

## Рассеяние света преимущественно ориентированными ледяными кристаллами. II. Гексагональные столбики

А.В. Бурнашов, Н.В. Кустова\*

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

Поступила в редакцию 24.11.2010 г.

Проанализированы энергетические характеристики света, рассеянного на 1D- и 2D-ориентированных гексагональных ледяных столбиках с учетом малых осцилляций около горизонтальной плоскости. Рассматривались параметры формы  $F = \{1,5; 2,5; 5; 10\}$ , углы падения  $\theta_0$  брались в интервале  $(0; 90^\circ)$ , максимальное значение угла отклонения частицы от горизонтальной плоскости равнялось  $5^\circ$  для равномерного и нормального законов распределения для флаттера. В случае 3D $\chi$ -ориентации гексагонального ледяного столбика в пространстве происходит перераспределение 70–100% рассеянной энергии вне зависимости от  $F$  и  $\theta_0$  среди небольшого количества гало. Если гексагональный ледяной столбик имеет еще и равномерное вращение относительно главной оси кристалла (3D $\chi$ -ориентация), то перераспределяется 50–85% рассеянной энергии среди u.tg.a, l.tg.a, forward peak и circumscribed halo.

*Ключевые слова:* перистые облака, рассеяние света, преимущественная ориентация, гало, Парри, матрица рассеяния; cirrus clouds, light scattering, preferable orientation, halo, Parry, scattering matrix.

### 1. Основные обозначения

В соответствии с [1] 1D-ориентация — ориентация кристалла, характеризующаяся наличием вращения вокруг одной из его осей в горизонтальной плоскости. В данном случае к 1D-ориентации относится Парри-ориентация [2–4] гексагонального ледяного столбика (кристалл произвольно повернут вокруг вертикали, когда одна из прямоугольных граней частицы параллельна горизонту). 2D-ориентация характеризуется наличием вращения уже по двум углам (наличие вращений вокруг главной оси кристалла и вокруг вертикали). Преимущественная ориентация в горизонтальной плоскости в общем случае определяется вращением уже по трем углам (3D).

Так как для малых осцилляций около горизонтальной плоскости мы вправе задать любую плотность вероятности ориентаций в некоем заданном интервале, то для простоты изложения полученных результатов обозначим 3D $\chi$ -ориентацией преимущественную ориентацию Парри-ориентированного гексагонального ледяного столбика, где индекс  $\chi$  будет обозначать вид функции плотности вероятности распределения в заданном интервале. Во втором случае для описания наличия флаттера у частицы будем использовать обозначение 3D $\chi$ -ориентации, которая характеризуется вращениями уже по трем углам (вокруг главной оси кристалла, вертикали с малыми осцилляциями около горизонтальной

плоскости), где  $\chi$  также обозначает выбранный закон распределения отклонения частицы от горизонтального положения (флаттера).

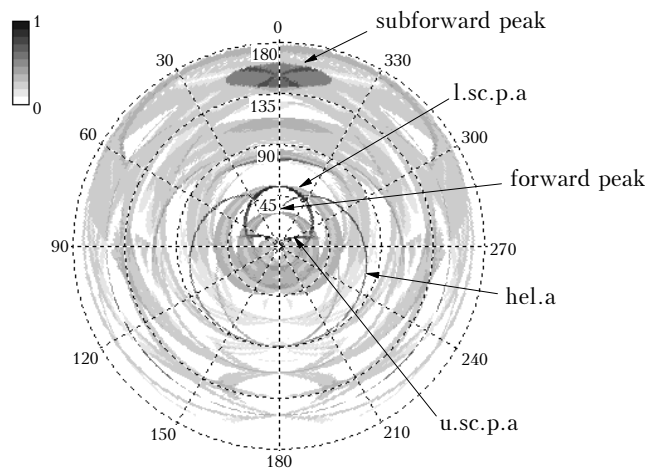
Как и в [1],  $\Sigma$  — количество внутренних столкновений для рассеянного пучка с заданной траекторией с гранями кристалла. Для сравнительного анализа будем рассматривать также нормальное и равномерное распределения флаттера. Максимальное значение отклонения частицы от горизонта примем  $5^\circ$  [5–9] при тех же значениях дисперсии для нормального распределения до  $T_i = i^\circ$ , где  $i = 1–5$ . Математическое ожидание равно 0 во всех случаях. Параметры формы  $F$  кристалла будут равны  $\{1,5; 2,5; 5; 10\}$ , а углы падения  $\theta_0$  в интервале  $(0^\circ; 90^\circ)$  с шагом  $10^\circ$ .

### 2. Характеристики света, рассеянного на гексагональных ледяных столбиках Парри с учетом флаттера

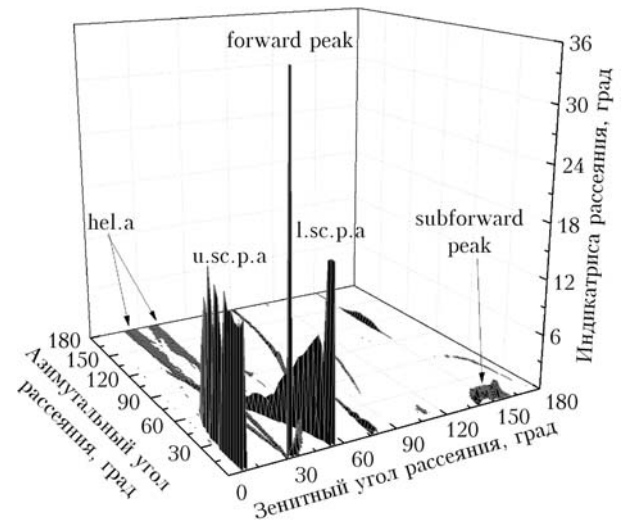
Рассмотрим поведение рассеянного света при 3D $\chi$ -ориентации гексагонального ледяного столбика в зависимости от параметра формы  $F$ , угла падения  $\theta_0$  и значения  $T_i$ . Вследствие большого объема данных (открытый доступ осуществляется по адресу <ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/> [10]) на рис. 1 в качестве примеров представлены результаты моделирования рассеяния света при Парри-ориентации гексагонального ледяного столбика с флаттером для двух наборов входных параметров.

Как видно из рис. 1, в отличие Парри-ориентации гексагонального столбика без флаттера, здесь

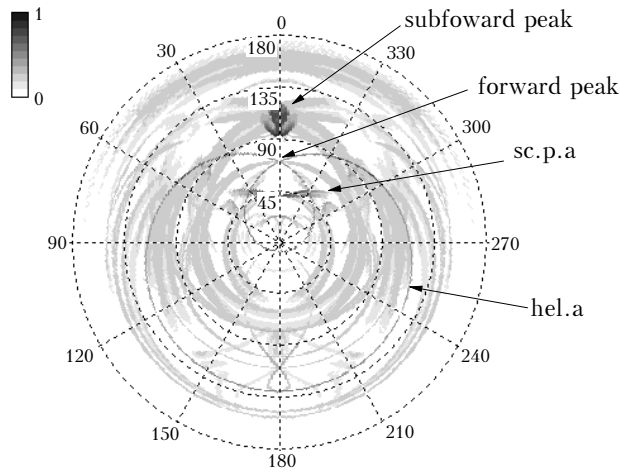
\* Алексей Владимирович Бурнашов (bvaleksey@iao.ru); Наталья Валентиновна Кустова.



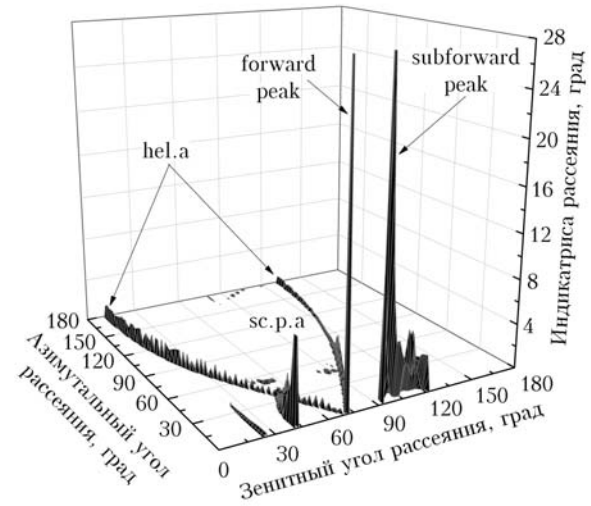
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 1. Результаты моделирования рассеяния света на Парри-ориентированном гексагональном столбике с учетом флаттера при следующих параметрах: *a, б* –  $F = 2,5$ ,  $\theta_0 = 30^\circ$ , 3Dg 5 (означает нормальное распределение по флаттеру при его максимальном значении  $T_5 = 5^\circ$ ); *в, г* –  $F = 10$ ,  $\theta_0 = 70^\circ$ , 3Dc 5. Из-за симметрии картины рассеяния относительно направления падения рис. 1, б и г приведены для азимутального интервала (0; 180°)

гало начинают представлять собой некие размытые области на сфере рассеяния и некоторые из них уже трудно различимы. Первоначально можно сделать вывод, что, например, *hel.a* остается линией. Однако при увеличении максимального значения угла отклонения частицы от горизонтальной плоскости становится очевидным, что оно представляет собой также размытую область на сфере рассеяния. Это объясняется тем фактом, что при отклонении частицы от горизонтального положения траектории также начинают отклоняться. Исключение составляет тип траекторий, когда свет проходит через плоскопараллельные грани, что как раз и дает резкий пик вперед.

Тем не менее также можно выделить области наибольшей интенсивности, вклад в которые дают

траектории с небольшим числом внутренних столкновений (например, *u.sc.p.a*) либо с полными внутренними отражениями (например, *hel.a*). Данный факт продемонстрирован в табл. 1 и 2. Не представленные в таблицах гало и соответствующие проценты рассеянной энергии включены в «остаток».

Заметим, что в большинстве случаев рассеяния света на преимущественно ориентированной гексагональной ледяной пластинке достаточно было трех внутренних столкновений, чтобы рассеянное излучение было больше или равнялось  $\geq 95\%$  от падающего вне зависимости от параметра формы  $F$  и угла падения  $\theta_0$ . В данном случае мы ограничились  $\Sigma = 4$ , так как уже при четырех взаимодействиях падающего излучения с гранями кристалла процент рассеянной энергии от падающей составляет более

90. Кроме того, при  $\Sigma > 4$  происходит увеличение лишь графы «остаток».

Таким образом, можно сделать вывод, что 70–100% рассеянной энергии вне зависимости от  $F$  и  $\theta_0$  распределяется среди небольшого количества гало

( $Q_1$ – $Q_7$ ,  $Q_{11}$ ,  $Q_{12}$ ). При этом чем больше параметр формы, тем больше рассеянной энергии приходится на указанные гало. Данный факт обусловлен образованием большинства гало типами траекторий, которые преодолевают двугранный угол  $60^\circ$ .

Таблица 1

Распределение рассеянной энергии среди  $Q_i$  в зависимости от  $\theta_0$  для параметра формы  $F = 1,5$  и 3Dg 1-ориентации гексагонального ледяного столбика (случай Парри)

$Q_i, \%$	$\theta_0^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$Q_1$ (hel.a)		14,5	13,2	9,1	5,6	6	13,6	15,4	17,9	19,6	21,1
$Q_2$ (forward peak)		48,2	40,3	29,5	24,8	22,9	23,8	28,3	27,3	24,7	0
$Q_3$ (subforward peak)		1,9	1,7	1,7	2,3	6,5	11,5	10,4	20,5	21,1	27,5
$Q_5$ (l.sc.p.a)		34,3	35,1	34,7	29,4	20,8	4,3	0,1	0	0	0
$Q_6$ (l.sx.p.a)		<0,1	1,7	4,5	5,1	0,8	3,5	7,6	0	0	0
$Q_7$ (u.sc.p.a)		0	0	7,6	14,4	17,9	16,2	11,3	0	0	0
$Q_8$ (cz.a)		0	0	0	0	0	0	1	2,1	1,1	<0,1
$Q_9$ (subp.i.a)		0	0	0	0	0,5	0,4	<0,1	<0,1	0	0
$Q_{10}$ (p.s.a)		0	0	0	0	0	0	0,8	2,2	2,5	4
$Q_{11}$ (sc.p.a)		0	0	0	0	0	0	0	6,3	2,2	<0,1
$Q_{12}$ (sx.p.a)		0	0	0	0	0	0	0	0	5,2	25,1
$Q_{14}$ (p.i.a)		0	0	0	0,1	1	1,9	2,5	2,1	1,1	0,2
$Q_{18}$ (subp.s.a)		0	0	0	0	0	<0,1	<0,1	0,4	<0,1	0
$Q_{22}$ (pc)		0,4	2,2	2,1	1,8	1,4	1,4	1,3	7,6	5,9	1,5
$Q_{23}$ (df.a)		0	0	0	0	0	<0,1	<0,1	<0,1	0,3	<0,1
$Q_{25}$ (subdf.a)		0	0	<0,1	0,5	0,4	0,9	1,4	1,4	1,6	3,3
$Q_{26}$ (subpc)		<0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	1,9	0,2	<0,1	<0,1	0
«Остаток»		0,7	5,3	10,6	15,5	21,1	19,9	19	11,8	13,8	17,2
Суммарная энергия рассеянного излучения при $\Sigma = 4$		99,2	92,2	93,5	93,9	94,4	92,4	93,3	94,8	95,7	95,1

Таблица 2

Распределение рассеянной энергии среди  $Q_i$  в зависимости от  $\theta_0$  для параметра формы  $F = 5$  и 3Dc 4-ориентации для гексагонального ледяного столбика (случай Парри)

$Q_i, \%$	$\theta_0^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$Q_1$ (hel.a)		14,2	14	10	6,7	6,6	16	13,3	13,2	17	19,4
$Q_2$ (forward peak)		46,8	43,2	33,9	30,9	30,2	31,6	41	36,6	29,4	0
$Q_3$ (subforward peak)		1,9	1,8	1,9	2	3,2	9	8,9	28,1	29,8	32,1
$Q_5$ (l.sc.p.a)		33,4	37,2	38,8	36,0	28,2	6,9	0,4	0	0	0
$Q_6$ (l.sx.p.a)		<0,1	0,5	1,4	1,2	1,1	4,2	10,6	0	0	0
$Q_7$ (u.sc.p.a)		0	0	8,3	16,8	22,7	20,2	16,1	0	0	0
$Q_8$ (cz.a)		0	0	0	0	0	0	0,3	0,7	0,4	0,1
$Q_9$ (subp.i.a)		0	0	0	0	0,2	0,1	<0,1	<0,1	0	0
$Q_{10}$ (p.s.a)		0	0	0	0	0	0	0,2	0,9	1	1,5
$Q_{11}$ (sc.p.a)		0	0	0	0	0	0	0	9,3	3,6	0,1
$Q_{12}$ (sx.p.a)		0	0	0	0	0	0	0	0	7,4	36,4
$Q_{14}$ (p.i.a)		0	0	0	<0,1	0,3	0,6	0,9	0,7	0,4	0,1
$Q_{18}$ (subp.s.a)		0	0	0	0	0	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	0,0
$Q_{22}$ (pc)		1,4	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	2,9	2,3	0,5
$Q_{23}$ (df.a)		0	0	0	0	0	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
$Q_{25}$ (subdf.a)		0	0	<0,1	0,2	0,2	0,3	0,6	0,5	0,4	1,2
$Q_{26}$ (subpc)		<0,1	<0,1	0,1	0,1	0,1	1,5	0,6	<0,1	<0,1	0
«Остаток»		2,3	2,5	5,1	5,6	6,4	8,3	6,3	6,1	6,7	8,4
Суммарная энергия рассеянного излучения при $\Sigma = 4$		98,9	92,4	94,4	94	91,6	97,7	90,7	94,0	92,5	92,9

Как и в случае с рассеянием света на преимущественно ориентированной гексагональной ледяной пластинке [1], получается, что вне зависимости от угла падения и вида функции распределения по флаттеру для определенного  $F$  распределение рассеянной энергии также отличается незначительно. Если будем варьировать параметр формы, то и доля рассеянной энергии будет меняться (см. табл. 1, 2) за счет изменения площадей выходящих пучков. Так, например, для одного и того же угла падения  $\theta_0$  и количества внутренних столкновений для рассеянного пучка с заданной траекторией с гранями кристалла  $\Sigma = 4$  разница доли рассеянной энергии в пике вперед ( $Q_2$ ) может доходить до 15%.

### 3. Характеристики света, рассеянного на гексагональных ледяных столбиках с учетом флаттера

Далее рассмотрим, каким образом ведет себя рассеянное излучение в случае, когда гексагональный ледяной столбик имеет равномерное вращение вокруг и главной оси кристалла, и вертикали при условии флаттирования частицы. На рис. 2 представлены сферы рассеяния с описанными параметрами моделирования.

В отличие от 2D $\chi$ -ориентированных столбиков, число гало, которые можно выделить отдельно,

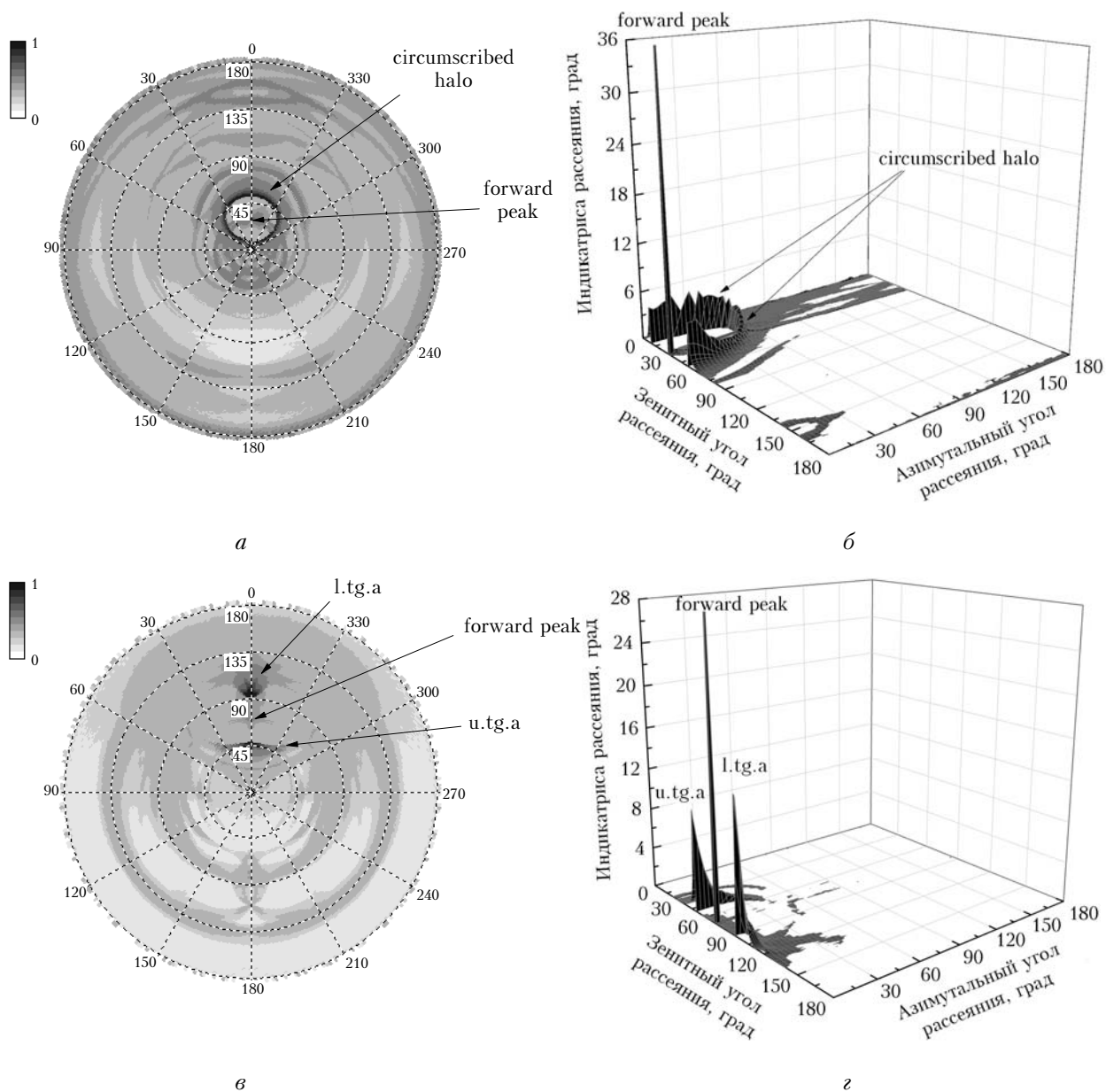


Рис. 2. Результаты моделирования рассеяния света на преимущественно ориентированном гексагональном столбике при 3D $\chi$ -ориентации и следующих параметрах: а, б –  $F = 2,5$ ,  $\theta_0 = 30^\circ$ , 3D $\chi$  5 (означает нормальное распределение по флаттеру при его максимальном значении  $T_5 = 5^\circ$ ); в, г –  $F = 10$ ,  $\theta_0 = 70^\circ$ , 3D $\chi$  5. За счет симметрии картины рассеяния относительно направления падения рис. б и г приведены для азимутального интервала (0; 180°)

также меньше. Происходит это потому, что для флаттирующей частицы траектории большинство из них начинает еще сильнее размываться на сфере рассеяния, например рс. В данном случае также при увеличении параметра формы кристалла происходит наращивание доли рассеянной энергии в гало, которые образуются траекториями прохождения света через двугранный угол  $60^\circ$ . Данный факт наглядно продемонстрирован в табл. 3, 4. Кроме того, на представленные в таблицах гало приходится 50–85% рассеянной энергии вне зависимости от угла падения  $\theta_0$ , параметра формы  $F$  и вида функции распределения по флаттеру.

сталла присутствует равномерное вращение вокруг его главной оси (3D $\chi$ -ориентация), доля рассеянной энергии в u.tg.a, l.tg.a, forward peak и circumscribed halo также более 50%. В обоих случаях при увеличении  $F$  происходит и возрастание доли рассеянной энергии в гало, которые образуются за счет прохождения падающего излучения через двугранный угол  $60^\circ$  либо через плоскопараллельные грани (forward peak). Для 3D $\chi$ -ориентаций гексагонального ледяного столбика достаточно 3–4 внутренних столкновений с гранями кристалла, чтобы рассеивалось более 90% падающего излучения вне зависимости от  $\theta_0$  и  $F$ .

Таблица 3

Распределение рассеянной энергии среди  $Q_i$  в зависимости от  $\theta_0$  для параметра формы  $F = 1,5$  и 3Dg 1-распределения

$Q_i, \%$ / $\theta_0^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$Q_1$ (p0)	35	32,2	29,8	27,8	25,9	25,1	24,9	26,1	28,5	30,3
$Q_5$ (l.tg.a)	0	0	0	0	0	14,2	12,1	11	10,7	10,7
$Q_6$ (u.tg.a)	0	0	0	0	0	14,6	12,1	11	10,5	10,7
$Q_7$ (cs.halo)	50,5	46,5	42,4	38,2	33,7	0	0	0	0	0
«Остаток»	14,5	21,4	27,8	34	40,4	46,1	50,9	51,9	50,4	48,3
Суммарная энергия рассеянного излучения при $\Sigma = 3$	95,9	95,4	94	92,4	91,3	90,9	91,1	92,5	93	93,1

Таблица 4

Распределение рассеянной энергии среди  $Q_i$  в зависимости от  $\theta_0$  для параметра формы  $F = 5$  и 3Dc 4-распределения

$Q_i, \%$ / $\theta_0^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$Q_1$ (p0)	34,4	33,8	33,4	33,4	34,1	34,7	35	34,9	33,9	34,3
$Q_5$ (l.tg.a)	0	0	0	0	0	18,9	16,9	15,6	15,4	15,6
$Q_6$ (u.tg.a)	0	0	0	0	0	19,8	16,8	15,6	15,1	15,6
$Q_7$ (cs.halo)	49,4	48,5	46,8	44,9	42,6	0	0	0	0	0
«Остаток»	17,1	21,6	28	34,1	40,5	46	50,7	51,8	50,4	48,6
Суммарная энергия рассеянного излучения при $\Sigma = 4$	95,8	95,3	94	92,4	91,4	91	91,2	92,4	93	93,1

В данном случае, чтобы рассеянное излучение составляло минимум 90% от падающего, для табл. 3 было взято  $\Sigma = 3$ , а для табл. 4  $\Sigma = 4$ . Траектории с числом внутренних столкновений больше указанного увеличивают процент рассеянной энергии в графе «остаток».

### Заключение

Рассмотрены характеристики света, рассеянного на гексагональных ледяных столбиках при 1D- и 2D-ориентациях с учетом малых осцилляций около горизонтальной плоскости. При введении дополнительного угла вращения гало начинают «размываться» по сфере рассеяния еще сильнее. Показано, что в случае 3D $\chi$ -ориентации частиц 70–100% рассеянной энергии распределяется среди небольшого количества гало ( $Q_1$ – $Q_7$ ,  $Q_{11}$ ,  $Q_{12}$ ) в зависимости от параметров моделирования. Когда у кри-

Доступ к данным осуществляется по адресу: <ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/> [10].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-05-00051-а).

1. Бурнашов А.В., Кустова Н.В. Рассеяние света преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости гексагональными ледяными кристаллами. I. Гексагональные пластинки // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 3. С. 199–204.
2. Бурнашов А.В., Боровой А.Г. Рассеяние света горизонтально ориентированными столбиками // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 11. С. 922–930.
3. Tape W. Atmospheric halos. Washington: American Geophysical Union, Antarctic Research Series. V. 64. 1994. 139 p.
4. Tape W., Moilanen J. Atmospheric Halos and the Search the Angle X. Washington: American Geophysical Union. 2006. 238 p.
5. Platt C.M.R., Abshire N.L., McNice G.T. Some microphysical properties of an ice cloud from lidar

- observation // J. Appl. Meteorol. 1978. V. 17, N 8. P. 1220–1224.
6. *Thomas L., Kartwright J.C., Wareing D.P.* Lidar observations of the horizontal orientation of ice crystals in cirrus clouds // *Tellus B.* 1990. V. 42, N 2. P. 211–216.
  7. *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.
  8. *Noel V., Chepfer H.* Study of ice crystals orientation in cirrus clouds based on satellite polarized radiance measurements // *J. Amer. Meteorol. Soc.* 2004. V. 61, N 16. P. 2073–2081.
  9. *Noel V., Sassen K.* Study of ice crystals orientation in ice clouds based on polarized observations from the farscanning lidar // 22th Int. Laser Radar Conference (ILRC 2004). ESA: Matera, Italy, 2004. P. 309–312.
  10. <ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/>

*A.V. Burnashov, N.V. Kustova.* **Light scattering by preferably oriented ice crystals. II. Hexagonal columns.**

Energy characteristics for different parameters of modeling of preferably oriented hexagonal ice columns are studied. The parameters of modeling have been taken as follows: aspect ratios  $F = \{1,5; 2,5; 5; 10\}$ , the incident angle  $\theta_0 = (0; 90^\circ)$ , the maximum deviation of the particle from the horizontal plane of  $5^\circ$  has been taken for normal and uniform distribution. Tables of distributions of scattered energy among halos depending on incident angles, aspect ratios and forms of flutter are presented. It is shown that 70–100% of the scattered energy is distributed among some halos for the case of the  $3D\chi$ -orientation. For the case of the  $3D\chi$ -orientation, 50–85% of the scattered energy is distributed among only u.t.g.a, l.t.g.a, forward peak and circumscribed halo.