

УДК 551.501

Рассеяние света на ледяных кристаллах перистых облаков вида «пуля» и «усеченная пуля» в условиях их преимущественной ориентации в пространстве

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 25.10.2013 г.

В приближении геометрической оптики проведено численное моделирование рассеяния света на ледяных кристаллах перистых облаков вида «пуля» и «усеченная пуля», ориентированных преимущественно в горизонтальной плоскости. Для данных частиц рассматривался параметр формы $F = 10$, максимальная величина флаттера принималась равной 5° . С учетом флаттирования рассмотрены как Парри-ориентация кристаллических частиц в пространстве, так и 3D-ориентация. На основе полученных результатов представлены табличные данные о распределении рассеянного излучения по наиболее ярким гало. Проведено сравнение полученных данных с данными для случая рассеяния света на простом гексагональном столбике.

Ключевые слова: матрица рассеяния, перистые облака, флаттер, преимущественная ориентация, гало, дроксталл, поляризация, кристалл вида «пуля», Парри-ориентация; scattering matrix, cirrus clouds, flutter, preferable orientation, halo, droxtal, polarization, bullet, Parry orientation.

1. Геометрические характеристики ледяных кристаллов и параметры численного моделирования

Настоящая статья является продолжением исследований взаимодействия солнечного излучения с различными по форме ледяными кристаллами [1–17], характерными для перистых облаков и, в частности, [8–17]. Рассматриваемые нами ледяные кристаллы – это так называемые кристаллы вида «пуля» и «усеченная пуля» (или усеченный дроксталл).

На рис. 1 представлены геометрические параметры рассматриваемых ледяных кристаллов, характерных для перистой облачности. Видно, что формы кристаллов, кроме стандартных геометрических параметров (L и a), характеризуются либо еще одним (h) либо двумя (h и b) дополнительными. Так как на данный момент не существует конкретных значений параметров h и b , то будем выбирать их эмпирически, основываясь на реальных фотографиях W. Таре [18]. Кроме того, введем нумерацию граней в соответствии с рис. 1, которую при необходимости будем использовать для более понятного изложения полученных результатов.

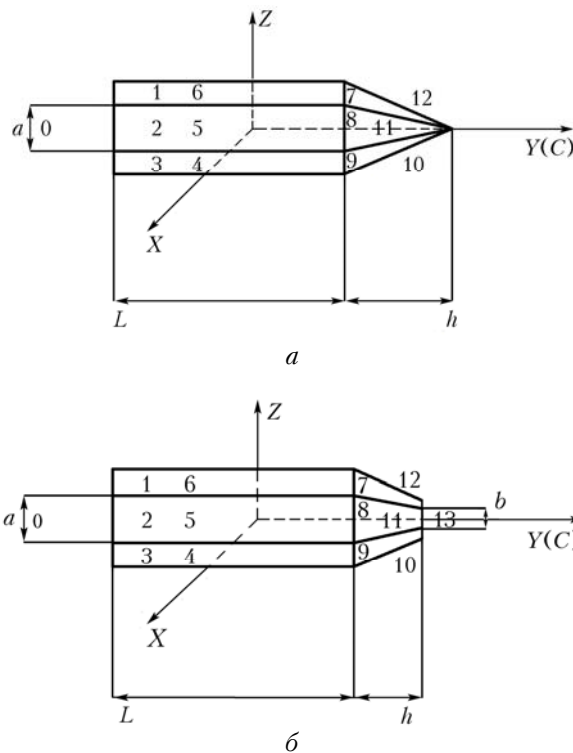


Рис. 1. Геометрические характеристики рассматриваемых ледяных кристаллов: a – кристалл вида «пуля»; b – кристалл вида «усеченная пуля» (или усеченный дроксталл). C – главная ось кристалла, параллельная горизонту

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

Характеристики рассеянного света

Покажем, каким образом происходит распределение рассеянного излучения на рассматриваемых кристаллах. Вследствие большого объема полученных результатов на рис. 2 представлена сфера направлений рассеяния света для двух видов ледяных кристаллов с указанными начальными параметрами численного моделирования в случае Парри-ориентации [11, 12, 14].

Напомним, что Парри-ориентацией ледяного кристалла называется такая ориентация кристалла в пространстве, когда он имеет равномерное вращение относительно зенита и одна из его прямоугольных граней параллельна горизонту. Флаттер подразумевает небольшие флуктуации относительно горизонтальной плоскости. Так, например, 3Dg 5 означает, что кристалл с Парри-ориентацией имеет флуктуации, распределенные по нормальному закону с максимальным отклонением от горизонтальной плоскости 5° .

На рис. 2 приведены графики только для «усеченной пули», так как визуально они мало отлича-

ются от графиков для «пули». Несмотря на наличие скошенных граней у кристаллов вида «пуля» и «усеченная пуля», наиболее яркие гало остаются те же, что и в случае рассеяния света на гексагональном столбике.

Данный факт объясняется тем, что, во-первых, большая часть рассеянной энергии приходится на траектории с небольшим числом внутренних столкновений с гранями кристаллов. Во-вторых, часть кристалла, геометрические параметры которой описываются « h » и/или « b », на порядок меньше основной гексагональной части. Также на рис. 2 отчетливо видны различия между пиком назад и sc.p.a.

Если в случае рассеяния света на гексагональном столбике доли энергии, приходящиеся на данное гало, на сфере направлений рассеяния сконцентрированы в узком интервале углов, то в случае рассеяния света на ледяных кристаллах вида «пуля» и «усеченная пуля» (или усеченный дроксталл) данные области немного размыты. Это объясняется тем, что в такие гало дают вклад подобные типы траекторий, образующиеся в результате рассеяния света на усеченной части рассматриваемых кристаллов.

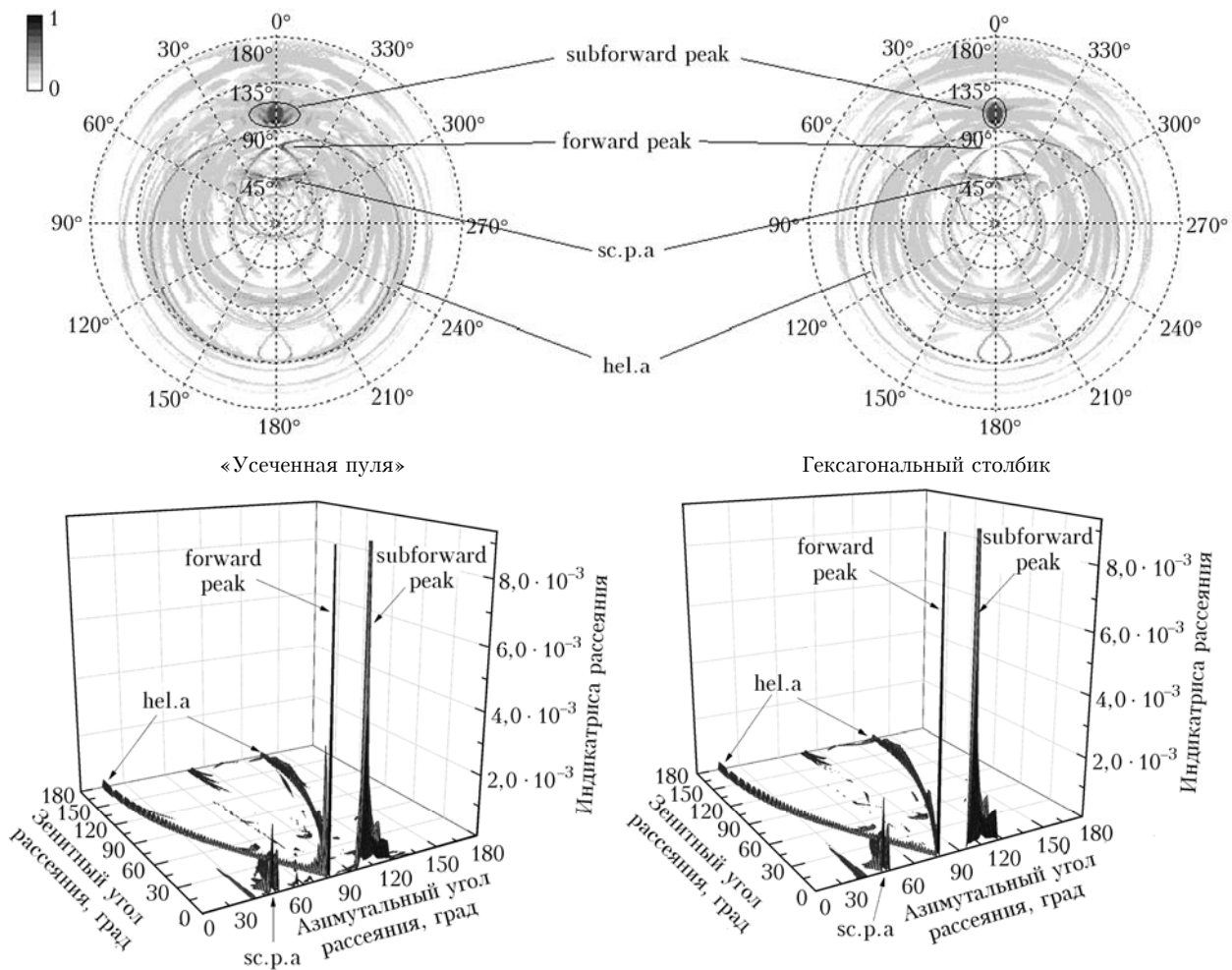


Рис. 2. Результаты моделирования рассеяния света на преимущественно ориентированных «усеченной пуле» и гексагональном столбике при форме кристаллов $F = 10$ и угле падения $\theta_0 = 75^\circ$, 3Dg 5 (случай Парри-ориентации). За счет симметрии картины рассеяния относительно направления падения нижние графики приведены для азимутального интервала $(0; 180^\circ)$

На основе введенной ранее параметризации индикатрисы рассеяния света в случае столбчатых кристаллов [11, 12, 14] проведем сравнение результатов численного моделирования. В табл. 1 и 2 представлена информация о распределении рассеянной энергии по наиболее ярким гало при рассеянии света на ледяных кристаллах вида «пуля» и «усеченная пуля» с учетом их зенитной преимущественной ориентации в пространстве. Отметим, что в значении параметра формы ($F = L + h/2a$, см. рис. 1, *a*, $F = L + h/a + b$, см. рис. 1, *б*) присутствует литера, которая означает форму кристалла («b» – кристалл вида «пуля», «d» – кристалл вида «усеченная пуля» (усеченный дроксталл), «h» – простой гексагональный столбик).

Таблица 1

Распределение рассеянной энергии по наиболее ярким гало при $F = 10$, $\theta_0 = 15$ и 45° (случай 3Dg 5)

Весовой коэффициент, %	Угол падения θ_0 , град (отсчитывается от зенита)					
	15			45		
	F					
	10b	10d	10h	10b	10d	10h
Q_1 (hel.a)	9,6	9,8	12,4	6,7	7	8,4
Q_2 (forward peak)	31,1	31,6	35,8	26,9	26,6	30,2
Q_3 (subforward peak)	6,1	6,2	4,1	5,6	5,8	6,7
Q_4 (subsc.p.a)	0	0	0	0	0	0
Q_5 (l.sc.p.a)	31,8	31,3	35,9	17,3	17,4	20,6
Q_6 (l.sx.p.a)	0,3	0,4	0,8	2,6	2,6	2,4
Q_7 (u.sc.p.a)	2,6	2,4	4,7	23,9	23,9	22
Q_8 (cz.a)	0	0	0	0	0	0
Q_9 (subp.i.a)	0	0	0	<0,1	<0,1	0,1
Q_{10} (p.s.a)	0	0	0	0	0	0
Q_{11} (sc.p.a)	0	0	0	0	0	0
Q_{12} (sx.p.a)	0	0	0	0	0	0
Q_{14} (p.i.a)	0	0	0	0,1	0,2	0,1
Q_{19} (subu.sc.p.a)	0	0	0	0	0	0
Q_{20} (Tr.a)	0	0	0	0	0	0
Q_{21} (Wg.a)	0	0	0	0	0	0
Q_{22} (pc)	0,2	0,3	0,6	0,1	0,2	0,3
Q_{25} (subdf.a)	0	0	0	0	0	0
Q_{26} (subpc)	0	0	0	0	0	0
Остаток	18,3	17,9	5,7	16,8	16,4	9,1

Из табл. 1 и 2 видно, что наибольшие отличия по распределению рассеянной энергии относятся к hel.a, пику вперед, пику назад и гало, которые образуются траекториями преодоления двугранного угла 60° , например l.sc.p.a.

Для пика вперед и пика назад данный факт объясняется либо отсутствием второй гексагональной грани (кристалл вида «пуля»), либо наличием гексагональной грани (грань «13», см. рис. 1, *б*), но за счет геометрии кристалла площадь соответствующего выходящего пучка значительно меньше, как в случае простого гексагонального столбика. Что касается гало, которые образуются траекториями преодоления двугранного угла 60° , то здесь небольшая добавка получается за счет подобных траекторий, когда одна из граней является скошенной, например траектория «6–8». Таким образом, доля рассеянной энергии, приходящейся на данные гало, почти всегда больше для случая рассеяния света на кристалле вида «пуля», чем на кристалле вида «усеченная пуля».

При рассеянии света на столбчатых кристаллах, их преимущественной зенитной ориентации в пространстве и равномерных вращениях вокруг зенита и главной оси кристалла индикатриса рассеяния света на сфере направлений рассеяния света показана на рис. 3, где наиболее яркие гало также представляют собой более размытые области в случае кристаллов вида «пуля» и «усеченная пуля» по сравнению со случаем рассеяния света на простом гексагональном столбике. В данном случае обозначение 3Dg 5 подразумевает, что распределение флаттера подчиняется нормальному закону и его значение равно 5° .

Таблица 2

Распределение рассеянной энергии по наиболее ярким гало при $F = 10$, $\theta_0 = 60$ и 75° (случай 3Dg 5)

Весовой коэффициент, %	Угол падения θ_0 , град (отсчитывается от зенита)					
	60			75		
	F					
	10b	10d	10h	10b	10d	10h
Q_1 (hel.a)	9	9,1	13,0	13,1	13,3	14,5
Q_2 (forward peak)	38	38,3	39,1	31,1	31,1	32,6
Q_3 (subforward peak)	7,7	7,9	9,1	4,4	4,5	5,6
Q_4 (subsc.p.a)	0	0	0	20,5	20,7	16,9
Q_5 (l.sc.p.a)	0,7	0,5	0,4	0	0	0
Q_6 (l.sx.p.a)	11,5	11,3	11,1	0	0	0
Q_7 (u.sc.p.a)	17,6	17,3	17,7	0	0	0
Q_8 (cz.a)	<0,1	<0,1	0,1	0,2	0,3	0,5
Q_9 (subp.i.a)	0,1	0,1	0,1	0	0	0
Q_{10} (p.s.a)	<0,1	<0,1	0,1	0,2	0,3	0,9
Q_{11} (sc.p.a)	0	0	0	11,8	11,5	10
Q_{12} (sx.p.a)	0	0	0	1,9	1,9	1,9
Q_{14} (p.i.a)	0,2	0,3	0,7	0,1	0,2	0,3
Q_{19} (subu.sc.p.a)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Q_{20} (Tr.a)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Q_{21} (Wg.a)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Q_{22} (pc)	0,1	0,2	0,3	0,6	1,0	2,1
Q_{25} (subdf.a)	0,1	0,1	0,4	<0,1	<0,1	<0,1
Q_{26} (subpc)	0,2	0,3	0,4	<0,1	<0,1	<0,1
Остаток	15	14,5	7,4	16	15,3	14,6

В табл. 3 показано, как происходит распределение доли рассеянной энергии среди наиболее ярких гало.

Таблица 3

Распределение рассеянной энергии по наиболее ярким гало при параметре формы кристаллов $F = 10$ и различных углах падения θ_0 (случай 3Dg 5)

Угол падения θ_0 , град	F	Q_1 (forward peak)	Q_5 (l.tg.a)	Q_6 (u.tg.a)	Q_7 (cs.halo)	Остаток
15	10b	29,3	0	0	55,1	15,5
	10d	28,7	0	0	54,3	16,6
	10h	34,2	0	0	48,6	17,2
45	10b	30,4	0	0	47,3	22,3
	10d	29,9	0	0	47,5	22,2
	10h	35,8	0	0	42,1	22,1
60	10b	36,5	18,8	18,7	0	24,4
	10d	35,9	18,8	18,6	0	25,8
	10h	37,3	17,9	17,8	0	27
75	10b	36,5	17,4	17,2	0	28,3
	10d	36,9	17,5	17,3	0	28,2
	10h	37,2	16,7	16,7	0	29,5

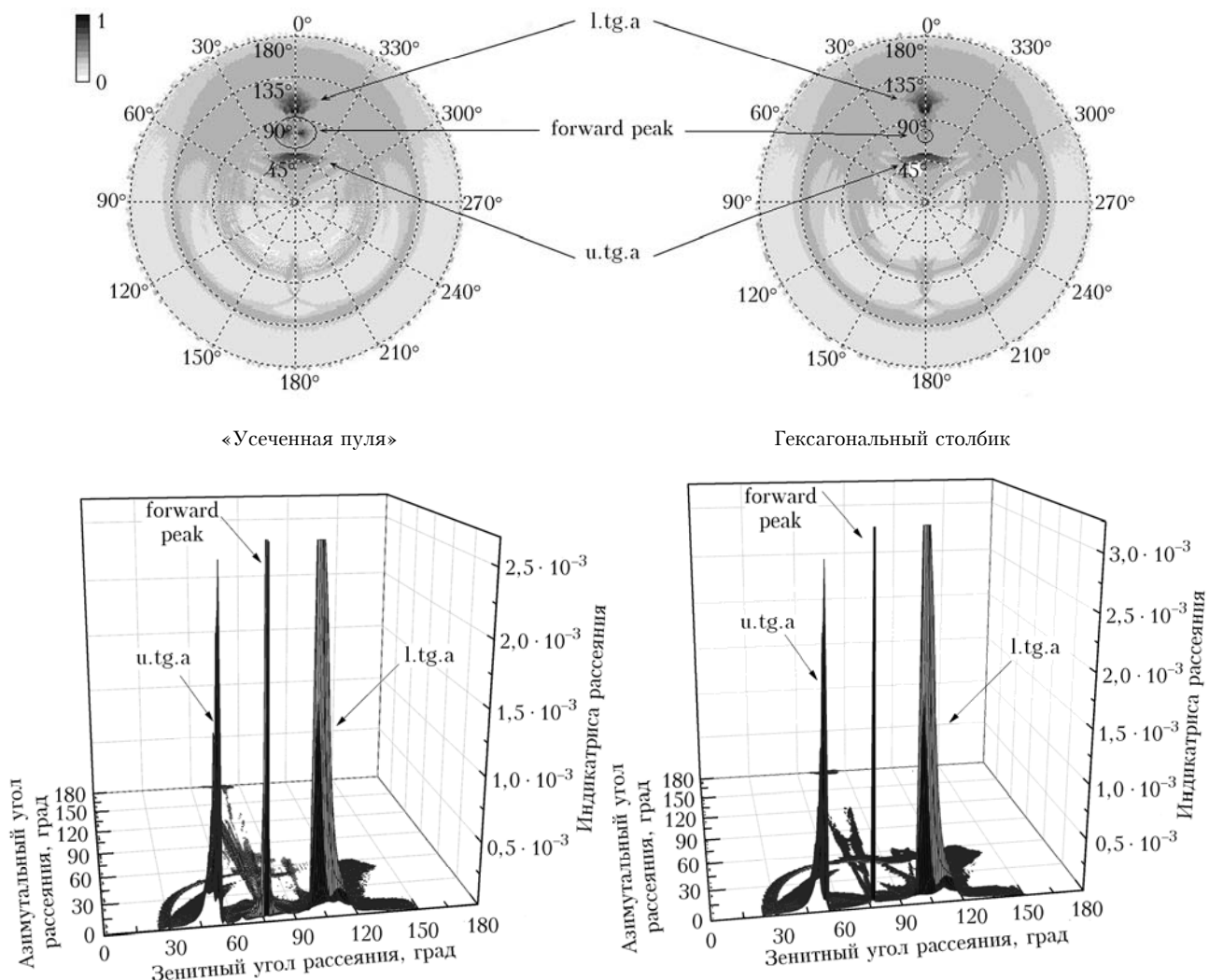


Рис. 3. Результаты моделирования рассеяния света на преимущественно ориентированных «усеченной пуле» и гексагональном столбике при $F = 10$ и угле падения $\theta_0 = 75^\circ$, 3Dg 5 (случай 3D). Из-за симметрии картины рассеяния света относительно направления падения нижние графики приведены для азимутального интервала (0; 180°)

Аналогично Парри-ориентации на гало Q_5 , Q_6 , Q_7 приходится в большинстве случаев больше рассеянной энергии для кристалла вида «усеченная пуля» в отличие от кристалла вида «пуля». Обратная ситуация наблюдается для Q_1 вследствие наличия в кристалле вида «усеченная пуля» небольшой гексагональной грани «13», которая параллельна другой гексагональной грани «0» (см. рис. 1, б). Свободный доступ к данным осуществляется по адресу [19].

Работа выполнена при поддержке 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., Koелеmeijer R.B., Stammes P.* Scattering matrices of imperfect hexagonal ice crystals // *J. Quant. Spectrosc. 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. 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. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112, N 9. P. 1492–1508.
6. *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.
7. *Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Ориентация частиц в кристаллических облаках *Ci*: Часть 1. Ориентация при падении // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 11. С. 963–967.
8. *Borovoi A.G., Burnashov A.V., Cheng A.Y.S.* Light scattering by horizontally oriented ice crystal plates // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2007. V. 106, N 1–3. P. 11–20.
9. *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.
10. *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.
 11. *Бурнашов А.В., Боровой А.Г.* Рассеяние света горизонтально ориентированными ледяными столбиками // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 11. С. 922–930.
 12. *Borovoi A.G., Burnashov A.V., Oppel U.G.* Scattering matrices for horizontally oriented ice crystals // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2008. V. 109, N 15. P. 2648–2655.
 13. *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.
 14. *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.
 15. *Бурнашов А.В., Коношонкин А.В.* Матрица рассеяния света на усеченном пластинчатом дроксталле, ориентированном преимущественно в горизонтальной плоскости // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1043–1048.
 16. *Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г.* Особенности в деполяриционном отношении лидарных сигналов для хаотически ориентированных ледяных кристаллов перистых облаков // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 5. С. 385–387.
 17. *Коношонкин А.В., Боровой А.Г.* Зеркальное рассеяние света на ледяных кристаллах облаков и взволнованной поверхности воды // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 64–69.
 18. *Tape W., Moilanen J.* Atmospheric Halos and the search of Angle X. Washington: American Geophysical Union. DC., 2006. 238 p.
 19. URL: ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Geometric_Optics/

A.V. Burnashov, A.V. Konoshonkin. Scattering of the light on bullet and droxtal ice crystals of cirrus clouds preferably oriented in a horizontal plane with zenith flutter.

The properties of the light scattering on a column-like bullet and droxtal of cirrus clouds oriented preferably in a horizontal plane have been calculated in the geometrical optics approximation. The shape parameters of crystals F and the flutter are assumed to be equal to 10 and 5 degrees respectively. The Parry and 3D orientations of crystals in space have been analyzed. Based on the results, the tabular information of the distribution of the scattered light among the brightest halo has been represented. The results have been compared with scattering on the hexagonal column.