

**Н.А. Вострецов, А.Ф. Жуков**

## **О ФЛУКТУАЦИЯХ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В СНЕГОПАДЕ**

Проведены измерения и установлены характерные особенности в дисперсии, корреляционной функции, временном спектре и плотности вероятности флуктуаций интенсивности рассеянного лазерного излучения фокусированного пучка в снегопаде на трассе 130 м в диапазоне углов рассеяния от 0,04 до 0,17 мрад.

Известно [1–4], что при распространении фокусированного лазерного пучка в снегопаде в фокальной плоскости образуется сложное пространственное распределение рассеянного излучения в виде легко наблюдаемых пятен, или <спеклов>. Они являются результатом интерференции волн, рассеянных на частицах снегопада. Спеклы непрерывно изменяются, а интенсивность рассеянного излучения вблизи фокального пятна флуктуирует во времени.

Свойства этих флуктуаций в осадках до сих пор мало изучены. Однако уже первые данные о них при одном фиксированном угле рассеяния [1] дают основание надеяться на то, что их можно использовать не только для обнаружения осадков, но и для измерения некоторых их характеристик.

Возможности оптических методов, основанных на явлении спеклов, описаны во многих работах, например в [5]. Для оценки этих возможностей в 1992–1993 гг. проведена серия измерений флуктуационных характеристик (увеличив их число) при нескольких углах рассеяния.

В данной статье приведены результаты совместного анализа прежних [1–4] и новых данных о флуктуациях интенсивности рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка во время снегопадов.

Кратко рассмотрим методику измерений. (Подробно о ней можно прочесть в [1–4]). В качестве источника излучения использовался квазиодноимодовый He–Ne-лазер ЛГН-215. Длина волны излучения  $\lambda = 0,6328$  мкм, максимальная мощность излучения 50 мВт, излучение линейно поляризовано, плоскость поляризации приблизительно перпендикулярна поверхности земли. Лазерное излучение расширялось и фокусировалось на приемнике с помощью высококачественного коллиматора от оптической скамьи ОСК-2. Параметр Френеля источника равен  $\Omega = k\alpha_0^2/L = 38$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\alpha_0$  – эффективный радиус пучка в плоскости источника;  $L = 130$  м – длина трассы.

Визуальный диаметр пучка на приемнике был равен примерно 3 мм. Диаметр приемной диафрагмы, установленной перед фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), – 0,3 мм. Полный угол поля зрения приемной системы обычно равен 0,01 рад, в единичном случае – 0,05 рад.

В начале измерений приемная диафрагма устанавливалась с визуальной точностью в центре фокального пятна. Контроль проводился по максимальному значению сигнала на выходе ФЭУ. Затем весь приемный узел микровинтом смещался на расстояние  $\Delta l$ . Критерием того, что минимальное расстояние  $\Delta l$  было больше радиуса пучка в плоскости измерений, служили резкое уменьшение низкочастотных составляющих и появление высоких частот в сигнале. В новых измерениях  $\Delta l$  изменялось от 5 до 23 мм, что соответствовало углу рассеяния  $\varphi = \Delta l/L = 0,04$ – $0,17$  мрад. Ранее [1–4]  $\Delta l$  равнялось 15 мм,  $\varphi = 0,12$  мрад. Нами было проведено 12 измерений во время снегопадов в разные дни. Далее мы приведем основные результаты.

Прежде всего следует заметить, что в дымке (без осадков и тумана) в рассеянном сигнале отсутствуют высокочастотные составляющие флуктуаций. Однако даже при слабом снегопаде, когда метеорологическая дальность видимости достигала 8–10 км, в сигнале появлялись высокие частоты.

Остановимся вначале на нормированной дисперсии флуктуаций сигнала ( $I$ )  $\sigma^2 = \langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle / \langle I \rangle^2$ . Символ  $\langle \rangle$  обозначает усреднение по времени. В измерениях время усреднения было равно 20 с.

При близких значениях максимального размера частиц  $D_m = 1 \div 3$  мм и оптической толщи  $\tau = 0,3 \div 0,45$  дисперсия  $\sigma^2$  уменьшается с ростом угла рассеяния  $\varphi$  (рис. 1). Последней точке ( $\varphi = 0,17$  мрад) соответствуют несколько другие метеоусловия:  $D_m \leq 5$  мм,  $\tau = 0,25$ .

Были проведены измерения зависимости  $\sigma^2 = f(\tau)$  при  $\varphi = 0,05$  мрад ( $\Delta l = 7$  мм). Измерения показывают, что  $\sigma^2$  явно зависит от  $D_m$  (рис. 2). При  $D_m = 1 \div 3$  мм и  $\varphi = 0,05$  мрад она слабо зависит от  $\tau$  (кривая 1). Когда же  $D_m = 3 \div 5$  мм и  $\varphi = 0,05$  мрад дисперсия вначале увеличивается с ростом  $\tau$ , а затем стремится к насыщению (кривая 2). Аналогичное происходит при  $D_m \geq 5$  мм и  $\varphi = 0,12$  мрад ( $\Delta l = 15$  мм), но в отсутствие больших хлопьев [1] (кривая 3). Дисперсия уже при  $\tau \approx 0,2$  насыщалась до значения 0,85.

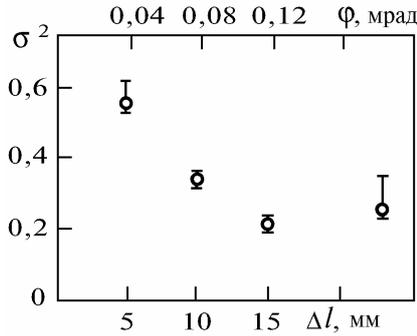


Рис. 1. Зависимость дисперсии флуктуаций интенсивности рассеянного излучения  $\sigma^2$  от угла рассеяния  $\varphi$  (6.04.93)

Для кривой 3 было получено аналитическое выражение зависимости дисперсии от оптической толщи путем визуальной аппроксимации экспериментальных данных [2]  $\sigma^2 = 0,85 (1 - \exp(-17 \tau))$ . Измерениям, отмеченным кривой 4, соответствует весьма редкий случай выпадения сплошных гигантских хлопьев, когда  $D_m$  достигал 3 см ( $\varphi = 0,05$  мрад). Дисперсия в среднем была равна единице.

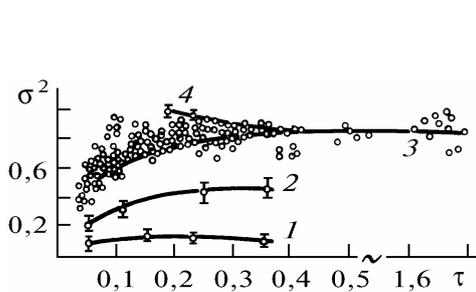


Рис. 2. Зависимость дисперсии флуктуаций интенсивности рассеянного излучения ( $\sigma^2$ ) от оптической толщи ( $\tau$ )

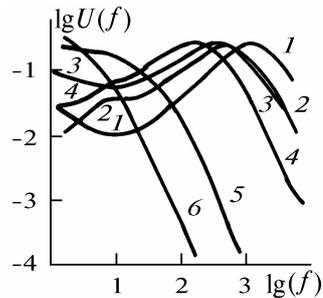


Рис. 3. Спектр флуктуаций интенсивности прямого и рассеянного излучения [2],  $V = 5$  м/с

Из рис. 2 видно, что при  $\tau = 0,2 - 0,3$  дисперсия зависит от максимального размера частиц. Это подтверждается и результатами, приведенными в табл. 1 ( $\sigma^2$  – средние значения дисперсии;  $N$  – количество измерений;  $\delta$  – средне-квадратическое значение для  $\sigma^2$ ). Из табл. 1 ясно, что дисперсия увеличивается более чем в 10 раз с ростом  $D_m$  от 1 до 30 мм.

Нормированный спектр флуктуаций  $U(f) = f W(f) / \int W(f) df$ , где  $W(f)$  – спектральная плотность мощности сигнала на частоте,  $f$  (рис. 3) рассеянного излучения ( $\varphi = 0,12$  мрад) су-

щественно уширяется по сравнению со спектром, измеренным в центре фокального пятна (кривые 5,6 рис. 3 и табл. 2).

Таблица 1

Зависимость дисперсии флуктуаций от размеров частиц снегопада  $D_m$  (мм) при  $\tau = 0,2-0,3$  и  $\varphi = 0,05$  мрад

$\sigma^2$	$D_m$	$\delta$	$N$
1	10-30	0,058	32
0,85	5-7	0,124	31
0,48	3-5	0,066	42
0,17	1-3	0,040	31
0,09	1	0,017	45

Таблица 2

Кривые	$\tau$	$D_m$ , (мм)	$\varphi$ , мрад	$V_{\perp}$ , м/с
1	0,18	10	0,12	5/
2	0,2	5	0,12	-
3	0,12	5	0,12	-
4	0,1	5	0,12	-
5	0,36	5	0	5
6	0,1	5	0	-

Анализ корреляционных функций показал, что время корреляции  $t_k$ , определенное на уровне 0,37, в рассеянном излучении на два порядка меньше, чем в центре фокального пятна. Время корреляции уменьшается с ростом  $\varphi$  и  $D_m$  при близких значениях  $\tau$  и скорости ветра ( $V$ ). Так, например, когда скорость ветра  $V = 3,5$  м/с, а  $V_{\perp} = 1,2$  м/с,  $\tau = 0,3 \div 0,45$ ,  $D_m = 1 \div 3$  мм, время корреляции было равно 1100, 650, 590 мкс для  $\varphi = 0,04; 0,08; 0,12$  мрад соответственно. На рис. 4 приведены две нормированные корреляционные функции  $B$  для  $\varphi = 0,05$  мрад при близких значениях оптической толщи и перпендикулярной скорости ветра ( $V_{\perp}$ ), но существенно разных  $D_m$ . Время корреляции при малых частицах снегопада в два раза уменьшается по сравнению с гигантскими хлопьями. Уточним, что пока проанализировано 25 корреляционных функций.

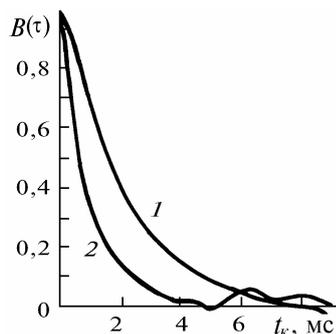


Рис. 4. Нормированная автокорреляционная функция рассеянного излучения  $\varphi = 0,05$  мрад: кривая 1 -  $D_m = 10-20$  мм;  $\sigma^2 = 1,03$ ;  $\tau = 0,2$ ;  $V = 2$  м/с;  $V_{\perp} = 1,8$  м/с; 2 -  $D_m = 1-2$  мм;  $\sigma^2 = 0,55$ ;  $\tau = 0,3$ ;  $V = 3,4$  м/с;  $V_{\perp} = 1,2$  м/с

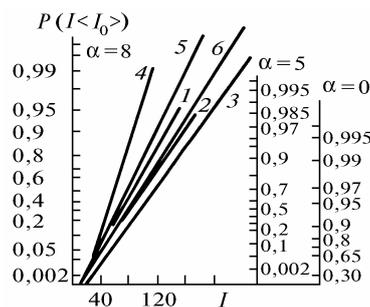


Рис. 5. Проверка гамма-распределения ( $\varphi = 0,05$  мрад)

Было проведено 40 измерений плотности вероятностей флуктуаций интенсивности рассеянного излучения. Все они имеют правую асимметрию. Подбор аналитического выражения для эмпирических распределений проводился путем графического представления вероятностей (т.е. использовался метод выпрямленных диаграмм). Для этого данные наносились на специальную графическую бумагу, предназначенную для выбранного распределения. Качественным критерием выполнимости гипотезы является расположение данных вблизи прямой линии [6,7]. Тридцать три распределения неплохо описываются гамма-распределением. Логарифмически нормальное распределение гораздо хуже описывает экспериментальные данные. Рис. 5 наглядно подтверждает сказанное выше. Каждому  $\alpha$  соответствует свой масштаб вероятностной сетки [7]. На рис. 5 по оси ординат обозначены вероятностные сетки для  $\alpha = 8; 5; 0$  соответственно. Значения параметров, соответствующих кривым рис. 5, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Кривые	$\alpha$	$D_M$ , (мм)	$\sigma$	$\tau$
1	0	10–20	1,04	0,2
2	0	2		0,09
3	5	3–5	0,34	0,17
4	5	3–5	0,12	0,21
5	8	1–3	0,46	0,36
6	8	1	0,11	0,35

Из вышеизложенного следует, что характеристики флуктуаций интенсивности рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка зависят от оптической толщи, размеров частиц осадков, скорости ветра и в сильной мере отличаются от характеристик в пределах фокального пятна, где доминирующую роль играет турбулентность атмосферы. Эти особенности могут быть использованы в качестве критерия в датчике осадков. В целом же приведенные данные могут помочь выбрать эффективную методику обработки случайного сигнала для такого датчика и, более того, дать некоторое представление о временном изменении сигнала в предельно малых углах рассеяния, поскольку используется фокусированный пучок.

1. Zhukov A.F., Kabanov M.V., Tshvyk R.Sh. // Appl. opt. 1988. V. 27. № 3. P. 578–583.
2. Вострецов Н.А., Жуков А.Ф., Кabanов М.В., Цвык Р.Ш. Статистические характеристики флуктуаций интенсивности лазерного пучка в снегопаде. Томск 1982. 50 с. (Препринт ИОА ТФ СО АН СССР, N 13).
3. Вострецов Н.А., Жуков А.Ф. // 2-е Всесоюз. совещание по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. (Тезисы докл.) Обнинск, 1982. Ч. 1. С. 141–144.
4. Жуков А.Ф. Флуктуации интенсивности лазерного пучка при распространении в атмосферных осадках. Автореф. дис. .... канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 1992. 16 с.
5. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.
6. Левин Л.М. Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей. М.: Изд. АН СССР, 1961. 267 с.
7. Вострецов Н.А., Жуков А.Ф., Кabanов М.В., Цвык Р.Ш. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6, № 1. С. 37–41.

Институт Оптики атмосферы  
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию  
6 августа 1993 г.

N.A. Vostretsov, A.F. Zhukov. **On the Intensity Fluctuations of Radiation Scattered from a Focused Laser Beam by Snowfalls.**

Some features of the variance, correlation function, time spectrum, and of the probability density of fluctuations of radiation scattered from a focused laser beam by snowfalls revealed from field measurements conducted along a path of 130 m length and for scattering angles from 0,04 to 0,17 mrad are discussed in this paper.