

ВЛИЯНИЕ ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЯННОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НАПРАВЛЕНИИ «НАДИР»

Самохвалов И.В.^{1*}, Манохин Д.П.^{1**}, Локтюшин О.Ю.^{1***}, Брюханов И.Д.^{1,2****}, Ни Е.В.¹,
Животенюк И.В.¹, Стыкон А.П.¹, Пустовалов К.Н.^{1,3}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

³Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия

e-mail: *lidar@mail.tsu.ru, **den.manokhin.03@mail.ru, ***oleglokyushin@gmail.com,

****plyton@mail.tsu.ru

Облака верхнего яруса (ОВЯ) существенно влияют на климат, регулируя радиационные потоки в атмосфере. Однако их микроструктура в моделях атмосферы учитывается упрощенно, что приводит к погрешностям расчетов и ошибкам прогнозов погоды и климата. Устойчивые (существующие дольше 10 минут) конденсационные следы самолетов (КСС) и образованные из них перистые облака являются единственным типом искусственных кристаллических облаков. Конденсационные следы самолетов изучаются на основе метода поляризационного лазерного зондирования. Для оценки их влияния на распространение солнечной радиации в атмосфере применяются данные по спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), измеряемой спутниковым спектрорадиометром MODIS. Совместное использование лидарных измерений и спутниковых наблюдений позволяет оценить динамику СПЭЯ в зависимости от временной эволюции конденсационных следов.

Конденсационные следы самолетов, как и естественные ОВЯ, влияют на пропускание атмосферой излучения, но отличаются микроструктурой [1], более высокой концентрацией ледяных кристаллов [2] и меньшими их размерами [3]. С ростом авиационного трафика их распространенность увеличивается, особенно в промышленно развитых регионах [4]. Хотя одиночные следы слабо влияют на климат, их слияние и расширение усиливают радиационный эффект [5]. Вместе с тем, спустя определенное время после формирования они состоят из ледяных частиц, которые, как и в естественных ОВЯ, могут иметь несферическую форму и преимущественную горизонтальную пространственную ориентацию. Такая микроструктура приводит к аномальному (зеркальному) обратному рассеянию света. Современные климатические модели не учитывают особенности микроструктуры ОВЯ.

Метод поляризационного лазерного зондирования (ПЛЗ) [6] остается единственным, позволяющим дистанционно определять микрофизические параметры облаков. Ключевой особенностью метода является экспериментальное получение полной матрицы обратного рассеяния света (МОРС), состоящей из 16 элементов и содержащей исчерпывающую информацию о микроструктуре облаков, включая ориентацию, размеры и форму ледяных кристаллов, что критически важно для оценки их радиационных свойств. Метод ПЛЗ

реализован в рамках уникального научного комплекса – высотного матричного поляризационного лидара (ВМПЛ), разработанного и используемого в Национальном исследовательском Томском государственном университете (НИ ТГУ). Установка размещена на южной окраине Томска ($56^{\circ}26'$ с. ш., $84^{\circ}58'$ в. д.) и с 2009 г. применяется в систематических экспериментах, обеспечивая оперативное получение информации об атмосфере и присутствующих в ней облаках.

Многолетние измерения с использованием ВМПЛ позволили сформировать обширный массив данных (более 820 серий измерений, в течение которых зарегистрированы ОВЯ, длительностью около 15–17 минут каждая) о геометрических, оптических и микрофизических характеристиках ОВЯ, а также о метеорологических условиях их формирования и наблюдения по данным аэрологического зондирования [7] и реанализа ERA5 [8] Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECWMF). Особое внимание в рамках наблюдений уделяется изучению КСС, исследование которых возможно благодаря расположению в радиусе 100 км от ВМПЛ авиационных трасс [9]. При наличии соответствующих атмосферных условий следы переносятся в поле зрения ВМПЛ, что позволяет определять их характеристики.

Для идентификации КСС при интерпретации результатов лидарных измерений применяется методика, основанная на комплексном анализе траекторных и метеорологических данных. Она включает оценку пространственно-временных параметров переноса следов к месту расположения ВМПЛ и предполагает расчет расстояния до лидара и азимутального угла от него на точку траектории для каждой точки самолетной траектории в радиусе 100 км от лидара. С учетом направления и скорости ветра на соответствующей высоте, полученных из метеорологических источников, рассчитываются дистанция и длительность дрейфа к лидару и время достижения его координат. Полученные время и высота сопоставляются с результатами лидарных измерений, совместный анализ которых позволяет идентифицировать зондируемое аэрозольное образование как след самолета, чья траектория анализировалась [10].

СПЭЯ отраженного облаками излучения определяется по данным спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на спутниках Terra (запущен в 1999 г.) и Aqua (2002 г.) в рамках программы NASA EOS. Прибор обеспечивает измерения в 36 спектральных диапазонах (0,4–14,4 мкм) с шириной полосы охвата 2330 км [11]. Для Томска данные доступны 1–2 раза в дневное и столько же раз в ночное время. В ходе исследования использованы наборы данных уровня обработки 1В (MOD021KM/MYD021KM) с пространственным разрешением 1×1 км, включающие калиброванные значения измеренного излучения. Анализ проводился по 8 спектральным каналам видимого диапазона и 4

инфракрасным каналам в полосе поглощения водяного пара. Выбор указанных каналов обусловлен их чувствительностью к параметрам облачного покрова [12].

Для оценки воздействия конденсационных следов на изменение СПЭЯ солнечного излучения выбраны два дня наблюдений: 25 и 27 февраля 2025 г. В оба эти дня над территорией Томска отсутствовали осадки и низкая облачность, что обеспечило благоприятные условия для работы ВМПЛ. 25 февраля ОВЯ зарегистрированы не были, тогда как 27 февраля наблюдалось устойчивое присутствие ОВЯ, часть из которых в ходе обработки лидарных данных была классифицирована как КСС. В таблице 1 перечислены моменты времени, в которые Томск попадал в поле зрения MODIS в указанные два дня. Кроме того, в таблице представлены значения азимутального и зенитного углов положения Солнца, рассчитанные согласно [13] на основе даты, времени, часового пояса и координат точки интереса. Далее будем использовать местное, Томское (UTC+7) время.

Таблица 1. Доступные данные дневных пролетов MODIS для Томска 25–27 февраля 2025 г.

Дата	Спутник	Время (ЧЧ:ММ)	Азимутальный угол Солнца, °	Зенитный угол Солнца, °
25.02.2025 г.	Terra	11:05	141,3	72,2
	Terra	12:40	165,6	66,3
	Aqua	14:25	194,0	66,3
	Aqua	16:00	218,3	72,0
27.02.2025 г.	Terra	10:45	136,5	73,3
	Terra	12:25	161,7	66,2
	Aqua	14:05	188,6	65,0
	Aqua	15:40	213,4	69,7

Как видно из таблицы в дневное время Томск попадал в поле зрения MODIS в течение двух 2 пролетов обоих спутников Aqua и Terra в оба рассматриваемых дня. При этом они пролетали в близкое время, вследствие чего зенитный угол Солнца во время соответствующих пролетов различается не больше чем на 2°. 25 февраля в радиусе 100 км от лидарной станции ТГУ было зафиксировано 123 воздушных судна [9]. Расчет параметров дрейфа КСС для каждого из них показал, что при метеорологических условиях, способствующих длительному существованию следов, к точке стояния ВМПЛ мог дрейфовать 101 след. 27 февраля метеорологические условия обеспечивали устойчивость самолетных следов в течение времени, достаточного для их переноса к лидару. Из 124 воздушных судов, пролетевших в указанной

области, 87 следов могли достичь ВМПЛ. При обработке данных лидарных измерений за весь день идентифицировано 27 самолетов, чьи следы попали в поле зрения лидара. Установлено, что во время измерений MODIS 27.02.2025 г. в 12:25 были зарегистрированы одномоментно следы сразу нескольких самолетов, пролетавших на разных высотах (см. таблицу 2).

Таблица 2. Параметры дрейфа КСС к точке стояния ВМПЛ во время измерений спектро радиометром MODIS

Рейса	Время точки траектории	Высота полета, м	Дистанция до лидара, км	Азимут на лидар, °	Длительность (ЧЧ:ММ)	Время появления над лидаром
MU262	10:47	11277	77,1	276,9	1:32	12:20
CZ674	10:40	11887	75,3	276,3	1:46	12:26
CZ304	11:22	11270	51,4	264,4	1:01	12:24
SU6791	11:07	10355	72,4	264,5	1:11	12:18

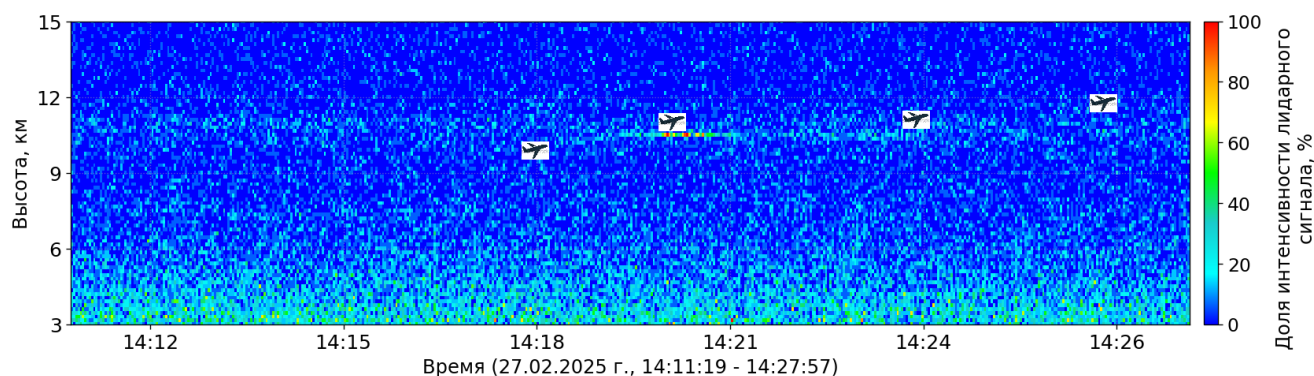


Рисунок 1 – Временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала; маркерами с изображением самолёта отмечены высоты и моменты времени, соответствующие оценкам появления КСС в поле зрения ВМПЛ

На рисунке 2 в качестве примера представлено распределение СПЭЯ по каналам MODIS спутника Terra по данным измерений 25 февраля в 12:40 и 27 февраля в 12:25. Во второй из указанных моментов времени в лидарных измерениях регистрировался аэрозольный слой на высотах 10,2–11,6 км. По совокупности значений [14] его оптических характеристик, полученных на основе лидарных данных, этот слой не содержал преимущественно горизонтально ориентированных ледяных частиц: его оптическая толщина составляла 0,11, отношение рассеяния имело значение 5,64, а элемент m_{44} матрицы обратного рассеяния был равен -0.21 .

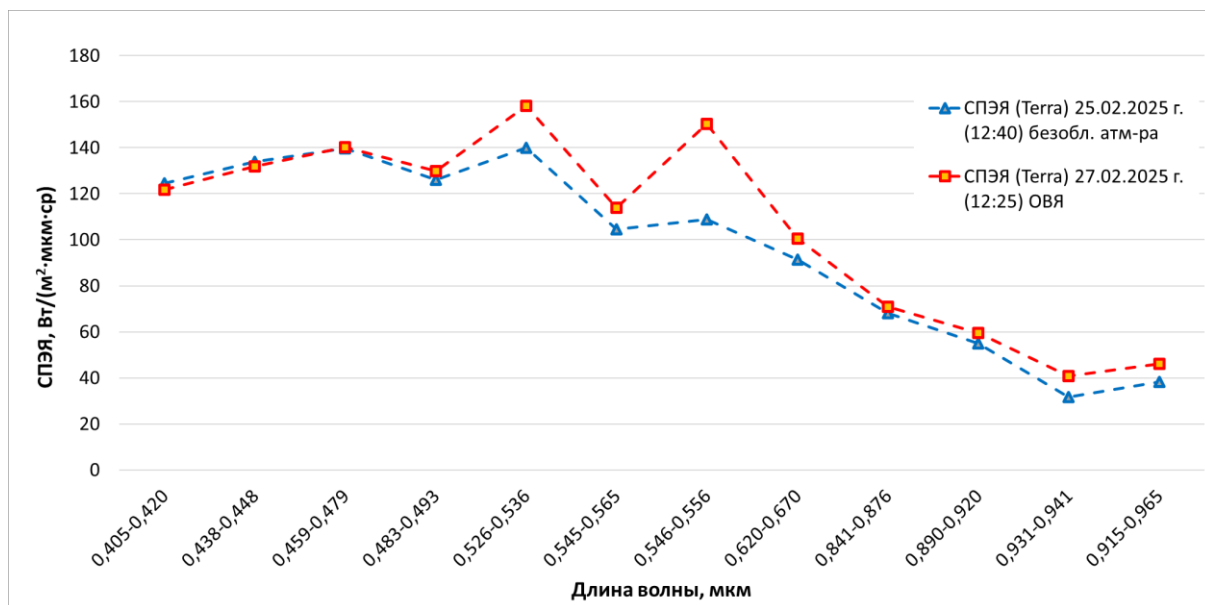


Рисунок 2 – Распределение СПЭЯ по каналам MODIS спутника Terra 25 и 27 февраля 2025 г.

Как видно из графика, значения СПЭЯ в каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазона 27 февраля заметно больше. В среднем значения в видимом диапазоне выше на 7,4%, а в ближнем ИК – на 11,2%. Увеличение значений СПЭЯ при присутствии ОВЯ, по-видимому, обусловлено отражением солнечного излучения от кристаллических облаков. Другими словами, 27 февраля в 12:40 поверхности Земли в точке стояния ВМПЛ не достигло около 10% солнечной энергии из-за присутствия в небе самолетных следов. Этот эффект будет усиливаться при приближении положения Солнца к горизонту. Анализируя данные других пролетов MODIS в рассматриваемые дни, заключим: 27 февраля в 10:45 значения СПЭЯ были больше на 5,7% в видимом и на 7% в ИК диапазонах; в 14:05 – на 20,7% и 20,9%; в 15:40 – на 9,2% и 13% соответственно.

Представленные результаты комплексного анализа результатов одновременных измерений наземным поляризационным лидаром НИ ТГУ и спутниковым спектрометрией MODIS показали чувствительность СПЭЯ к присутствию ОВЯ, включая случаи развития многоярусной облачности, что подчеркивает диагностический потенциал метода. Полученные данные демонстрируют возможность использования данных спутниковой спектрометрии для детектирования ОВЯ, содержащих горизонтально ориентированные кристаллы. Предложенный подход открывает новые возможности для оперативного выявления облачности и аэрозольных образований, а также для валидации спутниковых наблюдений и результатов численного моделирования атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Грант № 24-77-00097.

1. Gayet J.F., Febvre G., Brogniez G., et al. Microphysical and optical properties of cirrus and contrails: Cloud field study on 13 October 1989 // *J. Atmos. Sci.* 1996. V. 53, № 1. P. 126–138.
2. Bock L., Burkhardt U. The temporal evolution of a long-lived contrail cirrus cluster: Simulations with a global climate model // *J. Geophys. Res.: Atmosphere*. 2016. V. 121, № 7. P. 3548–3565.
3. Wang Z., Bugliaro L., Jurkat-Witschas T., et al. Observations of microphysical properties and radiative effects of a contrail cirrus outbreak over the North Atlantic // *Atmos. Chem. Phys.* 2023. V. 23. P. 1941–1961.
4. Minnis P., Ayers J.K., Palikonda R., et al. Contrails, Cirrus Trends, and Climate // *J. Clim.* 2004. V. 17, № 8. P. 1671–1685.
5. Minnis P., Young D.F., Garber D.P., et al. Formation and radiative forcing of contrail cirrus // *Nature communications*. 2018. V. 9. Article No. 1824.
6. Кауль Б.В. Оптико-локационный метод поляризационных исследований анизотропных аэрозольных сред: дис. докт. физ.-мат. наук. Томск, 2004. 219 с.
7. University of Wyoming [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu> (дата обращения: 10 апреля 2025 г.).
8. Copernicus Climate Data Store [Электронный ресурс]. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu> (дата обращения: 5 апреля 2025 г.).
9. Flightradar24. Live Air Traffic [Электронный ресурс]. URL: <https://www.flightradar24.com> (дата обращения: 1 апреля 2025 г.).
10. Bryukhanov I., Loktyushin O., Ni E., et al. Comparison of the Contrail Drift Parameters Calculated Based on the Radiosonde Observation and ERA5 Reanalysis Data // *Atmosphere*. 2024. V. 15. 1487.
11. Justice C.O., Townshend J.R.G, Vermote E.F., et al. An overview of MODIS Land data processing and product status // *Rem. Sens. Env.* 2002. V. 83, № 1–2. P. Pages 3–15.
12. Самохвалов И.В., Локтюшин О.Ю. Брюханов И.Д. и др. Совместная обработка результатов лазерного поляризационного зондирования облаков верхнего яруса с данными спутникового спектрорадиометра MODIS // *Электроника, фотоника и киберфизические системы*. 2024. Т. 4, № 1. С. 26–33.
13. Rizvi A.A., Addoweesh K., El-Leathy A., et al. Sun position algorithm for sun tracking applications // *IECON 2014 – 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Dallas, TX, USA. October 29 – November 1, 2014. P. 5595–5598.
14. Брюханов И.Д. Оптические свойства облаков верхнего яруса естественного и антропогенного происхождения, содержащих ориентированные кристаллы льда, по данным поляризационного лазерного зондирования: дис. канд. физ.-мат. наук. Томск, 2022. 138 с.