

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 535.36; 551.501.7

Алгоритм интерпретации матриц обратного рассеяния света перистых облаков для восстановления их микрофизических параметров

В.А. Шишко¹, И.Д. Брюханов², Е.В. Ни², Н.В. Кустова¹,
Д.Н. Тимофеев¹, А.В. Коношонкин^{1, 2*}

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

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 29.01.2019 г.

Описан алгоритм интерпретации матриц обратного рассеяния света (МОРС), экспериментально полученных на уникальном высотном поляризационном лидаре Национального исследовательского Томского государственного университета при зондировании перистых облаков. На основе базы данных МОРС, теоретически рассчитанных в рамках приближения физической оптики, сделана оценка микрофизических характеристик перистых облаков, таких как размер, ориентация и форма частиц, а также процентное соотношение частиц разной формы.

Ключевые слова: матрица обратного рассеяния света, ледяные кристаллы, перистые облака, метод физической оптики, поляризационный лидар; light backscattering matrices, ice crystals, cirrus clouds, physical optics approximation, polarization lidar.

Введение

Значительная часть облаков, покрывающих поверхность земли, — перистые, состоящие из ледяных кристаллических частиц и существенно влияющие на процесс переноса солнечной энергии, а следовательно, на формирование климата нашей планеты [1–3]. В зависимости от ориентации кристаллических частиц эти облака могут как задерживать проникновение солнечного излучения вглубь атмосферы, к земной поверхности, так и препятствовать выходу теплового излучения Земли [4] в открытый космос, усугубляя парниковый эффект. Поэтому важно исследовать состояние перистых облаков, а именно их микрофизические характеристики, такие как размер частиц, входящих в состав облака, их ориентацию, а также процентное соотношение частиц разной формы, поскольку зачастую облака состоят из смеси различных частиц.

Существенным фактором, влияющим на оптические характеристики перистых облаков, является ориентация ледяных кристаллических частиц, обра-

зующих облако [4–7]. Недавние исследования, проведенные под руководством И.В. Самохвалова [4], показывают, что при одинаковой оптической толщине перистые облака, состоящие из ориентированных ледяных кристаллов, пропускают значительно меньше видимого излучения, чем в случае хаотической ориентации кристаллов.

Объективную и актуальную информацию об ориентации кристаллических частиц в облаке в реальном времени возможно получить при помощи лидарных наблюдений. Наиболее перспективным является предложенный Б.В. Каулем и И.В. Самохваловым метод поляризационного лазерного зондирования [7]. Наибольшую эффективность данная методика имеет при измерении полной матрицы обратного рассеяния света (МОРС) и одновременном измерении метеорологических характеристик атмосферы на высотах образования перистых облаков [8, 9]. Однако до сих пор большинство наземных и космических поляризационных лидаров измеряют лишь линейные и круговые деполаризационные отношения. В России единственный лидар, способный измерять полную МОРС, находится в г. Томске (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) в Национальном исследовательском Томском государственном университете (НИ ТГУ) [4, 9–10]. Здесь же в оперативной доступности хранятся экспериментальные данные по лидарному зондированию облаков верхнего яруса, накопленные в течение многих лет.

* Виктор Андреевич Шишко (sva@iao.ru); Илья Дмитриевич Брюханов (plyton2121@mail.ru); Евгений Вячеславович Ни (wolf.ni@yandex.ru); Наталья Валентиновна Кустова (kustova@iao.ru); Дмитрий Николаевич Тимофеев (tdn@iao.ru); Александр Владимирович Коношонкин (sasha_tvo@iao.ru).

Несмотря на то что попытки решения обратной задачи лазерного поляризационного зондирования кристаллических облаков уже предпринимались ранее [8], основным препятствием для интерпретации данных уникального высотного поляризационного лидара ТГУ до последнего времени являлось отсутствие эффективного метода решения прямой задачи рассеяния света на ледяных кристаллических частицах, свойственных реальным перистым облакам. Для построения такого решения в Институте оптики атмосферы ИОА СО РАН под руководством А.Г. Борового был разработан метод физической оптики [11]. Он эффективен для решения прямой задачи рассеяния света в направлении рассеяния «назад» для ледяных кристаллических частиц перистых облаков размерами от 10 до 1000 мкм [12]. При помощи этого метода была рассчитана база данных МОРС для основных типов атмосферных ледяных кристаллов: гексагональных пластинок и столбиков, дроксталлов и буллитов, а также деформированных частиц и агрегатов. Работа по теоретическому расчету МОРС для всего этого многообразия форм и размеров атмосферных ледяных кристаллов велась много лет, база данных доступна на ftp-сервере ИОА СО РАН [13].

В настоящей работе описывается алгоритм, позволяющий интерпретировать накопленные данные высотного поляризационного лидара ТГУ с использованием теоретически рассчитанной в рамках приближения физической оптики базы данных МОРС. Он позволит впервые получить оценки микрофизических параметров перистых облаков и тем самым на качественном уровне сделать заключение о его возможностях.

Микрофизическая модель облака

Прежде чем изложить описание алгоритма интерпретации лидарных данных, введем основные физические понятия и допущения, в рамках которых он разработан.

При исследовании перистых облаков методом поляризационного лазерного зондирования [7] можно с хорошей степенью достоверности работать в рамках теории однократного рассеяния, поскольку оптическая толщина облаков очень мала и редко превышает 0,4 [14]. Также можно считать, что измеренный лидаром сигнал получен от большого ансамбля частиц ввиду значительной пространственной протяженности зондируемого участка облака, а также усреднения по большому временному интервалу. Следовательно, измеренная лидаром МОРС представляет собой усредненную по статистическому ансамблю кристаллов матрицу и ее следует сопоставлять с усредненной теоретической матрицей обратного рассеяния.

Поскольку реальное перистое облако содержит кристаллические частицы льда, различающиеся по форме, размеру, ориентации и в некоторых случаях по степени искажения формы частиц, то рассчитанная в рамках метода физической оптики МОРС также должна учитывать эти особенности и усред-

няться. Таким образом, оптическая модель характеризуется следующими параметрами: модальный размер кристалла (для столбиков длина L_{mod} , для пластинок эффективный диаметр D_{mod}), эффективный угол наклона частицы (угол флаттера) β_{eff} , эффективный угол искажения формы кристалла ξ_{eff} и доля частиц одного сорта относительно другого P (если предполагается смесь частиц).

Для учета распределения атмосферных кристаллов по размерам при усреднении элементов МОРС необходимо задать адекватный закон распределения. В ряде публикаций [5, 15–17] предложено считать распределение кристаллов по размерам в перистом облаке подчиняющимся гамма-распределению. В данной работе при усреднении МОРС гексагональных столбиков использовалось гамма-распределение по длине столбика, а при усреднении матриц, рассчитанных для гексагональных пластинок, — по диаметру пластинки. Параметр дисперсии гамма-распределения был выбран равным 2 согласно [18]. Размеры гексагональных ледяных кристаллов задавались с использованием микрофизической модели [19, 20].

После усреднения матрицы обратного рассеяния света по размерам проводилось усреднение по пространственной ориентации частиц. Очередность выбора параметра, по которому производится усреднение, в данном случае не существенна в силу независимости параметров друг от друга.

Определив ориентацию частицы тремя углами Эйлера (α, β, γ), аналогично [21] можно охарактеризовать пространственную ориентацию частицы функцией плотности вероятностей $p(\alpha, \beta, \gamma)$. Как правило, предполагают, что частицы в облаке имеют либо хаотическую [22], либо квазигоризонтальную ориентацию [5, 17] (т.е. частицы равновероятно ориентированы по углам α и γ и имеют нормальный закон распределения по углу наклона β с параметром β_{eff}). Подробно случай квазигоризонтальной ориентации изложен в [5]. Случай преимущественной азимутальной ориентации [23, 24] в данной работе не рассматривается, и при усреднении используется закон распределения по ориентациям частицы аналогично [21].

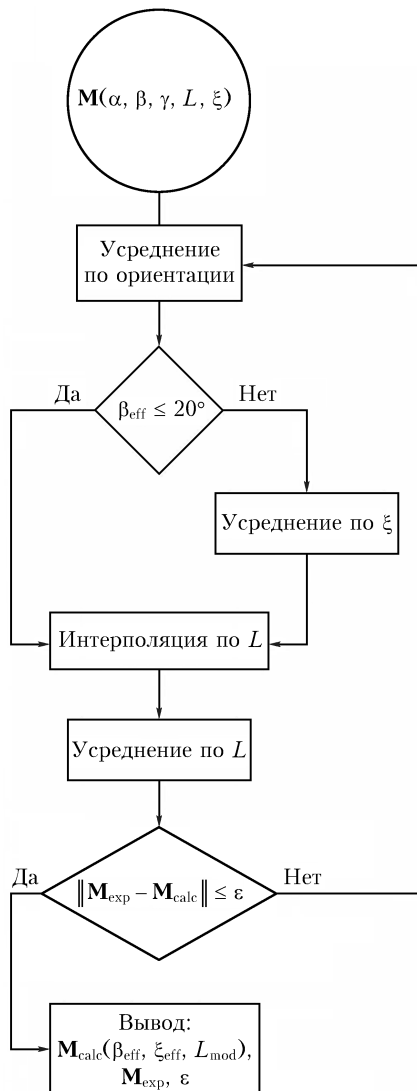
Помимо ориентации и распределения по размерам кристаллов, существенное влияние на оптические характеристики может оказывать деформация формы частицы [25, 26].

Для учета деформации формы частиц используется модель искажения формы кристалла, представленная в [26]. Согласно данной модели угол искажения ξ прямого двугранного угла ледяного гексагонального столбика изменяется в диапазоне от 0 (идеальная частица) до 10° .

Поскольку достоверная информация о деформации частиц в облаке в литературе отсутствует, в работе используется нормальный закон распределения для описания искажения частиц перистого облака с единственным параметром — среднеквадратичным отклонением угла искажения частицы, который в данной работе будем называть эффективным углом искажения формы кристалла ξ_{eff} [26].

Алгоритм восстановления микрофизических параметров облаков по данным лазерного зондирования

Для интерпретации данных высотного поляризованного лидара НИ ТГУ был разработан алгоритм, который осуществляет поиск теоретически рассчитанных МОРС, хранящихся в базе данных ИОА СО РАН, и экспериментально измеренных на поляризованном лидаре НИ ТГУ, диагональные элементы которых совпадают в пределах погрешности измерений этих элементов. Апробация алгоритма проводилась в среде Mathcad. В алгоритме реализованы усреднения элементов исходных теоретически рассчитанных матриц обратного рассеяния света $\mathbf{M}(\alpha, \beta, \gamma, L, \xi)$ по углам ориентации, углу искажения формы и размеру кристалла. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке.



Блок-схема алгоритма оценки микрофизических параметров экспериментально полученных матриц обратного рассеяния света

На первом этапе происходит усреднение элементов МОРС $\mathbf{M}(\alpha, \beta, \gamma, L, \xi)$, рассчитанных в приближении физической оптики, по ориентации частицы с шагом по углу флаттера β_{eff} в 1° . Если угол флаттера частицы меньше 20° , то переходим ко второму этапу, в противном случае – к усреднению по углу искажения формы кристалла с шагом по ξ_{eff} в $0,05^\circ$.

Выбор угла флаттера в 20° обусловлен тем, что выбранная модель искажения формы частицы, не оказывает значительного влияния на ее оптические характеристики при флаттере частицы меньше 20° .

На втором этапе происходит интерполяция элементов рассчитанных матриц обратного рассеяния света по размеру частицы (с шагом в 10 мкм в диапазоне от 10 до 1000 мкм), допустимость использования этой процедуры обоснована в [27]. Затем проводится усреднение элементов рассчитанных матриц обратного рассеяния света по размеру частицы.

На третьем этапе, при хорошем совпадении экспериментальной \mathbf{M}_{exp} и усредненной по ориентации, размеру и углу искажения формы кристалла теоретической матрицы $\mathbf{M}_{\text{calc}}(\beta_{\text{eff}}, L_{\text{mod}}, \xi_{\text{eff}})$, в Mathcad выводятся сами матрицы и параметры (угол флаттера, модальный размер, эффективный угол искажения частицы), соответствующие рассчитанной матрице, а также параметр ϵ – максимальное различие между элементами рассчитанной и экспериментально полученной матрицы обратного рассеяния света. В случае если матрицы не совпали, делается шаг по параметрам $\beta_{\text{eff}}, L_{\text{mod}}, \xi_{\text{eff}}$ и цикл повторяется начиная с первого этапа.

Стоит отдельно отметить, что представленная реализация алгоритма в среде Mathcad призвана лишь продемонстрировать его работоспособность. Она является крайне неудобной для практического использования ввиду высоких требований среды Mathcad к вычислительным ресурсам. Для практического применения рациональным следует считать написание специальной программы, например, на языке C++, которая бы позволила проводить подобную интерпретацию в режиме реального времени.

Апробация алгоритма

Элементы экспериментально полученных МОРС всегда оцениваются с погрешностью, которая складывается из случайной и систематической, зависящей от величины помехи многократного рассеяния (МР) в лидарном сигнале. Уровень вклада МР-излучения в лидарный сигнал можно оценить по величине невязки для диагональных элементов МОРС [28]:

$$\Delta = |1 - m'_{22} + m'_{33} - m'_{44}|,$$

где m'_{ii} – элемент приведенной матрицы обратного рассеяния, т.е. матрицы, элементы которой нормированы на элемент M_{11} матрицы Мюллера. Чем больше Δ , тем больше уровень мощности МР-излучения в лидарном сигнале.

Стоит отдельно рассмотреть структуру теоретически рассчитанных матриц обратного рассеяния света для различных модельных ситуаций.

Для перистых облаков характерны следующие обобщенные виды МОРС:

$$а) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(1-d) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(1-2d) \end{bmatrix},$$

$$б) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1-d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(1-d) & 0 \\ a & 0 & 0 & -(1-2d) \end{bmatrix},$$

$$в) \begin{bmatrix} 1 & b & 0 & 0 \\ b & 1-d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(1-d) & c \\ 0 & 0 & -c & -(1-2d) \end{bmatrix},$$

$$г) \begin{bmatrix} 1 & b & 0 & a \\ b & 1-d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(1-d) & c \\ a & 0 & -c & -(1-2d) \end{bmatrix}.$$

Вид а) характерен для ансамбля хаотически ориентированных симметричных частиц; вид б) — для ансамбля хаотически ориентированных деформированных частиц; вид в) — для ансамбля квазигоризонтально ориентированных симметричных частиц; вид г) — для ансамбля квазигоризонтально ориентированных частиц произвольной формы.

Ниже в табл. 1–3 представлена апробация предложенного алгоритма для оценки микрофизических параметров частиц перистых облаков. Матрицы обратного рассеяния света были измерены на высотах 5,25 (M_1); 9,6 (M_2); 8,7 (M_3); 9 (M_4); 7,35 (M_5); 5,7 (M_6) и 6,15 км (M_7).

Для оценки микрофизических параметров облака в табл.1 и 2 приведены экспериментально полученные и теоретически рассчитанные МОРС

Таблица 1

Сравнение экспериментально полученной и рассчитанной МОРС для гексагональных столбиков с флаттером β_{eff} и углом искажения ξ_{eff}

Номер матрицы	Дата и время измерений/ высота облака, км	Экспериментально полученная МОРС	Рассчитанная МОРС	β_{eff} , град	L_{mod} , мкм	ξ_{eff} , град	ϵ
M_1	20.01.2017 г., 12:46–13:02/ 4,125–10,275	$\begin{bmatrix} 1 & 0,01 & 0,02 & -0,08 \\ 0,01 & 0,66 & 0,03 & 0,09 \\ -0,02 & -0,12 & -0,66 & 0,02 \\ -0,08 & 0,05 & 0,10 & -0,34 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,59 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,59 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,22 \end{bmatrix}$	90	70	0,05	0,12
M_2	12.04.2011 г., 21:32–21:46/ 9,2–9,8	$\begin{bmatrix} 1 & -0,02 & 0,06 & -0,05 \\ -0,02 & 0,56 & 0,09 & 0 \\ -0,06 & 0,09 & -0,46 & -0,04 \\ -0,05 & 0,04 & 0,11 & -0,07 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,02 \\ 0 & 0,56 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,56 & 0 \\ 0,02 & 0 & 0 & -0,16 \end{bmatrix}$	90	40	5,0	0,11
M_3	24.03.2017 г., 11:30–11:47/ 7,725–10,125	$\begin{bmatrix} 1 & -0,02 & -0,03 & -0,08 \\ -0,02 & 0,65 & -0,01 & -0,02 \\ 0,03 & 0,11 & -0,67 & -0,22 \\ -0,08 & -0,02 & 0,22 & -0,45 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,03 \\ 0 & 0,67 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,67 & 0 \\ 0,03 & 0 & 0 & -0,36 \end{bmatrix}$	90	280	4,05	0,11
M_4	08.01.2018 г., 13:36–14:10/ 8,025–11,325	$\begin{bmatrix} 1 & 0,05 & 0,02 & 0,02 \\ 0,05 & 0,92 & -0,10 & 0,03 \\ -0,02 & 0,09 & -0,90 & -0,05 \\ 0,02 & 0,01 & 0,02 & -0,74 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,82 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,82 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,67 \end{bmatrix}$	17	100	0	0,1
M_5	14.07.2016 г., 17:50–18:23/ 6,525–8,325	$\begin{bmatrix} 1 & -0,02 & -0,03 & -0,01 \\ -0,02 & 0,89 & 0,06 & 0,04 \\ 0,03 & -0,1 & -0,87 & 0,04 \\ -0,01 & -0,1 & 0,07 & -0,76 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,82 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,82 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,67 \end{bmatrix}$	17	100	0	0,09
M_6	04.02.2015 г./ 5,5–6,0	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -0,04 & 0,05 \\ 0 & 0,99 & 0,06 & -0,06 \\ 0,04 & 0,06 & -0,96 & -0,02 \\ 0,05 & 0,01 & 0,04 & -0,94 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,92 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,92 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,84 \end{bmatrix}$	12	1000	0	0,1
M_7	22.03.2016 г., 17:57–18:25/ 5,5–8,5	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0,08 & -0,03 \\ 0 & 0,86 & 0,1 & 0,05 \\ -0,08 & 0,01 & -0,75 & -0,04 \\ -0,03 & -0,05 & -0,09 & -0,69 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,80 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,80 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,62 \end{bmatrix}$	20	1000	0	0,1

для разных параметров облачных частиц: в табл. 1 — для случая гексагональных столбиков, в табл. 2 — для случая гексагональных пластинок. Невязка для экспериментально измеренных МОРС (табл. 2) равна: 0,02 (\mathbf{M}_1); 0,05 (\mathbf{M}_2); 0,13 (\mathbf{M}_3); 0,08 (\mathbf{M}_4); 0 (\mathbf{M}_5); 0,01 (\mathbf{M}_6) и 0,08 (\mathbf{M}_7).

Из табл. 1 видно, что для большинства экспериментально полученных МОРС величина ϵ сопоставима с невязкой Δ , за исключением матриц \mathbf{M}_1 , \mathbf{M}_5 и \mathbf{M}_6 .

В табл. 2 представлена оценка микрофизических параметров экспериментально полученных данных с помощью рассчитанной базы данных матриц обратного рассеяния света для ледяных гексагональных пластинок.

Из табл. 2 видно, что, как и в табл. 1, для большинства экспериментально полученных МОРС величина ϵ сопоставима с невязкой Δ , за исключением матриц \mathbf{M}_1 , \mathbf{M}_5 и \mathbf{M}_6 .

Таким образом, для всех матриц обратного рассеяния показана возможность интерпретации как

ледяными гексагональными столбиками, так и пластинками.

Отдельного внимания заслуживает матрица \mathbf{M}_4 , для которой ϵ близка к невязке Δ и не исключена возможность интерпретации ансамблем частиц, включающим как идеальные гексагональные ледяные столбики, так и пластинки. По этой причине алгоритм был видоизменен для случая, когда в облаке присутствуют слои квазигоризонтально ориентированных гексагональных пластинок и хаотически ориентированных гексагональных столбиков. Для данного случая матрица имеет следующий вид:

$$\mathbf{M}_{\text{calc}} = (1 - P)\mathbf{M}_h + P \cdot \mathbf{M}_r,$$

где \mathbf{M}_h — матрица рассеяния квазигоризонтально ориентированных частиц; \mathbf{M}_r — матрица рассеяния хаотически ориентированных частиц; P — доля хаотически ориентированных частиц относительно квазигоризонтально ориентированных частиц.

Таблица 2

Сравнение экспериментально полученной и рассчитанной МОРС для гексагональных пластинок с флаттером β_{eff}

Номер матрицы	Дата и время измерений/ высота облака, км	Экспериментально полученная МОРС	Рассчитанная МОРС	β_{eff} , град	D_{mod} , мкм	ϵ
\mathbf{M}_1	20.01.2017 г., 12:46–13:02/ 4,125–10,275	$\begin{bmatrix} 1 & 0,01 & 0,02 & -0,08 \\ 0,01 & 0,66 & 0,03 & 0,09 \\ -0,02 & -0,12 & -0,66 & 0,02 \\ -0,08 & 0,05 & 0,10 & -0,34 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,61 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,61 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,25 \end{bmatrix}$	90	10	0,12
\mathbf{M}_2	12.04.2011 г., 21:32–21:46/ 9,2–9,8	$\begin{bmatrix} 1 & -0,02 & 0,06 & -0,05 \\ -0,02 & 0,56 & 0,09 & 0 \\ -0,06 & 0,09 & -0,46 & -0,04 \\ -0,05 & 0,04 & 0,11 & -0,07 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,55 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,55 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,11 \end{bmatrix}$	90	230	0,11
\mathbf{M}_3	24.03.2017 г., 11:30–11:47/ 7,725–10,125	$\begin{bmatrix} 1 & -0,02 & -0,03 & -0,08 \\ -0,02 & 0,65 & -0,01 & -0,02 \\ 0,03 & 0,11 & -0,67 & -0,22 \\ -0,08 & -0,02 & 0,22 & -0,45 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,6 \end{bmatrix}$	17	100	0,15
\mathbf{M}_4	08.01.2018 г., 13:36–14:10/ 8,025–11,325	$\begin{bmatrix} 1 & 0,05 & 0,02 & 0,02 \\ 0,05 & 0,92 & -0,10 & 0,03 \\ -0,02 & 0,09 & -0,90 & -0,05 \\ 0,02 & 0,01 & 0,02 & -0,74 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,82 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,82 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,64 \end{bmatrix}$	18	20	0,1
\mathbf{M}_5	14.07.2016 г., 17:50–18:23/ 6,525–8,325	$\begin{bmatrix} 1 & -0,02 & -0,03 & -0,01 \\ -0,02 & 0,89 & 0,06 & 0,04 \\ 0,03 & -0,1 & -0,87 & 0,04 \\ -0,01 & -0,1 & 0,07 & -0,76 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,87 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,87 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,73 \end{bmatrix}$	17	1000	0,07
\mathbf{M}_6	04.02.2015 г./ 5,5–6,0	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -0,04 & 0,05 \\ 0 & 0,99 & 0,06 & -0,06 \\ 0,04 & 0,06 & -0,96 & -0,02 \\ 0,05 & 0,01 & 0,04 & -0,94 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,99 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,99 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,98 \end{bmatrix}$	10	250	0,06
\mathbf{M}_7	22.03.2016 г., 17:57–18:25/ 5,5–8,5	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0,08 & -0,03 \\ 0 & 0,86 & 0,1 & 0,05 \\ -0,08 & 0,01 & -0,75 & -0,04 \\ -0,03 & -0,05 & -0,09 & -0,69 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,83 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,83 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,66 \end{bmatrix}$	17	250	0,09

Сравнение экспериментально полученной и рассчитанной МОРС для ансамбля хаотически ориентированных гексагональных столбиков и пластинок с флаттером β_{eff}

Номер реализации	Экспериментально полученная МОРС	Рассчитанная МОРС	β_{eff} , град	D_{mod} , МКМ	L_{mod} , МКМ	P
1	$\begin{bmatrix} 1 & 0,05 & 0,02 & 0,02 \\ 0,05 & 0,92 & -0,10 & 0,03 \\ -0,02 & 0,09 & -0,90 & -0,05 \\ 0,02 & 0,01 & 0,02 & -0,74 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,85 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,85 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,71 \end{bmatrix}$	1	50...1000	50	0,4
2	$\begin{bmatrix} 1 & 0,05 & 0,02 & 0,02 \\ 0,05 & 0,92 & -0,10 & 0,03 \\ -0,02 & 0,09 & -0,90 & -0,05 \\ 0,02 & 0,01 & 0,02 & -0,74 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,84 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,84 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,7 \end{bmatrix}$	1	50...1000	100...150	0,4
3	$\begin{bmatrix} 1 & 0,05 & 0,02 & 0,02 \\ 0,05 & 0,92 & -0,10 & 0,03 \\ -0,02 & 0,09 & -0,90 & -0,05 \\ 0,02 & 0,01 & 0,02 & -0,74 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,92 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,92 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,84 \end{bmatrix}$	1	50...1000	400...1000	0,2
4	$\begin{bmatrix} 1 & 0,05 & 0,02 & 0,02 \\ 0,05 & 0,92 & -0,10 & 0,03 \\ -0,02 & 0,09 & -0,90 & -0,05 \\ 0,02 & 0,01 & 0,02 & -0,74 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,92 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,92 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,84 \end{bmatrix}$	11	100	400...1000	0,15

В данном случае под квазигоризонтально ориентированными частицами будем понимать гексагональные пластинки, а под хаотически ориентированными — столбики. В качестве примера в табл. 3 приведена оценка микрофизических параметров для экспериментально измеренной матрицы \mathbf{M}_4 при различных комбинациях P и углах флаттера β_{eff} -пластинок.

Из табл. 3 видно, что в случае интерпретации экспериментально полученной МОРС ансамблем разных типов кристаллических частиц наблюдается вариативность искомым микрофизических параметров. Возможное решение данной проблемы — использование данных о температурном профиле облачности и связи температуры окружающей среды с ростом атмосферных кристаллов льда [29].

Заключение

Таким образом, в статье представлен алгоритм оценки микрофизических параметров перистых облаков по данным, полученным на высотном поляризационном лидаре НИ ТГУ. Продемонстрирована возможность восстановления микрофизических параметров перистых облаков, однако при интерпретации экспериментально полученных МОРС ансамблем разных типов кристаллических частиц наблюдается некоторая вариативность искомым микрофизических параметров. Исключить вариативность можно, используя, например, экспериментальные данные о температурном профиле облачности и связи температуры окружающей среды с ростом атмосферных кристаллов льда. Результаты, представленные в статье, доказывают, что экспериментально полученные на уникальном высотном поляризационном лидаре НИ ТГУ матрицы обратного рассеяния света могут быть интерпретированы при помощи базы

данных МОРС ИОА СО РАН, полученных в рамках приближения физической оптики.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (соглашение № 18-77-10035) в части решения задачи для и симметричных гексагональных ледяных частиц, РФФИ (гранты № 18-05-00568, 18-55-53046), программ Д.И. Менделеева и повышения международной конкурентоспособности ТГУ.

1. *Stephens G.L., Tsay S.-C., Stackhouse Jr.P.W., Flatau P.J.* The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climatic feedback // *J. Atmos. Sci.* 1990. V. 47, N 14. P. 1742–1754.
2. *Hong G.* Parameterization of scattering and absorption properties of nonspherical ice crystals at microwave frequencies // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. D11208.
3. *Takano Y., Liou K.-N.* Radiative transfer in cirrus clouds. Part III: Light scattering by irregular ice crystals // *J. Atmos. Sci.* 1995. V. 52, N 7. P. 818–837.
4. *Самохвалов И.В.* Влияние ориентации кристаллов льда в перистых облаках на потоки прямой и рассеянной солнечной радиации // *Изв. вузов. Физика.* 2017. Т. 60, № 11. С. 138–140.
5. *Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N., Okamoto H.* Backscattering Mueller matrix for quasihorizontally oriented ice plates of cirrus clouds: Application to CALIPSO signals // *Opt. Express.* 2012. V. 20, N 27. P. 28222–28233.
6. *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. 20th Int. Sympos. on Atmos. Ocean Opt.: Atmos. Phys.* 2014. V. 9292. 6 p. DOI: 10.1117/12.2075562.
7. *Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Теория и результаты лазерного зондирования ориентированных кристаллических частиц в облаках // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 12. С. 1051–1057.
8. *Ромашов Д.Н., Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Банк данных для интерпретации результатов поляризацион-

- ного зондирования кристаллических облаков // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13, № 9. С. 854–861.
9. Самохвалов И.В., Бобровников С.М., Гейко П.П., Ельников А.В., Кауль Б.В. Развитие высотного лидара Томского государственного университета как уникального комплекса для мониторинга атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 11. С. 995–999.
 10. Самохвалов И.В., Насонов С.В., Брюханов И.Д., Боровой А.Г., Кауль Б.В., Кустова Н.В., Коношонкин А.В. Оценка параметров микроструктуры перистых облаков с аномальным обратным рассеянием поляризационным лидаром // Лазеры. Измерения. Информация. 2013: сб. докл. 23-й Междунар. конф. Т. 3. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 295–307.
 11. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г., Шишко В.А., Гринько Е. Решение задачи рассеяния света на гексагональной ледяной пластинке методами Галеркина, дискретных диполей и физической оптики // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59, № 12-2. С. 156–159.
 12. Wang Z., Шишко В.А., Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г., Матвиенко Г.Г., Xie Ch., Liu D., Wang Y. Исследование перистых облаков поляризационным лидаром в юго-восточном Китае (г. Хэфей) // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1050–1052; Wang Z., Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G., Matvienko G.G., Xie Ch., Liu D., Wang Y. The study of cirrus clouds with the polarization lidar in the South-East China (Hefei) // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 3. P. 234–235.
 13. URL: ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Physical_optics/Backscattering/ (last access: 7.10.2018).
 14. Cox S., Bugliaro L., Ostler A. Retrieval of cirrus cloud optical thickness and top altitude from geostationary remote sensing // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7, N 10. P. 3233–3246.
 15. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 200 с.
 16. Okamoto H., Sato K., Hagihara Y. Global analysis of ice microphysics from CloudSat and CALIPSO: Incorporation of specular reflection in lidar signals // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, N 22. P. D22209. DOI: 10.1029/2009JD013383.
 17. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Ориентация частиц кристаллических облаков Ci: Часть 1. Ориентация при падении // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 11. С. 963–967.
 18. Sato K., Okamoto H. Characterization of Ze and LDR of nonspherical and inhomogeneous ice particles for 95-GHz cloud radar: Its implication to microphysical retrievals // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, N 22. P. D22213.
 19. 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. P. 817–832.
 20. 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.
 21. Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Shishko V.A., Borovoi A.G. The technique for solving the problem of light backscattering by ice crystals of cirrus clouds by the physical optics method for a lidar with zenith scanning // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 3. P. 252–262.
 22. Heymsfield A.J., Bansemer A., Field P.R., Durden S.L., Stith J.L., Dye J.E., Hall W., Grainger C.A. Observations and parameterizations of particle size distributions in deep tropical cirrus and stratiform precipitating clouds: Results from in situ observations in TRMM field campaigns // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59, N 24. P. 3457–3491.
 23. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Физические факторы, определяющие пространственную ориентацию частиц кристаллических облаков // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 27–34.
 24. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Ориентация частиц в кристаллических облаках Ci: Часть 2. Азимутальная ориентация // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 1. С. 44–46.
 25. Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G. Main types of optical beams giving predominant contributions to the light backscatter for the irregular hexagonal columns // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. P. 1046646.
 26. Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G. Influence of cirrus clouds ice crystal's deformation on the backscattering matrix calculated within the physical optics approximation // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. P. 100353.
 27. Konoshonkin A., Borovoi A., Kustova N., Reichardt J. Power laws for backscattering by ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. 2017. V. 25, N 19. P. 22341–22346.
 28. 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. 51, N 9. P. 958–964.
 29. 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.

V.A. Shishko, I.D. Bryukhanov, E.V. Nie, N.V. Kustova, D.N. Timofeev, A.V. Konoshonkin. **Algorithm of retrieving microphysical properties of cirrus clouds from Mueller matrices.**

The paper presents the algorithm of interpreting the light backscattering matrices (BSM) that were obtained by the unique high-altitude polarization lidar of NR TSU while sounding cirrus clouds. The microphysical properties of cirrus clouds, i.e., size, spatial orientation, shape, and percentage of different particles based on BSMs calculated within physical optics approximation were estimated.