

Н.А. Вострецов, А.Ф. Жуков

**ФЛУКТУАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ. Ч. 1. СНЕГОПАД***Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 22.06.99 г.

Принята к печати 24.06.99 г.

Проведен анализ флуктуационных характеристик рассеянного в снегопаде фокусированного лазерного пучка в области однократного рассеяния. Установлено несколько характерных особенностей флуктуаций.

Из общих физических положений ясно, что флуктуации рассеянного излучения зависят от многих параметров. К числу важнейших факторов, влияющих на флуктуационные характеристики рассеянного излучения, следует отнести оптические свойства рассеивателей, скорость их перемещения, уровень турбулентности атмосферы, размеры фотоприемника, расстояние от оптической оси пучка  $\Delta L$ , оптическую толщину  $\tau$  и расстояние между источником и приемником  $L$  и другие. Роль каждого из них до сих пор строго не определена, но качественно их индивидуальное влияние можно предсказать.

В данной статье приведены результаты анализа экспериментальных исследований некоторых временных характеристик спекл-структуры лазерного излучения в фокальной плоскости вблизи оптической оси сфокусированного лазерного пучка в условиях однократного рассеяния в снегопадах. Измерены статистические характеристики интенсивности рассеянного излучения при одном расстоянии от оптической оси с целью поиска характерных особенностей во флуктуациях рассеянного излучения, по которым можно было бы судить о погодных условиях в приземном слое атмосферы.

Эта работа продолжает исследования, результаты которых опубликованы в [1].

**1. Экспериментальная установка**

В обсуждаемом эксперименте мы использовали одни и те же значения  $\Delta L$ ,  $L$ , дифракционный параметр пучка  $\Omega$  и радиус кривизны фазового фронта пучка  $R$  ( $R = -L$ ) и исследовали влияние оптической толщины  $\tau$ , скорости ветра  $V$  и  $V_{\perp}$  и максимального размера частиц снегопада  $D_m$  на флуктуационные характеристики рассеянного излучения.

На рис. 1 показана блок-схема измерений. Лазерный пучок от ЛГ-38 расширялся линзами Л1 и Л2, так что его параметр Френеля  $\Omega$  в плоскости источника равнялся 50. Здесь  $\Omega = k \alpha_0^2 / L$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\alpha_0$  – эффективный радиус пучка;  $L$  – расстояние, проходимое пучком в атмосфере ( $L = 130$  м). Некоторые характеристики лазерного источника: He-Ne-лазер,  $\lambda = 0,63$  мкм, мощность  $P \leq 70$  мВт, угол расходимости –  $5 \times 10^{-4}$  рад, линейно поляризован в плоскости, перпендикулярной к земле. Пучок фокусировался так, что его фокус находился на расстоянии  $L = 130$  м, а диаметр пучка в фокальной плоскости, по визуальным измерениям, был не более 5 мм. Для фокусировки пучка линза Л1 перемещалась вдоль оптической оси линзы Л2. Линзы Л1 и Л2 составляли вместе высококачественный коллима-

тор от оптической скамьи ОСК-2. Диаметр линзы Л2 равнялся 16 см, а длина ее фокусного расстояния 160 см. Диаметр приемной диафрагмы, расположенной перед фотоприемником, составлял 0,01 см. Перед диафрагмой устанавливалась цилиндрическая бленда длиной 110 см, внутри которой на ее оси размещались три круглые диафрагмы диаметром 3 см. Полный угол поля зрения фотоприемника был равен  $2,7 \times 10^{-2}$  рад. Оптическая толщина  $\tau$  на трассе 130 м рассчитывалась по данным регистратора дальности видимости РДВ-3, работающего на трассе  $100 \times 2$  м. Он был установлен на приемном конце трассы и развернут вблизи лазерного пучка. Максимальный размер частиц снегопада  $D_m$  измерялся визуально после оседания частиц на поверхность, покрытую мехом. Скорость ветра  $V$  и ее направление измерялись прибором М63м на высоте 2,5 м; по этим данным рассчитывалась перпендикулярная к трассе составляющая скорости ветра  $V_{\perp}$ . Трасса проходила на высоте 2,5 м.

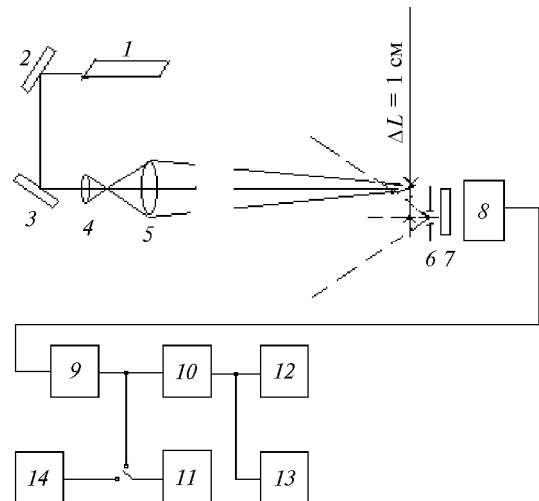


Рис. 1. Блок-схема измерений: 1 – лазер; 2, 3 – плоские зеркала; 4, 5 – линзы Л1 и Л2; 6 – диафрагма; 7 – интерференционный светофильтр; 8 – фотоприемник (ФЭУ-38); 9 – усилитель; 10 – усилитель У5-10; 11 – анализатор спектра FSP-38; 12 – анализатор импульсов АИ-1024; 13 – коррелятор Х6-4; 14 – генератор шума NRJ-20

Использовалась следующая методика измерений. Вначале фотоприемный узел совместно с блендой разме-

шались на оптической оси сфокусированного пучка. Критерием этого служило максимальное значение среднего сигнала на выходе фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Перед ФЭУ в этом случае устанавливался мощный нейтральный светофильтр (ослабитель), затем приемный узел и бленда с помощью микровинтов параллельно смещались на 1 см в сторону от оптической оси сфокусированного пучка и снимался нейтральный светофильтр. Одновременно измерялись частотный спектр, автокорреляционная функция и гистограмма распределения вероятностей флуктуаций. По нашим оценкам, относительная погрешность оценок выше указанных величин была не более 15%. Каждой реализации сопоставлялись  $\tau$ ,  $D_m$ ,  $V$  и  $V_{\perp}$ , а также вид замутнения атмосферферы по наблюдениям за погодой оператором.

## 2. Результаты измерений

### Нормированная автокорреляционная функция (НАФ)

В эксперименте получено 130 НАФ при различных значениях  $\tau$ ,  $D_m$ ,  $V$  и  $V_{\perp}$ . Измерения НАФ проведены прибором для исследования корреляционных характеристик ХБ-4. Всего в анализ включено 13 серий измерений в зимний период 1998/99 г.

Для каждой НАФ было рассчитано время корреляции  $t_k$ , когда эта функция имела значения 0,5; 0,36; 0,1 и первый раз была равна нулю, т.е.  $t_k = 0,5; 0,36; 0,1$  и 0. Анализ  $t_k$  проводился в следующем порядке. Вначале по всем НАФ были исследованы зависимости  $t_k$  от  $V$  и  $V_{\perp}$ . Было установлено, что нет явной зависимости  $t_k$  от  $V$  и  $V_{\perp}$  при различных значениях  $D_m$ . Затем была проведена сортировка значений  $t_k$  по  $D_m$  и  $V_{\perp}$ . Результаты такой сортировки приведены в таблице, из которой видно, что для всех значений  $D_m$  в снегопаде  $t_k$  на уровне 0,5; 0,36 и 0,1 уменьшается с ростом перпендикулярной скорости ветра ( $V_{\perp}$ ). Такая же тенденция имеет место и в дымке при весьма слабых осадках (следы осадков). В таблице в столбце  $N$  дано число НАФ, используемых для получения  $t_k$ . Однако, как следует из таблицы, близкое по величине время корреляции (например,  $t_k = 310 \div 390$  мкс) можно получить при существенно разных  $D_m$  и  $V_{\perp}$ . По-видимому,  $t_k = 0,1$  и другие  $t_k$  зависят от отношения скорости перемещения частиц к их характерному размеру. В полидисперсной среде в качестве характерного размера можно взять средний размер частиц и их скорость перемещения.

$D_m$ , мм	$V_{\perp}$ , м/с	$t_k$ , мкс				$N$
		0,5	0,36	0,1	0	
1	4 – 4,4	116	163	284	340	4
1	1 – 2	311	416	746	1175	5
1	< 1	360	489	1280	–	5
3	2,1 – 2,9	380	446	764	1010	4
3	1 – 2	442	606	1120	1891	15
3	< 1	822	1059	1750	3265	3
7	7,2	92	108	167	205	1
7	3,6	211	286	414	474	1
7	0,6 – 0,9	516	613	1394	–	3
7	< 0,2	907	1173	1575	1697	3
10–20	3	386	520	1600	–	1
10–20	0,6	517	720	1457	4750	3
10–20	0,1	912	1153	1775	–	3
Дымка,	4,9	336	443	650	1200	1
следы	4,3	538	680	1020	1157	1
осадков	2,2	600	786	1075	1200	1
	0,3	925	1250	1634	1900	1
	0,0	1280	1680	2100	2330	1

На рис. 2 наглядно показаны изменения НАФ ( $B(t)$ ) при близких  $D_m$ , но разных  $V_{\perp}$  (рис. 2, а), а также при близких  $V_{\perp}$ , но разных  $D_m$  (рис. 2, б).

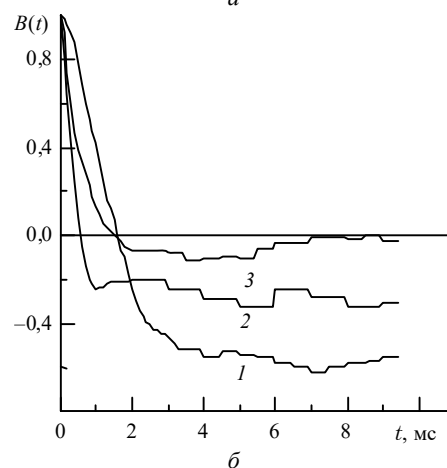
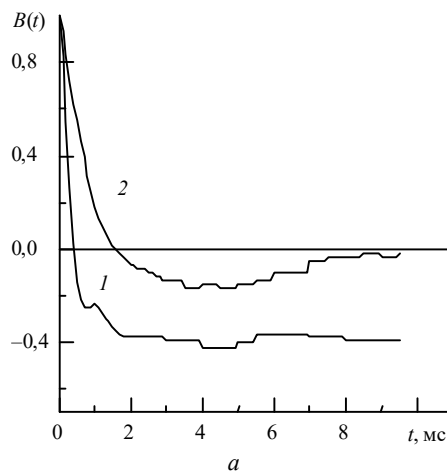


Рис. 2. Нормированные автокорреляционные функции:  
 а – 1 –  $D_m = 3 \div 5$  мм;  $V_{\perp} = 4,9$  м/с;  $\sigma_s^2 = 0,29$ ;  $\tau = 0,21$ ;  
 2 –  $D_m = 3 \div 5$  мм;  $V_{\perp} = 1,3$  м/с;  $\sigma_s^2 = 0,74$ ;  $\tau = 0,32$ ;  
 б – 1 –  $D_m = 10$  мм;  $V_{\perp} = 1,5$  м/с;  $\sigma_s^2 = 0,32$ ;  $\tau = 0,43$ ;  
 2 –  $D_m = 1$  мм;  $V_{\perp} = 1,7$  м/с;  $\sigma_s^2 = 0,25$ ;  $\tau = 0,38$ ;  
 3 –  $D_m = 3 \div 5$  мм;  $V_{\perp} = 1,7$  м/с;  $\sigma_s^2 = 0,22$ ;  $\tau = 0,1$

### Временной частотный спектр

Временной частотный спектр измерялся анализатором спектра параллельного действия FSP-38. Выходные (средние) сигналы с каждого фильтра и канала среднего значения через коммутатор поступали на цифropечать. По ним рассчитывался нормированный на «собственную» дисперсию спектр флуктуаций принимаемого сигнала  $U(f) = f_i \times W(f_i) / \int W(f_i) df_i$ , где  $W(f_i)$  – спектральная плотность на частоте  $f_i$ . Калибровка анализатора FSP-38, учитывающая изменение коэффициента усиления фильтров, проводилась с помощью генератора «розового» шума NRJ-20. Спектральная плотность «розового» шума складает обратно пропорционально частоте, так что на электронно-лучевой трубке прибора сигналы на выходе фильтров будут примерно одинаковы. Это позволяет визуально и оперативно контролировать работу анализатора на электронно-лучевой трубке. Результаты калибровки учитывались при расчете  $U(f)$ . В координатах  $U(f) = F(\log f)$  площадь

между двумя частотами соответствует долевному вкладу данного интервала частот в измеренную дисперсию флуктуаций  $\sigma_3^2$ . Этот факт, как и в [1], был использован нами для оценки турбулентного вклада  $\sigma_1^2$  в измеренную дисперсию  $\sigma_3^2$ , причем  $\int W(f) df = 1$ , что и применялось для проверки правильности расчетов на ЭВМ.

В обсуждаемый анализ включено 26 спектров. Установлено, что форма спектра изменяется во времени, а это сильно затрудняет установление по крайней мере типичных особенностей в форме спектров. Тем не менее мы смогли определить несколько характерных черт в форме спектров в снегопаде.

а) В снегопаде гидрометеорологический максимум в спектре зависит от  $D_m$  при близких значениях  $V(V_{\perp})$ . С ростом  $D_m$  он смещается в сторону меньших частот. Причем максимум в спектре смещается почти на порядок в сторону низких частот при увеличении  $D_m$  от 1 до 10 мм.

б) Спектр чаще всего асимметричен по отношению к частоте гидрометеорологического максимума  $f_m$ , т.е.  $\Delta f_{\text{п}} > \Delta f_{\text{л}}$ , где  $\Delta f_{\text{п}}$  – правая полуширина спектра, определенная на уровне 0,7;  $\Delta f_{\text{л}}$  – аналогичная левая полуширина.

в) Ширина спектра  $\Delta f = \Delta f_{\text{п}} + \Delta f_{\text{л}}$  в анализируемых данных меняется от 150 до 600 Гц.

г) В координатах  $\log [U(f)] = F [\log f]$  при  $f < f_m$ , а в нескольких случаях при  $f \leq f_m$  спектр имеет характерный линейный наклон, который описывается зависимостью  $U(f) = A f^{\alpha}$  ( $A$  – коэффициент). Наклон ( $\alpha$ ) меняется, по этим данным, в пределах от 1 до 1,4.

д) В области самых низких частот при  $f \leq 10$  Гц в спектре имеется явно различимый всплеск, вероятно из-за влияния турбулентности. По площади спектра при  $f \leq 10$  Гц был оценен турбулентный вклад  $\sigma_1^2$  в измеренную дисперсию  $\sigma_3^2$ . Отношение  $\sigma_1^2/\sigma_3^2$  изменяется в пределах от 0,05 до 0,26.

е) При  $f > f_m$  спектр круто спадает. Для аналитического описания спектра при  $f > f_m$  использовались две пары различных координат. В координатах  $\log [U(f)] = F(f, \text{кГц})$  спектр при  $f > f_m$  линейно спадает. В 20 случаях из 26 он с точностью не хуже 10–15% описывается зависимостью  $U(f) = A' \times 10^{-\gamma f}$ . В координатах  $\log [U(f)/U_{\text{max}}] = F(f - f_m/\Delta f)$  большинство спектров при  $f > f_m$  имеет также линейный участок вблизи максимального значения  $U(f)$  при  $f > f_m$ .

ж) Не установлено явной зависимости  $\Delta f$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  от  $D_m$  и  $V(V_{\perp})$ , что, по-видимому, вызвано небольшим числом анализируемых спектров. Этот факт ограничивает возможности проведения многопараметрического анализа.

#### Распределение плотности вероятностей флуктуаций (РПВ)

Здесь необходимо подчеркнуть, что достаточно сложно выбрать надежно то или иное распределение вероятностей на основе известных нам теоретических работ. В анализе было использовано 98 распределений. В нашем случае первоначальной информацией была гистограмма распределения. Экспресс-анализ ее формы проводился на осциллографе анализатора импульсов АИ-1024.

Уточним методику измерений РПВ с помощью АИ-1024. Этот прибор имеет 1024 уровня (были использованы 128). Динамический диапазон исследуемого сигнала составлял 0,2–10 В. Поскольку сигнал может иметь значения меньше 0,2 В, то нуль входного усилителя (У5-10) смещался на величину несколько больше 0,2 В. Это сме-

щение измерялось цифровым вольтметром и учитывалось в дальнейшей обработке. Согласно описанию АИ-1024 точность оценки значения плотности вероятности равна 5%. Длительность одной выборки в АИ-1024 равна 1 мкс, а частота квантования ( $f_k$ ) выбиралась с учетом времени корреляции  $t_k$  так, чтобы  $1/f_k \geq t_k$ . В качестве  $t_k$  бралось время корреляции на уровне 0,1. Оно оперативно измерялось коррелятором Х6-4, так что анализировались слабо коррелированные выборки сигнала.

Из визуальных наблюдений следует, что распределение одномодально и имеет правую асимметрию. Это – важнейшие характеристики распределения. Известно несколько распределений с такими особенностями [2]. Одна из задач заключалась в объективном подборе функции, которая описывала бы эмпирическую гистограмму (распределение). Это традиционная цель для подобного анализа, но она оказалась непростой, так как широко используемый метод выпрямленных диаграмм для интегрального распределения мало эффективен. Даже хорошее соответствие гамма-распределения эмпирическим распределениям по методу выпрямленных диаграмм не подтверждается классическими критериями  $\chi$ -квадрат [2] и Колмогорова–Смирнова [3].

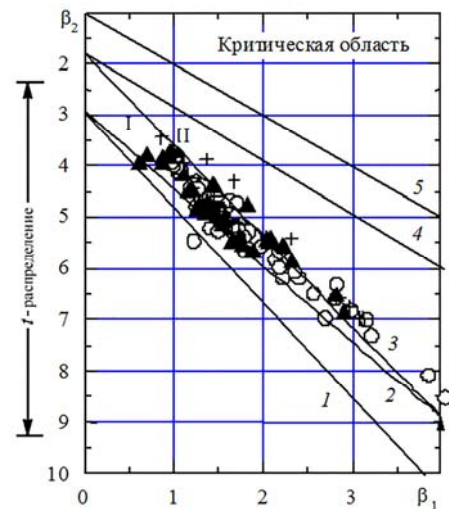


Рис. 3. Области в плоскости ( $\beta_1, \beta_2$ ) для различных распределений

В связи с этим был предпринят поиск других распределений. Для этого рассчитывались по гистограмме оценки для параметров  $\beta_1$  и  $\beta_2$  [2] ( $\beta_1$  – квадрат нормированного показателя асимметрии, а  $\beta_2$  – нормированный показатель острровершинности). Затем использовался метод диаграмм Пирсона [2], суть которого состояла в том, что некоторому количеству известных семейств распределений в плоскости ( $\beta_1$  и  $\beta_2$ ) можно отвести определенное место. На рис. 3, который выполнен в масштабе, используемом в [2], даны кривые 1–5 и области I и II между ними. Кривая 1 соответствует логарифмически нормальному распределению; кривая 2 – гамма-распределению; область I – бета-распределению, область II – J-образному бета-распределению. Точка с координатами  $\beta_1 = 0, \beta_2 = 3$  соответствует нормальному (гауссовскому) распределению, а точка  $\beta_1 = 4, \beta_2 = 9$  – экспоненциальному распределению. Расчетные  $\beta_2$  и соответствующие им значения  $\beta_1$  при разных  $D_m$  показаны на рис. 3, из которого видно, что экспериментальные значения в плоскости ( $\beta_1, \beta_2$ ) занимают в большинстве своем область, характерную для бета-

распределения. Причем нет явной зависимости от размера частиц ( $D_m$ ). Более того, некоторая часть распределений дает значения  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , которые располагаются вблизи кривой 2, соответствующей гамма-распределению.

Напомним, что бета-распределение пригодно для описания случайной величины, значения которой ограничены конечным интервалом [2]. По этому признаку бета-распределение предпочтительнее для наших измерений, которые проводились при  $U_{\min} > 0,3$ ;  $U_{\max} = (10 \pm 1)$  В.

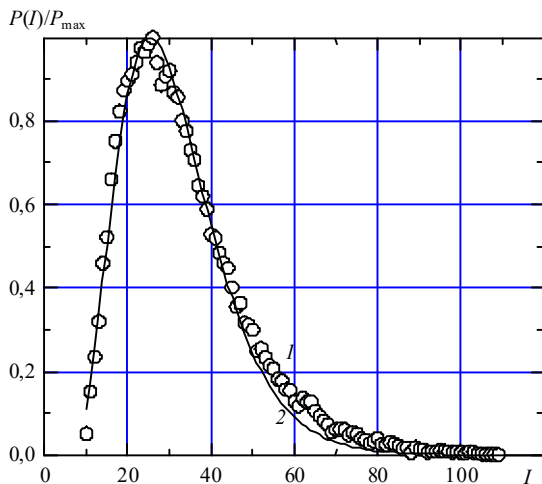


Рис. 4. Сравнение эмпирического распределения (1) с бета-распределением (2):  $I - D_m = 1$  мм;  $\sigma_s^2 = 0,29$ ;  $\tau = 0,21$ ; 2 – параметры бета-распределения:  $\gamma = 2,24$ ,  $\eta = 7,5$ ;  $I$  – номер канала;  $P$  – плотность вероятности;  $P_{\max}$  – максимальное значение плотности вероятности

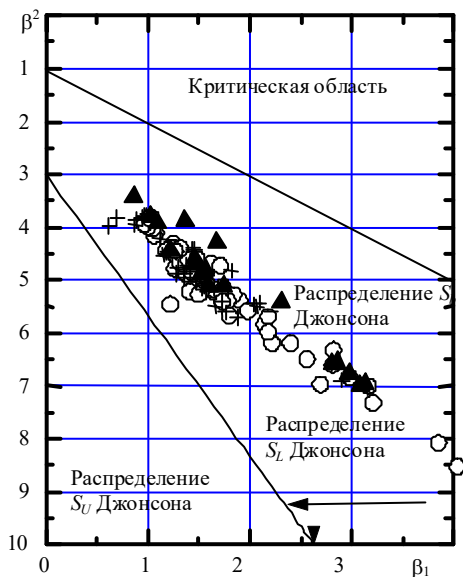


Рис. 5. Графики для выбора соответствующего аппроксимирующего распределения Джонсона: + – хлопья  $D_m > 5$  мм; O –  $D_m = 1 \div 5$  мм;  $\sigma - D_m \leq 1$  мм

Выборочная проверка на соответствие обобщенного бета-распределения эмпирическому распределению по критериям  $\chi$ -квадрат и Колмогорова–Смирнова [3] показала,

что по этим критериям эмпирические распределения не описываются бета-распределением. Оценка параметров обобщенного бета-распределения проводилась с помощью [2] и с учетом значений  $U_{\min}$  и  $U_{\max}$  для каждого эмпирического распределения. Как видно из рис. 4, лучшее бета-распределение плохо согласуется с эмпирическим при выбросах интенсивности. Такая же особенность имеет место и для гамма-распределения.

По оценкам  $\beta_1$  и  $\beta_2$  можно найти распределение Джонсона [2], которое в некоторых случаях используется для описания эмпирических распределений. Из рис. 5 следует, что для наших целей можно использовать распределение  $S_b$  Джонсона (трехпараметрическое распределение). В дальнейшем будет проведен расчет параметров и критериев совпадения.

Необходимо добавить также, что методом выпрямленных диаграмм нами были исследованы логнормальное и Райса–Накагами распределения, которые очень далеки от совпадений с эмпирическими распределениями.

Дальнейший поиск распределений будет проведен в классе трехпараметрических распределений (с использованием  $S_b$  и обобщенного гамма-распределения).

#### Дисперсия флуктуаций интенсивности

По гистограмме (с учетом смещения) была рассчитана нормированная дисперсия  $\sigma_s^2$ . Всего получено около ста ее значений. Нет явной зависимости дисперсии от  $\tau$  и  $D_m$ , о которой сообщается в [1], и пока не найдена причина несоответствия в этой части между [1] и анализируемыми здесь данными. Уточним, что значения  $\sigma_s^2$ , рассчитанные по гистограмме плотности вероятности в этой статье, хорошо совпадают с дисперсиями, измеренными дисперсиомером [1]. Отличие между ними составляет несколько процентов.

### 3. Заключение

Анализ различных статистических характеристик рассеянного в снегопаде излучения фокусированного лазерного пучка позволил установить несколько характерных особенностей во флуктуациях. Важнейшей среди них является существенное (на порядок) увеличение частоты флуктуаций по сравнению с флуктуациями на оптической оси фокусированного пучка, где они в основном обусловлены турбулентностью атмосферного воздуха. Роль турбулентности во флуктуациях рассеянного излучения уменьшается по сравнению с флуктуациями в прямом пучке, но она все-таки явно заметна в форме спектра флуктуаций и в скрытой форме должна сказаться в других флуктуационных характеристиках. Наряду с этим фактом, по всей видимости, идентификация погодных условий только по флуктуациям рассеянного излучения малоэффективна. Возможны промахи, например, в определении плотной дымки и слабых осадков. Для исключения промахов нужны дополнительные измерения скорости ветра и хотя бы максимального размера частиц, а это существенно ограничивает возможности собственно оптического метода. Дополнительные возможности, вероятно, откроются при одновременном измерении флуктуаций под двумя и более углами рассеяния в прямом пучке. Такие измерения планируется провести в будущем.

Авторы благодарят А.Г. Борового за полезные советы по обсуждаемым в статье вопросам.

Работа выполнена при частичном финансировании Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 99-02-16923.

1. *Вострецов Н.А., Жуков А.Ф.* // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 1. С. 24–28.
2. *Хан Г., Шапиро С.* Статистические модели в инженерных задачах. М.: Мир, 1966. 395 с.
3. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983.

*N.A. Vostretsov, A.F. Zhukov. Fluctuations of Intensity of Focused Beam Scattered Radiation in Atmospheric Ground Layer. 1. Snowfall.*

The fluctuation characteristics of focused laser beam scattered in the snowfall within the range of single scattering are analyzed. Some features of the fluctuation have been found.