

РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 535.2; 551.501

Б.В. Кауль, Д.Н. Ромашов, И.В. Самохвалов

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ МАТРИЦ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ

Сравниваются матрицы обратного рассеяния кристаллических облаков, полученные посредством поляризационного лидара «Стратосфера 1М», с матрицами обратного рассеяния, рассчитанными для полидисперсных ансамблей частично ориентированных цилиндров льда.

Показано, что модель удовлетворительно описывает некоторые тенденции, наблюдавшиеся в эксперименте, и, в частности, дает хорошее совпадение значений направления преимущественной ориентации частиц и параметра, характеризующего степень или остроту ориентированности.

При распространении оптического излучения через кристаллическое облако коэффициенты рассеяния и экстинкции могут сильно зависеть от состояния поляризации и направления падения излучения [1, 2]. Это происходит из-за того, что оптически анизотропные, вследствие анизометрии, кристаллические частицы могут иметь преимущественную ориентацию в пространстве. Вследствие этого облако, как целое, становится оптически анизотропным.

Ранее нами было показано, как посредством лидарных измерений могут быть оценены направление преимущественной ориентации осей частиц и некоторый параметр k , характеризующий степень или остроту ориентации [3, 4]. Направление преимущественной ориентации характеризуется углом α , отсчитываемым, например, от оси x поляризационного базиса лидара [5]. При известной ориентации лидара в пространстве это направление может быть приведено к геодезической системе координат. Степень ориентированности k является параметром распределения

$$f(\varphi, \alpha, k) = \exp [k \cos 2(\varphi - \alpha)] / \pi I_0(k), \quad (1)$$

известного как распределение Мизеса [6] и характеризующего разброс ориентаций осей частиц возле моды α , т.е. направления преимущественной ориентации. В формуле (1) $I_0(k)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода и нулевого порядка. Распределение (1) имеет следующие особенности: если $k \rightarrow 0$, то $f \rightarrow 1/\pi$ на интервале $[-\pi/2, \pi/2]$, а если $k \rightarrow \infty$, то $f \rightarrow \delta(\varphi - \alpha)$. Практически при $k \approx 10$ ансамбль частиц строго ориентирован вдоль направления α .

Коль скоро параметры α и k могут быть определены экспериментально, уместен вопрос, как это может быть использовано для оценок условий распространения излучения при различных углах падения излучения на среду или как влияет поляризация на коэффициенты рассеяния и ослабления.

Возможный путь для ответа на поставленный вопрос состоит в расчете матриц для моделей ансамблей облачных частиц с заданными параметрами ориентированности. Разумеется, чтобы получить матрицы рассеяния, как можно более соответствующие реальным облачным ансамблям, необходимо учитывать многообразие форм частиц и распределений по размерам. Предпосылки для подобных расчетов в настоящее время имеются. В научной литературе описаны различные приближения для расчета матриц рассеяния на пластинах и гексагональных столбиках. Составление матриц рассеяния для полидисперсных ансамблей таких частиц, в основном, дело математической техники, хотя и не тривиальной и весьма трудоемкой.

Пока такая работа не выполнена, можно попытаться выявить некоторые закономерности рассеяния на анизотропных облачных ансамблях, используя их упрощенные модели. В [7–9] были представлены расчеты матриц рассеяния для полидисперсных ансамблей цилиндрических частиц льда, которые, как мы полагаем, в какой-то мере должны отражать закономерности

сти рассеяния на гексагональных столбиках. Вопрос состоит в том, в какой мере. Для ответа на этот вопрос было бы желательно сравнить предсказания расчетов с результатами эксперимента.

В настоящее время мы располагаем возможностью сравнить экспериментально измеренные матрицы обратного рассеяния с расчетными, выполненными для ансамблей цилиндрических частиц с заданными параметрами ориентации. С этой целью проведены расчеты матриц обратного рассеяния упомянутых ансамблей для фиксированных углов падения γ зондирующего пучка на облачный слой в пределах от 0 до 90° с шагом 10°. Направление преимущественной ориентации α задавалось в пределах от 0 до 180° с шагом 3°, а параметр распределения Мизеса k в пределах от 0 до 3 с шагом 0,5.

Поиском по этой трехмерной сетке параметров находилось значение матрицы, наиболее близко совпадающей со сравниваемой экспериментальной. Критерием совпадения считался минимум невязки

$$\delta = \left(\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (m_{ij} - m'_{ij})^2 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где m_{ij} , m'_{ij} – соответственно экспериментальные и расчетные значения элементов матрицы рассеяния, по которым производится сравнение.

Результаты сравнения для пяти матриц с заметно отличными от нуля недиагональными элементами можно видеть в таблице. Для каждой матрицы в верхней строке приведены значения, полученные в эксперименте. Причем во всех случаях зондирование проводилось вертикально вверх ($\gamma = 0$). Ближайшие модельные значения элементов матриц в двумерной сетке ($\gamma = 0$, k , α) приведены в третьей строке. Ближайшие значения в трехмерной сетке (γ , k , α) приведены во второй строке.

Результаты сравнения экспериментально измеренных (верхняя строка) и расчетных (две нижние строки) матриц обратного рассеяния

N матрицы	γ^0	k	α^0	m_{22}	m_{33}	m_{44}	m_{12}	m_{13}	m_{34}	m_{24}	m_{23}	δ
1	0	2,25	90	0,81	-0,60	-0,38	0,39	0,00	0,31	0,00	0,00	
	30	3,0	90	0,867	-0,639	-0,507	0,433	-0,002	0,125	-0,004	0,000	0,31
	0	2,5	90	0,752	-0,439	-0,192	0,174	0,007	0,123	-0,002	0,001	0,48
2	0	1,0	169,8	0,62	-0,55	-0,15	0,00	0,00	-0,32	-0,12	0,00	
	10	1,0	168,0	0,534	-0,468	-0,012	-0,040	-0,015	-0,294	-0,124	0,031	0,20
	0	1,0	168,0	0,513	-0,423	0,044	-0,005	-0,002	-0,297	-0,117	0,022	0,25
3	0	2,3	0	0,78	-0,55	-0,35	-0,43	0,00	-0,28	0,00	0,00	
	30	3,0	0	0,870	-0,636	-0,507	-0,433	-0,015	-0,125	-0,005	-0,00	0,37
	0	3,0	0	0,784	-0,408	-0,192	-0,181	0,009	-0,130	-0,013	-0,004	0,46
4	0	2,7	70,1	0,32	-0,10	0,58	0,56	0,38	-0,27	-0,20	0,21	
	60	3,0	75,0	0,362	0,005	0,643	0,471	0,273	-0,150	-0,087	0,320	0,37
	0	2,0	75,0	0,525	-0,367	0,107	-0,025	-0,013	-0,238	-0,135	0,138	1,16
5	0	-	172,6	0,65	-0,65	-0,35	-0,15	0,00	-0,10	-0,05	0,00	
	0	1,5	177	0,716	-0,593	-0,310	-0,090	-0,011	-0,086	-0,034	0,006	0,13
	0	1,5	177	0,716	-0,593	-0,310	-0,090	-0,011	-0,086	-0,034	0,006	0,13

Можно видеть, что во всех случаях, кроме матрицы N 5, ближе к экспериментальным матрицы, рассчитанные для наклонного падения зондирующего пучка на облачный слой ($\gamma \neq 0$). Впрочем, невязки отличаются не очень значительно, кроме одного случая. Если полученные невязки равномерно разбросать на все восемь сравниваемых элементов матрицы, то получится величина, близкая к ошибке измерений, оцененной экспериментально: $\delta = \pm 0,04$ [5]:

Мы не склонны считать, что лучшее совпадение матриц при $\gamma \neq 0$ является доказательством того, что существует преимущественный наклон частиц в реальном облаке, хотя и не исключаем такую возможность, особенно для матрицы N 4. Скорее можно предположить, что параметр γ выступает в качестве параметра подгонки, маскирующего несоответствие модели реальному облачному ансамблю частиц. Но заслуживает внимания тот факт, что

параметры ориентированности k и α мало зависят от варьирования параметра γ и неплохо совпадают с экспериментальными данными, кроме случая N 5, который рассмотрим особо, поскольку он, по-видимому, связан с проблемой ошибок измерений. В этом случае мы имеем минимальную невязку и совпадение по углу γ , но тем не менее экспериментальная матрица не удовлетворяет модели ансамбля осесимметричных частиц. Дело в том, что согласно вышеуказанной модели для такого ансамбля при $m_{22} = -m_{33}$ должно выполняться $m_{12} = 0$, а эксперимент дает ненулевое значение. Из равенства $m_{22} = -m_{33}$ следует также $k = 0$, т.е. отсутствие ориентации. В то же время угол преимущественной ориентации α , оцененный по соотношению элементов m_{12} и m_{13} , равен 180° (или, что то же, $\alpha = 0$), а оцененный по элементам m_{34} и m_{24} $\alpha = 165,3^\circ$ (в таблице стоит среднее значение). Противоречие устраняется, если m_{22} и m_{33} увеличить на величину средней ошибки измерений $\delta = 0,04$. Тогда оценка параметра степени ориентированности дает $k = 1,1$. Этот краткий анализ показывает, что когда параметры ориентированности приходится находить из малых разностей или отношения малых величин, то возможны большие ошибки. Ясно, что на существующей аппаратуре можно надежно оценивать параметры ориентации, если она достаточно хорошо выражена. Поэтому проблема повышения точности измерений как всегда актуальна.

Так же очевидно, что, пользуясь весьма упрощенной моделью ансамбля облачных частиц, мы не вправе ожидать хорошего количественного совпадения рассчитанных матриц обратного рассеяния с измеренными в эксперименте и на основании последних делать надежные предсказания оценок величин других углов рассеяния. Тем не менее, как показано выше, расхождения не очень большие. Это позволяет надеяться, что модель может отражать некоторые основные тенденции в поведении поля рассеянной радиации при ее распространении в оптически анизотропном облаке. В качестве примера рассмотрим одно следствие для случая рассеяния на ансамбле цилиндрических частиц, оси которых равномерно распределены в горизонтальной плоскости.

На рис. 1 показаны поверхности, изображающие вид функции $m_{12}(\theta, \varphi)$, т.е. элемента m_{12} нормированной матрицы для всех углов рассеяния при различных углах падения γ . Для сравнения с результатами лазерного зондирования, если не рассматривать бистатистические схемы, доступно сечение представленной поверхности $m_{12}(\theta, \varphi)$ при фиксированном $\theta = 180^\circ$, т.е. $m_{12}(180^\circ, \varphi)$. Но для того чтобы варьировать φ , нужно иметь возможность вращать вокруг оптической оси либо весь лидар, либо как целое его поляризационный базис. Ни то, ни другое в конструкции лидара не предусмотрено. Но лидар позволяет варьировать γ – угол падения лазерного пучка на облачный слой. Поэтому в семействе поверхностей $m_{12}(\theta, \varphi, \gamma)$ мы можем сравнить поведение точек $m_{12}(\pi, 0, \gamma)$.

На рис. 2 представлены результаты измерений нормированных параметров Стокса q при различных углах падения γ . Значения элемента m_{12} могут быть рассчитаны по этим данным. Для слоя на высоте 5,5–7,5 км при зондировании в зенит ($\gamma = 0$) выполняется $m_{12} = 0$, что соответствует отсутствию преимущественной ориентации по углу φ . При отклонении оптической оси от вертикали m_{12} возрастает, как и предсказывает модель, до некоторой положительной величины, которая, впрочем, существенно меньше модельной. Результаты сравнения можно видеть на рис. 3.

Существенно меньшие экспериментальные значения элемента m_{12} можно было бы предвидеть, если иметь в виду, что в реальном облаке ориентированные частицы составляют лишь долю, и возможно малую, от общего числа частиц. Ориентируются главным образом крупные анизометрические частицы, а изометрические и мелкие частицы ориентированы хаотически, и матрица рассеяния для них не зависит от угла падения, а значение элемента $m_{12}(\pi, 0)$ остается нулевым при любом γ .

Если предположить, что модель правильно отражает зависимость $m_{12}(\pi, 0)$ от γ , то различие между модельным и измеренным значениями можно использовать для определения долей, вносимых в коэффициент обратного рассеяния ориентированными и неориентированными компонентами ансамбля частиц. В частности, в рассматриваемом примере оценка показывает, что вклад ориентированного компонента составляет около 30 % от общего обратного рассеяния.

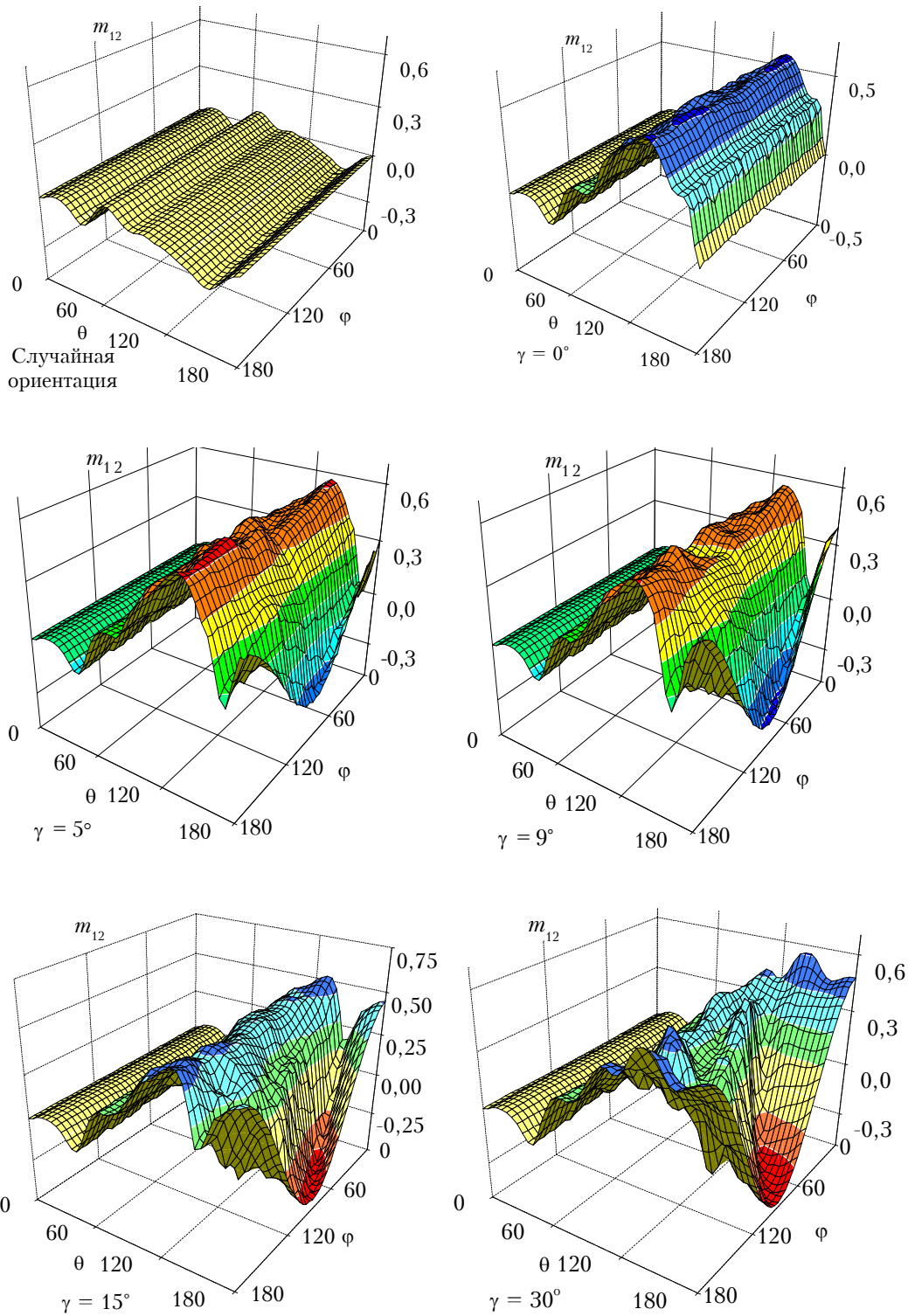


Рис. 1. Пространственное угловое поведение элемента матрицы рассеяния $m_{12}(\theta, \varphi)$ при различных γ – углах падения излучения на облачный слой

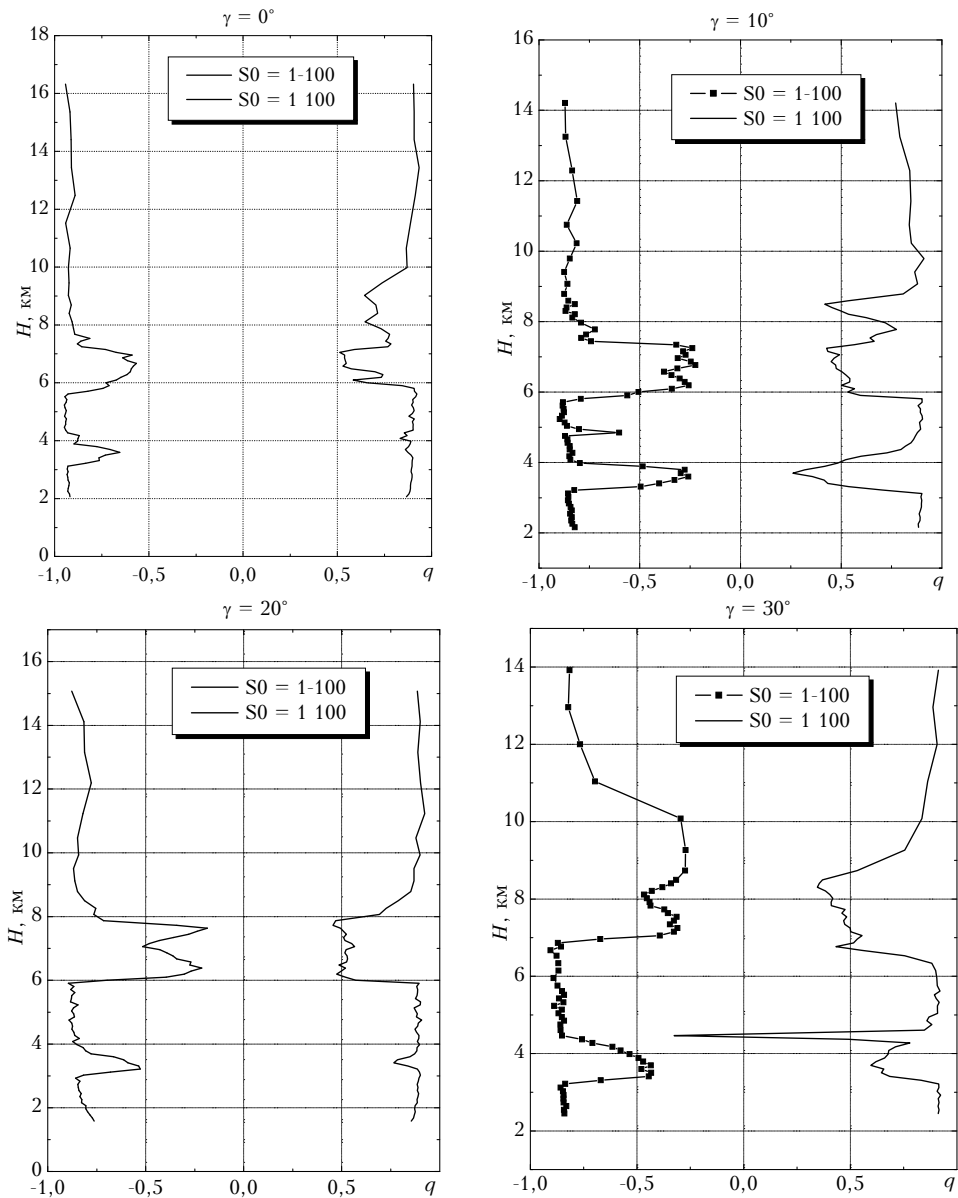


Рис. 2. Нормированные параметры Стокса q , измеренные при различных γ – углах отклонения оптической оси лидара от направления в зенит: параметры измерены при состоянии поляризации лазерного излучения $(1, -1, 0, 0)$ – кривые слева, $(1, 1, 0, 0)$ – кривые справа

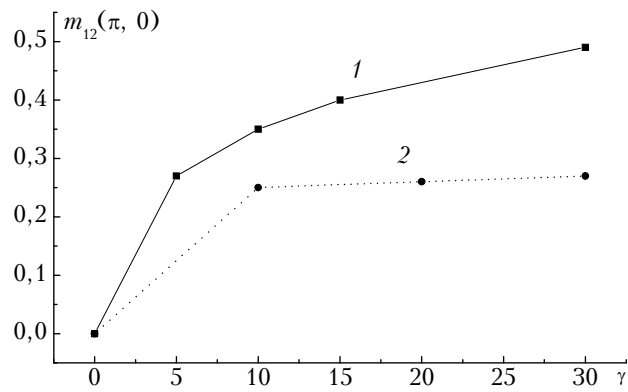


Рис. 3. Зависимость элемента $m_{12}(\pi, 0)$ от γ – угла падения на облачный слой. 1 – значения, рассчитанные для ансамбля цилиндрических частиц; 2 – экспериментальные для случая, представленного на рис. 2

В более общем плане параметры ориентированности и зависимости элементов матрицы обратного рассеяния от углов зондирования связаны с размерами частиц и могут быть использованы для их определения, например, как это показано в [10], для пластинчатых частиц. Эта возможность заслуживает детального анализа при разработке моделей ансамблей частиц, более приближенных к реальным облачным.

Предлагаемая нами упрощенная модель позволяет правильно оценивать параметры ориентированности α и k , так как она основана на достаточно общих соотношениях симметрии. Мы полагаем, что модель может быть использована, например, для первых, пусть и грубых, оценок влияния анизотропии оптических свойств облака на структуру поля многократного рассеяния.

1. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 200 с.
2. Кауль Б.В., Краснов О.А., Кузнецов А.Л., Половцева Е.Р., Самохвалов И.В., Стыкон А.П. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 4. С. 191–201.
3. Рахимов Р.Ф., Ромашов Д.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 8. С. 891–898.
4. Кауль Б.В., Кузнецов А.Л., Самохвалов И.В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 1. С. 11–17.
5. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Поляризационные лидарные измерения характеристик атмосферного аэрозоля // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2 / Под общей редакцией М.В. Кабанова. Томск: Спектр, 1997. 295 с.
6. Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука, 1978. 239 с.
7. Рахимов Р.Ф., Ромашов Д.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 3. С. 285–292.
8. Рахимов Р.Ф., Ромашов Д.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 6. С. 917–920.
9. Ромашов Д.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 1. С. 10–18.
10. Попов А.А., Шеффер О.В. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 4. С. 410–416.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск
Томский государственный университет

Поступила в редакцию
26 марта 1997 г.

B. V. Kaul, D. N. Romashov, I. V. Samokhvalov. Comparison of Experimental and Computed Backscattering Phase Functions for Crystalline Clouds.

The backscattering phase functions for crystalline clouds obtained by means of lidar «Stratosphera 1M» are compared with those calculated for polydispersion ensembles of partly oriented ice cylinders.

It is shown that the model describes satisfactorily some tendencies noticed in the experiment and, in particular, demonstrates a good coincidence of values of the particles preferential orientation and the parameter characterizing the extent or sharpness of the orientability.