

Об угловой структуре яркости световых столбов от наземных точечных источников в снегопадах

О.В. Савченко, Н.И. Вагин, А.М. Морозов*

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

Поступила в редакцию 16.03.2009 г.

Рассмотрены результаты экспериментов по наблюдению световых столбов от точечного источника света в слабых снегопадах. Получены аппроксимации угловых профилей для различных углов визирования. Выявлена двухмасштабность угловой структуры световых столбов.

Ключевые слова: световые столбы, преимущественная ориентация, ледяные кристаллы; light pillars, preferable orientation, ice crystals.

Введение

Ледяные кристаллы в атмосфере принимают преимущественно горизонтальную ориентацию за счет гидродинамических или каких-либо других сил. Такая ориентация кристаллов приводит к появлению хорошо известных атмосферно-оптических явлений в виде солнечных столбов на небе или световых столбов над наземными, обычно изотропными, источниками света [1, 2]. Как следует из экспериментальных измерений, ориентация кристаллов при этом осциллирует относительно горизонта в небольшом интервале углов порядка 5° [3–6]. Эти осцилляции принято называть флаттером.

В настоящее время оптические параметры преимущественно ориентированных ледяных кристаллов в атмосфере, так же как и характеристики флаттера, вызывают повышенный интерес, поскольку экспериментальные данные, полученные космическим лидаром [7], показывают, что преимущественная ориентация кристаллов реализуется в атмосфере довольно часто. Но как характеристики самого флаттера, так и обусловленные им оптические параметры преимущественно ориентированных кристаллов рассматривались только небольшим числом исследователей. В частности, в статьях [8–10] в рамках гидродинамики рассматриваются параметры флаттера ледяных кристаллов и там же можно найти ссылки на предыдущие работы. Теория оптических параметров преимущественно ориентированных кристаллов изложена в работе [11], в которой предлагается разделить свет, рассеянный ледяными кристаллами, на зеркальную и диффузную компоненты, где зеркальная компонента образуется отражением света от тех граней кристалла, которые ориентированы горизонтально.

Эта компонента описывается достаточно простыми аналитическими выражениями, тогда как для диффузной компоненты в настоящее время не получено каких-либо аналитических выражений. К тому же неизвестно количественное соотношение между этими компонентами, которое зависит от параметров ледяных кристаллов.

В настоящей статье мы приводим результаты эксперимента, в котором для световых столбов, возникающих в снегопадах, проводится разделение рассеянного света на эти две компоненты и рассматриваются количественные соотношения между ними.

На рис. 1 показан световой столб в снегопаде с довольно крупными снежинками.



Рис. 1. Изображение светового столба

* Остап Вячеславович Савченко (xxl@iao.ru); Николай Иванович Вагин (regibu@inbox.ru); Александр Михайлович Морозов (moro@iao.ru).

В качестве точечного источника света использовалась галогенная лампа, которая находилась на расстоянии 21,4 м от точки наблюдения на высоте 3,4 м, а угол визирования равнялся 15,7°.

Обработка фотографий столба сводилась к следующему. Каждая точка изображения характеризует яркость столба в направлении, задаваемом двумя углами: высотным углом β и углом отклонения θ от вертикальной плоскости. Мы сканировали изображение в поперечном разрезе столба и получали угловые профили яркости как функции от угла θ . Для этого по углу визирования изображение разбивалось на полосы и в пределах полосы проводилось усреднение. Пример полученных таким образом данных приведен на рис. 2.

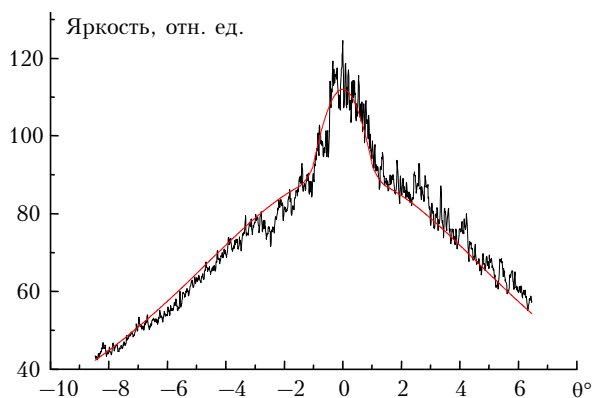


Рис. 2. Экспериментальное поперечное угловое распределение яркости в столбе ($\beta = 18,1^\circ$)

Как видно на рис. 1, в изображении светового столба выделяются яркая центральная часть, соответствующая зеркальной компоненте, и широкоугольная часть с широкими спадающими крыльями.

Для выяснения особенностей такой угловой структуры мы провели процедуру сглаживания полученных экспериментальных данных. Для этого взяли две простые модели для зеркальной и широкоугольной части профиля яркости:

$$J_c(\beta, \theta) = A(\beta) \exp\left\{-\left(\theta / \theta_g\right)^2\right\}$$

в центральной части столба $|\theta| \leq \Delta_0$, где $\Delta_0 = 1,0^\circ$, и

$$J(\beta, \theta) = \frac{a(\beta) \theta_d^2}{\theta^2 + \theta_d^2}$$

в широкоугольной области за пределами углов $|\theta| \geq \Delta$, где $\Delta = 1,5^\circ$.

В промежуточных участках по $0,5^\circ$ с обеих сторон от центра использовался параболический сплайн для сшивания обеих функций. Таким образом, каждый полученный угловой профиль мы характеризовали четырьмя параметрами: параметром гауссоиды θ_g , амплитудой зеркальной компоненты $A(\beta)$, угловой шириной θ_d и амплитудой широкоугольной части $a(\beta)$.

На рис. 3 представлены сглаженные таким образом профили яркости для четырех углов β . По всей совокупности подобных зависимостей нами получено, что угловая ширина зеркальной компоненты $\theta_g = (2,3 \pm 0,2)^\circ$ (т.е. параметр гауссоиды, приведенный на рис. 3) оказалась практически постоянной и не зависящей от угла β . Этот результат полностью подтверждает имеющийся в работе [11] теоретический вывод о том, что угловая ширина зеркальной компоненты не зависит от высоты.

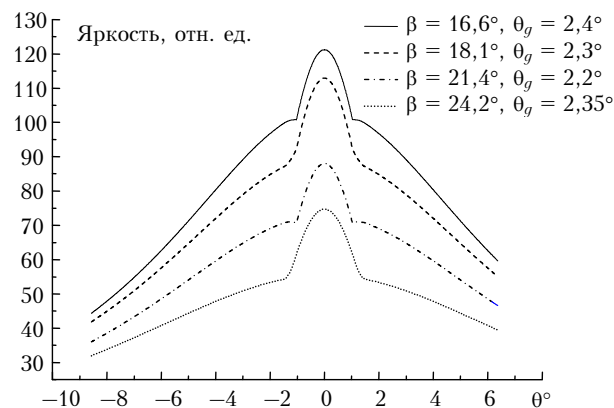


Рис. 3. Сглаженные профили яркости светового столба для четырех углов β

Что касается широкоугольной части столба, то в ее формировании участвуют обе компоненты рассеянного снежинками излучения — зеркальная и диффузная.

Если θ_g не меняется с высотой, то уширение диффузной части монотонно нарастает при увеличении высоты. Построенная по экспериментальным точкам зависимость угловой ширины от угла β аппроксимируется формулой

$$\theta_d = 15,2 - 1,14\beta + 0,04\beta^2.$$

Убывание яркости зеркальной и диффузной компонент с ростом угла β представлено на рис. 4, где a (10) соответствует разбиению всего интервала углов на 10 полос с шириной $\Delta\beta = 1,09^\circ$, a (8) на 8 полос с $\Delta\beta = 1,37^\circ$.

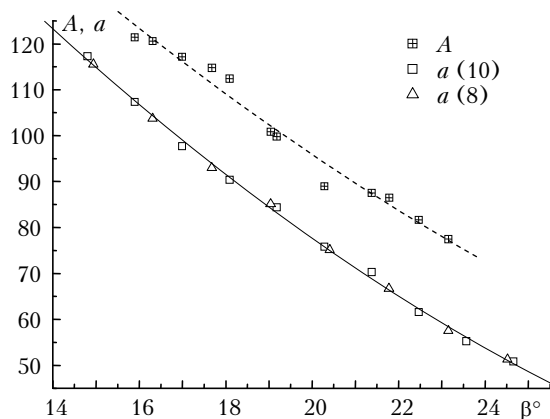


Рис. 4. Зависимости амплитуд a и A от угла β

Здесь затухание с высотой амплитуды диффузной компоненты аппроксимируется как

$$a(\beta) = 273,9 - 13,0\beta + 0,16\beta^2,$$

тогда как зеркальная компонента убывает медленней:

$$A(\beta) = 274,6 - 11,5\beta + 0,13\beta^2.$$

Это приводит к тому, что контраст зеркальной компоненты светового столба увеличивается с высотой и из измерений под большими углами, соответствующими большим высотам, можно извлекать информацию по флаттеру более надежно, здесь вклад диффузной компоненты мал.

Учет удельных вкладов от зеркальной и диффузной компонент позволяет нам надеяться на более достоверную постановку задачи для определения распределения снежинок по ориентациям из яркости световых столбов.

Авторы благодарны А.Г. Боровому и Э.И. Нацу за полезные замечания при обсуждении результатов.

1. *Mallmann A.J., Hock J.L., Greenler R.G.* Comparison of Sun Pillars With Light Pillars From Nearby Light Sources // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. N 9. P. 1441–1449.
2. *Sassen K.* Polarization and Brewster angle properties of light pillars // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 1987. V. 4. N 3. P. 570–580.
3. *Platt C.M.R., Abshire N.I., McNice G.T.* Some microphysical properties of an ice cloud from lidar

- observations of horizontally oriented crystals // *J. Appl. Meteorol.* 1978. V. 17. N 8. P. 1220–1224.
4. *Noel V., Roy G., Bissonnette L., Chepfer H., Flamant P.* Analysis of lidar measurements of ice clouds at multiple incidence angles // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. N 9. P. 1338, doi: 10.1029/2002GL014828.
 5. *Noel V., Sassen K.* Study of planar ice crystal orientations in ice clouds from scanning polarization lidar observations // *J. Appl. Meteorol.* 2005. V. 44. N 11. P. 653–654.
 6. *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 4. P. 2073–2081.
 7. *Hu Y., Vaughan M., Liu Z., Liu B., Yang P., Flittner D., Hunt B., Kuehn R., Huang J., Wu D., Rodier S., Powell K., Trepte C., Winker D.* The depolarization-attenuated backscatter relation: CALIPSO lidar measurements vs. theory // *Opt. Express.* 2007. V. 15. N 9. P. 5327–5332.
 8. *Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Ориентация частиц кристаллических облаков *Ci*: Часть 1. Ориентация при падении // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18. № 11. С. 963–967.
 9. *Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Ориентация частиц в кристаллических облаках *Ci*: Часть 2. Азимутальная ориентация // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19. № 1. С. 44–46.
 10. *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.
 11. *Borovoi A., Kustova N.* Display of ice crystal flutter in atmospheric light pillars // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L04804, doi: 10.1029/2008GL036413.

O.V. Savchenko, N.I. Vagin, A.M. Morozov. **About the angular structure of light pillar brightness caused by ground point sources in snowfalls.**

We considered results of experiments on the observing of light pillars from a point source in weak snowfalls. Angle profiles approximations for different vision angles are obtained. Two-scale dimensions of light pillars angular structure were revealed.