

Гистограмма распределения снежинок по углам ориентации в свежеснежном покрове

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

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

Поступила в редакцию 6.05.2008 г.

Состояние снежного покрова и, в частности, ориентация поверхностных снежинок определяют альbedo снега. Проведено экспериментальное исследование ориентации снежинок в верхнем слое снежного покрова, формирующем зеркальное отражение. Получены гистограммы распределения снежинок по углам. Предложено модельное распределение, которое хорошо аппроксимирует полученные гистограммы.

Ключевые слова: снежный покров, зеркальное отражение, плотность вероятности.

Известно [1, 2], что снежный покров сильно влияет на изменения климата из-за его высокого альbedo. Альbedo Земли вместе с атмосферой изменяется в зависимости от облачности и площади снежного покрова. Коэффициент отражения солнечной радиации (альbedo снега), как правило, очень велик. Для плотного чистого снега он колеблется от 0,85 до 0,95. Снег, в целом, отражает солнечные лучи так же, как матовая поверхность, которая равномерно рассеивает свет во все стороны. Это объясняется разнообразной ориентировкой множества снежинок. Лишь не более 3% всех кристалликов случайно оказываются наклоненными почти горизонтально [3]. Только они отражают лучи зеркально, вызывая всем знакомый эффект искристости снега. Детальное исследование ориентации поверхностных снежинок может позволить точнее оценивать альbedo снега. Нами была предпринята попытка экспериментального определения ориентации снежинок, формирующих зеркальное отражение.

Ориентацию снежинок можно задать двумя углами: θ — угловое отклонение от вертикального направления $0 \leq \theta \leq \pi/2$ и φ — азимутальный угол $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. Для изотропной по азимуту φ ориентации, описываемой плотностью вероятности $f(\theta)$, дифференциал вероятности

$$dP = f(\theta)\sin(\theta) d\theta d\varphi.$$

Для оценки распределения по углам ориентации мы воспользовались известным эффектом искристости света, возникающим вследствие зеркального отражения лучей.

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

Для этого в темное время суток мы проводили фотографирование снежного покрова по схеме, представленной на рис. 1.

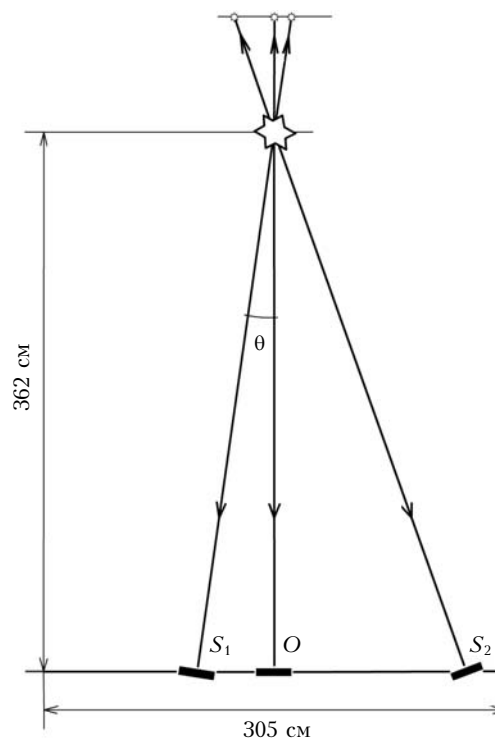


Рис. 1. Схема эксперимента

Источником света служила фотовспышка самой фотографической камеры. Стрелками показаны лучи от вспышки, которые нормально отражались от соответственно ориентированных снежинок и противоположно. Стрелки, направленные противоположно, показывают места регистрируемых бликов, и это означает, что есть однозначное соответствие между

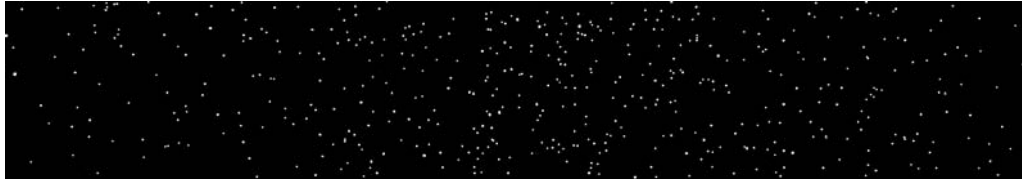


Рис. 2. Зеркально-отражающие снежинки

точками изображения и углами ориентации θ . Так, все блики от снежинок, имеющие отклонение от вертикали θ , будут располагаться на удалении радиуса от оптической оси камеры: $r/F = \text{tg}(\theta)$, где F – фокусное расстояние.

Фотографируемая горизонтальная площадка охватывала 3 м и представляла собой свежеснеженный покров. Пример полученного изображения представлен на рис. 2.

Построение гистограммы сводилось к подсчету плотности бликов-отражений в концентрических кольцах ограниченной последовательностью радиусов $r_n \leq r \leq r_{n+1}$. Последовательность радиусов строилась в расчете на равномерность шага по углам, а именно $\Delta\theta = 2^\circ$. Предварительно определялись координаты каждого блика, пересчитывалось число бликов, попавших в ограниченные площадки, определялась их площадь, и вычислялась плотность бликов. Заметим, что площадь для расчетов слегка отличается от площади колец, лежащих в плоскости изображения, последняя площадь делилась на $\cos(\theta)$. Полученная гистограмма приведена на рис. 3 и обозначена «Эксперимент».

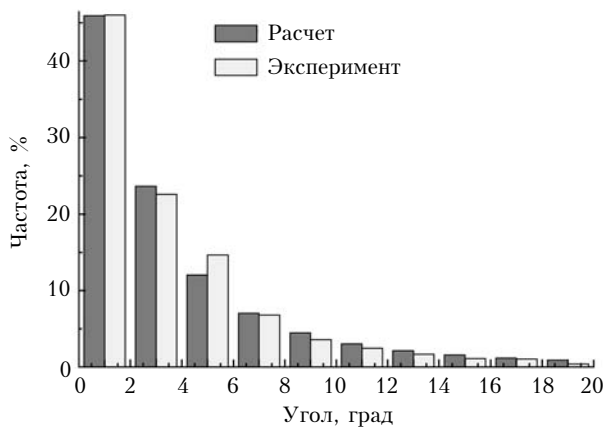


Рис. 3. Гистограмма распределения снежинок по углам ориентации (эксперимент) и расчетная гистограмма (расчет), где шаг гистограммы $\Delta\theta = 2^\circ$, среднее квадратическое отклонение $\delta = 1\%$, $\theta_0 = 0,55^\circ$ и $\sigma = 1,23$

Было исследовано несколько моделей распределения снежинок по углам ориентации $f(\theta)$. Наиболее подходящим оказалось то, где гистограмма подсчитывается по формуле

$$N_n = \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} \frac{C}{X} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln X}{\sigma}\right)^2\right\} \sin\theta d\theta,$$

где $X = \theta/\theta_0$.

Рассчитанная по этому распределению гистограмма обозначена «Расчет» на рис. 3. Параметры, дающие наименьшее среднее квадратическое отклонение $\delta = 1\%$, следующие: $\theta_0 = 0,55^\circ$, $\sigma = 1,23$ и $C = 31106$. Характерной особенностью этого распределения является то, что $f(\theta) = 0$ и очень резко возрастает до максимального значения в точке $\theta_{\max} = \theta_0 \exp\{-\sigma^2\}$ и затем медленно спадает. Для найденных нами параметров значение угла $\theta_{\max} = 0,12^\circ$, поэтому для того чтобы подтвердить наше модельное распределение, необходимо было построить гистограмму с меньшим шагом. Счетная процедура, описанная выше, при уменьшении площадок сопряжена с возрастанием статистической погрешности, вызванным уменьшением числа бликов, попавших на площадку. Но известен способ оценки плотности точек на плоскости с ограниченным числом точек [4, 5]. Если имеются случайные точки на плоскости, число которых в каждой площади A имеет распределение Пуассона со средним λA , то λ будет плотностью точек. И оценить эту плотность можно с помощью «выбрасывания» случайных точек P , число которых можно взять и большим. Оказывается, что в этом случае среднее расстояние от случайной точки P до ближайшего блика будет равно $1/2\sqrt{\lambda}$.

Мы разбили круг радиусом в 2° на 4 кольца с шагом $0,5^\circ$ и в каждом кольце оценили плотность бликов λ . Полученные результаты представлены на рис. 4.

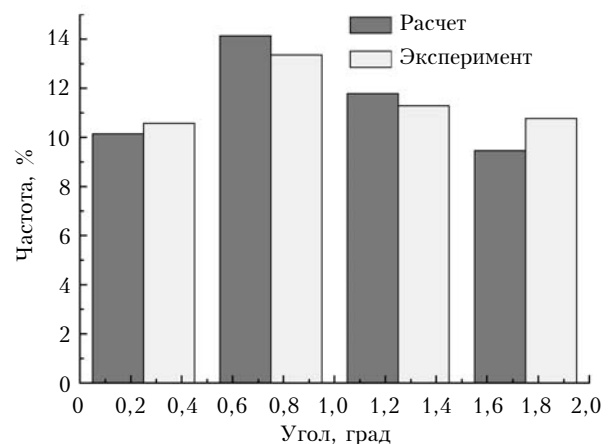


Рис. 4. Уточнение гистограммы с шагом $\Delta\theta = 0,5^\circ$ в диапазоне от 0 до 2°

На рис. 4 словом «Эксперимент» обозначены оценки плотности бликов, а «Расчет» – рассчитанные по модельному распределению с определенными выше параметрами. Явно виден немонокотный

характер гистограммы, т.е. в диапазоне от 0 до $0,5^\circ$ число бликов меньше, чем в диапазоне от $0,5$ до 1° .

Также наблюдается вполне удовлетворительное согласие между значениями, рассчитанными по нашей двухпараметрической модели и полученными с использованием оценок плотности бликов.

Напомним, что нами исследовались ориентации не всех снежинок, а только тех, которые локализованы в самом верхнем слое снежного покрова и ответственны за зеркальное отражение. В целом, снежный покров отражает так же, как ламбертовская поверхность, в формировании яркости которой участвуют и снежинки, лежащие на большей глубине и занимающие большую площадь, и зеркальное отражение имеет более узкую по углам структуру, чем общее более изотропное отражение. Так, около 90% нормалей «зеркальных» снежинок находится в области $0-8^\circ$.

Обратим внимание на «нефизическое» значение угла максимума в распределении $\theta_{\max} = 0,12^\circ$ вместо нулевого, которое означало бы, что наиболее веро-

ятное положение — горизонтальное. Но появление максимума в уточненной гистограмме говорит о том, что, возможно, $f(\theta) = 0$. Дело в том, что зеркальные снежинки лежат на снежинках, которые сами как-то распределены по углам, так что ненулевое значение угла θ_{\max} обусловлено сложным рельефом снежного покрова.

1. *Roesch A.* Evaluation of surface albedo and snow cover in AR4 coupled climate models // *J. Geophys. Res. D.* 2006. V. 111. Is. 15. P. 16343–16367.
2. *Namias J.* Some Empirical Evidence for the Influence of Snow Cover on Temperature and Precipitation // *Mon. Wea. Rev.* 1985. V. 113. Is. 9. P. 1542–1553.
3. *Dunkle R.V., Bevens J.T.* An approximate analysis of the solar reflectance and transmittance of a snow cover // *J. Meteorol.* 1995. V. 13. Is. 2. P. 212–216.
4. *Идые В., Драйард Д., Джеймс Ф.* Статистические методы в экспериментальной физике: Под ред. Ю.В. Прохорова / Пер. с англ. Р.В. Амбарцумяна. М.: Атомиздат, 1976. 335 с.
5. *Кендалл М., Моран П.* Геометрические вероятности. М.: Наука, 1972. 192 с.

O.V. Savchenko, N.I. Vagin, A.M. Morozov. **Histogram of orientation distribution for snowflakes in fresh snow cover.**

Albedo of a snow cover is determined in part by orientation of surface snowflakes. We have studied this orientation experimentally for the upper layer of snow cover forming specular reflection. Angular histograms of these distributions are presented. A model distribution approximating the histograms is proposed.