

**Б.В. Кауль, А.Л. Кузнецов, И.В. Самохвалов**

### **ПРОЯВЛЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ РАССЕЯНИЯ СВЕТА В АЭРОЗОЛЬНЫХ СЛОЯХ СТРАТОСФЕРЫ**

Приводятся результаты измерений матриц обратного рассеяния (МОР) посредством лидара с управляемой поляризацией лазерного излучения, приспособленного для измерения всех параметров Стокса рассеянного излучения на длине волны  $\lambda = 532$  нм. Определяются направление преимущественной ориентации и степень ориентированности частиц, для чего используются свойства МОР для модели ансамбля, состоящего из осесимметричных вытянутых частиц (ОВЧ). Высказано предположение, что в аэрозольном слое, МОР которого не укладывается в модель ОВЧ, анизотропия рассеяния вызвана двойным лучепреломлением.

Ранее нами была проиллюстрирована возможность определения направления преимущественной ориентации кристаллических облачных частиц [1] на основе лидарных измерений матриц обратного рассеяния (МОР). В этом сообщении мы обсудим некоторые результаты измерений МОР, которые дают основание предположить, что в отдельных случаях поляризационные лидарные измерения позволяют обнаружить в стратосфере кристаллические частицы не водного происхождения.

Идентификация различных типов частиц основывается на анализе соотношений между элементами МОР, которые, в свою очередь, определяются через элементы  $s_{ij}$  матрицы преобразования амплитуд (МПА) матричным уравнением [2]

$$\mathbf{M} = \mathbf{U}(\mathbf{S} \times \mathbf{S}^*)\mathbf{U}^{-1}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{M}$  – матрица рассеяния (4×4) для интенсивностей (матрица Мюллера);  $\mathbf{S}$  – матрица преобразования (2×2) амплитуд электромагнитного поля;  $\mathbf{U}$  – унитарная матрица (4×4) [1, 2]. Символом  $\times$  обозначено кронекеровское произведение матриц.

Явные выражения для элементов матрицы Мюллера (через элементы МПА) можно найти, например, в [3], где также видно, что для рассеяния назад всегда выполняется условие  $s_{12} + s_{21} = 0$  и вследствие этого для недиагональных элементов МОР в общем случае

$$M_{ij} = M_{ji}, \text{ если } i \neq 3 \text{ или } j \neq 3,$$

$$M_{ij} = -M_{ji}, \text{ если } i = 3 \text{ или } j = 3.$$

Для нижеследующего анализа экспериментальных МОР целесообразно привести вид МОР для частиц, имеющих ось симметрии и перпендикулярную ей плоскость зеркальной симметрии. В этот тип осесимметричных вытянутых частиц (ОВЧ) попадают наиболее распространенные кристаллические ледяные частицы в виде игл и гексагональных столбиков. Кроме того, сюда же попадают осесимметричные пластины.

При описании рассеяния света на частицах этого типа в системе координат, связанной с частицей так, что ось симметрии частицы лежит в плоскости референции, недиагональные элементы МПА обращаются в нуль (плоскостью референции является плоскость  $xoz$ , причем направление  $oz$  совпадает с направлением волнового вектора падающей на частицу электромагнитной волны). Вследствие этого принимают нулевые значения все элементы  $M_{ij}$ , содержащие в качестве множителя элементы МПА  $s_{12}$  или  $s_{21}$ , и МОР принимает вид

$$\mathbf{M}(0) = \begin{pmatrix} a & b & 0 & 0 \\ b & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & -d \\ 0 & 0 & d & c \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $a = \frac{A_2 A_2^* + A_1 A_1^*}{2}$ ,  $b = \frac{A_2 A_2^* - A_1 A_1^*}{2}$ ,  $c = \frac{A_2 A_1^* + A_1 A_2^*}{2}$ ,  $d = \frac{i(A_2 A_1^* - A_1 A_2^*)}{2}$ . Здесь и далее мы принимаем обозначения для элементов МПА  $s_{11} = A_2$ ,  $s_{22} = A_1$ ,  $s_{13} = A_3$ ,  $s_{21} = A_4$ , что соответствует обозначениям, принятым в [3].

В системе координат, повернутой вокруг направления распространения излучения на угол  $\alpha$ , МОР получается преобразованием

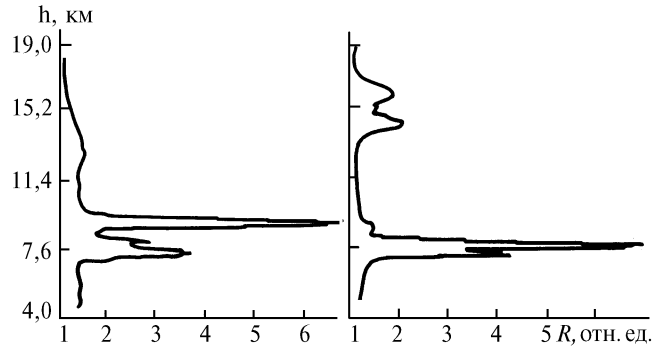
$$\mathbf{M}(\alpha) = \mathbf{R}(\alpha)\mathbf{M}(0)\mathbf{R}(\alpha), \quad (3)$$

где  $\mathbf{R}(\alpha)$  – оператор вращения. Явный вид оператора приводился нами в [1]. В [4] дан вид МОР для ансамбля полидисперсных ОВЧ, имеющих преимущественную ориентацию с некоторым симметричным распределением по углу ориентации возле моды  $\alpha_0$ . Матрица имеет следующий вид:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \bar{a} & k_1 \bar{b} \cos 2\alpha_0 & -k_1 \bar{b} \sin 2\alpha_0 & 0 \\ k_1 \bar{b} \cos 2\alpha_0 & \frac{\bar{a} - \bar{c}}{2} + k_2 \frac{\bar{a} + \bar{c}}{2} \cos 4\alpha_0 & -k_2 \frac{\bar{a} + \bar{c}}{2} \sin 4\alpha_0 & k_1 \bar{d} \sin 2\alpha_0 \\ k_1 \bar{b} \sin 2\alpha_0 & k_2 \frac{\bar{a} + \bar{c}}{2} \sin 4\alpha_0 & \frac{\bar{c} - \bar{a}}{2} + k_2 \frac{\bar{a} + \bar{c}}{2} \cos 4\alpha_0 & -k_1 \bar{d} \cos 2\alpha_0 \\ 0 & k_1 \bar{d} \sin 2\alpha_0 & k_1 \bar{d} \cos 2\alpha_0 & \bar{c} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Здесь  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{c}$ ,  $\bar{d}$  имеют смысл усредненных по полидисперсному ансамблю величин, введенных в выражение (2);  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты, зависящие от вида функции распределения по углам ориентации. При равномерном распределении они обращаются в нуль, и матрица (4) становится диагональной. При  $\alpha_0 = 0$  или  $\pi/2$ , (4) принимает вид матрицы (2).

Используем известные, в том числе изложенные выше, свойства МОР для интерпретации одного из ранее полученных результатов.



На рисунке слева представлен вертикальный профиль отношения общего обратного рассеяния к молекулярному обратному рассеянию, полученный в октябре 1991 г. Справа приведен профиль той же величины, полученный 11 июля 1991 г. – это дата первого обнаружения впоследствии стабильно существовавшего (даты обнаружения 16.07; 24.07; 27.08; 26.09; 30.09) слоя повышенного рассеяния на высотах между 13 и 16 км. Поляризационные характеристики обратного рассеяния света этим слоем были нами ранее описаны в [5]. Нормированная МОР слоя диагональна, и абсолютные значения ее элементов близки к единице. Это указывает на капельную структуру ансамбля частиц.

Вообще говоря, подобное поведение МОР возможно у ансамбля осесимметричных пластин, нормали которых ориентированы вдоль направления зондирования. Это утверждение почти очевидно, так как из соображения симметрии ясно, что у таких частиц недиагональные элементы МПА равны нулю. В то же время из общего вида МОР для ансамбля из  $n$  частиц следует соотношение

$$M_{11} - M_{22} = \sum_{i=1}^n (A_3 A_3^*)_i. \quad (5)$$

Квадратичная форма, стоящая в его правой части, будет равна нулю, если равен нулю каждый член суммы. Так будет, если нормали всех частиц ориентированы строго вдоль направления зондирования. Но естественный флаттер нарушает ориентацию, и для пластин, нормали которых расположены не в плоскости референции или не в плоскости, к ней ортогональной, элемент  $A_3$  будет отличаться от нуля. Вследствие этого из (5) следует

$$M_{11} > M_{22} \quad (6)$$

и матрица абсолютных значений  $|M_{ij}|$  будет отличаться от единичной.

Менее очевиден результат, полученный в [6], где показано, что при рассеянии на ансамбле цилиндрических частиц, имеющих радиус 10 мкм и длину, равномерно распределенную в интервале [30, 50] мкм, при ориентации осей цилиндров в горизонтальной плоскости вблизи некоторого выбранного горизонтального направления, характер поляризации рассеянного излучения качественно аналогичен рассеянию на сферах. Имея в виду (5) и приведенные в [6] выражения для МПА цилиндрических частиц, можно прийти к заключению, что для рассмотренных объектов при любом повороте вокруг направления зондирования выполняется, по крайней мере приближенно, условие

$$A_1 = -A_2. \quad (7)$$

Вероятно, это условие нарушается при наклоне оси цилиндра относительно горизонтальной плоскости, так как расчеты, выполненные там же [6] для ансамбля цилиндрических частиц того же размера, но имеющих наклон осей  $45^\circ$ , дают качественно совершенно иное поведение параметров Стокса. Естественно допустить, что для реальных ансамблей вытянутых частиц имеется некоторое распределение углов наклона относительно горизонтальной плоскости и соотношение (6) также выполняется. Вследствие сказанного, можно утверждать, что достаточно надежно установлена капельная структура (вулкан Пинатубо) происхождения которого наводит на мысль о его вулканическом (вулкан Пинатубо) происхождении.

Рассмотрим аэрозольную ситуацию, представленную на рисунке слева, где можно видеть два хорошо выраженных слоя с максимумами на высотах 7,6, 9,3 км и слабо выраженный ( $R = 1,5$ ) слой, расположенный в интервале высот от 10 до 16 км. Нормированная МОР последнего слоя диагональна и имеет следующие значения элементов:  $m_{11} = 1$ ;  $m_{22} = 0,97$ ;  $m_{33} = m_{44} = -0,97$ . Абсолютная величина ошибки измерений элементов нормированной матрицы оценивается нами значением  $\pm 0,04$ . Такой вид матрицы и высоты расположения слоя дают основание предполагать, что это все тот же капельный, возможно, вулканогенный слой. Нормированные МОР двух других слоев имеют следующие значения:

$$m(h = 7,6 \text{ км}) = \begin{pmatrix} 1 & 0,39 & 0 & 0 \\ 0,39 & 0,81 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,60 & -0,31 \\ 0 & 0 & -0,31 & -0,38 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$m(h = 9,3 \text{ км}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,62 & 0 & 0,125 \\ 0 & 0 & -0,55 & 0,32 \\ 0 & 0,125 & -0,32 & -0,15 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

Матрица слоя  $h = 7,6$  км может быть описана моделью ОВЧ-матрицы (2), (4). Из (4) следует

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \operatorname{arccctg} \frac{m_{21}}{m_{31}} = \frac{1}{2} \operatorname{arccctg} \frac{m_{43}}{m_{42}}, \quad (10)$$

откуда получаем два главных значения  $\alpha_0 = 0$  и  $\alpha_0 = \pi/2$ . Из результатов [4, 6] следует, что для цилиндров входящие в выражение элементов МОР (2), (4) величины  $b$  и  $d$  отрицательны, когда ось цилиндра расположена в плоскости референции, и положительны, когда ось цилиндра перпендикулярна ей. В матрице (8) реализуется последний случай, следовательно,  $\alpha_0 = \pi/2$ .

Если распространить этот результат на другие ОВЧ, то получается, что вследствие того, что в (8)  $b > 0$  и  $d > 0$ , оси частиц наблюдавшегося слоя были преимущественно ориентированы перпендикулярно оси  $x$  поляризационного базиса лидара, что примерно соответствует направлению линии Восток – Запад. Кроме того, как показано в [4], можно определить параметр  $k_2$ , характеризующий степень ориентации частиц от отсутствия таковой ( $k_2 = 0$ ) до полной ориентации ( $k_2 = 1$ ). Из соотношения

$$k_2 = \frac{m_{22} + m_{33}}{(m_{11} + m_{44})\cos 4\alpha_0} \quad (11)$$

получим для матрицы (8)  $k_2 = 0,33$ .

Рассмотрим матрицу (9). Из (4) видно, что одновременное равенство нулю элементов  $m_{12}$  и  $m_{13}$  означает их нулевые значения для любого положения плоскости референции (поляризационного базиса лидара). Это общее свойство МОР, а не только для модели ОВЧ. В рамках же последней одновременное равенство нулю элементов  $m_{12}$  и  $m_{13}$  может быть вследствие того, что  $k_1 = 0$  или  $b = 0$ , либо то и другое вместе. Равенство нулю параметра  $k_1$  означает хаотическую ориентацию и в рамках модели ОВЧ должно приводить к диагональной МОР. Но в матрице (9) ненулевые значения элементов  $m_{24}$  и  $m_{34}$  указывают на наличие выделенного направления, а именно  $\alpha_0 = 10,5^\circ$ ,  $k_2 = 0,11$ . Поворот поляризационного базиса лидара вокруг направления зондирования на такой угол должен приводить к тому, что элементы  $m_{24}$  и  $m_{42}$  становятся нулевыми, а модуль элементов  $m_{34}$ ,  $m_{43}$  принимает максимальное значение.

Из сказанного следует, что, оставаясь в рамках модели ОВЧ, для объяснения матрицы (9) нужно положить  $\bar{b} = 0$ . Величина  $\bar{b}$  представляет собой сумму

$$\bar{b} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (A_2 A_2^* - A_1 A_1^*)_i, \quad (12)$$

где  $n$  – число частиц в единице объема;  $A_1$  и  $A_2$  – элементы МПА, записанные для каждой частицы в системе координат, связанной с этой частицей так, что  $A_3^i = A_4^i = 0$ . Сумма (12) может равняться нулю, в частности, по причине равенства нулю каждого слагаемого в отдельности. В этой связи сразу всплывает условие (7) для крупных цилиндрических частиц. Но оно должно приводить к диагональной матрице с абсолютными значениями элементов, близкими к единице, что противоречит экспериментально измеренной матрице. Как уже упоминалось, условие (7) выполняется и для осесимметричных пластин, ориентированных нормальными вдоль направления зондирования. Можно было бы показать, что наличие случайного флаттера оставляет МОР диагональной, а существование выделенного наклона по отношению к горизонтальной плоскости привело бы к ненулевым значениям элементов  $m_{12}$  и  $m_{13}$  (однако это не укладывается в рамки нашей статьи). Отвергнув условие (7) и гипотезу симметричных пластин и оставаясь в рамках модели ОВЧ, следует признать, что сумма (12) равна нулю в среднем. Ансамбль ОВЧ, для которых бы выполнялось это равенство, представляется довольно странным, поскольку должен был бы содержать частицы, для которых в системе координат, связанной с частицей, выполнялось бы  $|A_1| < |A_2|$  для одних частиц и  $|A_1| > |A_2|$  для других. В то же время если признать найденное значение  $\alpha_0 = 10,5^\circ$  связанным с ориентацией осей частиц, то в рамках модели цилиндрических частиц следовало бы ожидать преимущественного выполнения  $|A_1| < |A_2|$ .

Столкнувшись с описанными только что противоречиями в интерпретации экспериментальной МОР в рамках модели ОВЧ или симметричных пластин, рискнем высказать предположение, что наличие некоторого выделенного направления, определяемого из соотношения элементов  $m_{42}$  и  $m_{43}$ , связано не с геометрией частиц, а с их оптической анизотропией. К этому

предположению побуждает просматриваемая на рисунке возможная зависимость генезиса слоя на высоте 9,3 км от вышерасположенного и предположительно вулканогенного слоя. Длительное существование последнего в капельном виде указывает на возможное наличие таких соединений, как серная кислота и аммиак, что, в свою очередь, является предпосылкой для образования сульфата аммония, который, как известно, при температуре ниже минус 49°C является сегнетоэлектриком, а кислый сульфат аммония становится таковым уже при температуре ниже минус 3°C. Если предположить, что слой на высоте 9,3 км состоит из частиц сульфата аммония, то выделенное направление можно связать с преимущественной ориентацией постоянного дипольного момента частиц в электрическом поле Земли, имеющем по какой-либо причине градиент потенциала в данном направлении. Тогда равенство нулю элементов  $m_{12}$  и  $m_{13}$  может быть следствием изометричности частиц, а ненулевые значения элементов  $m_{42}$  и  $m_{43}$  могут быть объяснены фазовым сдвигом между компонентами электрического поля вследствие двойного лучепреломления.

В предложенном объяснении экспериментального факта привлекает возможность применения лидара для исследования процессов трансформации газовых загрязнений в аэрозольную фазу. Но мы не можем высказать уверенности, что это объяснение является единственно возможным. В частности, в рецензии на статью нам было указано на возможность объяснения матрицы (9) моделью ОВЧ, если допустить, что величины  $|m_{21}|$  и  $|m_{31}|$  не точно равны нулю, а имеют некоторые значения, не превышающие ошибки их экспериментального определения. Надеемся, что дальнейшие исследования внесут ясность в этот вопрос.

Авторы выражают признательность Д.Н. Ромашову и Р.Ф. Рахимову за предоставленную возможность ознакомления с материалами неопубликованной статьи.

Исследования, нашедшие отражение в этой статье, ведутся при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: проект 93 – 05 – 9376.

1. Кауль Б. В., Кузнецов А. Л., Половцева Е. Р., Самохвалов И. В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 4. С. 423 - 430.
2. Потехин В. А., Татарин В. Н. Теория когерентности электромагнитного поля. М.: Связь, 1978. 208 с.
3. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: ИЛ, 1961. 536 с.
4. Ромашов Д. Н., Рахимов Р. Ф. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 8. С. 891–898.
5. Кауль Б. В., Кузнецов А. Л., Половцева Е. Р., Самохвалов И. В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 6. С. 605 - 607.
6. Ромашов Д. Н., Рахимов Р. Ф. // Оптика атмосферы и океана. 1991. Т. 4. № 10. С. 1011 - 1016.

Институт оптики атмосферы  
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию  
30 мая 1993 г.

**B. V. Kaul, A. L. Kuznetsov, I. V. Samokhvalov. Effect of Light Scattering Anisotropy Observed in the Stratospheric Aerosol Layers.**

Measurement results on the backscattering phase matrices (BPM) obtained with a lidar facility in which the polarization of sounding radiation can be varied so that it enables measurements of all the Stokes parameters of scattered radiation at the wavelength  $\lambda = 532$  nm are presented in this paper. Based on some properties of BPM for a model ensemble of axially symmetric stretched particles (ASSP), the direction of preferred orientation and the degree of orientation of particles is determined. Since not all the observational results agree with the ASSP model, light scattering anisotropy is assumed to be caused by birefringence in such an aerosol layer.