

Б.В. Кауль, А.Л. Кузнецов, Е.Р. Половцева

## ИЗМЕРЕНИЯ МАТРИЦ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ЛИДАРМ

В результате измерений параметров Стокса рассеянного излучения, при четырех состояниях поляризации излучения лазера, определялись матрицы обратного рассеяния.

Установлено, что в облаках верхнего яруса часто наблюдается анизотропия рассеяния, что проявляется через наличие ненулевых значений недиагональных элементов матрицы рассеяния.

Исследование озонного цикла в атмосфере предполагает изучение процессов взаимодействия озона с другими компонентами атмосферы, в частности аэрозолем, как одним из факторов, который может оказывать существенное влияние на величину равновесной концентрации озона. Это влияние проявляется, во-первых, через зависимость потока солнечной радиации от содержания аэрозолей. Во-вторых, первичная субстанция аэрозольных частиц или адсорбированные на них молекулы газов могут вступать в химическое взаимодействие с озоном. В этом случае существенное значение может иметь агрегатное состояние вещества (капли, правильные кристаллы или конгломераты, образовавшиеся в результате коагуляции частиц). Хорошим оперативным средством наблюдения аэрозольного содержания в атмосфере с получением информации о форме частиц является лидар, в котором реализован принцип измерения параметров Стокса рассеянного излучения. Наиболее интересным применением подобного лидара является изучение облачности верхнего яруса, включая возможные проявления стратосферных полярных облаков.

В лидарных исследованиях аэрозолей часто применяется методика измерения параллельного  $I_{\parallel}$  и кроссполяризованного  $I_{\perp}$  компонентов интенсивности рассеянного излучения. Их отношение  $I_{\perp}/I_{\parallel}$  интерпретируется как некая мера несферичности частиц и не вполне оправдано определяется термином «деполяризация», поскольку этот термин введен ранее [1] как величина

$$d = 1 - p,$$

где  $p$  — степень поляризации, которая определяется через параметры Стокса следующим соотношением:

$$p = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}/I.$$

По существу, в измерениях  $I_{\perp}$  и  $I_{\parallel}$  определяется параметр Стокса  $Q = I_{\parallel} - I_{\perp}$  и при условии

$$U = V = 0 \tag{1}$$

деполяризация представляется соотношением

$$d = 2I_{\perp} / (I_{\parallel} + I_{\perp}). \tag{2}$$

Для аэрозольных ансамблей из хаотически ориентированных частиц неправильной формы условие (1) выполняется. Совершенно иначе обстоит дело в ансамблях кристаллических частиц, в частности в цирусах. Невыполнение условия (1) было отмечено еще в [2, 3]. В 1988 г. нами начат новый цикл измерений параметров Стокса оптических лидарных откликов при облучении среды линейно поляризованным светом. Параметры нашего лидара представлены в каталоге [4]. По результатам измерений 1988–1990 гг. проведена классификация по пяти типам рассеивающих ансамблей, которые отличаются различными сочетаниями параметров Стокса [5, 6].

В 1990–91 гг. нами проведен цикл измерений, в которых параметры Стокса измерялись при следующих четырех значениях нормированных векторов Стокса излучения лазера ( $\mathbf{S}^0 = \{1, q^0, u^0, v^0\}$ ):

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_1^0 &= \{1, 1, 0, 0\}, \quad \mathbf{S}_2^0 = \{1, -1, 0, 0\}, \\ \mathbf{S}_3^0 &= \{1, 0, 1, 0\}, \quad \mathbf{S}_4^0 = \{1, 0, 0, 1\}. \end{aligned}$$

Таким образом, удалось измерить полные матрицы обратного рассеяния для большинства ранее классифицированных типов рассеивающих ансамблей. В этом сообщении мы приводим некоторые предварительные результаты.

Из 39 исследованных проявлений аэрозольных слоев на высотах 7÷11 км 21 случай мы отнесли к первому (четыре случая) и второму (17 случаев) типам рассеяния. Для них выполняется условие (1) и справедливо отношение (2). Остальные 14 случаев отнесены к четвертому и пятому типам, в которых либо параметр  $v$ , либо  $u$  и  $v$  не равны нулю. Заметим, что классификация проведена по значениям параметров Стокса, которые получаются при поляризации зондирующего излучения, соответствующей вектору  $\mathbf{S}$ .

Пример одного цикла измерений для определения матриц обратного рассеяния, проведенный 11.07.91, представлен на рис. 1. Слой кристаллических частиц расположен на высотах между 7 и 8 км. Отношение рассеяния  $R = (\sigma_R + \sigma_a) / \sigma_R$  приведено в правых частях рисунков. Его среднее значение равно 10. Слева представлены профили нормированных на интенсивность параметров Стокса ( $q = Q/I$ ;  $u = U/I$ ;  $v = V/I$ ). Согласно рис. 1,  $a$ , слой относится к четвертому типу введенной ранее классификации ( $u = 0, v \neq 0$ ). Анализ последующих рисунков позволяет видеть, что разница между четвертым и пятым типом достаточно условна и зависит от ориентации поляризационного базиса лидара.

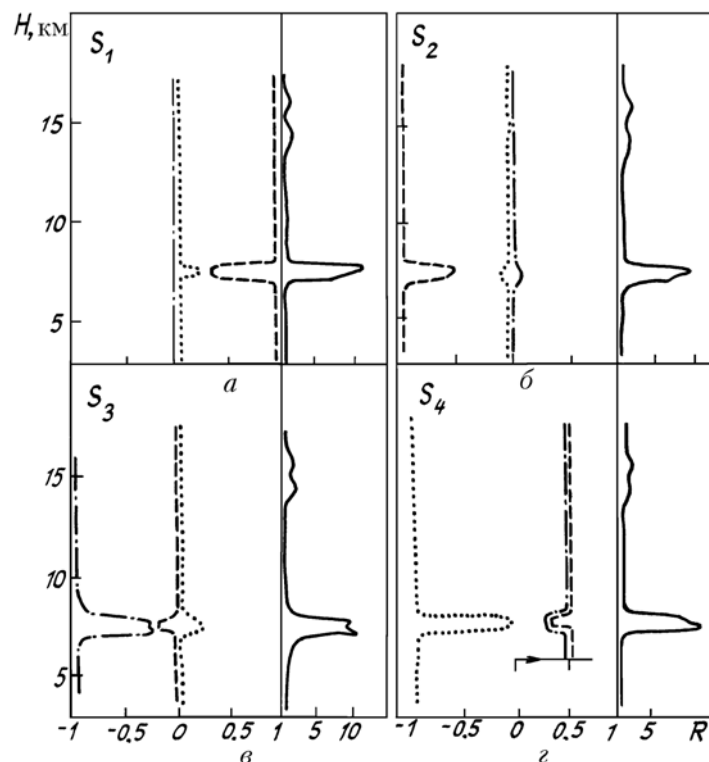


Рис. 1. Вертикальные профили параметров Стокса  $q$  (штриховая);  $u$  — штрихпунктирная;  $v$  — точки; сплошная линия — отношения рассеяния  $R$ , полученные 11.07.91 г. при состояниях поляризации лазерного излучения  $\mathbf{S}_1^0$  ( $a$ ),  $\mathbf{S}_2^0$  ( $b$ ),  $\mathbf{S}_3^0$  ( $c$ ),  $\mathbf{S}_4^0$  ( $d$ )

Нормированная на элемент  $A_{11}$  матрица обратного аэрозольного рассеяния  $a_{ij}$  имеет следующие элементы:

$$a_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & -0,12 & -0,01 & 0,06 \\ -0,12 & 0,40 & -0,02 & 0,10 \\ 0,01 & 0,02 & -0,21 & 0,20 \\ 0,06 & 0,10 & -0,20 & -0,20 \end{pmatrix}.$$

Элементы матрицы безразмерны. Абсолютную погрешность измерения элементов мы оцениваем значением  $\pm 0,04$ . Для вычисления абсолютных значений элементов матрицы каждый из них нужно умножить на  $A_{11}$ .

$$A_{11} = \sigma_R(\bar{R}-1),$$

где  $\sigma_R$  — коэффициент обратного рассеяния молекулярного компонента на высоте, соответствующей высоте слоя;  $\bar{R}$  — среднее в эксперименте значение отношения рассеяния, которое определено выше.

Характерными особенностями приведенного примера являются заметная эллиптизация линейно поляризованного излучения и почти полная деполаризация излучения с круговой поляризацией. Это интересно тем, что в [7] предсказывается такая ситуация при рассеянии на частично ориентирован-

ных цилиндрах конечной длины, если поперечные размеры цилиндров сравнимы с длиной волны. Очевидно, эта модель может быть перенесена на призмы сопоставимых размеров. Тогда представляется возможность получить информацию о размерах и направлении ориентации кристаллов, что, в свою очередь, связано с физическими условиями в слое, их содержащем. Более детальное обсуждение этого вопроса мы предполагаем провести в ближайшем будущем.

Определенный интерес представляет достаточно длительное проявление аэрозольных слоев на высотах 14,5 и 15,5 км. Дата 11.07.91 — это момент первого их обнаружения. Предыдущая дата, где их еще не было, — 7.07.91 г. Затем мы их обнаруживали до октября. Причем начиная с августа вместо двух слоев проявлялся один в границах от 14 до 16 км. Матрица рассеяния все это время оставалась диагональной. Абсолютные значения элементов матрицы  $a_{22}$ ,  $a_{33}$ ,  $a_{44}$  держались на уровне 0,95, отношение рассеяния в пределах 1,5÷2. По-видимому, это капельные образования. И хотя абсолютные значения указанных элементов должны были бы принять значения 1,0, мы могли этого не заметить на фоне рэлеевского рассеяния. Другое возможное объяснение заключается в том, что частицы — несферические, но размеры их много меньше длины волны. Так что рассеяние на них остается рэлеевским. Начиная с конца сентября нами эпизодически, из-за неблагоприятных для наблюдений условий, отмечался стратосферный слой в границах 19–22 км. Деполяризация в нем также отсутствовала. Значение  $R$  составляло 2,5÷3. В даты 30 и 31 октября 1991 г. нами отмечен один слой в границах 15,5÷21 км с двумя максимумами на высотах 17,5 и 19 км. И 12.11.91 г. отмечен только стратосферный слой в границах 20÷23,5 км с максимумом на высоте 21 км при  $R = 3÷3,5$ .

1. Born M., Wolf E. Principles of Optics. Pergamon Press. Paris—Frankfurt. 1964.
2. Houston J.P., Carswell A.I. //Appl. Opt. 1978. V. 17. № 4. p. 614–620.
3. Zuev V.E., Kaul B.V., Kozlov N.V., Samokhvalov I.V. //9-th International Laser Radar Conf. Abstr. FRG. Munich, July 1979.
4. Second International Lidar Researchers Directory. Comp, by M. P. Mc. Cormick, Atmospheric Science Division NASA, Langley Research Center, Hampton, Virginia, 23665. 1989. P. 64.
5. Кауль Б.В., Краснов О.А., Кузнецов А.Л., Самохвалов И.В. //Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 4. С. 394–403.
6. Kaul B.V., Krasnov O.A., Kuznetsov A.L., Samokhvalov I.V. //15-th International Laser Radar Conf. Abstr.. USSR. Tomsk, 1990.
7. Рахимов Р.Ф., Ромашов Д.Н. //Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 10. С. 1011–1016.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
24 марта 1992 г.

**B.V. Kaul, A.L. Kuznetsov, E.R. Polovtseva. Measurements of the Backscattering Phase Matrices of Crystal Clouds with a Polarization Lidar.**

The backscattering phase matrices of crystal clouds were determined based on measurements data on the Stokes parameters of scattered radiation obtained at four polarization states of sounding laser radiation. It was revealed from these measurements that anisotropy of scattering is often observed in the upper level clouds which results in non zero values of off-diagonal elements of the scattering phase matrix.