

Рассеяние света горизонтально ориентированными столбиками

А.В. Бурнашов, А.Г. Боровой*

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

Поступила в редакцию 19.06.2008 г.

Рассмотрена индикатриса рассеяния для различных случаев ориентации гексагональных ледяных столбиков в горизонтальной плоскости. Представлены таблицы распределения рассеянной энергии по гало в зависимости от угла падения и параметра формы кристаллов. Показано, что 50–75% рассеянной энергии перераспределяется среди небольшого количества (≤ 7) гало.

Рассмотрена поляризация рассеянного света при различной поляризации падающего излучения. Показано, что степень поляризации рассеянного излучения является качественным индикатором количества траекторий фотонов в кристалле, дающих основной вклад в данное направление рассеяния.

Ключевые слова: перистые облака, поляризация, гало, фазовая матрица, ледяные кристаллы.

Введение

Проблема рассеяния света ледяными кристаллами перистых облаков является одной из наиболее актуальных задач атмосферной оптики вследствие существенного влияния перистых облаков на радиационный и тепловой баланс земной поверхности.

В настоящее время детально изучены только оптические характеристики ледяных кристаллов в случае их хаотической ориентации в пространстве (например, [1–6]). Вместе с тем в перистых облаках часто присутствуют ледяные кристаллы, которые имеют ориентацию в окологоризонтальной плоскости. Опубликовано только небольшое число статей о рассеянии света на преимущественно или горизонтально ориентированных ледяных кристаллах перистых облаков, но они носят либо иллюстративный характер [7–12], либо авторы ограничились только узким интервалом углов рассеяния [13].

Типичными формами ледяных кристаллов перистых облаков, которые используются в модельных расчетах, являются гексагональные пластинки и столбики. В предыдущих работах [14, 15] мы уже исследовали матрицу рассеяния света для горизонтально ориентированных гексагональных пластинок. В данной статье делается следующий шаг в изучении матриц рассеяния в перистых облаках, т.е. рассматриваются основные качественные и количественные характеристики матрицы рассеяния света

для горизонтально ориентированных гексагональных столбиков.

1. Интенсивность рассеянного света

Ледяные кристаллы в атмосфере обычно хаотически ориентированы в пространстве, т.е. их углы поворота относительно трех ортогональных осей координат распределены равномерно. Этот случай назовем трехмерной хаотической ориентацией и обозначим 3D. Однако при падении кристаллов в воздухе аэродинамические силы ориентируют частицы так, чтобы площадь их проекции на горизонтальную плоскость была максимальной. Например, гексагональные ледяные пластинки стремятся ориентироваться параллельно горизонту. Для гексагональных кристаллов назовем ось, проходящую через центры гексагональных граней, главной осью. Тогда главная ось у пластинок направлена вертикально, но угол поворота пластинки относительно главной оси будет распределен равномерно. Такую ориентацию назовем одномерной хаотической ориентацией 1D для горизонтально ориентированных частиц.

У гексагональных столбиков основная ось кристалла располагается уже в горизонтальной плоскости и ее направление распределено равномерно относительно поворота вокруг вертикали. Кроме того, обычно столбик произвольно повернут и относительно главной оси. Такую ориентацию будем называть двумерной хаотической ориентацией для горизонтально ориентированных столбиков и обозначать как 2D-ориентацию. В более редких случаях ледяные

* Алексей Владимирович Бурнашов (bvalexsey@iao.ru); Анатолий Георгиевич Боровой (borovoi@iao.ru).

столбики не вращаются относительно главной оси, а сохраняют две прямоугольные грани параллельно горизонту. Такое одномерное распределение ориентации 1D для горизонтально ориентированных столбиков называется также Парри-ориентацией по имени W.E. Parry, который в 1820 г. наблюдал гало, вызванные такой ориентацией кристаллов, и объяснил происхождение этих гало.

Вышеуказанные типы ориентаций кристаллов охватывают ситуации, наиболее часто реализующиеся в атмосфере. Поэтому в данной статье мы рассматриваем гексагональные столбики с 2D- и Парри-ориентациями. Заметим, что в атмосфере реализуются и другие, более редкие типы ориентации кристаллов. Следующей по значимости является ориентация Ловитца, когда гексагональная призма вращается относительно двух осей: вертикали и оси, проходящей через середины двух противоположных ребер, которые соединяют прямоугольные грани кристалла.

Основной характеристикой света, рассеянного на произвольной частице, является сечение экстинкции. В данном случае мы рассматриваем рассеяние света в видимом диапазоне длин волн, где поглощение света льдом незначительно. В таких случаях сечение экстинкции совпадает с сечением рассеяния.

Характерной особенностью света, рассеянного при Парри-ориентации гексагональных столбиков, является локализация рассеянного света на совокупности линий на сфере направлений рассеяния, которые называются гало. Местоположение линий гало зависит от угла падения θ_0 , а интенсивность света вдоль этих линий – от параметра формы кристалла $F = (\text{высота}/\text{диаметр})$. При определенных значениях фактора формы некоторые гало могут полностью исчезать.

Локализация рассеянного света вдоль линий на сфере направлений рассеяния является следствием одномерного вращения кристалла, когда каждая траектория фотонов, реализующаяся внутри кристалла в процессе рассеяния света, прочерчивает линию на сфере направлений рассеяния при вращении кристалла. В отличие от рассмотренного ранее случая горизонтально ориентированных пластинок [14, 15], где все гало сводились к четырем кругам на сфере направлений рассеяния, для 1D-ориентированных столбиков число и форма линий гало резко возрастают. Подробное рассмотрение формы линий гало и их классификацию по типу траекторий фотонов можно найти в [12].

В наших расчетах мы ограничились траекториями, дающими основной вклад в рассеянное излучение. В частности, мы пренебрегли траекториями, число столкновений в которых было равно или больше семи. Пример полученных таким образом гало показан на рис. 1.

Большинство из них хорошо известны в литературе и имеют свои названия, которые приведены в табл. 1. Наиболее яркие из них отмечены на рис. 1.

В настоящее время в литературе практически нет количественных данных по интенсивности рассеянного света в гало для горизонтально ориентированных ледяных кристаллов. Чтобы восполнить этот пробел, мы рассчитали интегральный вклад каждого гало, указанного в табл. 1, в общее сечение рассеяния. Эти вклады, названные в нашей предыдущей статье [14] весовыми коэффициентами, представлены в табл. 2 для 1D-ориентированных столбиков. Видно, что основная часть рассеянной энергии (65–75%), независимо от параметра формы и угла падения, распределяется среди семи гало Q_1 – Q_7 .

В случае 2D-ориентированных столбиков за счет вращения кристаллов вокруг главной его оси большинство линий гало размазываются по сфере направлений рассеяния. Но некоторые траектории дают те же самые гало, что и при 1D-ориентации, поскольку вращение вокруг главной оси не изменяет направление рассеяния. К ним относятся паргелический круг (pc) и субсолнечная дуга (sh.a). Некоторые другие траектории образуют небольшие яркие области на сфере направлений рассеяния (см. рис. 1, в, г).

Названия таких гало отмечены в табл. 1 символом 2D. Весовые коэффициенты для основных гало приведены в табл. 3. Видно, что на эти гало приходится порядка 50–75% рассеянной энергии.

Интересно отметить связь между гало *circumscribed halo* и двумя гало *l.t.g.a*, *u.t.g.a*. Как видно из табл. 3, гало *circumscribed halo* и пара гало *l.t.g.a*, *u.t.g.a* не могут появляться одновременно при фиксированном угле падения. Этот факт имеет следующее простое объяснение. Как видно из рис. 1, в, гало *l.t.g.a*, *u.t.g.a* имеют вид дуг, которые при малых углах падения при отсчете от горизонта вогнуты относительно солнца. Затем, при увеличении угла падения, они трансформируются в выпуклые относительно солнца дуги. Начиная с 45° эти дуги смыкаются в круг, образуя таким образом *circumscribed halo*. Поэтому *circumscribed halo* и пара дуг *l.t.g.a*, *u.t.g.a* не могут появляться одновременно.

До сих пор никем не рассматривались количественные характеристики рассеянного света в гало. Мы провели такие расчеты, но полученные данные ввиду их большого объема целесообразнее представить в электронном виде на сайте, чем описывать в статье. Поэтому на рис. 2 представлены в виде иллюстрации распределения интенсивности рассеянного света только для одного параметра формы и нескольких углов падения.

Интересно сопоставить распределение интенсивности рассеянного света между соседними рисунками, соответствующими 1D- (слева) и 2D- (справа) ориентациям кристалла при тех же самых углах падения. Как видим, некоторые гало 1D-ориентации существенно размываются и становятся неотличимыми при переходе к 2D-ориентациям, тогда как некоторые гало изменяются незначительно.

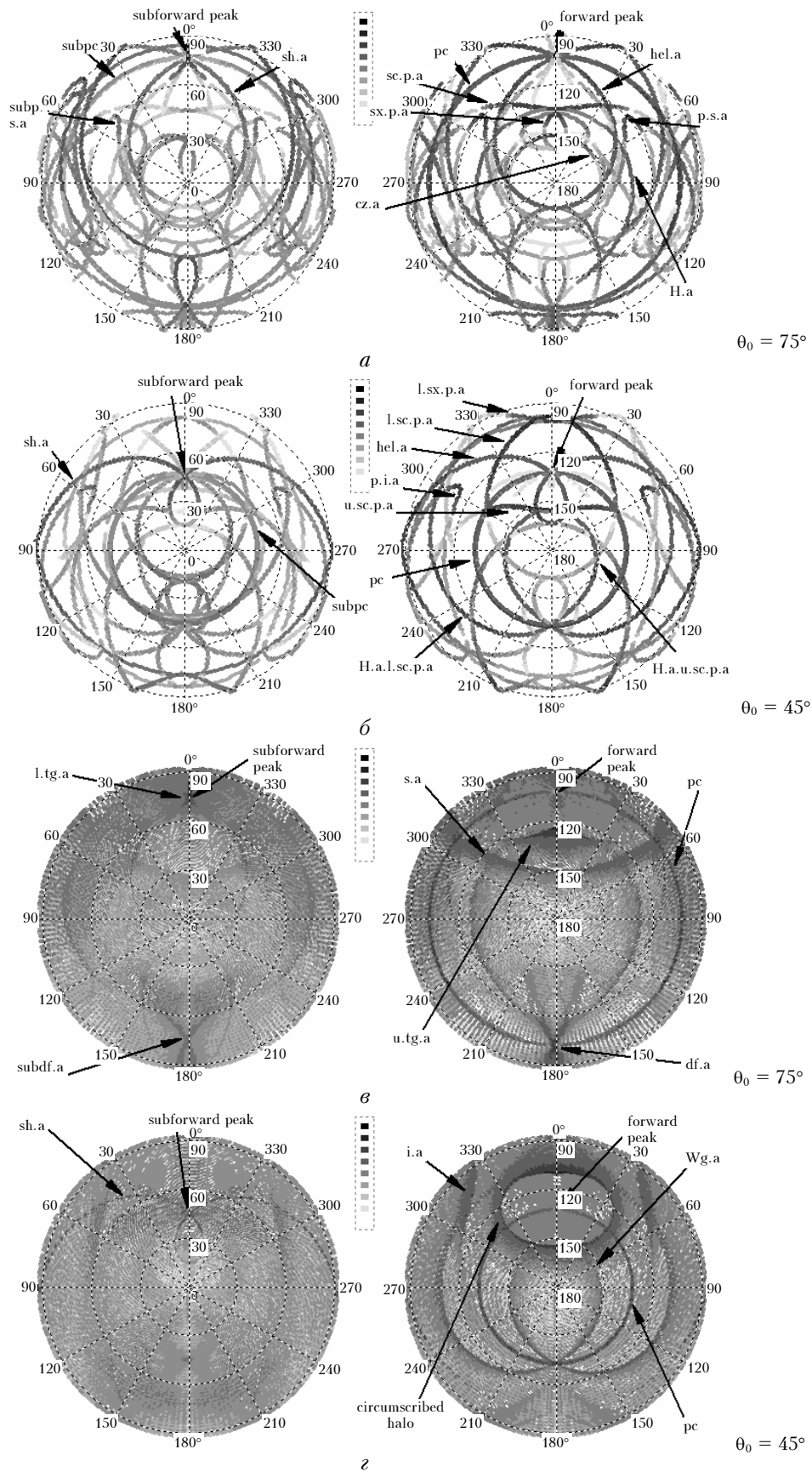


Рис. 1. Наличие гало при 1D- (*а, б*) и 2D-ориентациях гексагональных столбиков (*в, г*) при параметре формы $F = 1,5$; угол падения θ_0 отсчитывается от зенитного направления

**Расшифровка введенных обозначений названий гало при 1D-
и 2D-ориентациях гексагонального ледяного столбика**

Название на английском языке	Сокращение	Название на русском языке
Parry infralateral arc	p.i.a	Нижняя боковая дуга Парри (1D)
Lower suncave Parry arc	l.sc.p.a	Нижняя вогнутая солнечная дуга Парри (1D)
Lower sunvex Parry arc	l.sx.p.a	Нижняя выпуклая солнечная дуга Парри (1D)
Upper suncave Parry arc	u.sc.p.a	Верхняя вогнутая солнечная дуга Парри (1D)
Hastings arc of upper suncave Parry arc	H.a.u.sc.p.a	Дуга Гастингса верхней вогнутой солнечной дуги Парри (1D)
Hastings arc of lower suncave Parry arc	H.a.l.sc.p.a	Дуга Гастингса нижней вогнутой солнечной дуги Парри (1D)
Circumhorizon arc	chor.a	Окологоризонтальная дуга (1D)
Subcircumhorizon arc	subchor.a	Субокологоризонтальная дуга (1D)
Circumzenith arc	cz.a	Околозенитная дуга (1D)
Parry subinfralateral arc	subp.i.a	Субнижняя боковая дуга Парри (1D)
Parry supralateral arc	p.s.a	Верхняя боковая дуга Парри (1D)
Parry subsupralateral arc	subp.s.a	Субверхняя боковая дуга Парри (1D)
Suncave Parry arc	sc.p.a	Вогнутая солнечная дуга Парри (1D)
Subsuncave Parry arc	subsc.p.a	Вогнутая субсолнечная дуга Парри (1D)
Sunvex Parry arc	sx.p.a	Выпуклая солнечная дуга Парри (1D)
Hastings arc	H.a	Дуга Гастингса (1D)
Upper subsuncave Parry arc	subu.sc.p.a	Субверхняя вогнутая солнечная дуга Парри (1D)
Parhelic circle	pc	Паргелический круг (1D, 2D)
Heliac arc	hel.a	Солнечная дуга (1D, 2D)
Subhelic arc	sh.a	Субсолнечная дуга (1D, 2D)
Subdiffuse arc	subdf.a	Субдиффузная дуга (1D, 2D)
Diffuse arc	df.a	Диффузная дуга (1D, 2D)
Subparhelic circle	subpc	Субпаргелический круг (1D, 2D)
Forward peak	forward peak	Пик вперед (1D, 2D)
Subforward peak	subforward peak	Субпик вперед (1D, 2D)
Tricker arc	Tr.a	Дуга Триккера (1D, 2D)
Wegener arc	Wg.a	Дуга Вегенера (1D, 2D)
Supralateral arc	s.a	Верхняя боковая дуга (2D)
Infralateral arc	i.a	Нижняя боковая дуга (2D)
Lower tangent arc	l.tg.a	Нижняя тангенциальная дуга (2D)
Upper tangent arc	u.tg.a	Верхняя тангенциальная дуга (2D)
Circumscribed halo	circumscribed halo	Описанное гало (2D)

Таблица 2

**Распределение рассеянной энергии по гало при 1D-ориентации гексагонального ледяного столбика
в зависимости от параметра формы F и угла падения θ_0**

Весовой коэффициент, %	Угол падения θ_0 , град (отсчитывается от зенита)											
	30			45			60			75		
	F											
	1,5	2,4	4	1,5	2,4	4	1,5	2,4	4	1,5	2,4	4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$Q_1(\text{hel.a})$	5,4	6,1	6,7	7,2	8,4	6,5	14,3	9,8	10,9	18,6	17,3	15,5
$Q_2(\text{forward peak})$	23,3	26,5	28,3	20,9	26,3	29,9	26,4	31,5	36,7	24,4	26,4	30,9
$Q_3(\text{subforward peak})$	4,4	3,1	3,6	9,0	5,7	6,2	10,3	11,0	8,1	6,6	8,8	7,0
$Q_4(\text{subsc.p.a})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19,9	17,5	14,5
$Q_5(\text{l.sc.p.a})$	27,7	30,8	33,0	14,0	16,7	18,7	0,1	0,1	0,2	0	0	0
$Q_6(\text{l.sx.p.a})$	0	0	0	1,8	2,1	2,2	7,1	8,3	9,2	0	0	0
$Q_7(\text{u.sc.p.a})$	13,5	14,6	15,5	16,7	18,9	20,6	10,5	12,5	14,1	0	0	0
$Q_8(\text{cz.a})$	0	0	0	0	0	0	0,9	0,6	0,4	1,7	1,2	0,8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Q ₉ (subp.i.a)	<0,1	<0,1	<0,1	0,5	0,3	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	2,0	1,4	0,8
Q ₁₀ (p.s.a)	0	0	0	0	0	0	0,7	0,3	0,2	2,3	1,6	1,0
Q ₁₁ (sc.p.a)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,9	4,9	5,6
Q ₁₂ (sx.p.a)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,4	1,6	1,7
Q ₁₃ (H.a)	0	0	0	0	0	0	2,3	1,6	1,0	1,1	0,8	0,5
Q ₁₄ (p.i.a)	<0,1	<0,1	<0,1	1,4	0,9	0,6	2,3	1,5	1,0	0	0	0
Q ₁₅ (H.a.u.sc.p.a)	1,1	0,7	0,5	2,4	1,6	1,0	0	0	0	0	0	0
Q ₁₆ (H.a.l.sc.p.a)	4,1	2,7	1,7	4,0	2,7	1,7	0	0	0	0	0	0
Q ₁₇ (subchor.a)	<0,1	0,5	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q ₁₈ (subp.s.a)	0	0	0	0	0	<0,1	0,3	<0,1	0	0	0	0
Q ₁₉ (subu.sc.p.a)	0,1	0,2	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0	0
Q ₂₀ (Tr.a)	0	0	0	0	0	0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Q ₂₁ (Wg.a)	0	0	0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Q ₂₂ (pc)	6,2	4,1	2,4	7,4	5,0	3,1	8,6	5,9	3,8	6,5	4,6	3,0
Q ₂₃ (df.a)	0	0	0	0	0	0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Q ₂₄ (sh.a)	1,1	0,3	0,1	6,7	3,2	2,2	3,6	5,1	2,9	1,8	1,8	3,6
Q ₂₅ (subdf.a)	0	0	0	0	0	0	3,1	2,4	1,3	2,1	1,2	0,5
Q ₂₆ (subpc)	0,7	0,5	<0,1	2,1	1,1	0,4	1,6	1,4	0,9	<0,1	<0,1	<0,1
Q ₂₇ (chor.a)	5,4	3,7	2,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Суммарная энергия не приведенных в таблице гало, траектории которых имеют ≤ 6 столкновений с гранями кристалла	2,4	2,2	1,4	2,2	2,7	2,3	1,3	1,2	0,9	4,8	3,9	4,7
Суммарная энергия гало, траектории которых имеют >7 столкновений с гранями кристалла	4,5	4	4,1	3,8	4,5	6,4	6,6	6,8	8,4	6,5	7,3	9,9

Таблица 3

Распределение рассеянной энергии по гало при 2D-ориентации гексагонального ледяного столбика в зависимости от параметра формы F и угла падения θ_0

Весовой коэффициент, %	Угол падения θ_0 , град (отсчитывается от зенита)											
	30			45			60			75		
	F											
	1,5	2,4	4	1,5	2,4	4	1,5	2,4	4	1,5	2,4	4
forward peak	26,0	28,9	31,0	23,2	29,2	30,3	22,7	28,8	31,3	25,1	27,6	30,2
pc	6,2	4,0	2,5	4,4	2,9	1,9	8,3	5,7	3,7	6,7	4,7	3,1
sh.a	2,9	<1	<1	5,6	2,5	<1	4,6	4,0	1,1	4,0	3,6	2,0
df.a	<1	<1	<1	1,0	<1	<1	1,9	1,7	1,1	1,7	1,3	0,9
l.tg.a	—	—	—	—	—	—	11,0	13,0	14,6	10,1	12,1	13,7
u.tg.a	—	—	—	—	—	—	11,0	13,0	19,0	9,4	11,2	12,7
Circumscribed halo	35,4	39,3	42,0	28,5	32,9	36,2	—	—	—	—	—	—
Суммарная энергия от остальных траекторий с числом столкновений с гранями кристалла ≤ 6	21,3	19,7	17,9	29,0	25,9	22,6	28,9	19,4	14,2	30,4	25,1	22,2
Суммарная энергия от траекторий, которые имеют > 7 столкновений с гранями кристалла	8,2	8,1	6,6	8,4	12	10,8	11,5	14,3	15,1	12,7	14,5	15,3

2. Матрица рассеяния

В предыдущем разделе рассмотрена интенсивность рассеянного света при полностью неполяризованном падающем свете, т.е. первый элемент матрицы рассеяния. В наших расчетах мы получаем полную матрицу рассеяния, т.е. 16 независимых

функций, заданных на сфере направлений рассеяния. Как и в предыдущей нашей работе [15], в данной статье рассматривается приведенная матрица рассеяния \mathbf{M} , каждый столбец которой имеет простой физический смысл параметров Стокса рассеянного излучения при заданной поляризации падающего излучения.

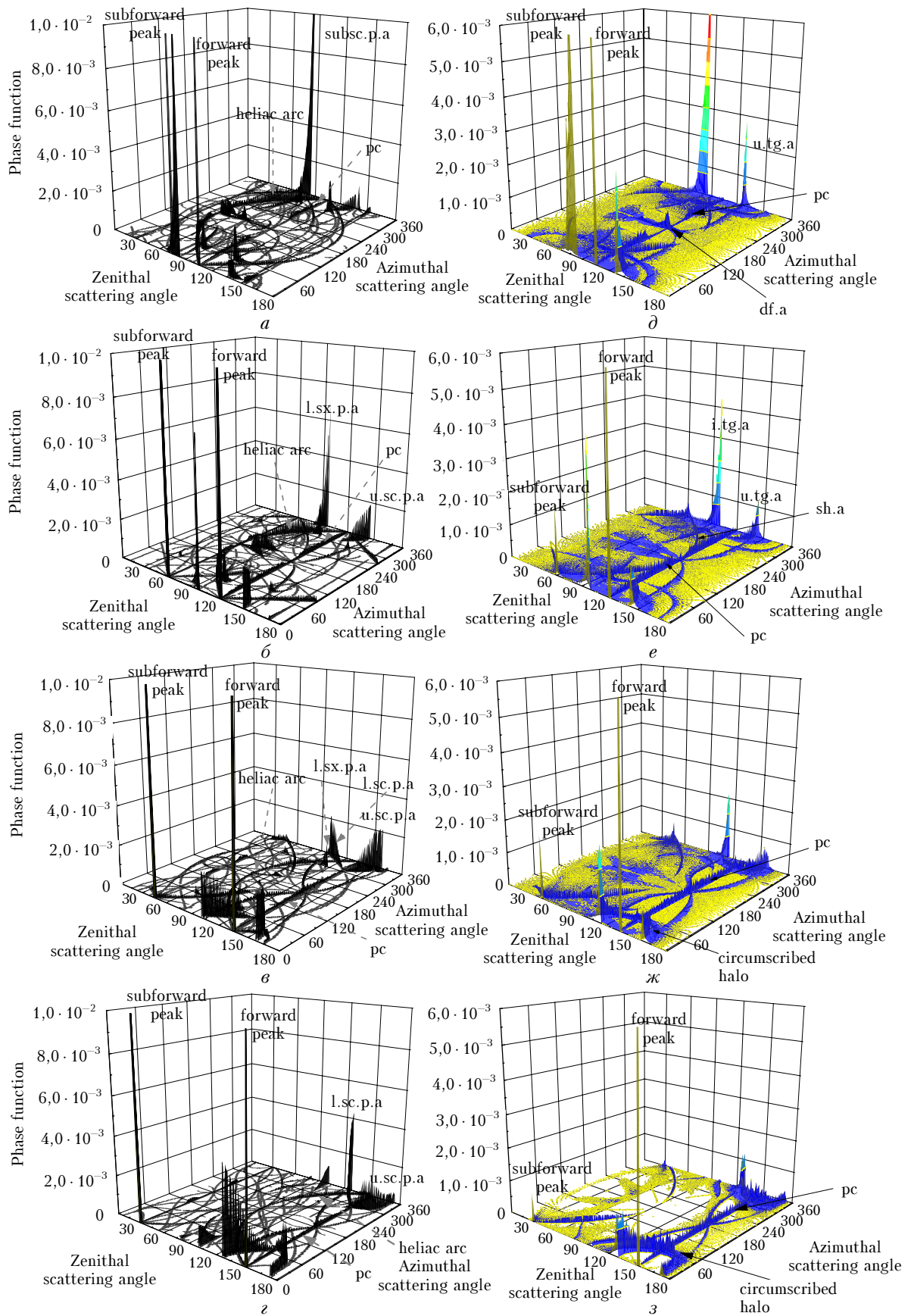


Рис. 2. Распределение рассеянной энергии по гало: $a-z$ – для Парри-ориентированного гексагонального столбика; $\delta-z$ – при 2D-ориентации для параметра формы $F = 1,5$ и углах падения $\theta_0 = 75^\circ (a, \delta)$, $60^\circ (б, \epsilon)$, $45^\circ (в, ж)$ и $30^\circ (г, з)$ соответственно

Для тех гало, которые образуются только одной траекторией фотонов в кристалле, очевидно, что для падающего полностью поляризованного излучения рассеянный свет также является полностью поляризованным. Таким образом, степень поляриза-

ции рассеянного света является критерием числа траекторий, дающих существенный вклад при заданном направлении рассеяния. Рис. 3 иллюстрирует этот вывод на примере двух линий гало u.s.c.p.a и hel.a при Парри-ориентации гексагонального столбика.

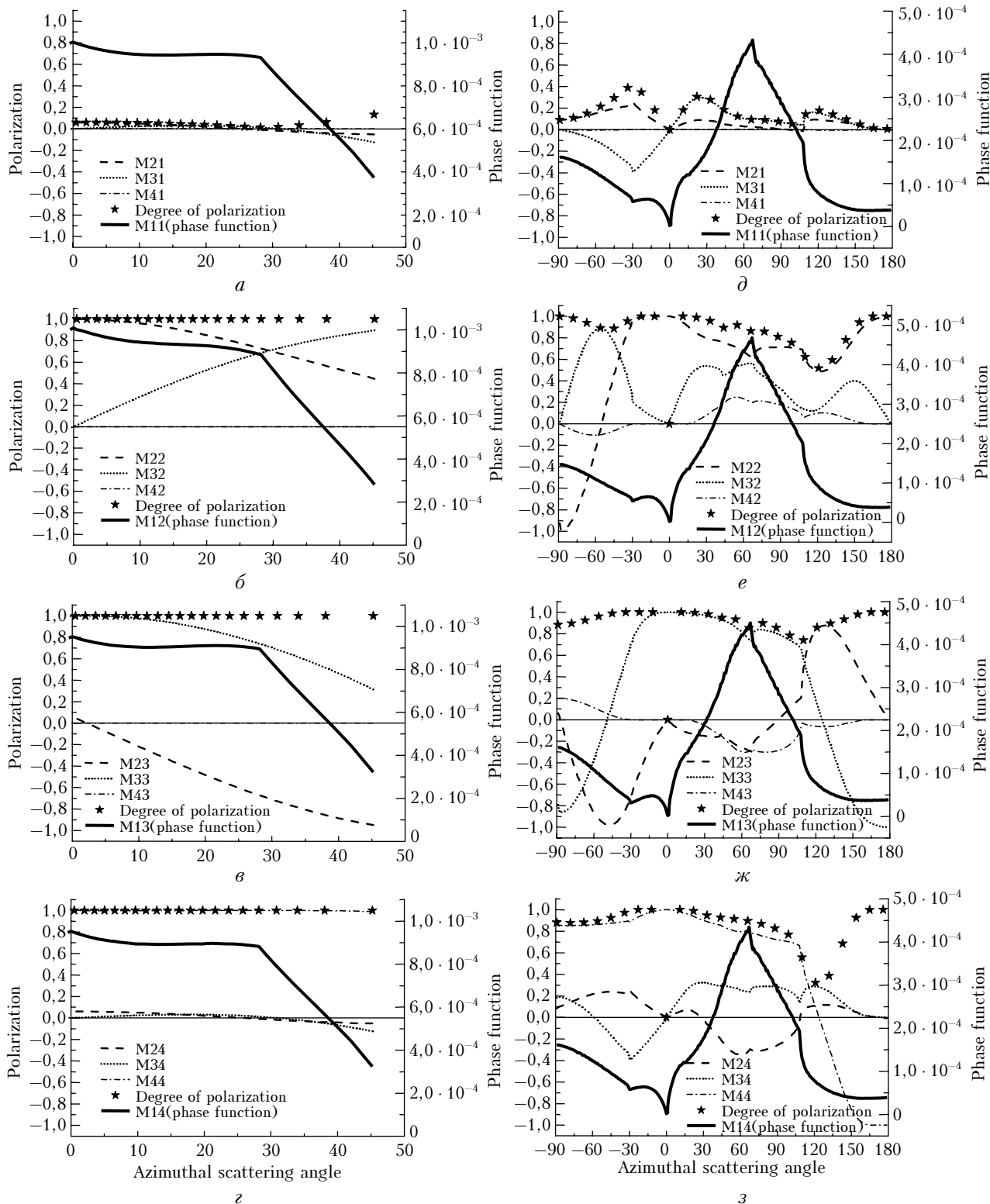


Рис. 3. Матрица рассеяния для Парри-ориентированных столбиков при $F = 1,5$, $\theta_0 = 60^\circ$ ($a-z$ – u.s.c.p.a; $d-з$ – hel.a)

Здесь на каждом графике приведен один столбец матрицы рассеяния, т.е. интенсивность, и три параметра, характеризующих состояние поляризации рассеянного света, которые определены в статье [15]. Кроме того, звездочками на графиках показана пятая функция — это степень поляризации, которая является наиболее простым критерием поляризации света. Рисункам слева (б–г) соответствует гало u.s.c.p.a. Как видим, степень поляризации здесь равна единице. Это доказывает, что данное гало образовано одной траекторией фотонов. На правой стороне рисунка представлена матрица рассеяния для другого гало, hel.a, которое, очевидно, образовано несколькими траекториями фотонов. Интересно отметить, что степень поляризации света в этих гало оказывается незначительна для падающего полностью неполяризованного света (рис. 3, а и д).

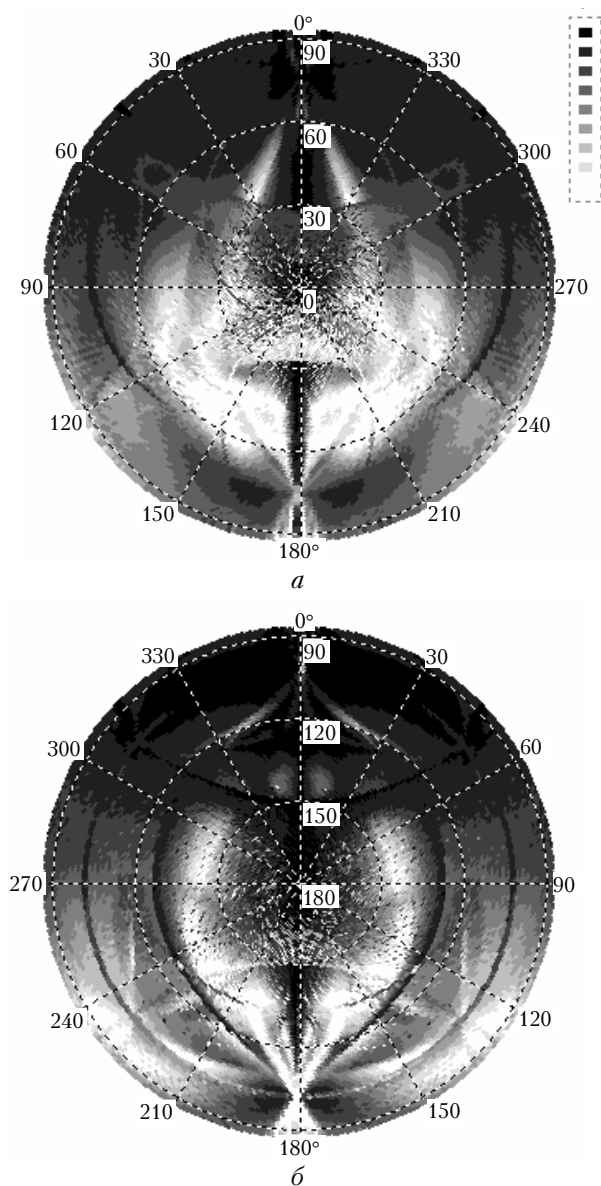


Рис. 4. Второй столбец матрицы M для гексагонального столбика при 2D со следующими параметрами: $F = 1,5$, $\theta_0 = 75^\circ$

Что касается 2D-ориентированных кристаллов, то здесь мы имеем дело уже не с отдельными линиями, а с некоторыми областями на сфере рассеяния, в которые размазываются гало Парри-ориентированного гексагонального столбика при его аксиальном вращении. Здесь также по степени поляризации можно судить о количестве траекторий, дающих вклад в ту или иную область сферы направлений рассеяния. На рис. 4 показана степень поляризации рассеянного света, интенсивность которого представлена на рис. 1, в.

Заключение

Из представленных результатов расчетов приведенной матрицы рассеяния при 1D- и 2D-ориентациях гексагональных столбиков следует, что 50–75% рассеянной энергии вне зависимости от параметра формы и угла падения света распределяется для 1D-ориентированных кристаллов среди семи основных гало (Q_1 – Q_7 , см. табл. 2) и среди 6 гало (l.t.g.a., u.t.g.a., circumscribed halo, forward peak, ps и sh.a, см. табл. 3) для 2D-ориентированных столбиков.

В отличие от рассмотренного ранее [14, 15] случая горизонтально ориентированных гексагональных пластинок, наиболее яркие гало для горизонтально ориентированных столбиков образуются, как правило, одной траекторией фотонов в кристалле. Поэтому степень поляризации рассеянного света зачастую близка к единице. Степень поляризации может рассматриваться как критерий для определенного числа траекторий, эффективно дающих вклад в фиксированное направление рассеяния.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 06-05-65141) и ИНТАС (грант № 05-1000008-8024).

1. Muinonen K., Lumme K., Peltoniemi J., Irvine W.M. Light scattering by randomly oriented crystals // Appl. Opt. 1989. V. 28. N 15. P. 3051–3060.
2. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 200 с.
3. Borovoi A.G., Grishin I.A. Scattering matrices for large ice crystal particles // J. Opt. Soc. Amer. A. 2003. V. 20. N 11. P. 2071–2080.
4. Borovoi A.G., Kustova N.V., Oppel U.G. Light back-scattering by hexagonal ice crystal particles in the geometrical optics approximation // Opt. Eng. 2005. V. 44. N 7. P. 171–208.
5. Yang P., Liou K.N. Light scattering and absorption by nonspherical ice crystals // Kokhanovsky A.A., editor. Light scattering reviews. Chichester: Springer-Praxis, 2006. P. 31–71.
6. Ромаинов Д.Н. Рассеяние света гексагональными ледяными кристаллами // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 2. С. 116–124.
7. Rockwitz K.-D. Scattering properties of horizontally oriented ice crystals columns in cirrus clouds. Part. 1 // J. Opt. Soc. Amer. 1989. V. 28. N 19. P. 4103–4110.
8. Noel V., Ledanois G., Chepfer H., Flamant P.H. Computation of a single-scattering matrix for nonspherical particles randomly or horizontally oriented in space // Appl. Opt. 2001. V. 40. N 24. P. 4365–4375.

9. *Takano Y., Liou K.N.* Solar radiative transfer in cirrus clouds. Part 1: Single scattering and optical properties of hexagonal ice crystals // *J. Atmos. Sci.* 1989. V. 46. N 1. P. 3–19.
10. *Takano Y., Liou K.N.* Interpretation of cirrus cloud polarization measurements from radiative transfer theory // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. N 9. P. 1–4.
11. *Tape W.* Atmospheric halos. Washington: American Geophysical Union, Antarctic Research Series. 1994. V. 64. 139 p.
12. *Tape W., Moilanen J.* Atmospheric halos and the search the angle X. Washington: American Geophysical Union, 2006. 238 p.
13. *Ромашов Д.Н., Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Банк данных для интерпретации результатов поляризационного зондирования кристаллических облаков // *Оптика атмосф. и океана.* 2000. Т. 13. № 9. С. 854–861.
14. *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.
15. *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.

A.V. Burnashov, A.G. Borovoi. **Light scattering by horizontally oriented ice columns.**

Phase functions for different orientations of hexagonal ice columns in the horizontal plane are studied. Tables of distributions of scattered energy among halos depending on incident angles and aspect ratios are presented. It is shown that 50–75% of the scattered energy is distributed among a few number (≤ 7) of the halos.

Polarization of scattered light at different polarization states of incident radiation is considered. Polarization degree of the scattered radiation is shown to be a qualitative indicator for a number of photon trajectories in a crystal that result in the main contribution to the scattering direction given.