

Н.А. Вострецов, А.Ф. Жуков

## Нормированная дисперсия флуктуаций интенсивности расходящегося пучка в снегопадах при смещении фотоприемника с оптической оси

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 2.09.2005 г.

Проведено измерение нормированной дисперсии флуктуаций интенсивности расходящегося лазерного пучка ( $\bar{\sigma}^2$ ) в приземной атмосфере в снегопадах при смещении фотоприемника с оптической оси. Установлено, что  $\bar{\sigma}^2$  увеличивается при смещении фотоприемника с оптической оси пучка. Рост дисперсии вызван частицами снегопада.

Известно, что смещение фотоприемника с оптической оси пространственно-ограниченных гауссовых пучков в области слабых флуктуаций в турбулентной атмосфере без осадков вызывает увеличение  $\sigma^2$  [1–5]. В этом случае результаты экспериментальных работ [1, 4, 5] качественно согласуются с теоретическими расчетами [1–3].

Подобный эффект имеет место в расчетах для рассеивающих сред, когда длина волны излучения много меньше диаметров сферических изотропных частиц [6, 7].

Ранее мы проводили измерения в снегопадах одним фотоприемником, установленным вблизи оптической оси пучка. Описанные здесь эксперименты проводились с использованием двух фотоприемников одновременно. Один из них по-прежнему находился вблизи оптической оси и использовался для контроля атмосферных условий во время измерений. Другой фотоприемник принимал излучение от оптического кубика (размером 2,5 см). Кубик сначала устанавливался на оптической оси пучка, а затем дискретно смещался с шагом 0,5 или 1 см параллельно оптической оси в горизонтальном направлении. Таким образом, фотоприемник принимал излучение из разных точек сечения пучка, отстоящих от оптической оси на расстояние  $R$ . Более подробное описание эксперимента можно найти в работах [5, 8, 9].

Измерения проводились на трассе длиной 130 м. Высота трассы от поверхности земли равнялась примерно 2 м, начальный диаметр пучка 6 мм, полный угол его расходимости  $10^{-3}$  рад. Длина волны излучения находилась в видимом диапазоне волн ( $\lambda = 0,63$  мкм). Диаметр приемников 0,1 мм. Полный угол поля зрения приемников составлял  $2,7 \cdot 10^{-2}$  рад. Измерялась метеорологическая дальность видимости прибором РДВ-3. По измеренным значениям метеорологической дальности видимости рассчитывалась оптическая толщина  $\tau$  на трассе 130 м.

Скорость ветра измерялась метеостанцией М63м. Максимальный размер частиц снегопадов  $D_m$  оценивался визуально после улавливания частиц на меховую подложку. Нормированная дисперсия флуктуаций интенсивности  $\bar{\sigma}^2$  рассчитывалась по измерениям  $\sigma_{\text{нн}}^2$  и  $\langle U \rangle$  в двухканальном дисперсиометре:

$$\bar{\sigma}^2 = \langle (U - \langle U \rangle)^2 \rangle / \langle U \rangle^2 = \sigma_{\text{нн}}^2 / \langle U \rangle^2,$$

где  $U$  – электрическое напряжение на нагрузке фотоприемника;  $\sigma_{\text{нн}}^2$  – ненормированная дисперсия. Символ  $\langle \rangle$  обозначает усреднение по времени. В измерениях время усреднения для  $\bar{\sigma}^2$  составляло 20 с. Мы измеряли флуктуации интенсивности лазерного излучения, так как дисперсия флуктуаций принимаемого излучения не увеличивается с уменьшением диаметра приемника от 0,1 мм.

В каждом канале дисперсиометра дисперсия определялась с погрешностью не более 15% в диапазоне изменения нормированной дисперсии от 0,01 до 1. Нормированные дисперсии, рассчитанные по измеренным  $\sigma_{\text{нн}}^2$  и  $\langle U \rangle$ , отличались между собой не более чем на 5% для одного и того же сигнала в двух каналах дисперсиометра. Спектральные функции флуктуаций интенсивности  $U(f)$  рассчитывались по величине среднего напряжения на выходе каждого из 38 трехоктавных фильтров, входящих в частотный анализатор параллельного действия:

$$U(f) = fW(f) / \int W(f)df,$$

где  $W(f)$  – спектральная плотность мощности на частоте  $f$ ,  $f$  – центральная частота фильтра. Время усреднения сигналов на выходе фильтров равнялось примерно 100 с. Проводилась калибровка фильтров «розовым» шумом. Она учитывалась при расчете  $U(f)$ . Спектральная мощность «розового» шума обратно пропорциональна частоте.

Обсуждаемые измерения проводились в снегопадах при оптической толщине, близкой к 0,1.

На рис. 1, *a* показано изменение  $\bar{\sigma}^2$  в турбулентной атмосфере без осадков (кривая 1) и в мелкодисперсном снегопаде (максимальный размер частиц снегопада  $D_m \approx 1$  мм) (кривая 2).

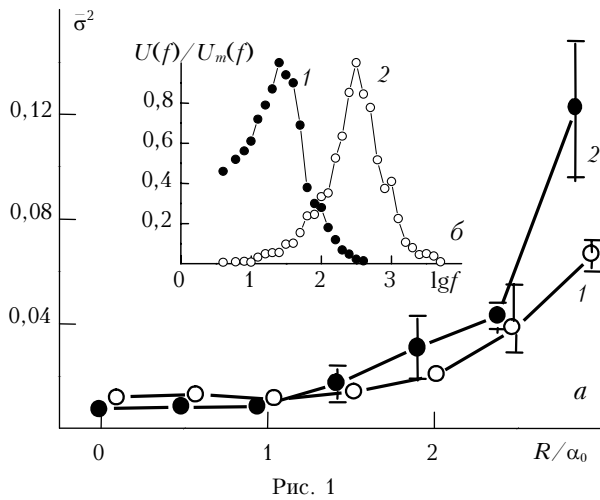


Рис. 1

На рис. 1, *a* по горизонтальной оси отложено смещение фотоприемника  $R$ , нормированное на эффективный радиус пучка в плоскости приема  $\alpha_0$ . Эффективным радиусом гауссова пучка принято называть тот радиус пучка, при котором пучок имеет одинаковую мощность с гауссовым пучком. Причем эффективный пучок имеет одинаковую интенсивность по сечению пучка, и его интенсивность в 2,72 раза меньше, чем интенсивность гауссова пучка на его оптической оси. Кривые 1 и 2 проведены по средним значениям дисперсии, которые рассчитывались по 9 значениям измеренной дисперсии. На рис. 1 и 2 вертикальные линии ограничены в точках, соответствующих среднеквадратическому отклонению дисперсии. Среднеквадратические отклонения не показаны при тех смещениях фотоприемника, где они были малы и равнялись 0,001–0,002. Средние значения дисперсии в турбулентной атмосфере без осадков несколько смещены вправо по горизонтальной оси.

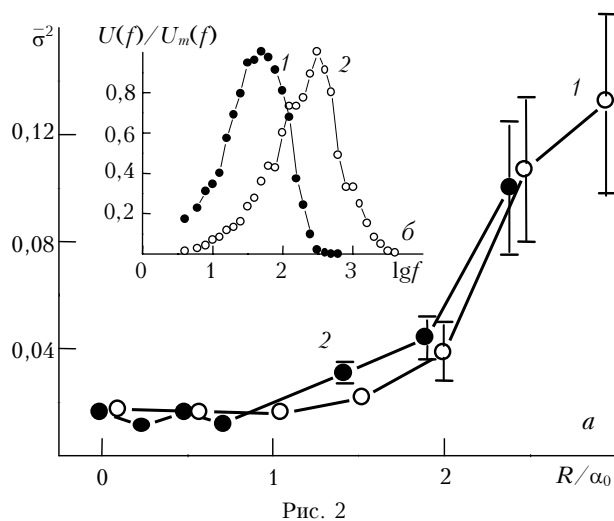


Рис. 2

На рис. 1, *б* приведены нормированные спектральные функции ( $U(f)/U_m(f)$ ) при смещении фотоприемника от оптической оси пучка на расстояние  $R = 6$  см ( $R/\alpha_0 = 2,8$ ).  $U_m(f)$  — максимальное значение спектральной функции. Скорость ветра  $V = 2-3$  м/с ( $V_{\perp} = 1$  м/с).

На рис. 2, *a* кривая 1 измерена в турбулентной атмосфере без осадков, кривая 2 — в крупнодисперсном снегопаде ( $D_m = 5-10$  мм). На рис. 2, *б*: кривая 1 — нормированная спектральная функция в турбулентной атмосфере при смещении фотоприемника на  $R = 6$  см ( $R/\alpha_0 = 2,8$ ), кривая 2 — в крупнодисперсном снегопаде при том же смещении. Скорость ветра и ее перпендикулярная составляющая к трассе были такие же, как и на рис. 1.

В турбулентной атмосфере без осадков получено увеличение  $\bar{\sigma}^2$  для области слабых флуктуаций при смещении фотоприемника с оптической оси пучка. В снегопадах также установлено увеличение  $\bar{\sigma}^2$  и, как следует из рис. 1, *б* и 2, *б*, оно вызвано частицами снегопада. Из рис. 1 и 2 видно, что максимумы спектральной функции в атмосфере без осадков и в снегопадах отличаются друг от друга на порядок. Это согласуется с ранее установленными высокочастотным уширением [9] спектральной функции в случае выпадения снегопада.

В снегопадах (см. рис. 1, *a* и 2, *a*), как и без осадков,  $\bar{\sigma}^2$  мало изменяется в пределах эффективного радиуса пучка. Она увеличивается более чем в три раза при смещении фотоприемника с оптической оси пучка, что значительно больше погрешности измерений  $\bar{\sigma}^2$ . При одних и тех же смещениях увеличение  $D_m$  приводит к увеличению дисперсии флуктуаций интенсивности [8].

По-видимому, увеличение нормированной дисперсии при смещении фотоприемника с оптической оси гауссова пучка вызвано одновременным действием двух причин, а именно: уменьшением средней интенсивности и увеличением доли рассеянного излучения в измеряемом сигнале от частиц снегопадов, находящихся в пучке.

Установлено, что нормированная дисперсия  $\bar{\sigma}^2$  в снегопадах не изотропна в сечении гауссова пучка. Она минимальна при измерении вблизи оптической оси пучка. Наибольшие значения  $\bar{\sigma}^2$  в пучке будут на его границе. Они могут быть также обусловлены качанием пучка, вызванного турбулентностью воздуха и вибрациями передающего устройства.

Авторы благодарят И.П. Лукина за полезные замечания.

1. Миронов В.Л. Распространение лазерного излучения в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1981. 246 с.
2. Миронов В.Л., Патрушев Г.Я. Флуктуации поля лазерного пучка распространяющегося в турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Радиофиз. 1972. Т. 15. № 6. С. 865–872.
3. Банах В.А., Креков Г.М., Миронов В.Л. Дисперсия и пространственная корреляция интенсивности волновых пучков, распространяющихся в турбулентной ат-

- мосфере // Изв. вузов. Радиофиз. 1974. Т. 17. № 2. С. 252–260.
4. *Миронов В.Л., Патрушев Г.Я.* Измерения флуктуаций интенсивности в разнесенных по углу световых пучках // Изв. вузов. Радиофиз. 1975. Т. 18. № 3. С. 450–452.
  5. *Жуков А.Ф., Ефремов А.В., Хмелевцов С.С., Цвык Р.Ш.* Исследование флуктуаций интенсивности по сечению узкого лазерного пучка // Изв. вузов. Физ. 1974. Т. 17. № 11. С. 122–123.
  6. *Крутиков В.А.* Флуктуации интенсивности гауссова оптического пучка в среде с крупномасштабными дискретными неоднородностями // Проблемы оптики атмосферы. Новосибирск: Наука, 1983. С. 141–150.
  7. *Тузова С.И.* Флуктуации интенсивности поля в поперечном сечении оптического пучка, распространяющегося в аэрозольной среде. Деп в ВИНТИ. 2696-B89. 1989. 8 с.
  8. *Вострецов Н.А., Жуков А.Ф.* Эмпирические соотношения для оценки дисперсии флуктуаций излучения расходящихся лазерных пучков в снегопадах (0,63 мкм) // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 3. С. 219–222.
  9. *Вострецов Н.А., Жуков А.Ф., Кабанов М.В., Цвык Р.Ш.* Спектры флуктуаций интенсивности лазерных пучков в атмосферных осадках // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1984. Т. 20. № 7. С. 581–588.

*N.A. Vostretsov, A.F. Zhukov.* **Normalized dispersion of intensity fluctuations of a divergent beam in the ground atmosphere under snowfall in case of photoreceiver shifting from the beam optical axis.**

Measurements of the normalized dispersion ( $\bar{\sigma}^2$ ) of intensity fluctuations of a laser divergent beam in the ground atmosphere under snowfalls were conducted at shifting the photoreceiver from the beam optical axis. It was found that  $\bar{\sigma}^2$  increased under these conditions. The dispersion increase was caused by snowfall particles.