

Оценка микрофизических характеристик конденсационных следов самолетов по данным поляризационного лидара: теория и эксперимент

И.В. Самохвалов¹, И.Д. Брюханов¹, В.А. Шишко², Н.В. Кустова², Е.В. Ни¹,
А.В. Коношонкин^{1,2}, О.Ю. Локтюшин¹, Д.Н. Тимофеев^{2*}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 5.02.2019 г.

Описаны методика и результаты исследования оптических и микрофизических характеристик конденсационных следов самолетов с помощью уникального высотного поляризационного лидара Национального исследовательского Томского государственного университета. Параметры микроструктуры ансамблей кристаллических частиц оценивались путем сравнения элементов матриц обратного рассеяния света, рассчитанных теоретически и полученных экспериментально. Показано, что образующийся в атмосфере конденсационный след за самолетом через 30–40 мин после выброса из двигателей продуктов сгорания топлива состоит из мелких хаотически ориентированных частиц льда, преимущественно столбчатой формы.

Ключевые слова: конденсационные следы самолетов, поляризационный лидар, матрица обратного рассеяния света; contrails, polarization lidar, backscattering phase matrix.

Введение

Продукты сгорания топлива в авиационных двигателях вносят существенный вклад в загрязнение верхней тропосферы и нижней стратосферы, повышая концентрацию углекислого газа, аэрозолей, водяного пара и других веществ [1]. Помимо изменения химического состава, конденсационные следы самолетов воздействуют и на оптические свойства атмосферы. Они не только влияют на пропускание оптического излучения, но и инициируют рост перистой облачности (см., например, [2]), которая признана важным климатообразующим фактором [3–6]. Стремительный рост интенсивности регулярного авиасообщения обуславливает необходимость исследований такого антропогенного влияния на образование облачности, поскольку экологические последствия воздействия конденсационных следов на атмосферу могут быть более ощутимыми, чем вред от авиационной эмиссии углекислого газа. Конденсационные следы способствуют глобальному потеплению, удерживая энергию инфракрасного излучения Земли

в пределах атмосферы. Особенно этот эффект усиливается, когда кристаллы льда принимают преимущественно горизонтальную ориентацию и образуют «зеркальные» облака [7].

Основная проблема при изучении влияния самолетных следов на перенос радиации в атмосфере заключается в том, что, являясь разновидностью облаков верхнего яруса (ОВЯ), следы состоят не из простых, хорошо изученных, симметричных сферических частиц, свойственных жидко-капельным облакам нижнего яруса, а из кристаллических ледяных частиц сложной формы. Поскольку прямая задача рассеяния света на ледяных кристаллических частицах в общем виде не решена, то и обратная задача — интерпретация данных пассивного и активного (лидарного) зондирования конденсационных следов самолетов — является нетривиальной. Настоящая работа представляет собой попытку ее решения, опирающуюся на совместный анализ экспериментальных и теоретических данных.

Оборудование и методика экспериментов

Эксперименты по поляризационному лазерному зондированию регулярно с 2009 г. выполняются на модернизированном высотном поляризационном лидаре Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ) [8, 9],

* Игнатий Викторович Самохвалов (lidar@mail.tsu.ru); Илья Дмитриевич Брюханов (plyton2121@mail.ru); Виктор Андреевич Шишко (sva@iao.ru); Наталья Валентиновна Кустова (kustova@iao.ru); Евгений Вячеславович Ни (wolf.ni@yandex.ru); Александр Владимирович Коношонкин (sasha_tvo@iao.ru); Олег Юрьевич Локтюшин (lega.lega123@mail.ru); Дмитрий Николаевич Тимофеев (tdn@iao.ru).

который позволяет дистанционно с поверхности Земли в любое время суток (при отсутствии облаков нижних ярусов) обнаруживать ОВЯ и определять степени ориентированности кристалликов льда в них [7, 10]. Лидар ориентирован вертикально, в направлении, близком к зениту. В качестве источника оптического излучения используется Nd:YAG-лазер с рабочей длиной волны 532 нм, энергией импульса до 300 мДж и частотой следования импульсов 10 Гц.

Суть метода поляризационного лазерного зондирования, реализованного в указанном лидаре, заключается в последовательном зондировании исследуемой среды лазерным излучением с четырьмя различными состояниями поляризации и регистрацией приемной системой лидара излучения, рассеянного средой в обратном направлении, при четырех различных комбинациях поляризационных элементов в приемном канале лидара. Фотоэлектронные умножители приемной системы лидара работают в режиме счета фотонов с использованием стробирования сигнала по высоте: длина строка может изменяться в диапазоне от 37,5 до 150 м.

В отличие от ранее проводимых экспериментов в настоящее время регистрация лидарных сигналов от ОВЯ ведется в режиме «параллельного» накопления 16 массивов одноэлектронных импульсов, что позволяет на одном и том же временном интервале оценивать с одинаковой погрешностью (не хуже 2–3%) интенсивность 16 лидарных сигналов от ОВЯ, необходимых для определения всех элементов матрицы обратного рассеяния света (МОРС).

Методические особенности оценки мощности лидарного сигнала от облаков в условиях влияния фоновой помехи «дневного неба» описаны ранее в работах [10–12]. Здесь лишь отметим, что первичная обработка экспериментальных данных включает коррекцию лидарных сигналов на статистический и фоновый шум, на просчеты и последствие фотоэлектронных умножителей [13]. После этого определяются высоты границ регистрируемого аэрозольного слоя, его отношение рассеяния и оптическая толщина, а также МОРС [7, 14]. При оптической толщине облачного слоя более 0,5–0,7 дополнительная обработка позволяет учесть вклад 2-й кратности рассеяния [15] в лидарном сигнале, а по его поляризационным характеристикам получить информацию о микроструктуре облачных образований [16]. Следует подчеркнуть, что при регистрации лидарных сигналов в режиме «параллельного» накопления погрешность оценки элементов МОРС ОВЯ не превосходит 8–10%. Поскольку экспериментально полученные МОРС определяются относительно базиса, связанного с лидаром, производится процедура приведения матриц к блочно-диагональному виду, исключающему их зависимость от азимутальной ориентации базиса лидарного приемника [17, 18].

Лидарные данные сопоставляются с метеорологическими параметрами, соответствующими дате и времени эксперимента, а также высотам регистрируемых в экспериментах аэрозольных образований [8, 19]. По причине отсутствия близких к месту расположе-

ния метеостанций используются данные с метеостанций в гг. Колпашево и Новосибирске. Несмотря на их удаленность от Томска, метеорологическая обстановка на высотах формирования ОВЯ по данным обеих станций обычно схожа. Процесс поиска и загрузки метеоданных автоматизирован. С 2016 г. на кафедре оптико-электронных систем и дистанционного зондирования радиофизического факультета НИ ТГУ функционирует программно-алгоритмический комплекс для автоматического сбора прогностической информации и ее рассылки для планирования лидарных экспериментов [20]. Кроме того, с 2018 г. функционирует система сбора информации о полетах самолетов вблизи Томска. Она используется для классификации наблюдаемых в лидарных экспериментах аэрозольных слоев и позволяет выявить конденсационные следы самолетов. Такая интерпретация будет рассмотрена далее.

Методика идентификации конденсационных следов самолетов

Лидар НИ ТГУ находится в южной части г. Томска, примерно в 0,5 км от берега р. Томи (56,448823° с.ш., 84,972493° в.д.). В радиусе 100 км от него проходят трассы регулярного гражданского авиасообщения (рис. 1). При благоприятных метеорологических условиях конденсационный след от пролетевшего самолета перемещается по направлению ветра и «дрейфует» на высотах 6–10 км над точкой расположения лидара, что позволяет изучать как геометрические, так и оптические характеристики таких образований [21, 22].

Интерпретация результатов экспериментов по лазерному зондированию самолетных следов требует привлечения метеорологических данных, а также информации о траекториях полетов самолетов. В качестве источника траекторных данных используется сайт Flightradar24 [23]. На рис. 2 представлен фрагмент одной самолетной траектории: показаны положения самолета на трассе с соответствующими датой и временем, а в окне рядом с одной из точек траектории указаны высота, скорость и курс самолета. В нижнем окне на рис. 2 отображается рассчитанное геоинформационной системой Google Earth расстояние от лидара до точки траектории. Кроме того, показано направление ветра, которое необходимо, чтобы след самолета попал из соответствующей точки траектории в поле зрения лидара в результате «дрейфа». При этом предполагается, что остальные метеорологические параметры должны оставаться такими, чтобы за время «дрейфа» этот след не распался. Далее в статье будет указываться местное, Томское, время (UTC +7).

В табл. 1 представлен один из результатов совместного анализа траекторных (см. рис. 2) и соответствующих метеорологических данных. В зависимости от высоты полета самолета выбирались ближайшие высоты метеорологических измерений (на станциях в гг. Колпашево и Новосибирске), для которых находились соответствующие направление

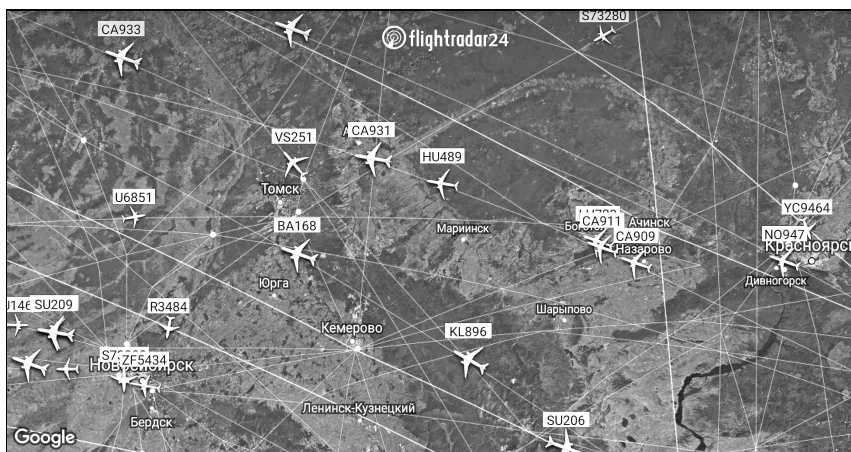


Рис. 1. Трассы регулярного гражданского авиасообщения вблизи г. Томска [23, 24]

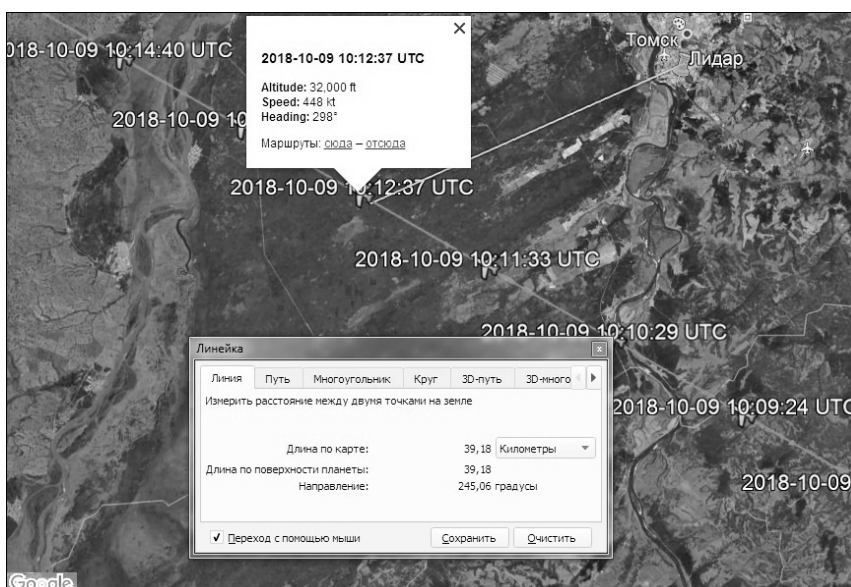


Рис. 2. Фрагмент траектории самолета вблизи г. Томска (рейс CA933, 9.10.2018 г.)

и скорость ветра. Затем через точку с координатами лидара проводилась прямая линия, имеющая направление, совпадающее с направлением ветра на высоте полета самолета, до точки пересечения с траекторией самолета. Расстояние между этой точкой и местоположением лидара вычислялось по их координатам. С учетом скорости ветра оценивалось время «дрейфа» конденсационного следа до места расположения лидара. В результате определялся момент времени, в который ожидалось появление следа в поле зрения лидара. При этом метеорологические параметры предполагались неизменными на всем пути «дрейфа» следа. Направление и скорость ветра, измеренные на станциях в гг. Колпашево и Новосибирске, несколько отличаются, что обуславливает расхождения в оценках расстояния и времени «дрейфа» самолетного следа с момента выброса продуктов сгорания топлива до точки расположения лидара (табл. 1).

На рис. 3 показана временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала, полученная во время эксперимента, в течение

Таблица 1

Результат совместного анализа траекторных и метеорологических данных (9.10.2018 г.)

Параметр	Значение
<i>Траекторные данные (рейс CA933)</i>	
Время точки траектории полета самолета	17:12
Высота точки траектории, км	9,75
<i>Метеорологические данные (Колпашево/Новосибирск)</i>	
Время измерений	19:00/19:00
Высота точки метеоданных*, км	10,3/9,9
Направление ветра**, град	245/268
Скорость ветра, м/с	27,8/24,2
<i>Результат совместного анализа (Колпашево/Новосибирск)</i>	
Расстояние «дрейфа» следа до лидара, км	39,2/61,6
Длительность «дрейфа» до лидара, мин	23,5/42,5
Ожидаемое время появления над лидаром	17:36/17:55

* Выбрано наиболее близкое к высоте полета самолета значение из доступных соответствующих метеорологических данных; ** 0° соответствует направлению на Север, 180° — на Юг.

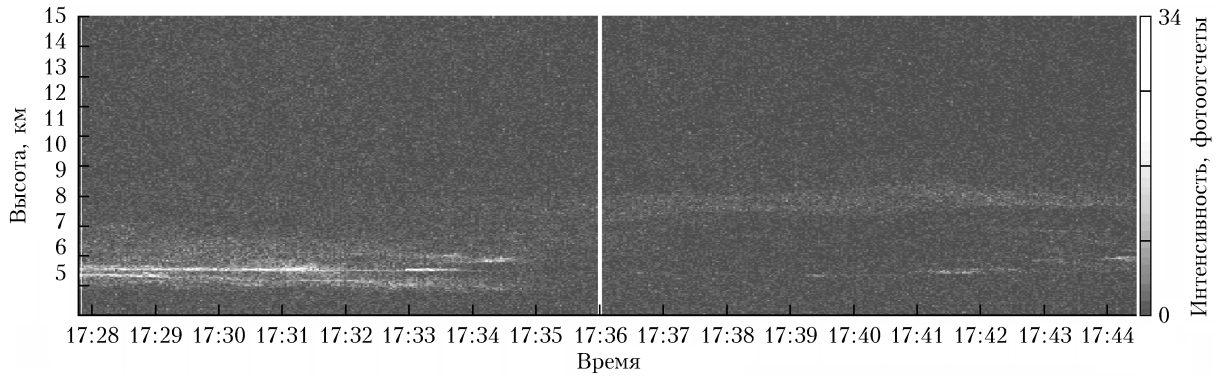


Рис. 3. Временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала, полученная в течение одной серии лидарных измерений (9.10.2018 г.)

которого наблюдалось появление конденсационного следа самолета в поле зрения лидара. Вертикальной белой чертой обозначено время ожидания появления следа над лидаром (17:36), вычисленное по данным метеостанции, расположенной в г. Колпашево. Видно, что с этого момента действительно наблюдался аэрозольный слой на высотах 8,5–9,5 км, что согласуется с высотой полета самолета (см. табл. 1). Полученное соответствие лидарных, метеорологических и траекторных данных позволяет квалифицировать наблюдаемый в эксперименте аэрозольный слой как конденсационный след самолета.

Профили, аналогичные рис. 3, для последующих серий лидарных измерений здесь приводить не будем. Ограничимся описательной констатацией: аэрозольный слой в указанном диапазоне высот непрерывно наблюдался вплоть до 18:02. Принимая во внимание возможные различия метеоусловий над гг. Колпашево, Новосибирском и Томском [22, 24], далее будем использовать метеоданные, полученные на метеостанции в г. Колпашево, поскольку они в большей мере соответствуют результатам лидарных измерений для рассматриваемых дат.

Теоретические расчеты МОРС и методика их сопоставления с экспериментальными данными

Для оценки параметров микроструктуры наблюдаемых лидаром конденсационных следов использовался банк данных МОРС ИОА СО РАН [25]. В нем представлены МОРС монодисперсных ледяных кристаллических частиц различной формы, полученные путем численного решения задачи рассеяния света ледяными кристаллами методом физической оптики [26]. С использованием банка данных сформирован массив МОРС полидисперсных ансамблей ледяных гексагональных столбиков и пластинок, моделирующих ОВЯ с той или иной микроструктурой. Распределение размеров кристаллов и его параметры принимались соответствующими микрофизической модели [27, 28]. Усредненная по размерам МОРС определялась следующим образом:

$$\langle \mathbf{M}(L_{\text{mod}}) \rangle = C \int_{10}^{1000} \mathbf{M}(L) L^{k-1} \frac{\exp(-L/\theta)}{\theta^k \Gamma(k)} dL, \quad (1)$$

где

$$C = \left[\int_{10}^{1000} L^{k-1} \frac{\exp(-L/\theta)}{\theta^k \Gamma(k)} dL \right]^{-1} \quad (2)$$

– нормировочный коэффициент; $\mathbf{M}(L)$ – матрица Мюллера, рассчитанная для кристалла размером L (для столбиков – длина, для пластинок – диаметр); θ и k – параметры гамма-распределения; $L_{\text{mod}} = (k-1)\theta$ – модальный размер кристалла; $\Gamma(k)$ – гамма-функция; $k = 2$.

На основании предположения о том, что частицы в облаках равновероятно ориентированы по углам α (угол вращения вокруг вертикали) и γ (угол вращения вокруг продольной оси кристалла), а также распределены по углу β (угол отклонения нормали кристалла от вертикали) по нормальному закону, МОРС усреднялись следующим образом:

$$\langle \mathbf{M} \rangle = \iiint_{\alpha \beta \gamma} \mathbf{M}(\alpha, \beta, \gamma) p(\alpha, \beta, \gamma) \sin(\beta) d\alpha d\beta d\gamma. \quad (3)$$

Здесь $\langle \mathbf{M} \rangle$ – усредненная по ориентации матрица Мюллера; $\mathbf{M}(\alpha, \beta, \gamma)$ – матрица для отдельной пространственной ориентации частицы.

Функция распределения для квазигоризонтальной ориентации имеет вид

$$p(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{\exp\left(-\frac{t^2}{2\beta_{\text{eff}}^2}\right)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \exp\left(-\frac{t^2}{2\beta_{\text{eff}}^2}\right) \sin(\beta) d\alpha d\beta d\gamma}, \quad (4)$$

где β_{eff} – эффективный угол наклона частицы (угол флаттера); $t = \beta$ для пластинок и $t = \pi/2 - \beta$ для столбиков. Случай преимущественной азимутальной ориентации в настоящей работе не учитывался.

Среди возможных конфигураций кристаллов рассматривался и случай искажения их формы относительно гексагональной. Поскольку достоверная

информация о деформации частиц в облаках в литературе отсутствует, для описания искажения частиц перистого облака использовался нормальный закон распределения. Единственным параметром закона является среднеквадратичное отклонение угла отклонения гексагонального основания частицы от ее нормали, которое будем называть эффективным углом искажения граней кристалла и обозначать ξ_{eff} . При усреднении элементов МОРС по этому углу применялась формула

$$\langle M_{ij}(\xi_{\text{eff}}) \rangle = C \int_0^{10} M_{ij}(\xi) \exp\left[-\frac{(\xi - \mu)^2}{2\xi_{\text{eff}}^2}\right] d\xi, \quad (5)$$

где нормировочный коэффициент определяется как

$$C = \left[\int_0^{10} \exp\left[-\frac{(\xi - \mu)^2}{2\xi_{\text{eff}}^2}\right] d\xi \right]^{-1} \approx [\xi_{\text{eff}} \sqrt{2\pi}]^{-1}; \quad (6)$$

M_{ij} — элемент матрицы Мюллера; ξ — угол искажения граней кристалла; $\mu = 0$.

В полученном массиве МОРС для полидисперсных ансамблей ледяных частиц размеры частиц изменялись в диапазоне от 10 до 1000 мкм (для столбиков длина, для пластинок диаметр), угол отклонения продольной оси кристалла от горизонтали — от 0 до 23°, угол искажения формы — от 0,05 до 10°. В качестве меры соответствия экспериментально

полученной МОРС и рассчитанной теоретически использовался параметр ϵ — максимальное различие между соответствующими элементами главной диагонали матриц [29]. Был выбран критерий соответствия матриц

$$\max(|M_{ii}^a - M_{ii}^t|) \leq \epsilon^2; \quad i = 2, 3, 4; \quad \epsilon \leq 0,15, \quad (7)$$

M_{ii}^a и M_{ii}^t — элементы экспериментально полученной МОРС и рассчитанной теоретически для полидисперсного ансамбля ледяных частиц соответственно. Отметим, что элементы теоретически рассчитанных МОРС округлялись до сотых долей.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты лидарных экспериментов, выполненных в условиях преимущественно чистого неба 8.09, а также 1 и 9.10.2018 г. Анализ данных сайта [23] показал, что во время указанных измерений в радиусе 100 км от лидара НИ ТГУ пролетели 153 самолета. Было выбрано 10 самолетных траекторий, для которых направление ветра на их высотах обеспечивало «дрейф» конденсационного следа к месту расположения лидара НИ ТГУ. В табл. 2 приведены результаты эксперимента по лазерному зондированию, в течение которого наблюдалось появление самолетного следа в поле зрения лидара (см. рис. 3), и соответствующие метеорологические условия.

Таблица 2

Данные эксперимента по зондированию конденсационных следов самолетов лидаром НИ ТГУ (9.10.2018 г.)

Параметр	Значение	
<i>Лидарные данные</i>		
Время эксперимента	17:27–17:44	
Диапазон высот аэрозольного слоя, км	8,5–9,5	
Ожидаемое время появления над лидаром	17:36 (Колпашево, 19:00)	
Высота полета самолета, км	9,75	
Оптическая толщина τ	0,48	
Отношение рассеяния R	13,54	
МОРС (h , км)	$\mathbf{M}(8,85) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0,14 & -0,03 \\ 0 & 0,47 & -0,08 & 0,01 \\ -0,14 & -0,04 & -0,41 & 0,02 \\ -0,03 & 0,05 & 0,02 & -0,09 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M}(9) = \begin{bmatrix} 1 & 0,08 & 0,06 & -0,04 \\ 0,08 & 0,51 & -0,01 & -0,01 \\ -0,06 & -0,03 & -0,37 & 0,05 \\ -0,04 & -0,05 & 0,07 & -0,07 \end{bmatrix};$ $\mathbf{M}(9,15) = \begin{bmatrix} 1 & 0,02 & 0,04 & -0,11 \\ 0,02 & 0,47 & 0,03 & -0,14 \\ -0,04 & -0,10 & -0,60 & 0,07 \\ -0,11 & 0,02 & -0,14 & -0,12 \end{bmatrix}$	
<i>Метеорологические данные (Колпашево, 19:00)</i>		
Высота*, км	10,3**	9,1***
Давление, гПа	250	300
Температура, °C	-59,5	-49,3
Точка росы, °C	-65,5	-56,3
Относительная влажность, %	45	44

* Выбрано наиболее близкое значение из доступных в соответствующих метеорологических данных; ** полет самолета; *** наблюдавшийся в лидарном эксперименте аэрозольный слой.

Из табл. 2 следует, что недиагональные элементы нормированной МОРС по абсолютной величине малы, величина элемента m_{44} близка к нулю, а отношение рассеяния меньше 20. Как показано в [18], рассеивающая среда с такими характеристиками с большой вероятностью представляет собой ансамбль хаотически ориентированных мелких частиц.

С целью оценки количественных характеристик микроструктуры конденсационного следа рассчитаны МОРС для полидисперсных ансамблей небольших по размерам хаотически ориентированных кристаллических частиц. В табл. 3 приведены четыре матрицы для хаотически ориентированных столбиков и одна — для хаотически ориентированных пластинок. Здесь же указаны параметры микроструктуры, положенные в основу расчетов: β_{eff} — амплитуда угла флаттера кристалла; L_{mod} — модальная длина столбика; D_{mod} — модальный эффективный диаметр пластины; ξ_{eff} — угол отклонения основания кристалла (мера искажения его формы).

Из сравнения МОРС (экспериментальных и теоретических, табл. 2 и 3) видно, что все они удовлетворяют критерию (7). Экспериментальной МОРС, полученной от конденсационного следа на высоте 8,85 км (см. табл. 2), согласно критерию (7), соответствуют \mathbf{M}_1 и \mathbf{M}_5 в табл. 3. Эту неопределенность можно исключить, если обратить внимание на температуру атмосферного воздуха на высотах образования конденсационного слоя (8,5–9,5 км). Из табл. 2

видно, что на высоте наблюдавшегося аэрозольного слоя температура воздуха не превышает -49°C . Согласно [30] пластинки образуются в ОВЯ при температурах от -40 до -20°C .

Таким образом, конденсационный след самолета, наблюдаемый в эксперименте 9.10.2018 г. в 17:36–17:44 на высоте 8,85 км, можно классифицировать как ансамбль хаотически ориентированных мелких столбиков с небольшим отличием формы от идеальной гексагональной. Указанная ситуация соответствует и метеорологической обстановке, и выводам, сделанным из предварительного анализа лидарных данных.

Для проверки достоверности сделанных выводов проведем анализ результатов еще одного лидарного эксперимента, выполненного в тот же день в аналогичных условиях. В ходе эксперимента регистрировался конденсационный след другого самолета, летевшего рейсом S773. Оцененное расстояние «дрейфа» следа к месту расположения лидара составило 33,8 км, время «дрейфа» 19,6 мин. Указанные значения близки к таковым в предыдущем эксперименте (см. табл. 1). В табл. 4 приведены данные эксперимента, в табл. 5 — соответствующие им теоретически рассчитанные МОРС и параметры микроструктуры.

Рассмотренный случай позволяет сделать вывод, аналогичный предыдущему: величина отношения рассеяния, не превышающая 20, и значительное

Таблица 3
Теоретически рассчитанные МОРС и соответствующие параметры микроструктуры ансамблей ледяных кристаллов

Номер матрицы	Рассчитанная МОРС	β_{eff} , град	L_{mod} , мкм	ξ_{eff} , град	ε
<i>Хаотически ориентированные столбики</i>					
$\mathbf{M}_1(8,85)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,47 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,47 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & < 0,01 \end{bmatrix}$	90	10	5,2	0,10
$\mathbf{M}_2(9,00)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,47 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,47 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & < 0,01 \end{bmatrix}$	90	10	5,2	0,10
$\mathbf{M}_3(9,15)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,02 \\ 0 & 0,56 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,56 & 0 \\ 0,02 & 0 & 0 & -0,16 \end{bmatrix}$	90	40	5	0,10
$\mathbf{M}_4(9,15)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,02 \\ 0 & 0,55 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,55 & 0 \\ 0,02 & 0 & 0 & -0,14 \end{bmatrix}$	90	30	7	0,10
<i>Хаотически ориентированные пластинки</i>					
$\mathbf{M}_5(8,85)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,56 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,56 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,13 \end{bmatrix}$	90	330	0	0,15

**Данные эксперимента по зондированию конденсационных следов самолетов
лидаром НИ ТГУ (9.10.2018 г.)**

Параметр	Значение	
<i>Лидарные данные</i>		
Время эксперимента	18:01–18:18	
Диапазон высот аэрозольного слоя, км	9,5–10,5	
Ожидаемое время появления над лидаром	17:59 (Колпашево, 19:00)	
Высота полета самолета, км	10,67	
Оптическая толщина τ	0,52	
Отношение рассеяния R	4,31	
MOPC (h , км)	$\mathbf{M}(9,60) = \begin{bmatrix} 1 & 0,02 & 0,01 & 0,08 \\ 0,02 & 0,57 & 0,01 & -0,02 \\ -0,01 & -0,07 & -0,64 & -0,11 \\ 0,08 & -0,17 & -0,14 & 0,05 \end{bmatrix};$	$\mathbf{M}(9,75) = \begin{bmatrix} 1 & -0,11 & -0,07 & -0,01 \\ -0,11 & 0,60 & -0,08 & -0,15 \\ 0,07 & -0,15 & -0,45 & 0,07 \\ -0,01 & -0,22 & 0,13 & 0,05 \end{bmatrix};$
	$\mathbf{M}(9,90) = \begin{bmatrix} 1 & 0,03 & -0,02 & -0,01 \\ 0,03 & 0,55 & 0,10 & 0,01 \\ 0,02 & -0,07 & -0,54 & -0,09 \\ -0,01 & -0,13 & -0,10 & 0,04 \end{bmatrix};$	$\mathbf{M}(10,05) = \begin{bmatrix} 1 & 0,01 & -0,08 & 0,04 \\ 0,01 & 0,53 & -0,01 & -0,09 \\ 0,08 & -0,03 & -0,47 & 0,21 \\ 0,04 & -0,07 & 0,29 & -0,01 \end{bmatrix}$
<i>Метеорологические данные (Колпашево, 19:00)</i>		
Высота*, км	10,65**	10,3***
Давление, гПа	234	250
Температура, °С	-62,5	-59,5
Точка росы, °С	-68,5	-65,5
Относительная влажность, %	44	45

* Выбрано наиболее близкое значение из доступных в соответствующих метеорологических данных; ** полет самолета; *** наблюдавшийся в лидарном эксперименте аэрозольный слой.

Таблица 5

Теоретически рассчитанные MOPC и соответствующие параметры микроструктуры ансамблей ледяных кристаллов

Номер матрицы	Рассчитанная MOPC	β_{eff} , град	L_{mod} , МКМ	ξ_{eff} , град	ϵ
1	2	3	4	5	6
<i>Хаотически ориентированные столбики</i>					
$\mathbf{M}_1(9,60)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,01 \\ 0 & 0,51 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,51 & 0 \\ 0,01 & 0 & 0 & -0,06 \end{bmatrix}$	90	20	5	0,15
	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,01 \\ 0 & 0,51 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,51 & 0 \\ 0,01 & 0 & 0 & -0,06 \end{bmatrix}$				
$\mathbf{M}_2(9,75)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,01 \\ 0 & 0,51 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,51 & 0 \\ 0,01 & 0 & 0 & -0,06 \end{bmatrix}$	90	20	5	0,15
	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,01 \\ 0 & 0,51 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,51 & 0 \\ 0,01 & 0 & 0 & -0,06 \end{bmatrix}$				
$\mathbf{M}_3(9,90)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,01 \\ 0 & 0,51 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,51 & 0 \\ 0,01 & 0 & 0 & -0,06 \end{bmatrix}$	90	20	5	0,10
	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,01 \\ 0 & 0,51 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,51 & 0 \\ 0,01 & 0 & 0 & -0,06 \end{bmatrix}$				
$\mathbf{M}_4(9,90)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,47 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,47 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,01 \end{bmatrix}$	90	10	5	0,10
	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,47 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,47 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,01 \end{bmatrix}$				
$\mathbf{M}_5(10,05)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,01 \\ 0 & 0,51 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,51 & 0 \\ 0,01 & 0 & 0 & -0,06 \end{bmatrix}$	90	20	4,65	0,05
	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,01 \\ 0 & 0,51 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,51 & 0 \\ 0,01 & 0 & 0 & -0,06 \end{bmatrix}$				

1	2	3	4	5	6
$M_6(10,05)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,02 \\ 0 & 0,52 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,52 & 0 \\ 0,01 & 0 & 0 & -0,08 \end{bmatrix}$	90	20	7	0,10
<i>Хаотически ориентированные пластинки</i>					
$M_7(9,60)$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,55 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,55 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,11 \end{bmatrix}$	90	230	0	0,15

отличие абсолютных значений элементов главных диагоналей экспериментальных МОРС от 0,9 указывают на отсутствие преимущественной горизонтальной ориентации ледяных кристаллов. В свою очередь, теоретически рассчитанные параметры МОРС, соответствующие экспериментально полученным, позволяют классифицировать наблюдавшийся самолетный след как ансамбль хаотически ориентированных мелких столбиков с небольшими отклонениями формы от идеальной гексагональной. Значения температуры и на высоте полета самолета, и на высоте наблюдавшегося аэрозольного образования не позволяют классифицировать его как ансамбль пластинок, хотя такой вывод может показаться уместным ввиду соответствия экспериментально полученной МОРС для высоты 9,6 км (табл. 4) и теоретически рассчитанной M_7 (табл. 5).

Заключение

В ряде экспериментов по поляризационному лазерному зондированию облаков верхнего яруса на высотном лидаре НИ ТГУ наблюдались протяженные аэрозольные образования. Выполнен совместный анализ лидарных данных с траекториями полетов гражданских самолетов в радиусе 100 км от места расположения лидара с данными о метеорологической обстановке на соответствующих высотах и с результатами теоретических расчетов матриц обратного рассеяния света на основе банка данных ИОА СО РАН. Результаты анализа позволили идентифицировать наблюдавшиеся в экспериментах аэрозольные слои как конденсационные следы самолетов и оценить параметры их микроструктуры. Сделанные оценки не противоречат известным закономерностям формирования облаков верхнего яруса.

Отработана методика оценки микроструктуры аэрозольных образований по данным поляризационного лазерного зондирования. Ее точность может быть повышена, например путем использования прогностических вертикальных профилей метеовеличин (данных так называемого реанализа), имеющих лучшее временное разрешение и рассчитанных непосредственно для координат Томска. В отличие от данных измерений метеостанций в гг. Колпашево и Новосибирске, выполняемых дважды в сутки, это позволит учесть изменение метеорологической обстановки, в том числе на пути «дрейфа» самолетных следов до лидара НИ ТГУ. Ранее было пока-

зано [24, 31], что данные такого «реанализа» могут применяться при интерпретации лидарных данных. Возможный учет в теоретических расчетах более широкого спектра форм частиц мог бы приблизить моделируемые ансамбли ледяных кристаллов к реальным аэрозольным образованиям и таким образом повысить точность восстановления их микроструктуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» и Программы повышения международной конкурентоспособности Томского государственного университета на 2013–2020 гг.; расчеты оптической модели – РФФИ (грант № 18-05-00568, 18-55-53046); интерпретация лидарных данных – при поддержке РНФ (соглашение № 18-77-10035).

1. Гориков В.Г., Довгалюк Ю.А., Ивлев Л.С. Физические основы экологии. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2005. 252 с.
2. Minnis P., Young D.F., Garber D.P., Nguyen L., Smith Jr.W.L., Palikonda R. Transformation of contrails into cirrus during SUCCESS // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25, N 8. P. 1156–1160.
3. Радиационные свойства перистых облаков / под ред. Е.М. Фейгельсон. М.: Наука, 1989. 223 с.
4. Borovoi A., Balin Y., Kokhanenko G., Penner I., Konoshonkin A., Kustova N. Layers of quasi-horizontally oriented ice crystals in cirrus clouds observed by a two-wavelength polarization lidar // Opt. Express. 2014. V. 22, N 20. P. 24566–24573.
5. Sassen K., Benson S. A midlatitude cirrus cloud climatology from the Facility for Atmospheric Remote Sensing: II. Microphysical properties derived from lidar depolarization // J. Atmos. Sci. 2001. V. 58, N 15. P. 2103–2112.
6. Cho H.M., Yang P., Kattawar G.W., Nasiri S.L., Hu Y., Minnis P., Trepte C., Winker D. Depolarization ratio and attenuated backscatter for nine cloud types: Analyses based on collocated CALIPSO lidar and MODIS measurements // Opt. Express. 2014. V. 16, N 6. P. 3931–3948.
7. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Nasonov S.V., Zhivotenyuk I.V., Stykon A.P. Investigation of the optical characteristics of cirrus clouds with anomalous backscattering // Russ. Phys. J. 2013. V. 55, N 8. P. 925–929.
8. Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В., Животенюк И.В., Брюханов И.Д. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной

- плоскости // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 5. С. 403–411.
9. Соковых О.В., Самохвалов И.В. Системная интеграция экспериментального оборудования высотного поляризационного лидара // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 10. С. 891–896.
 10. Кауль Б.В., Волков С.Н., Самохвалов И.В. Результаты исследований кристаллических облаков посредством лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 4. С. 354–361.
 11. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Поляризационные лидарные измерения характеристик атмосферного аэрозоля // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений. Томск: Спектр, 1997. С. 34–58.
 12. Волков С.Н., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Методика обработки результатов лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15, № 11. С. 982–986.
 13. Самохвалов И.В., Волков С.Н., Брюханов И.Д. Программно-алгоритмический комплекс коррекции интенсивности лидарного сигнала на статистический и фоновый шум, на просчеты и последствие фотоэлектронных умножителей приемных каналов лидара // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662035; Зарегистрирована 28.10.2016 г.; Заявка № 2016619429; Поступл. 02.09.2016 г.
 14. Samokhvalov I.V., Nasonov S.V., Stykon A.P., Bryukhanov I.D., Borovoi A.G., Volkov S.N., Kustova N.V., Konoshonkin A.V. Investigation of phase matrices of cirrus containing ensembles of oriented ice particles // Proc. SPIE. 2014. V. 9292. 92922M. DOI: 10.1117/12.2075562.
 15. Samokhvalov I.V., Kaul B.V., Bryukhanova V.V., Doroshkevich A.A., Zege E.P., Chaikovskaya L.I., Malinka A.V. Correction for distortions in lidar measurements of cloud backscattering phase matrices caused by multiple scattering // Russ. Phys. J. 2008. V. 5, N 9. P. 958–964.
 16. Doroshkevich A.A., Bryukhanova V.V. On the effect of cloud microstructure on the polarization characteristics of double scattering lidar return // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. 968053. DOI: 10.1117/12.2206001.
 17. Самохвалов И.В., Волков С.Н., Брюханов И.Д. Программно-алгоритмический комплекс расчета и приведения к плоскости вертикальной симметрии матриц обратного рассеяния света облаков верхнего яруса на основе данных поляризационного лазерного зондирования // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611252; Зарегистрирована 01.02.2017 г.; Заявка № 2016663186; Поступл. 02.12.2016 г.
 18. Kaul B.V., Samokhvalov I.V., Volkov S.N. Investigating particle orientation in cirrus clouds by measuring backscattering phase matrices with lidar // Appl. Opt. 2004. V. 43, N 36. P. 6620–6628. DOI: 10.1364/AO.43.006620.
 19. University of Wyoming [Electronic resource]. URL: <http://weather.uwyo.edu> (last access: 5.12.18).
 20. Брюханов И.Д. Программно-алгоритмический комплекс планирования лидарных экспериментов // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610524; Зарегистрирована 11.01.2019 г.; Заявка № 2018664729; Поступл. 20.12.2018 г.
 21. Самохвалов И.В., Брюханов И.Д., Животенюк И.В., Насонов С.В., Кириллов Н.С., Стыкон А.П. Определение матрицы обратного рассеяния света конденсационного следа самолета // Оптика атмосфер. и океана. Физика атмосферы: Материалы XXII Междунар. симп. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. С465–С468. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
 22. Самохвалов И.В., Брюханов И.Д., Животенюк И.В., Ни Е.В., Стыкон А.П. Оптические характеристики конденсационных следов самолетов // Оптика атмосфер. и океана. Физика атмосферы: Материалы XXIV Междунар. симп. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2018. С. С358–С361. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
 23. Flightradar24. Live Air Traffic [Electronic resource]. URL: <https://www.flightradar24.com> (last access: 5.12.18).
 24. Брюханов И.Д. Проблема интерпретации данных поляризационного лазерного зондирования конденсационных следов самолетов: оценка метеопараметров // Тр. Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2018. Вып. 662. С. 102–106.
 25. URL: ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Physical_optics/Backscattering/Quasi-horizontally_oriented_plate (last access: 5.12.18).
 26. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N., Okamoto H. Backscattering Mueller matrix for quasi-horizontally oriented ice plates of cirrus clouds: Application to CALIPSO signals // Opt. Express. 2012. V. 20, N 27. P. 28222–2823.
 27. Mitchell D.L., Arnott W.P. A model predicting the evolution of ice particle size spectra and radiative properties of cirrus clouds. Part II. Radiation // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51, N 6. P. 817–832.
 28. Auer A.H., Veal D.L. The dimension of ice crystals in natural clouds // J. Atmos. Sci. 1970. V. 27, N 6. P. 919–926.
 29. Шшико В.А., Брюханов И.Д., Ни Е.В., Кустова Н.В., Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В. Алгоритм интерпретации матриц обратного рассеяния света перистых облаков для восстановления их микрофизических параметров // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 3. С. 186–192.
 30. Um J., McFarquhar G.M., Hong Y.P., Lee S.-S., Jung C.H., Lawson R.P., Mo Q. Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15, N 7. P. 3933–3956. DOI: 10.5194/acp-15-3933-2015.
 31. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.V., Soojin P., Zhivotenyuk I.V., Ni E.V., Stykon A.P. Optical characteristics of contrails according to polarization lidar sensing data // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. 108335J. DOI: 10.1117/12.2504517.

I.V. Samokhvalov, I.D. Bryukhanov, V.A. Shishko, N.V. Kustova, E.V. Nie, A.V. Konoshonkin, O.Yu. Loktushin, D.N. Timofeev. Estimation of microphysical characteristics of contrails from polarization lidar data: Theory and experiment.

The technique for detecting and studying the optical and microphysical characteristics of aircraft condensation trails using the unique altitude polarization lidar of the National Research Tomsk State University (NR TSU) is described. The microstructure parameters of the ensembles of crystalline particles were estimated by comparing the elements of the backscattering light matrices (BSLM) obtained theoretically and experimentally. It is shown that the contrail appeared behind an aircraft formed in the atmosphere in 30–40 minutes after the emission of fuel combustion products from engines consists of small randomly oriented particles of ice, mostly columnar.