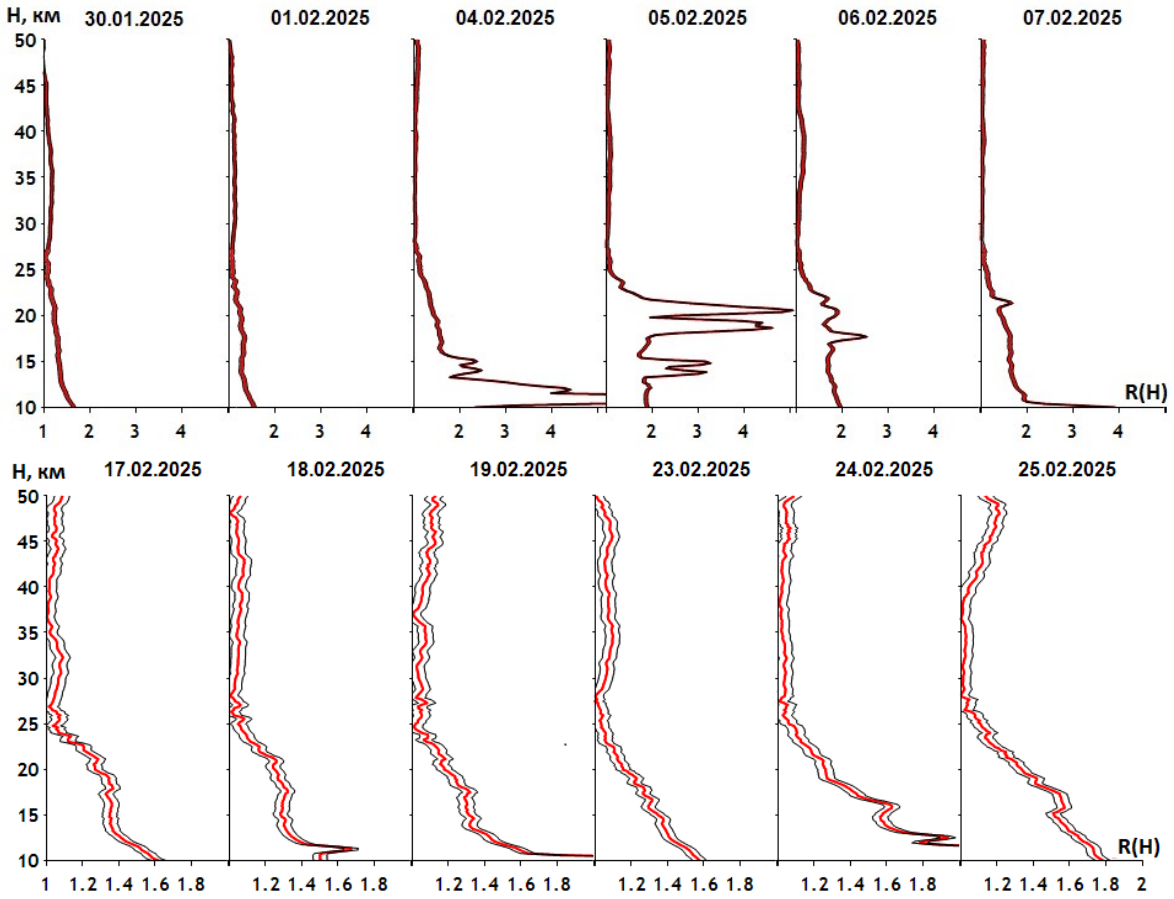


Рисунок 1 – Динамика вертикальной стратификации аэрозоля в феврале 2025 г.

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

В весенний период года, в отличие от наблюдений прошлых лет, отмечается повышенное аэрозольное наполнение нижней стратосферы. Особенно это выражено для марта и остается значимым для апреля и мая. Следует отметить заметную динамику вертикальной стратификации аэрозоля. Так, в первой половине марта профиль отношения рассеяния монотонно убывает с высотой от R ≈ 1.6 до R ≈ 1 в интервале 10 - 25 км. Во второй половине месяца заметно

уменьшение аэрозольного наполнения. В апреле и мае содержание аэрозоля остается примерно на одном уровне и соответствует содержанию аэрозоля второй половине февраля. Отношение рассеяния на высоте 15 км оценивается величиной R ≈ 1.2. Основное содержание аэрозоля сосредоточено в слое 10 - 25 км.

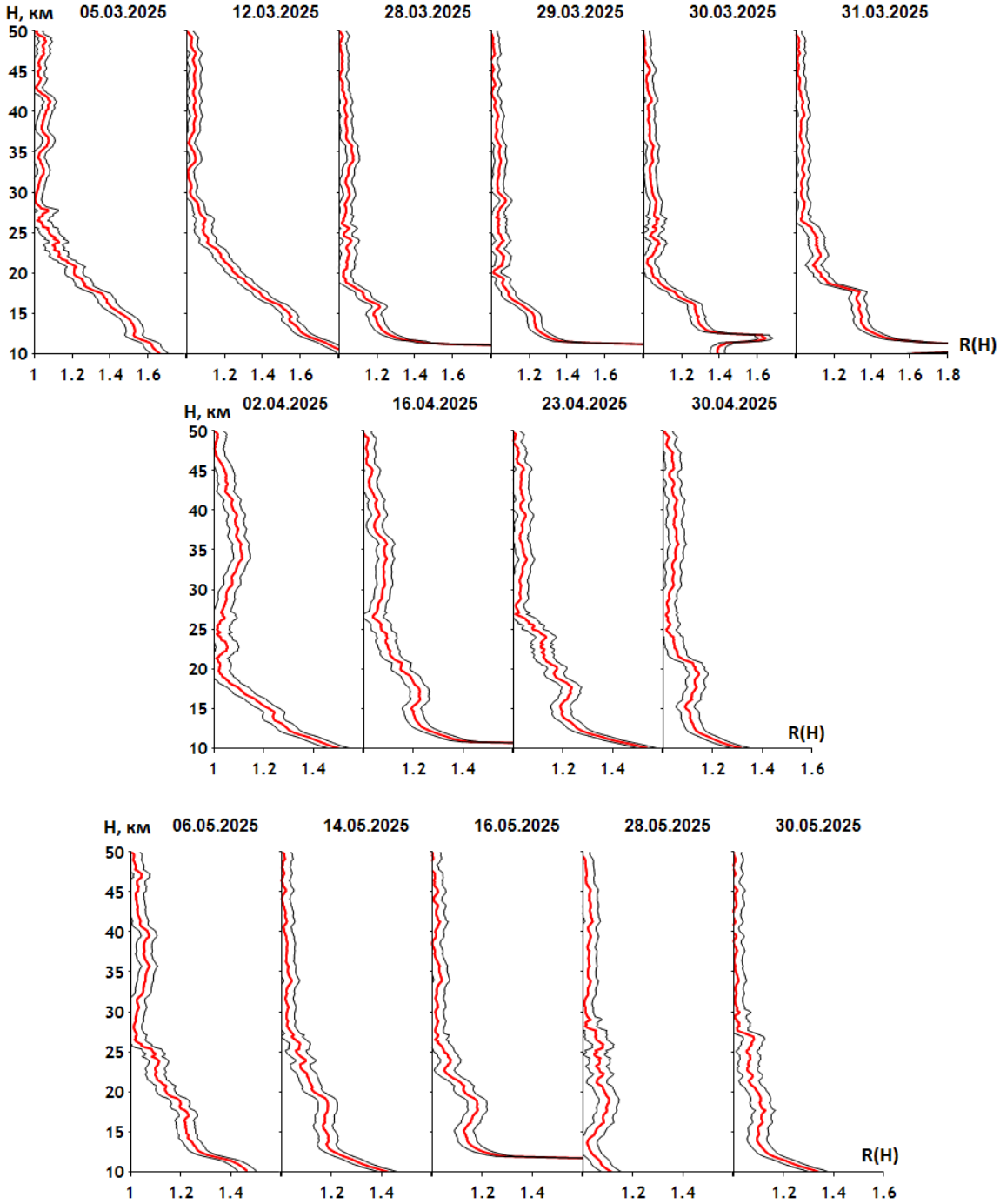


Рисунок 2 – Динамика вертикальной стратификации аэрозоля весной 2025 г.

Летний периода года (рис. 3) характерен низким значением аэрозольной компоненты в стратосфере.

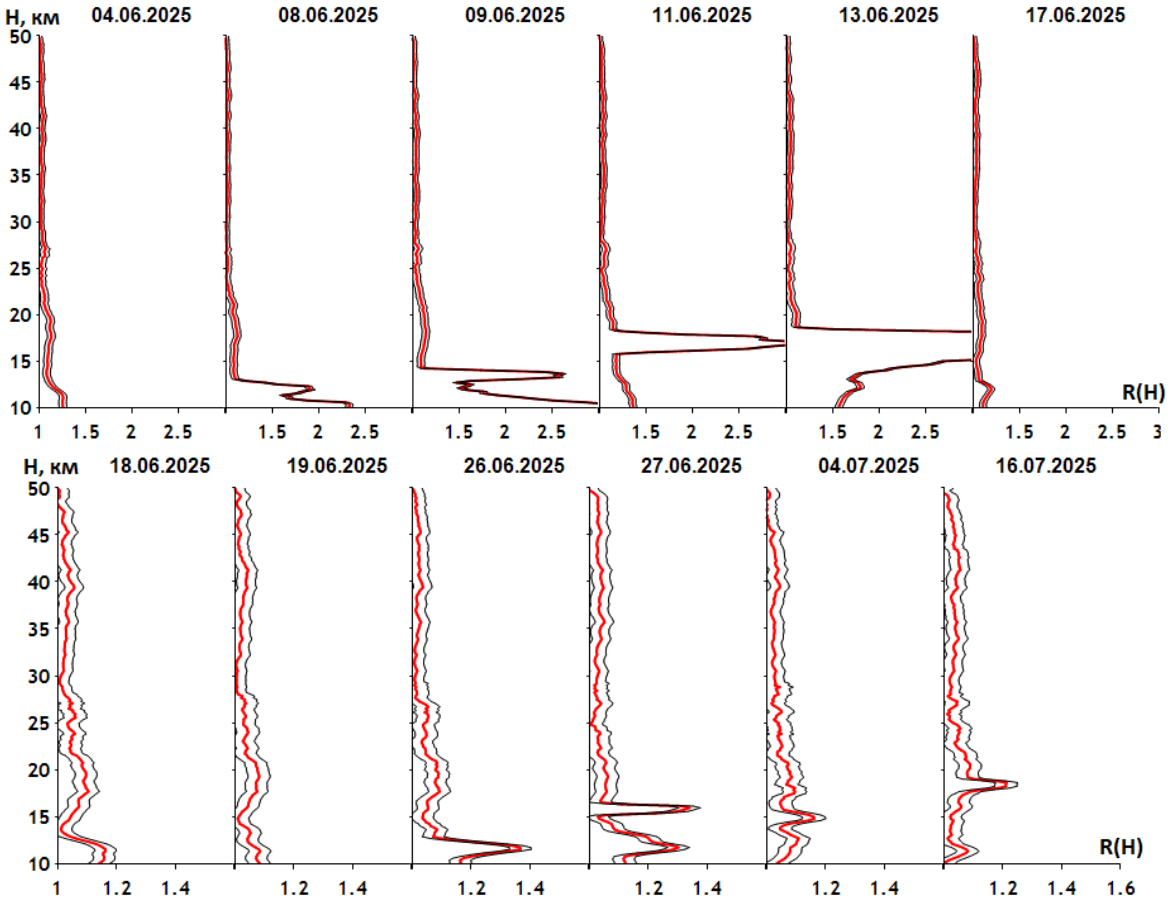


Рисунок 3 – Динамика вертикальной стратификации аэрозоля летом 2025 г.

Вместе с тем в наблюдениях первой половины июня было замечено появление мощных аэрозольных слоев на высоте 10 - 17 км с высокими значениями отношения обратного рассеяния R = 2÷10 (рис.4). С помощью построения изоэнтропийных траекторий движения воздушных масс был проведен анализ происхождения пиков R. как индикаторов аэрозольных слоев. Было показано, что зарегистрированные аэрозольные слои в стратосфере над Томском являются продуктами сажи в результате образования мощного пирокумулятивного облака, которое возникло 29 - 30 мая 2025 года в границах определённой области лесных пожаров, которая охватывает части США и Канады[8].

Далее с сентября происходит устойчивый рост аэрозольного наполнения нижней стратосферы (рис.5). Особняком выделяется случаи резкого увеличение содержания аэрозоля в отдельные даты осеннего периода, которое в отдельных 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.

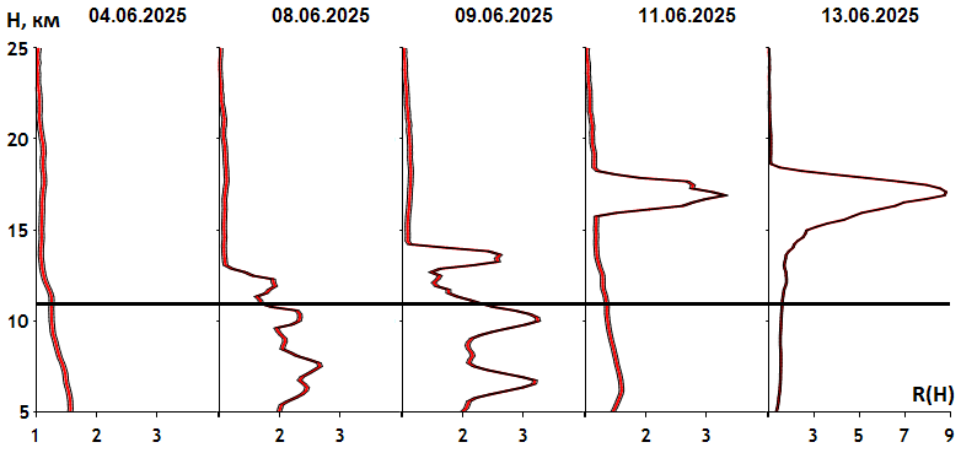


Рисунок 4 – Результаты наземных лидарных наблюдений в Томске 4 - 13 июня 2025 года. Сплошной линией показана высота тропопаузы

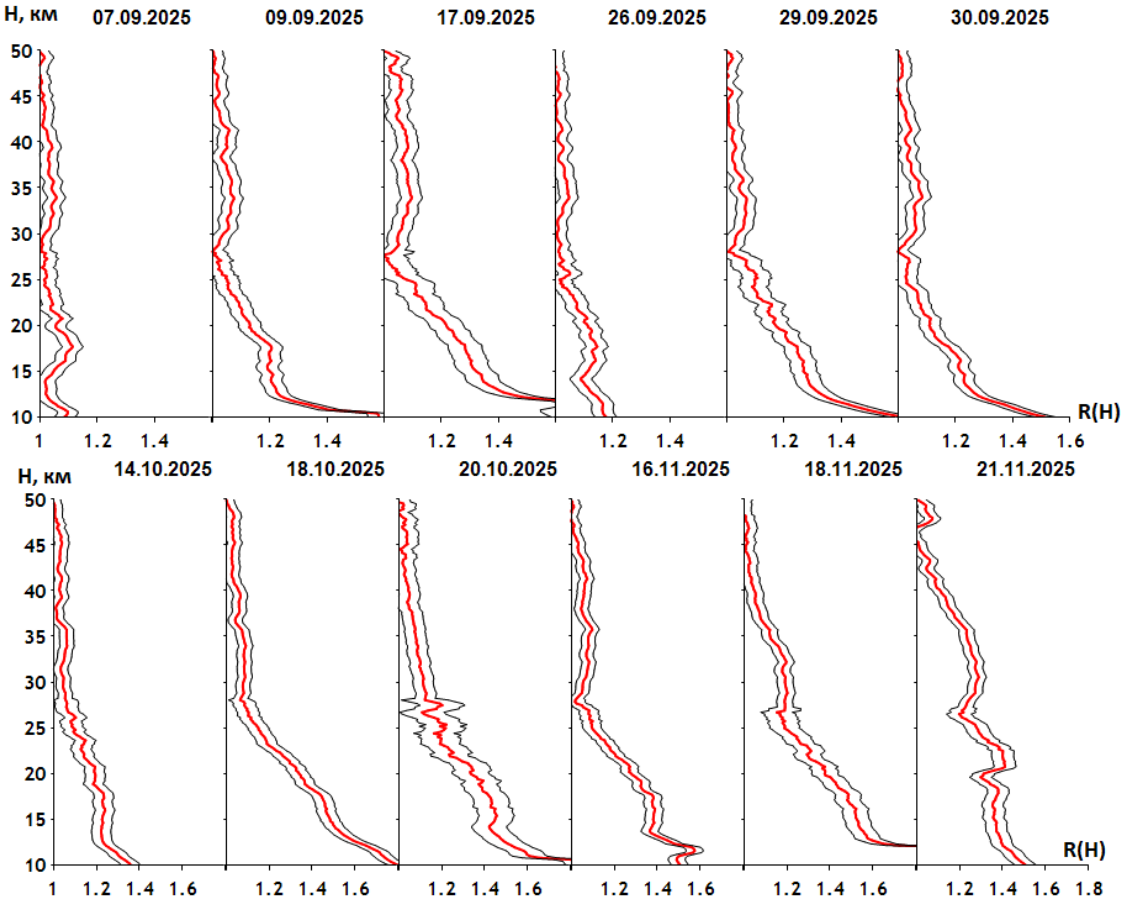


Рисунок 5 – Динамика вертикальной стратификации аэрозоля осенью 2025 г.

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 [9 - 15]. В ноябре происходит максимальное наполнение стратосферы аэрозолем до высот 40 - 45 км.

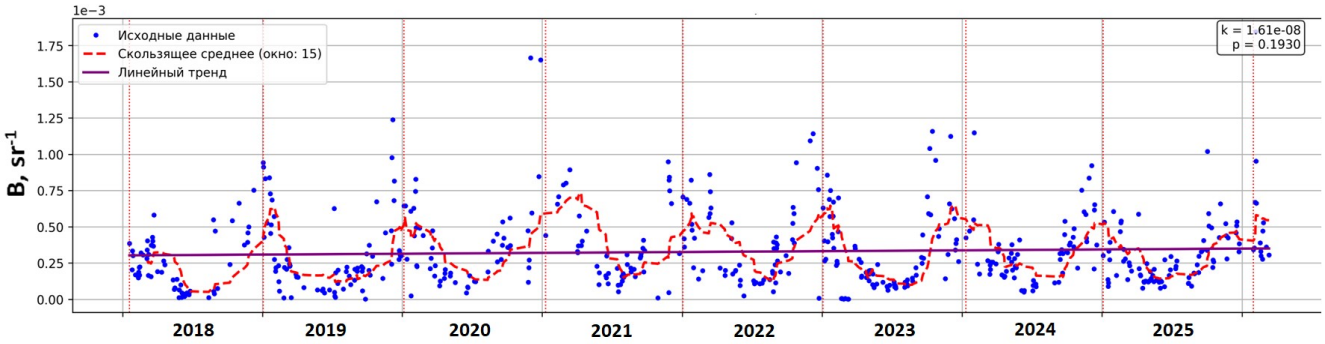


Рисунок 6 – Временной ход интегрального коэффициента обратного рассеяния над Томском.

**Заключение.**

По результатам лидарного мониторинга стратосферы Западной Сибири за 2025 г. зарегистрировано два значимых возмущений аэрозольной компоненты стратосферы.

Первое возмущение связано с появлением ПСО над Томском, которое наблюдалось 4-7 февраля. ПСО формировалось на высоте около 15 км. в виде слабого двойного слоя (4 февраля) интенсивность которого заметно возросла 5 февраля. В эту же ночь было зарегистрировано появление второго, более мощного ПСО, также в виде двойного слоя в интервале высот 18 - 22 км. В этот период проводимые синхронно лидарные измерения показали экстремально низкие значения температур в области локации ПСО, при которых образуются последние.

Второе возмущение относится к заносу пирокумулятивных облаков от лесных пожаров. В наблюдениях первой половины июня было замечено появление мощных аэрозольных слоев на высоте 10 - 17 км с высокими значениями отношения обратного рассеяния R = 2÷10. С помощью построения изоэнтропийных траекторий движения воздушных масс было установлен источник образования сажевых облаков – это область лесных пожаров, которая охватывает части США и Канады

НИР выполнена в рамках проекта государственного задания ИОА СО РАН. С использованием аппаратуры ЦКП «Атмосфера»

ЛИТЕРАТУРА.

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. № 09. С. 717–721. DOI: 10.15372/AOO20220904.

2. *Маричев В.Н., Бочковский Д.А.* Мониторинг изменчивости стратосферного слоя аэрозоля над Томском в 2016-2018 гг.// Метеорология и Гидрология.2021. №1. С.61-72. DOI: 10.3103/S1068373921010064
3. *Маричев В.Н., Бочковский Д. А.* Лидарные исследования стратосферного аэрозоля над томском в 2024 г. // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : Материалы XXXI Международного симпозиума. г. Томск. 2025. Т.1, С.1-9. DOI :https://doi.org/10.56820/conferencearticle_685be467023a94.38934996
4. *Trickl T., Giehl H., J¨ager H., and VogelmannH*. 35 yr of stratospheric aerosol measurements at Garmisch-Partenkirchen: from Fuego to Eyjafjallaj¨okull, and beyond // Atmos. Chem. Phys., 13, 5205–5225, 2013 www.atmos-chem-phys.net/13/5205/2013/ doi:10.5194/acp-13-5205-2013
5. *Черемисин А. А., Маричев В. Н., Новиков П. В.* Перенос полярных стратосферных облаков из Арктики к Томску в январе 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 02. С. 93-99
6. *Маричев В.Н., Бочковский Д.А.* Исследование изменчивости вертикальной стратификации фонового аэрозоля над Томском в 2016 г. уа основе лидарных наблюдений. // Сборник докладов 23-го международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». 3-7 июля 2017 года, Иркутск, С. D193-D200
7. *Маричев В. Н., Бочковский Д.А.* Особенности стратосферных возмущений над Томском зимой 2024/25 г по данным лидарных наблюдений.// Метеорология и Гидрология. 2026. №2. С.56-62. DOI: 10.52002/0130-2906-2026-2-55-62]
8. *Романченко И. И., Маричев В. Н., Новиков П. В., Бочковский Д. А., Черемисин А. А.* Лидарные наблюдения дымов лесных пожаров в стратосфере над Томском в июне 2025 г. // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38. № 12. С. 1028–1030. DOI: 10.15372/AOO20251209
9. *Cheremisin A.A., Marichev V.N., Bochkovskii D.A., Novikov P.V. and Romanchenko I.I.* Stratospheric Aerosol of Siberian Forest Fires According to Lidar Observations in Tomsk in August 2019 // Atmospheric and Oceanic Optics, 2022, V. 35. No. 01. pp. 57–64.
10. *Vaughan G., Draude A.P., Ricketts H.M.A., Schultz D.M., Adam M., Sugier J., Wareing D.P.* Transport of Canadian forest fire smoke over the UK as observed by lidar // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 11375–11388.
11. *Ansmann A., Baars H., Chudnovsky A., Mattis I., Veselovskii I., Haarig M., Seifert P., Engelmann R., Wandinger U.* Extreme levels of Canadian wildfire smoke in the stratosphere over central Europe on 21–22 August 2017 // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 11831– 11845.
12. *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 // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. P. 1639–1646
13. *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 // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. P. D06203.
14. *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 // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27, N 9. P. 1407–1410.
15. *Korshunov V.A. and Zubachev D.S.* Characteristics of Stratospheric Aerosol from Data of Lidar Measurements over Obninsk in 2012–2015. // Atmospheric and Oceanic Optics, 2017, V. 30. No. 03. pp. 226–233.