

УДК УДК 551.501

Матрица рассеяния света на усеченном пластинчатом дроксталле, ориентированном преимущественно в горизонтальной плоскости

А.В. Бурнашов, А.В. Коношонкин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 23.09.2012 г.

В приближении геометрической оптики численно рассчитаны матрицы рассеяния света на ориентированном преимущественно в горизонтальной плоскости усеченном пластинчатом дроксталле. Показано, что из-за наличия усеченных граней у ледяного кристалла появляются новые гало. Получены основные количественные характеристики наиболее ярких гало. На основе модифицированной матрицы рассеяния света проанализированы все 16 элементов матрицы рассеяния света в сравнении со случаем рассеяния света на ледяной гексагональной пластинке.

Ключевые слова: матрица рассеяния, перистые облака, флаттер, преимущественная ориентация, гало, дроксталл, поляризация; scattering matrix, cirrus clouds, flutter, preferable orientation, halo, droxtal, polarization.

Введение

Одной из нерешенных проблем атмосферной оптики является исследование оптических характеристик света, рассеянного на кристаллах перистых облаков в зависимости от их ориентаций в пространстве, форм и размеров. Решению данной задачи посвящено достаточно много работ специалистов по атмосферной оптике [1–6]. Но, к сожалению, в них рассматривался случай только хаотической ориентации ледяных кристаллических частиц в пространстве. Вместе с тем результаты дистанционного зондирования перистой облачности показывают, что зачастую кристаллы характеризуются преимущественной ориентацией в горизонтальной плоскости в пространстве [7–10]. На данный момент существует лишь небольшое число работ по исследованию характеристик света, рассеянного на ледяных кристаллах перистых облаков, ориентированных преимущественно в горизонтальной плоскости [7–20]. В этих работах рассмотрены простейшие геометрические формы кристаллов — это гексагональные пластинки и столбики. Тем не менее натурные эксперименты свидетельствуют о многообразии форм ледяных кристаллических частиц в перистых облаках [20].

Таким образом, цель данной работы — продолжение исследований свойств света, рассеянного на ледяных частицах более сложных геометрических форм при условии их преимущественной ориентации в горизонтальной плоскости в пространстве.

Отметим, что все представленные данные являются частью «Full set of Mueller matrices of preferably oriented ice crystal particles of cirrus clouds» — банка данных о характеристиках света, рассеянного на преимущественно ориентированных в горизонтальной плоскости ледяных кристаллах перистых облаков. Банк данных представляет собой набор всех 16 элементов матрицы Мюллера в зависимости от параметров моделирования. Открытый доступ осуществляется по адресу: ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Geometric_Optics/ [21].

Геометрические характеристики ледяной кристаллической частицы и параметры численного моделирования

Рассматриваемая ледяная кристаллическая частица — усеченный дроксталл, геометрия которого представлена на рис. 1.

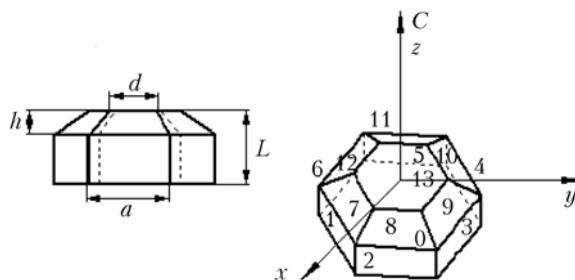


Рис. 1. Параметры и форма усеченного пластинчатого дроксталла

* Алексей Владимирович Бурнашов (bvaleksey@iao.ru); Александр Владимирович Коношонкин (sasha_tvo@iao.ru).

Геометрия рассматриваемой частицы характеризуется четырьмя параметрами: L – расстояние между шестигранниками; h – высота усеченной части кристалла; a и d – стороны большей и меньшей гексагональных граней соответственно. Параметр формы кристалла F будем принимать, как и в случае простой гексагональной частицы, равным $L/2a$. Кроме того, для более наглядного изложения полученных результатов введем нумерацию граней кристалла, как показано на рис. 1.

Несколько слов о параметрах численного моделирования. В соответствии с проведенными ранее исследованиями [17–19] углы падения света на частицу рассматриваются в интервале $\theta_0 = 0-90^\circ$ с шагом 5° , параметр формы $F = L/2a$ принимает

значения $F = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4\}$ при равномерном 3DcT и нормальном 3DgT [17–19] распределениях по флаттеру от 0° до выбранного максимального значения угла T_i , где $i = 1, 2, 3, 4, 5^\circ$, $\sigma_i^2 = 2, 2, 5, 2, 3$ соответственно.

Зенитное и азимутальное распределения элементов матрицы рассеяния света в зависимости от параметров моделирования

На рис. 2 в качестве примера представлены случаи рассеяния света на усеченном дроксталле и гексагональной пластинке.

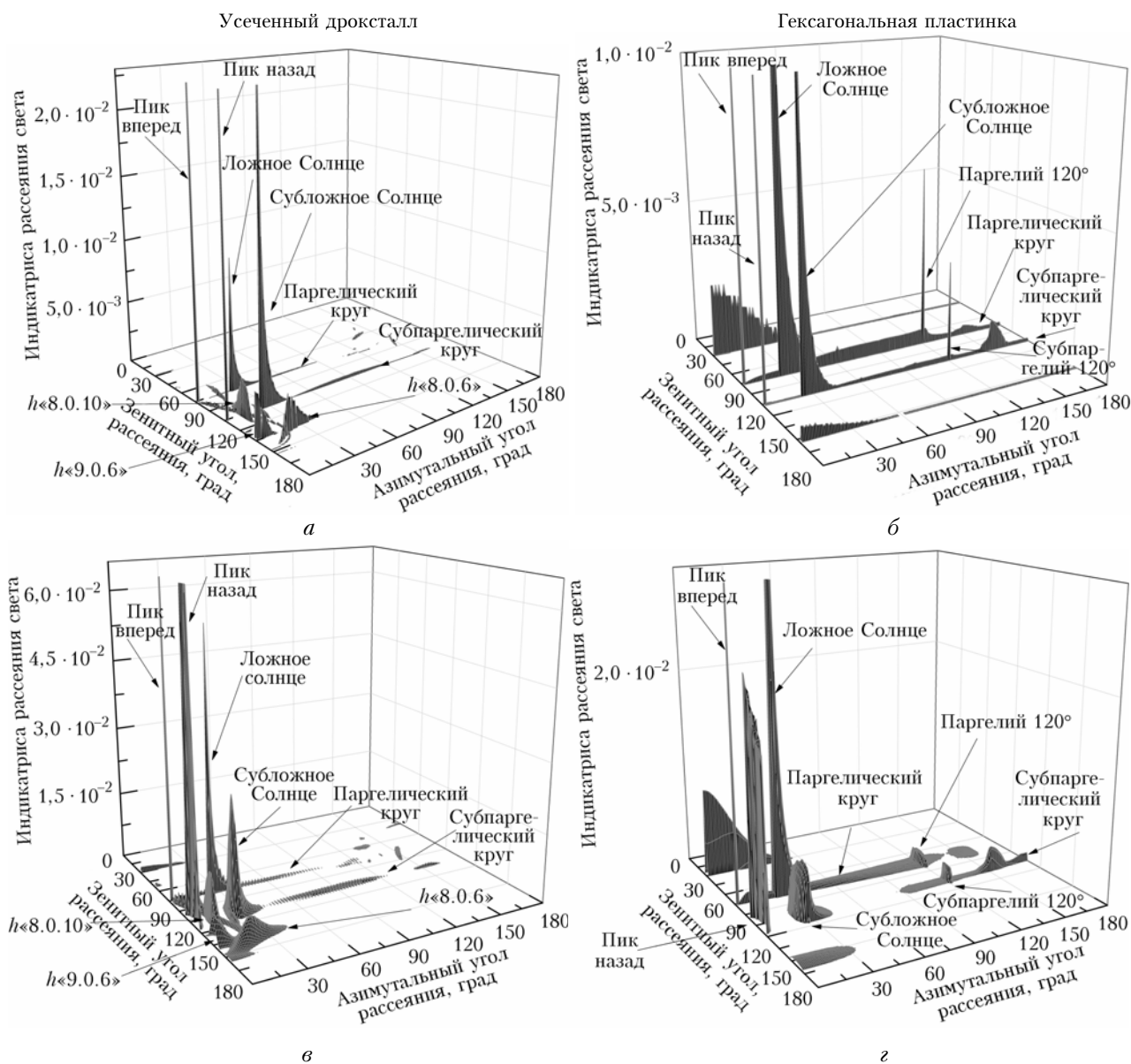


Рис. 2. Распределение рассеянной энергии на сфере направлений рассеяния света при параметре формы $F = 0,4$ и угле падения света $\theta_0 = 75^\circ$: а и б – случай горизонтально ориентированных кристаллов в пространстве; в и г – случай преимущественной ориентации в горизонтальной плоскости указанных кристаллов при нормальном распределении по флаттеру ($T_5 = 5^\circ$) соответственно

Видно, что при моделировании рассеяния света на ледяной гексагональной пластинке рассеянная энергия распределяется либо строго по четырем азимутальным кругам на сфере направлений рассеяния света (случай горизонтальной ориентации, рис. 2, б), либо непосредственно вблизи этих азимутальных кругов (случай преимущественной ориентации, рис. 2, г). В оставшиеся направления на сфере направлений рассеяния света ни одна траектория не дает вклад. В случае рассеяния света на усеченном дроксталле, наряду с характерными областями рассеяния для гексагональной пластинки, за счет наличия усеченных граней появляются дополнительные ярко выраженные области на сфере направлений рассеяния света.

Согласно [20] наиболее популярные и часто появляющиеся на небе гало имеют свои названия. Однако существуют гало, которые появляются гораздо реже и не имеют своего названия. Поэтому с учетом введенной нумерации граней кристалла гало будем обозначать соответствующей траекторией, например $h\langle 8.0.6 \rangle$ (т.е. первоначально свет преломился на восьмой грани кристалла, затем отразился от нулевой и вышел из кристалла через шестую грань).

Как следует из рис. 2, а, в, при углах падения света, близких к горизонту, за счет геометрии усеченного дроксталла появляются гало, которые обозначены, например, как $h\langle 8.0.6 \rangle$. Когда угол падения света на частицу уменьшается, площадь выходящего пучка света начинает также резко уменьшаться, что приводит к полному исчезновению данных гало. Вместе с тем начинает появляться яркое гало $h\langle 7.0 \rangle$ (рис. 3), которое «окаймляет» пик вперед. И при углах падения света на частицу, близких к зениту, большая часть рассеянной энергии (табл. 1) сосредоточивается в гало $h\langle 7.0 \rangle$.

Как было показано ранее [12, 15, 17, 19], наряду с паргелическим и субпаргелическим кругами на сфере направлений рассеяния света при рассея-

нии света на преимущественно ориентированной в горизонтальной плоскости ледяной гексагональной пластинке присутствуют также окологоризонтальный/субокологоризонтальный или околозенитный/субоколозенитный круги. Данные круги образуются траекториями, когда падающее излучение преодолевает двугранный угол 90° . При этом данные круги можно наблюдать на небе, когда угол падения света находится в интервале $0-32^\circ$ либо $58-90^\circ$ [12, 19]. В интервале углов падения света $32-58^\circ$ исчезают траектории вида «2-0» ввиду появления полного внутреннего отражения от нижней гексагональной грани «0», и, как следствие, образуется гало $h\langle 2.0.12 \rangle$, которое характеризуется большой долей рассеянной энергии (рис. 3, а).

Далее в качестве примера приведена табл. 2 распределения рассеянной энергии по наиболее ярким гало при параметре формы $F = 0,4$ и различных углах падения света на усеченный дроксталл (табл. 1, 2). С учетом введенной ранее параметризации индикатрисы рассеяния света более корректным будет представлять данные по распределению рассеянного излучения на сфере направлений рассеяния света, в величинах c_{jm} , а не в Q_j [12, 15, 17, 19].

Из табл. 1, 2 видно, что, во-первых, на пик вперед и пик назад в зависимости от угла падения приходится не более 40% рассеянной энергии. Во-вторых, при углах падения света на частицу в районе $\theta_0 = 75^\circ$ происходит существенное уменьшение энергии в пике вперед и, соответственно, увеличение доли рассеянной энергии, которая приходится на пик назад. Объясняется данный факт тем, что площадь выходящего пучка соответствующей траектории «13-0», дающей основной вклад в пик вперед, резко уменьшается за счет наличия наклонных граней у дроксталла. Вместе с тем начинает происходить резкое увеличение вклада в пик назад траектории вида «9-0-12» за счет появления полного внутреннего отражения.

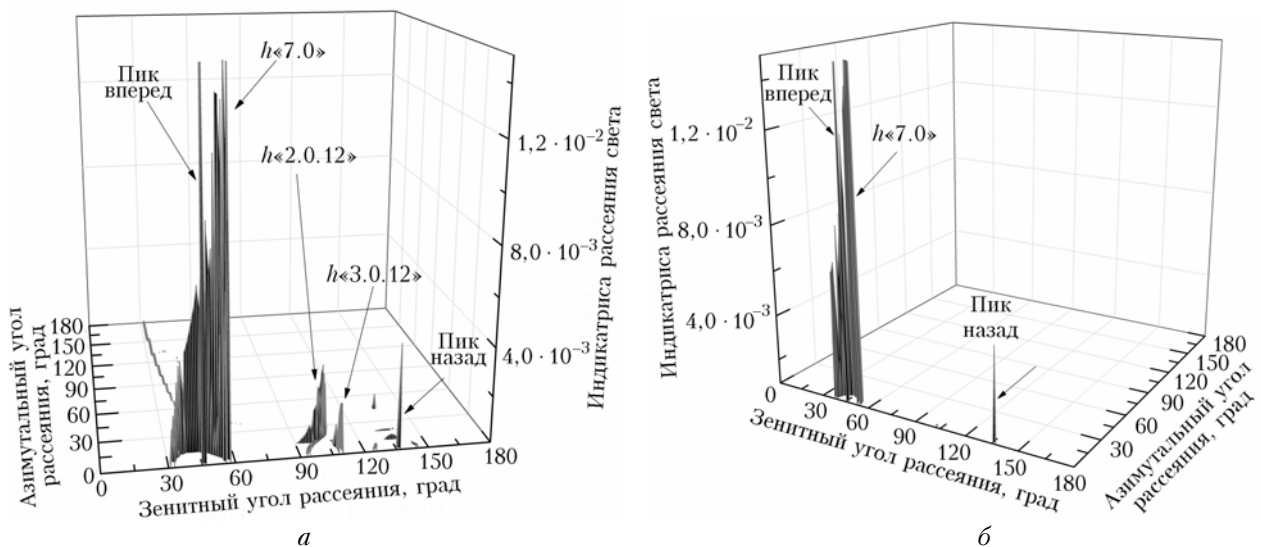


Рис. 3. Распределение рассеянной энергии на сфере направлений рассеяния света при $F = 0,4$ (а) и $0,2$ (б); $\theta_0 = 45^\circ$

Таблица 1

Распределение рассеянной энергии по наиболее ярким гало при параметре формы $F = 0,4$ и углах падения $\theta_0 = 85, 75$ и 60° в зависимости от величины флаттера при его нормальном распределении

$c_{jm}, \%$	$\theta_0, \text{град}$					
	85		75		60	
	3Dg1	3Dg5	3Dg1	3Dg5	3Dg1	3Dg5
c_{11} (пик вперед)	16,6	16,6	6,2	6,4	9,5	9,5
c_{12} (пик назад)	10	10	23,6	23,3	7,3	7,3
c_{13} (ложное Солнце)	24,6	24,5	6,2	6,3	0,3	0,3
c_{14} (субложное Солнце)	8,2	8,1	18,9	18,7	6,8	6,8
c_{15} (паргелий 120°)	1,5	1,5	1	1	0,3	0,3
c_{16} ($h \ll 8.0.6 \gg$)	10,3	10,2	9,2	9,1	0,3	0,3
c_{17} ($h \ll 9.0.6 \gg$)	7,8	7,7	4,4	4,4	0	0
c_{18} ($h \ll 8.0.10 \gg$)	1,7	1,8	7,2	7,3	6,5	6,5
c_{19} ($h \ll 7.0 \gg$)	0	0	1,7	1,8	31,4	31
c_{20} ($h \ll 3.0.12 \gg$)	0	0	0	0	7,1	6,9
c_{21} (cz.a)	0	0	0	0	0	0
c_{22} ($h \ll 2.0.12 \gg$)	0	0	0	0	2,2	2,2
c_{23} (остаток)	19,3	19,4	21,6	21,7	28,8	29
<i>Всего</i>	97,2	97,3	96,7	96,7	99,3	99,3

Таблица 2

Распределение рассеянной энергии по наиболее ярким гало при параметре формы $F = 0,4$ и углах падения $\theta_0 = 45, 30$ и 15° в зависимости от величины флаттера при его нормальном распределении

$c_{jm}, \%$	$\theta_0, \text{град}$					
	45		30		15	
	3Dg1	3Dg5	3Dg1	3Dg5	3Dg1	3Dg5
c_{11} (пик вперед)	15,6	15,4	13,3	13,3	14,4	14,3
c_{12} (пик назад)	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
c_{13} (ложное Солнце)	<0,1	<0,1	0	0	0	0
c_{14} (субложное Солнце)	0,1	0,1	0	0	0	0
c_{15} (паргелий 120°)	0,1	0,1	<0,1	<0,1	0	0
c_{16} ($h \ll 8.0.6 \gg$)	0	0	0	0	0	0
c_{17} ($h \ll 9.0.6 \gg$)	0	0	0	0	0	0
c_{18} ($h \ll 8.0.10 \gg$)	0,3	0,3	0	0	0	0
c_{19} ($h \ll 7.0 \gg$)	54,8	54,7	63,9	64,2	73,8	73,3
c_{20} ($h \ll 3.0.12 \gg$)	3,1	3,1	0	0	0	0
c_{21} (cz.a)	0	0	8,5	7,3	4,8	4,8
c_{22} ($h \ll 2.0.12 \gg$)	9,3	9,2	0,7	1	0	0
c_{23} (остаток)	16,3	16,6	13,4	13,9	6,7	7,4
<i>Всего</i>	97,9	98	99,6	99	99,2	99,9

В-третьих, при углах падения света на усеченный дроксталл, близких к зениту, довольно отчетливо можно увидеть гало $h \ll 7.0 \gg$, т.е. свет первоначально падает на одну из наклонных граней кристалла и затем выходит из него через нижнюю гексагональную грань. Данное гало как бы «окаймляет» пик вперед.

В-четвертых, в графе «остаток» при $\theta_0 > 58^\circ$ наблюдается скачок доли рассеянной энергии. Это объясняется тем, что при $\theta_0 \approx 58^\circ$ исчезают траектории вида «2–0–12» и появляются траектории с большим числом внутренних столкновений с гра-

нями усеченного дроксталла, которые дают вклад в разнообразные направления рассеяния света на сфере направлений рассеяния света.

Перейдем к рассмотрению остальных элементов матрицы рассеяния света. Как было показано ранее, предпочтительным является использование модифицированной матрицы рассеяния света [13, 19], в которой каждый из четырех столбцов соответствует определенному поляризованному состоянию падающего и рассеянного излучений.

Наиболее наглядно результаты по анализу элементов модифицированной матрицы рассеяния

света на усеченном дроксталле могут быть представлены в сравнении со случаем рассеяния света на ледяной гексагональной пластинке. Исходя из представленных графиков (рис. 4, в, г), можно сделать несколько выводов.

Во-первых, в интервале азимутального угла рассеяния от 0° до ложного Солнца поведение и значение индикатрисы рассеяния света и поляризационных элементов почти идентичны. Это говорит о том, что основной вклад в рассеяние света в данном интервале углов в обоих случаях дает лишь одна траектория, когда падающее излучение сразу отражается от прямоугольных граней кристаллов.

Во-вторых, поляризационные элементы, характеризующие ложное Солнце, ведут себя идентично, что позволяет сделать аналогичный вывод. Напомним, что ложное Солнце образуется траекторией, когда падающее излучение преодолевает двугранный угол 60° . Разница в поведении индикатрисы рассеяния света в ложном Солнце объясняется тем, что при одинаковом значении параметра формы площадь выходящего пучка в случае усеченного

дроксталла меньше за счет наличия наклонных граней кристалла.

В-третьих, интервал азимутального угла рассеяния света от ложного Солнца до паргелия 120° характеризуется значительным отличием. Это объясняется тем, что траектории типа «13–6–0», «5–6–1» характеризуются меньшими площадями выходящих пучков по сравнению со случаем рассеяния света на ледяной гексагональной пластинке. То есть в случае дроксталла площади выходящих пучков начинают быть сопоставимы друг с другом в отличие от случая рассеяния света на гексагональной пластинке, когда доминирующей была траектория преодоления двугранного угла 60° с дополнительным отражением от прямоугольной грани (траектории вида «2–1–6»). Большие углы рассеяния $120–180^\circ$ характеризуются вкладом траекторий с большим числом столкновений, которые зачастую не перекрываются друг с другом.

Несколько слов о поведении элементов модифицированной матрицы рассеяния света гало, образующихся за счет наличия усеченных граней дроксталла (на примере $h \ll 8.0.10$ », рис. 5).

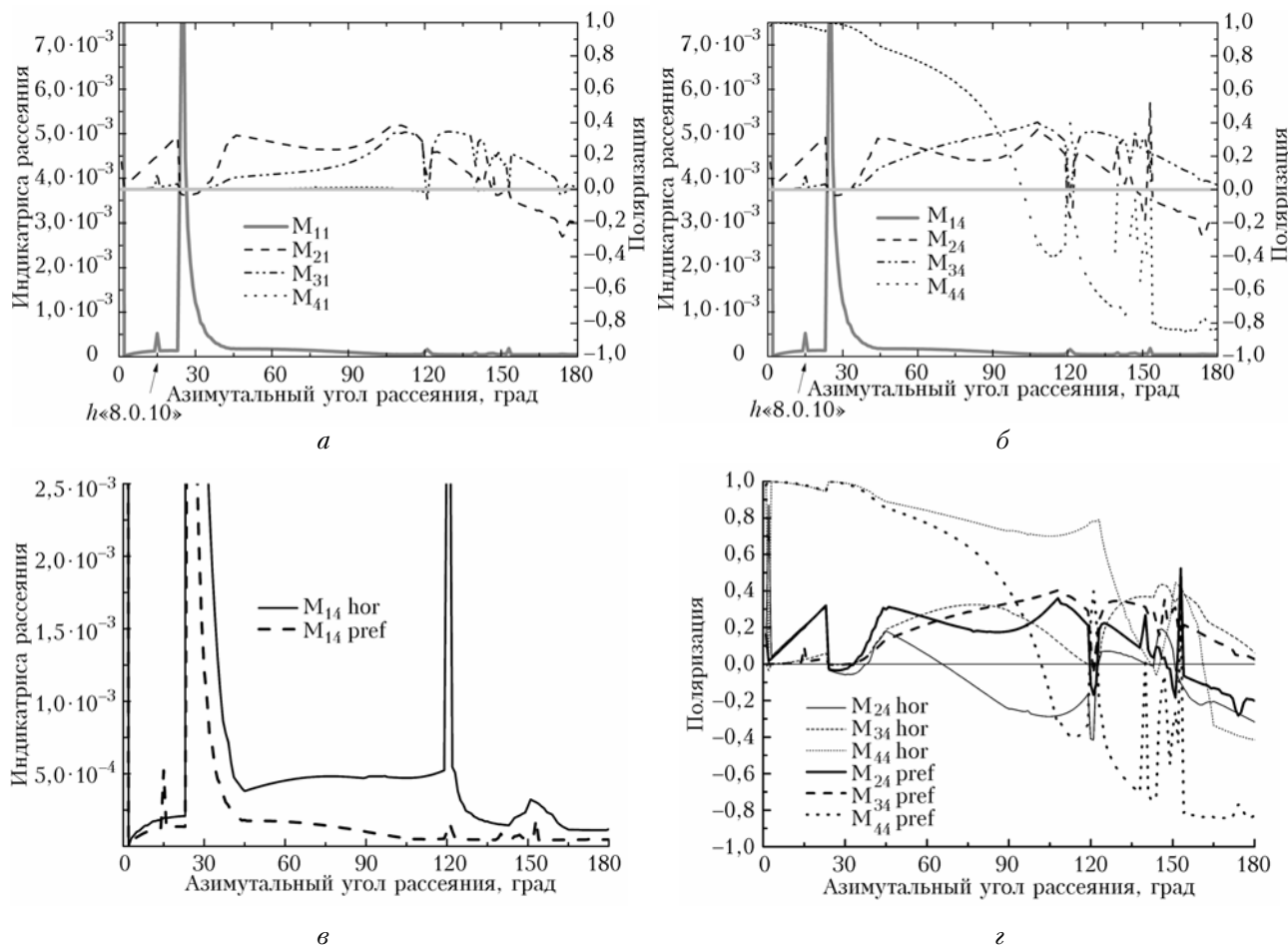
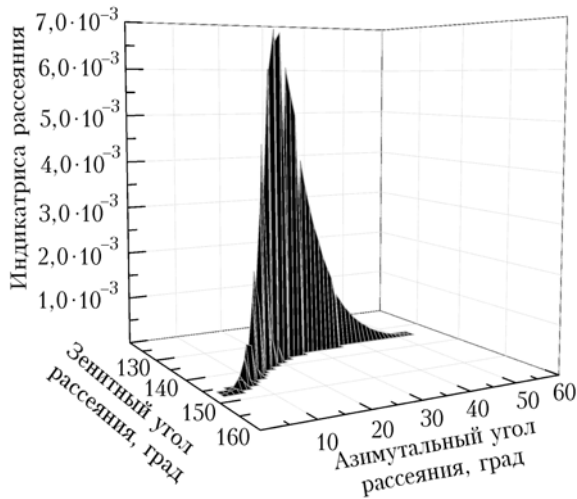
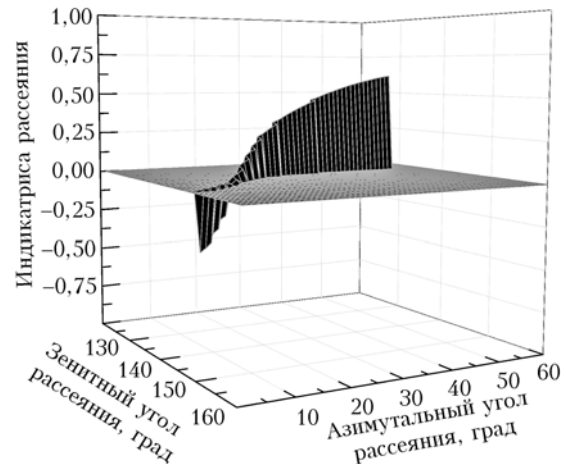


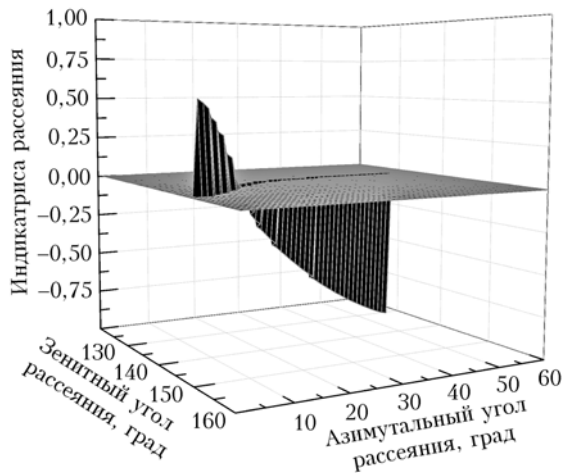
Рис. 4. Элементы модифицированной матрицы рассеяния света для паргелического круга в случае рассеяния света на усеченном дроксталле при параметре формы $F = 0.4$ и угле падения света на частицу $\theta_0 = 75^\circ$: первый столбец (а), четвертый столбец (б), сравнение индикатрисы рассеяния света (в) и элементов матрицы рассеяния четвертого столбца (г). «hor» и «pref» означают горизонтальную и преимущественную ориентации соответственно



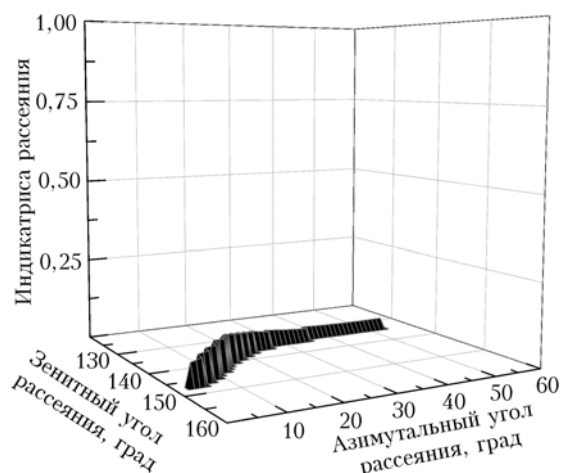
M_{12}



M_{22}



M_{32}



M_{42}

Рис. 5. Элементы модифицированной матрицы рассеяния света второго столбца для гало $h \ll 8.0.6$ в случае рассеяния света на усеченном дроксталле при следующих параметрах: $F = 0,4$, $\theta_0 = 75^\circ$ и падающем линейно поляризованном свете $(1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$

Как показано на рис. 5, элемент M_{12} имеет узкие границы на сфере направлений рассеяния. Это объясняется геометрией кристалла, когда при равномерном вращении кристалла вокруг его главной оси (которая совпадает с направлением в зенит) площадь соответствующего пучка становится ненулевой. При дальнейшем вращении происходит резкое наращивание энергии в данном пике до некоего максимума, после чего площадь выходящего пучка начинает резко уменьшаться до ее полного исчезновения.

Ошибочно было бы предположить появление полного внутреннего отражения, за счет которого и объяснялось бы существование такого гало, так как в этом случае была бы велика круговая компонента. Кроме того, известно, что если траектория не характеризуется полным внутренним отражением от граней кристалла, то при падающем линейно поляризованном свете рассеянное излучение также линейно поляризовано, т.е. компоненты элементов модифицированной матрицы рассеяния света, отве-

чающие за линейную поляризацию рассеянного излучения, достаточно велики. Это подтверждается графиками, на которых представлены элементы M_{22} и M_{32} . Отметим, что такое поведение поляризационных элементов модифицированной матрицы рассеяния характерно для всех остальных гало.

Рис. 6 показывает сопоставление интенсивностей наиболее ярких гало на сфере направлений рассеяния света с указанными параметрами (слева) с одним из поляризационных элементов модифицированной матрицы рассеяния света (справа).

Видно, что поляризация в разных направлениях на сфере направлений рассеяния света варьируется от -1 до 1 . Поэтому, зная местоположение наиболее ярких гало, достаточно сконцентрировать внимание на этих областях для более детального изучения свойств света, рассеянного на усеченном дроксталле, например при составлении различных моделей рассеяния света на ансамбле кристаллических частиц.

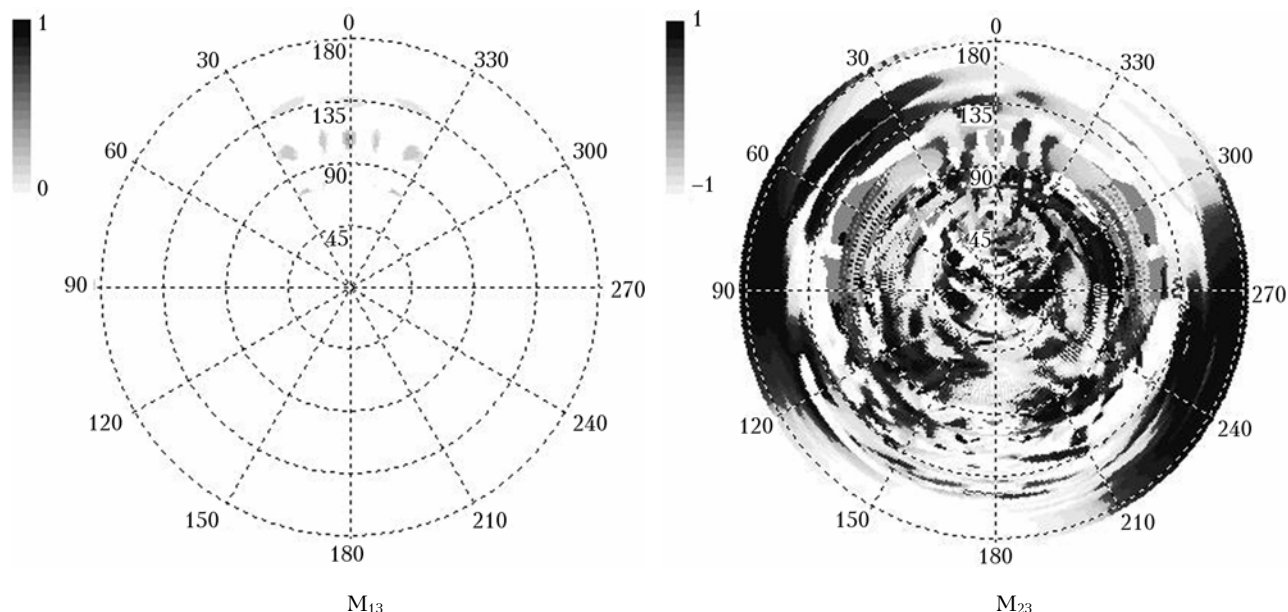


Рис. 6. Элементы модифицированной матрицы рассеяния света третьего столбца в случае рассеяния света на преимущественно ориентированном в горизонтальной плоскости усеченном дроксталле при следующих параметрах: параметр формы кристалла $F = 0,4$, угол падения света на частицу $\theta_0 = 75^\circ$, величина флаттера $T_5 = 5^\circ$ в случае нормального распределения

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-05-00675а) и Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 8616).

1. 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.
2. Macke A., Mueller J., Raschke E. Single scattering properties of atmospheric ice crystals // J. Atmos. Sci. 1996. V. 53, N 19. P. 2813–2825.
3. Hess M., Koelmeyer R.B., Stammes P. Scattering matrices of imperfect hexagonal ice crystals // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1998. V. 60, N 3. P. 301–308.
4. Yang P., Baum B.A., Heymsfield A.J., Hu Y.X., Hung-Lung Huang, Se-Chee Tsay, Ackerman S. Single-scattering properties of droxtals // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2003. V. 79–80. P. 1159–1169.
5. Lei Bi, Ping Yang, Kattawar G.W., Hu Y., Baum B.A. Scattering and absorption of light by ice particles: Solution by a new physical-geometric optics hybrid method // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2011. V. 112, N 9. P. 1492–1508.
6. Кустова Н.В. Методы геометрической и физической оптики в задаче рассеяния света атмосферными ледяными кристаллами: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2009. 22 с.
7. Noel V., Chepfer H., Haeffelin M., Morille Y. Classification of Ice Crystal Shapes in Midlatitude Ice Clouds from Three Years of Lidar Observations over the SIRTa Observatory // J. Opt. Soc. Amer. 2006. V. 63, N 11. P. 2978–2991.
8. Chepfer H., Brogniez G., Goloub P., Breon F.M., Flamant P.H. Observations of horizontally oriented ice crystals in cirrus clouds with POLDER – 1/ADEOS –

- 1 // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1999. V. 63, N 2. P. 521–543.
9. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Физические факторы, определяющие пространственную ориентацию частиц кристаллических облаков // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 27–34.
10. Кауль Б. В., Самохвалов И. В. Ориентация частиц в кристаллических облаках Сi: Часть 1. Ориентация при падении // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 11. С. 963–967.
11. Noel V., Chepfer H. Study of ice crystal orientation in cirrus clouds based on satellite polarized radiance measurements // J. Atmos. Sci. 2004. V. 61, N 16. P. 2073–2081.
12. Бурнашов А.В., Боровой А. Г. Рассеяние света горизонтально ориентированными ледяными пластинками. I. Интенсивность рассеянного света. // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 7. С. 583–592.
13. Бурнашов А.В., Боровой А.Г. Рассеяние света горизонтально ориентированными ледяными пластинками. II. Матрица рассеяния // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 966–972.
14. Бурнашов А. В., Боровой А. Г. Рассеяние света горизонтально ориентированными ледяными пластинками // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 11. С. 922–930.
15. Borovoi A.G., Burnashov A.V., Cheng A.Y.S. Light scattering by horizontally oriented ice crystal plates // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2007. V. 106, N 1–3. P. 11–20.
16. Borovoi A.G., Burnashov A.V., Oppel U.G. Scattering matrices for horizontally oriented ice crystals // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2008. V. 109, N 15. P. 2648–2655.
17. Бурнашов А.В., Кустова Н.В. Рассеяние света преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости гексагональными ледяными пластинками // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 3. С. 199–204.

18. *Бурнашов А.В., Кустова Н.В.* Рассеяние света преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости гексагональными ледяными столбиками // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 5. С. 371–376.
19. *Бурнашов А.В.* Особенности рассеяния света ледяными гексагональными кристаллами, ориентированных преимущественно в горизонтальной плоскости: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2011. 22 с.
20. *Tape W., Moilanen J.* Atmospheric Halos and the Search of Angle X. Washington: American Geophysical Union. DC. 2006. 238 p.
21. *URL: ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Geometric_Optics*

A.V. Burnashov, A.V. Konoshonkin. **Light scattering matrix for truncated plate-like ice droxtal preferably oriented in the horizontal plane.**

Light scattering matrices of truncated plate-like ice droxtals are calculated within the framework of geometric optics for the case of quasi-horizontal orientations. New halos appear because of truncated facets of ice crystal. The main quantitative properties of the brightest halos are obtained. All 16 elements of the scattering matrix are analyzed in terms of modified scattering matrix. A comparison of the matrices for the truncated droxtals and the hexagonal plates is carried out.