

В.Ф. Терзи, Ф.С. Якупова, А.Г. Конохов, Л.В. Курт

**РАССЕЯНИЕ СВЕТА ВОДНОЙ КАПЛЕЙ:
СПЕКТРАЛЬНАЯ ЯРКОСТЬ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ ГЛОРИИ**

По формулам теории Ми выполнены расчеты двух первых элементов матрицы рассеяния света па водной капле с радиусом 10, 100 мкм и 0,5 мм, а также на полидисперсных системах сферических частиц. Расчеты выполнены для синего, голубого, зеленого, желто-зеленого, оранжевого, красного и пурпурного цветов видимого излучения. Приведены спектральные распределения индикатрис рассеяния в области глории (углы рассеяния 170–180°). Показано, что выявленные особенности степени поляризации излучения в области глории не могут быть объяснены ни в рамках интерференции лучей, ни в рамках существования поверхностных волн. Для полидисперсных систем выявлена зависимость углового положения глории и степени поляризации излучения в ней от модальных размеров и дисперсии распределения частиц в облаках.

Одним из перспективных направлений дистанционного исследования фазового состава облаков является использование поляризационных лазерных систем [1, 2]. Как отмечено в работе [2], успешное развитие поляризационных методов зондирования должно основываться на серьезном методическом обеспечении. Последнее может быть получено изучением количественных закономерностей поведения элементов матрицы рассеяния [3–6] в области обратного рассеяния. Наиболее важной особенностью рассеянного излучения облачными частицами в этой области является возникновение хорошо известного [3–5], но малоизученного явления глории [5]. Глорией называется явление возникновения вокруг тени, спроектированной на облако или слой тумана, разноцветных колец, похожих на дифракционные венцы, появляющиеся вокруг Солнца или Луны, когда они закрыты тонким слоем облаков [3].

Первые объяснения глории основывались на предположениях, что эти дифракционные венцы, характерные для рассеяния в переднюю полусферу, отражаются каким-то образом в заднюю полусферу. Однако натурные и лабораторные исследования свидетельствуют [3] о другом расположении цветов в глории, чем внутри венцов, а также о наличии сильной поляризации излучения в области глории.

В работе [3] было сделано правильное предположение о том, что необычное изменение интенсивности света, рассеянного вблизи направления назад, присутствует уже в диаграмме рассеяния отдельной капли. Хотя сделанные при этом попытки простого физического объяснения возникновения глории на основе интерференции между лучами света, испытавшими одно отражение от внутренней границы сферы (принцип Гюйгенса), осложняется не только отсутствием такого луча для показателя преломления $m = 1,33$ (см. [3]), но и наблюдаемыми в расчетах (см. рис. 1) разнообразными условиями поляризации рассеянного излучения в кольцах яркости, в отличие от предсказуемой отрицательной степени поляризации [3]. Как будет показано ниже, отношение яркости первого кольца к яркости строго назад также отличается от предсказуемых [3] значений $\sim 0,3 \div 0,8$.

Выполненный анализ расчетных данных [7, 9, 10] привел автора [8] к следующему выводу: для малых частиц $x \lesssim 100$ ($x = 2\pi r/\lambda$, r — радиус частицы, мкм, λ — длина волны, мкм) справедливо объяснение [3], а для больших частиц $x \sim 10^3 \div 10^4$ возникновение глории связывается с наличием поверхностных волн.

Авторы одной из последних монографий [5] по рассеянию света на частицах констатируют, что попятного объяснения глории до сих пор не найдено, так как ее появление связано с суммированием многих тысяч членов в рядах рассеяния.

В данной работе приведены результаты расчетов по формулам теории Ми [3] двух первых элементов матрицы рассеяния для частиц с радиусом $r = 10, 100$ и 500 мкм в области глории. Параметры этих частиц и оптические постоянные воды, вычисленные по формулам [10], для основных длин волн видимого излучения приведены в табл. 1.

На рис. 1 показаны вычисленные элементы матрицы рассеяния для различных длин волн в области глории (сплошная кривая соответствует элементу I_2 , а пунктирная — I_1 , при $I_2 > I_1$ неполяризованное излучение Солнца при рассеянии приобретает отрицательную степень поляризации, т.е. электрический вектор лежит преимущественно параллельно к плоскости рассеяния). Радиус частицы $r = 10$ мкм или $x \approx 157 \div 89,76$ (см. табл. 1), следовательно, существование глории в этой области частиц объясняется на основе принципа Гюйгенса [3], что предсказывает отрицательную поляризацию в кольцах яркости. Как видно из рис. 1, в области углов рассеяния 174–180° можно наблюдать три цветовых венца (кольца яркости соединены прямыми линиями). Первый цветовой венец (178–178,8°) имеет ярко выраженные синее (кривая 1), голубое (2) и желто-зеленое (4) кольца. Зеленого (3) и красных (5, 6) колец не видно из-за слабой их яркости, хотя в области обратного рассеяния

($Q \approx 180^\circ$) рассеянное излучение имеет зеленовато-желтый цвет (кривые 2, 3). Во втором венце (176–177,6°) просматриваются кольца всех цветов, кроме красного, т.к. оно совпадает с синим кольцом третьего венца (174–176,5°). В последнем венце отсутствует зеленое (кривая 3) кольцо.

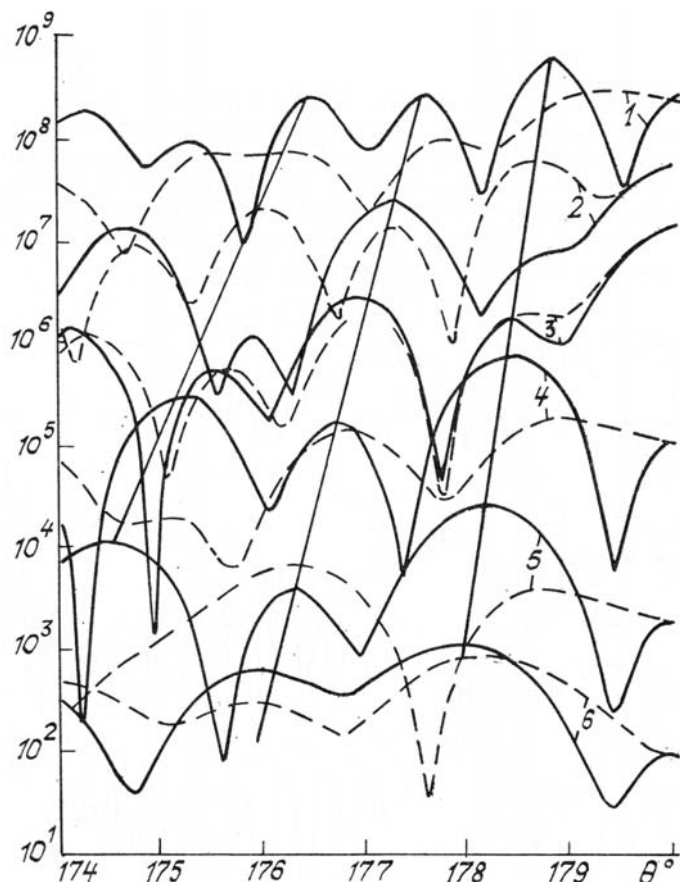


Рис. 1. Два первых элемента матрицы рассеяния в области глории для различных длин волн видимого излучения (номера на кривых соответствуют обозначениям в табл. 1). Для наглядности кривые 1–5 сдвинуты последовательно вверх на порядок. Радиус частицы 10 мкм

Сравнивая элементы матрицы I_1 и I_2 видно, что все кольца зеленого цвета практически неполяризованы, а первое и третье кольца голубого цвета (кривая 2) и второе кольцо красного цвета (5) имеют положительную степень поляризации (электрический вектор рассеянного излучения лежит преимущественно в перпендикулярной плоскости). Кроме того, предсказываемое в [3] отношение яркости в первом кольце к яркости под углом 180° порядка 0,8–0,3 также не согласуется с данными на рис. 1. Яркость первого кольца выше, чем яркость рассеяния назад, за исключением кривых 2 и 3.

На рис. 2 приведены индикатрисы рассеяния для $x = 100$. Кривые на этом рисунке имеют медленно осциллирующий характер (с периодом в несколько градусов), на которые наложены более быстрые осцилляции (с периодом в несколько десятых долей градуса). Практически на всех локальных максимумах наблюдается отрицательная поляризация, например, для $\lambda = 0,400$ мкм (кривая 1) при $Q = 175,9^\circ$ ($I_1 = 6483$, $I_2 = 9905$) и $174,2^\circ$ (6878, 11203), для $\lambda = 0,500$ мкм (кривая 2) $Q = 175,4^\circ$ (4625, 5444), для $\lambda = 0,700$ мкм (кривая 6) $Q = 175,8^\circ$ (2554, 2983) и $\lambda = 0,800$ мкм (кривая 7) $Q = 176,2^\circ$ (2428, 3088). Для $\lambda = 0,550$ мкм (кривая 4) локальный максимум при $Q = 177^\circ$ имеет положительную поляризацию (4373, 2791), а для $\lambda = 0,625$ мкм (кривая 5) все локальные максимумы в области $177–180^\circ$ имеют положительную поляризацию. Качественное объяснение этих закономерностей заключается в наложении отраженных лучей (период осцилляции доли градусов согласно [3]) с поверхностными волнами. Интенсивность последних намного выше. В обратном рассеянии ($Q = 180^\circ$) преобладает оранжевый цвет.

Таблица 1
 Характеристики водной капли, использованные при расчете спектральной яркости глорин (рис. 1–3)

Цвет	Характеристики водной капли									
	λ , мкм	n	κ	x (10)	x (100)	x (500)	Θ_M (100)	P (100)	Θ_M (500)	P (500)
Синий	0,400	1,339	$1,86 \cdot 10^{-9}$	157,08	1570,8	7854,0	174,2	-23,8	178,2	-5,8
Голубой	0,450	1,337	$1,02 \cdot 10^{-9}$	139,63	1396,3	6981,3	177,0	-10,5	179,3	-12,5
Зеленый	0,500	1,335	$1,00 \cdot 10^{-9}$	125,66	1256,6	6283,2	178,7	-21,8	179,6	-20,2
Желто-зеленый	0,550	1,333	$1,96 \cdot 10^{-9}$	114,24	1142,4	5712,0	174,5	-50,0	177,4	-0,12
Оранжевый	0,625	1,332	$1,39 \cdot 10^{-8}$	100,53	1005,3	5026,5	176,4	-42,1	177,2	-21,8
Красный	0,700	1,331	$3,35 \cdot 10^{-8}$	89,76	897,6	4488,0	175,4	-11,5	175,8	-42,3
Пурпурный	0,800	1,329	$1,25 \cdot 10^{-7}$	78,54	785,4	3927,0	175,7	-34,8	176,8	-42,4

Примечание. В таблице приведены углы рассеяния Θ_M только для тех порядков цветовых колец, в которых наблюдается максимум степени линейной поляризации P .

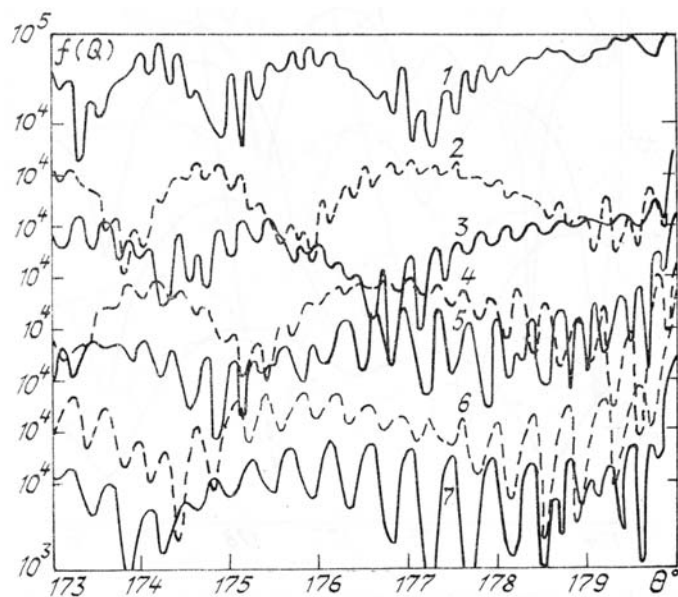


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния в области глории для сферической частицы радиусом 0,1 мкм для различных длин волн (см. табл. 1). Для наглядности кривые 2–7 сдвинуты последовательно вниз на множитель 4

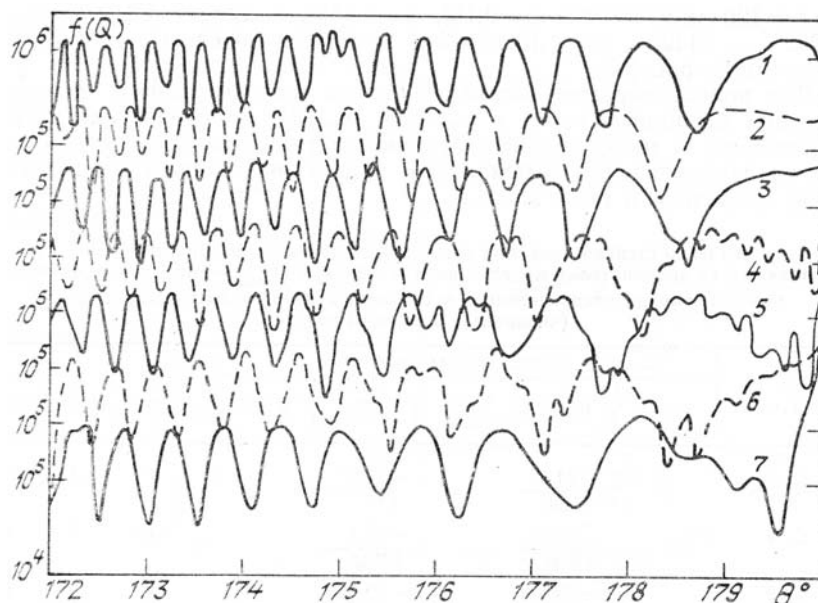


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния в области глории для сферической частицы радиусом 0,5 мкм. Обозначения те же, что и на рис. 2

На рис. 3 приведены индикатрисы рассеяния для $x = 500$. Видно, что локальные осцилляции исчезли (их период в данном случае составляет менее $0,1^\circ$, что меньше углового разрешения данных). Следовательно, наблюдаемые особенности должны качественно объясняться наличием поверхностных волн. Из рис. 3 видно, что первый венец в области $Q \approx 178,4 \div 180^\circ$ содержит размытый синий круг (кривая 1) с максимумом яркости при $Q = 179,7^\circ$ ($3,03 \cdot 10^5$; $7,64 \cdot 10^4$), голубой круг (кривая 2) смещен на 179° ($2,39 \cdot 10^5$; $1,86 \cdot 10^5$), зеленый круг (кривая 3) размыт и при $Q = 179,4^\circ$ ($1,06 \cdot 10^6$; $7,42 \cdot 10^5$), несколько желто–зеленых узких кругов (кривая 4) с максимумом при $198,8^\circ$ ($8,23 \cdot 10^5$; $8,57 \cdot 10^5$), оранжевый круг (кривая 5) при $178,7^\circ$ ($7,39 \cdot 10^5$; $5,95 \cdot 10^5$), красный и пурпурный цвета (кривые 6, 7) смещены к центральному пятну обратного рассеяния ($3,12 \cdot 10^6$; $3,12 \cdot 10^6$). Проследить следующие венцы практически не удастся, т.к. наблюдается чередование и наложение отдельных разноцветных колец. Пятно обратного рассеяния имеет ярко выраженный пурпурный цвет.

Из рис. 1–3 следует, что для монодисперсных частиц радиусом 10 мкм наблюдаются ярко выраженные разноцветные венцы, для $r = 100$ мкм венцы размыты и на них просматриваются отдельные кольца, а для $r = 500$ мкм венцы отсутствуют и существуют отдельные кольца разных цветов.

При $r = 100$ и 500 мкм в некоторых максимумах яркости также наблюдается отрицательная степень поляризации, что усложняет физическое объяснение приведенных кривых (см. табл. 1).

Из рис. 1 следует, что угловое положение первого и второго венцов определяется соотношениями

$$\gamma_1 = 180^\circ - Q = 16/r;$$

$$\gamma_2 = 180^\circ - Q = 16/r + 1,4^\circ. \quad (1)$$

Если предположить справедливость этих выражений для любых r , то для $r = 100$ мкм имеем $\gamma_1 = 0,16^\circ$, $\gamma_2 = 1,56^\circ$, а для $r = 500$ мкм $\gamma_1 = 0,032^\circ$, $\gamma_2 = 1,432^\circ$, что достаточно удовлетворительно согласуется с данными на рис. 2,3.

Для полидисперсных систем облачных частиц расчеты матрицы рассеяния были выполнены в работах [4, 12]. Распределение частиц по размерам задается модифицированным гамма-распределением, параметры которого ($r_{\text{мод}}$ – модальный радиус, а σ – дисперсия распределения) приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Значения степени линейной поляризации P в кольцах яркости для различных (в знаменателе) моделей водных облаков ($r_{\text{мод}}$ – модальный радиус, σ – полуширина распределения) и соответствующие углы рассеяния Q (числитель) в области глории

Тип облака	Длина волны, мкм					$r_{\text{мод}}$, мкм	σ , мкм	γ , град
	0,400	0,450	0,550	0,700	0,950			
C. 3		$\frac{-24,5}{174,4^\circ}$		$\frac{-31,6}{171^\circ}$		2	1	8
C. 4		$\frac{-33,5}{176,8^\circ}$		$\frac{-32,1}{175,2^\circ}$		4	1	4
C. 2		$\frac{-29,6}{177^\circ}$		$\frac{-29,1}{175,5^\circ}$		4	2	4
C. 1		$\frac{-18,2}{177,6^\circ}$		$\frac{-17,5}{176,5^\circ}$		4	4	4
St	$\frac{-31,3}{178^\circ}$		$\frac{-33,3}{177,6^\circ}$	$\frac{-23,9}{177^\circ}$	$\frac{-21,7}{176,5^\circ}$	4,7	4,8	3,4
Sc	$\frac{-33,3}{178,2^\circ}$		$\frac{-21,1}{177,8^\circ}$	$\frac{-30,3}{177,4^\circ}$	$\frac{-33}{176,6^\circ}$	5,33	4,9	3
Ns			$\frac{-29,2}{178^\circ}$	$\frac{-20}{177,6^\circ}$	$\frac{-23,3}{177^\circ}$	6,41	6,2	2,5
As			$\frac{-29,4}{178,2^\circ}$	$\frac{-24,2}{178^\circ}$	$\frac{-9,86}{177,8^\circ}$	6,75	8,2	2,4
Cb					$\frac{-26,3}{178^\circ}$	9,67	11,5	1,7
Ac					$\frac{-22,1}{178^\circ}$	10,19	9	1,6

На рис. 4 приведены элементы матрицы рассеяния I_1 и I_2 в области глории для двух форм облаков (используются общепринятые сокращения названий различных форм облаков). Видно, что в результате наложения многих кривых, типа приведенных на рис. 1, остается только один венец с голубым внутренним кольцом и красным внешним. Степень линейной поляризации

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \cdot 100 \% \quad (2)$$

становится отрицательной (см. табл. 2). Из табл. 2 видно, что для некоторых форм облаков (содержащих большие частицы) отсутствуют кольца яркости на более коротких длинах волн, так что глория содержит только одно кольцо красного цвета. Вычисленные по формуле (1) углы глории хорошо согласуются с углами рассеяния для $\lambda = 0,700$ мкм (см. табл. 2). Степень линейной поляризации более сложным образом зависит от размеров частиц и дисперсии распределения частиц по размерам. Полные табличные данные для всех элементов матрицы рассеяния первых четырех типов облаков в области углов рассеяния $0-180^\circ$ приведены в [4], а для последних 6 типов – в работе [12].

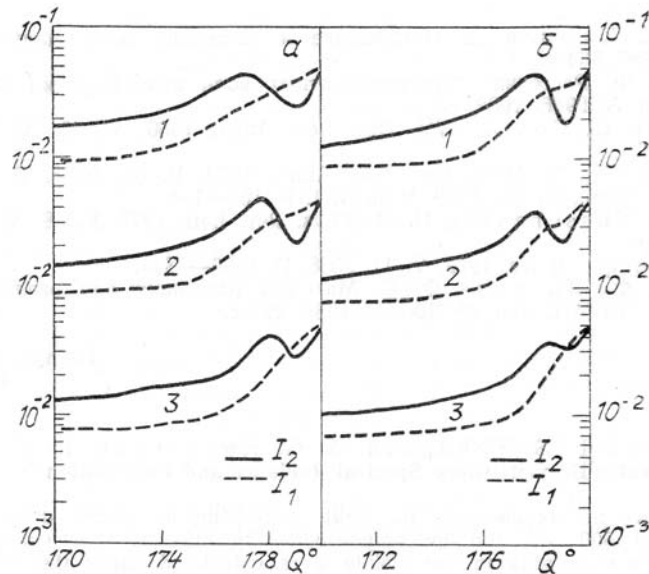


Рис. 4. Два первых элемента матрицы рассеяния в области глории для двух моделей водных облаков: *a* — слоистого St; *b* — слоисто-дождевого Ns. Для наглядности кривые 2 и 3 смещены на порядок вниз. Расчеты выполнены для трех длин волн: 1 — $\lambda = 0,7$ мкм; 2 — $\lambda = 0,55$ мкм; 3 — $\lambda = 0,4$ мкм

На основе выявленных закономерностей можно попробовать оценить размеры частиц на цветной фотографии глории [8]. Наличие красноватого пятна обратного рассеяния свидетельствует о том, что $r_{\text{мод}}$ меньше 4 мкм или больше 10 мкм. Однако яркость внешнего красного кольца выше яркости этого пятна, следовательно, средний радиус частиц составляет порядка 2 мкм (см. [4] модель С. 3). Дисперсия распределения σ составляет примерно 2÷3 мкм, т.к. цвета на фотографии более расплывчатые, чем те, которые дает модель С. 3. Учитывая, что размер тени самолета совпадает с внешним кольцом, которое для С. 3 имеет угол рассеяния $\gamma = 8^\circ$ (см. табл. 2), получаем расстояние до облака $R = l/\text{tg } 8^\circ = 7,14 \cdot l$, где l — длина самолета.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Полное описание глории возможно только на основе строгих формул теории Ми, выявленные при этом особенности не позволяют разделить эффекты интерференции между отраженными лучами от эффектов поверхностных волн.

2. Для области частиц от 2 до 10 мкм яркость рассеянного строго назад излучения сравнима или меньше яркости в первом максимуме глории. Следовательно, глория должна наблюдаться и в отсутствие затенения пятна обратного рассеяния. При $r = > 10$ мкм для наблюдения глории необходимо затенять яркое пятно обратного рассеяния.

3. Для полидисперсной системы частиц угловое положение глории зависит от среднего размера частиц (см. табл. 2), а степень поляризации от среднего размера и дисперсии распределения частиц по размерам.

1. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М. //Изв. АН СССР, ФАО. 1983. Т. 19. № 6. С. 595–602.
2. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Н.: Наука. 1987. 185 с.
3. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: ИЛ. 1961. 536 с.
4. Дейрменджан Д. Рассеяние света в мутной среде. М.: Гостехиздат. 1951. 288 с.
5. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир. 1986. 664 с.
6. Терзи В.Ф. Рассеяние электромагнитных волн атмосферными частицами. М.: ЦНИИ. Деп. № 2946. 1982. 83 с.
7. Bryant H.C, Cox A.J. //J. Opt. Soc. Amer. 1966. V. 56. № 11. p. 1529–1532.
8. Nussenzweig H.M. //J. Opt. Soc. Amer. 1979. V. 69. № 8. P. 1068–1079.
9. Dave J.V. //Appl. Optics. 1969. V. 8. № 1. P. 155–164.
10. Khare V., Nussenzweig H.M. //Phys. Rev. Lett. 1977. V. 38. № 12. P. 1279–1282.
11. Ray P.S. //Appl. Optics. 1972. V. 11. № 8. P. 1836–1844.
12. Терзи В.Ф., Якупова Ф.С. Матрицы рассеяния для различных моделей облаков. М.: ВИМИ. Деп. № Д06043. 1984. 224 с.

Поступила в редакцию
6 июня 1988 г.

V.F. Terzi, F.S. Yakupova, A.G. Konyukhov, L.V. Kurt. **Light Scattering by Water Droplet: Glory Spectral Radiance and Polarization.**

The first two matrix elements for light scattering by water droplets with radii of 10, 100 and 500 μm and by polydisperse systems of spherical particles in a wide range of wavelengths in the visible were calculated using the Mie-theory relations. The scattering phase functions for different frequencies in the region of glory for the $170\text{--}180^\circ$ angles are presented. It is shown that the specific behaviour of the degree of polarization in the region of glory cannot be interpreted within the framework of the interference effect or surface waves. The angular position of the glory and the degree of polarization are found as a function of mode and variance of the particle distribution within clouds.