

А.Ф. Жуков, М.В. Кабанов, Р.Ш. Цвык, Н.А. Вострецов, Н.П. Кривопапов

ФЛУКТУАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ УЗКОГО РАСХОДЯЩЕГОСЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В СНЕГОПАДЕ

Проведены измерения флуктуаций интенсивности узкого расходящегося лазерного пучка в снегопадах. Длина трассы 130, 390, 650 и 964 м. Показано, что флуктуации увеличиваются, а затем насыщаются с ростом оптической толщи снегопада. Уровень насыщения увеличивается с ростом максимальных размеров частиц снегопада.

1. Атмосферные осадки активно действуют на характеристики лазерного пучка. Он существенно ослабляется вследствие рассеяния на частицах осадков. Кроме того, одновременно с турбулентными флуктуациями показателя преломления воздуха частицы осадков вызывают значительные флуктуации принимаемого сигнала. Статистика таких флуктуаций при многократном рассеянии до сих пор изучена недостаточно. Однако уже известно, что она отличается от статистики в турбулентной атмосфере в присутствии аэрозоля [1–8].

В [1, 5] экспериментально установлено, что дисперсия σ_s^2 флуктуаций интенсивности в расходящемся пучке при оптической толщине (τ) меньше 0,7 возрастает пропорционально τ . Важно и то, что при одинаковых значениях τ дисперсия существенно увеличивается с ростом максимальных размеров частиц снегопада D_m , т.е. $\sigma_s^2 = f(\tau, D_m)$, где D_m – максимальный размер частиц. В этой статье исследуется зависимость $\sigma = f(\tau, D_m)$ в более широком диапазоне изменений τ , а именно $\tau \leq 4$. Причем мы проводим совместный анализ наших прежних [1, 5, 9] и новых результатов.

Исследования в этой области значений τ имеют практическое значение, поскольку такие атмосферные условия довольно часто реализуются в осадках на трассах в несколько сот метров и более.

Диапазон $\tau \geq 1$ до сих пор мало изучен, хотя уже имеются некоторые первые результаты. Наиболее значительным среди них нам представляется факт насыщения уровня флуктуаций (σ_s) с ростом τ [2, 3, 5, 9, 10, 11].

Термин насыщение мы будем употреблять, подразумевая под ним явное уменьшение или прекращение роста σ_s с увеличением оптической толщи снегопада. Подобная ситуация наблюдается также в турбулентной атмосфере в отсутствие осадков с ростом длины трассы (L) и (или) уровня турбулентности. Например, днем на трассе длиной $L = 1750$ м в расходящемся пучке уровень флуктуаций в области сильных флуктуаций не превышает 1,6 и слабо зависит от уровня турбулентности [12].

Теория «насыщенных» флуктуаций в атмосферных осадках пока весьма далека от завершенности. В ней необходимо одновременно учитывать многократное рассеяние на оптически жестких частицах аэрозоля и осадков, а также турбулентность атмосферы. В [2] записано уравнение для моментов поля при таких условиях распространения оптической волны. Однако не удается записать в общем виде точное решение этого уравнения для дисперсии флуктуаций интенсивности.

В связи с этим А.Г. Боровым предложена качественная модель высокочастотных флуктуаций в осадках на протяженных атмосферных трассах [13, 14]. Последняя версия этой модели подробно изложена в [2].

По этой модели высокочастотные флуктуации в основном определяются слоем частиц осадков, прилегающим к приемнику, и турбулентностью атмосферы на пути от источника до этого слоя. Причем с увеличением длины трассы уровень флуктуаций сначала растет, а затем насыщается. Более того, при дальнейшем увеличении длины трассы, когда заметно сказывается влияние слабо флуктуирующего многократно рассеянного поля, флуктуации уменьшаются.

Важно и то, что основную роль во флуктуациях играет наиболее крупная фракция частиц. Таковы основные особенности для уровня флуктуаций, вытекающие из этой модели.

Эти особенности в поведении $\sigma_s = f(\tau)$ явно проявляются в модельных средах при $\tau < 32$ [15]. Вместе с этим, по мнению авторов работы [2], обсуждаемая модель качественно описывает экспериментальные данные, полученные при $\tau = 1,5–14$ в одном из дождей на трассе 2,5 и 5 км и узком коллимированном пучке.

Естественно желание проверить предложенную модель флуктуаций в других атмосферных условиях, в частности в снегопадах, когда возможны значительные изменения формы и размеров частиц, которые можно, хотя бы грубо, оценить из простых визуальных наблюдений за частицами.

В качестве объекта исследования мы выбрали узкий расходящийся пучок, поскольку для него уже установлена сильная зависимость от размера частиц при $\tau < 0,7$. Кроме того, в зимних условиях с ним более удобно проводить измерения.

2. Схема эксперимента и методика измерений подробно описаны нами ранее в наших работах. Поэтому мы здесь упускаем несущественные детали и ограничимся тем, что приведем только те сведения, которые нужны для понимания сути обсуждаемого эксперимента.

Расходящийся пучок представлял собой излучение с основного выхода He—Ne-лазера типа ЛГ-38 ($\lambda = 0,6328$ мкм). Полный угол расходимости пучка был равен $5 \cdot 10^{-4}$ рад. Лазер работал в квази-одномоновом режиме и имел гауссовское распределение излучения по сечению в плоскости источника.

Измерения проведены на четырех трассах длиной 130, 390, 650 и 964 м. На трассах длиной 3×130 и 5×130 м измерения проводились путем отражения пучка от плоских зеркал, размер которых был не менее 40 см. При исследовании флуктуаций интенсивности перед фотоприемником устанавливалась диафрагма диаметром 0,3 мм и бленда для ограничения угла поля зрения приемника, равного $5 \cdot 10^{-2}$ рад. В качестве фотоприемника использовался фотоэлектронный умножитель ФЭУ-38. Сигнал I с ФЭУ усиливался и поступал на устройство для измерения дисперсии $\sigma^2 = \langle I - \langle I \rangle \rangle^2$ и среднего значения сигнала $\langle I \rangle$. По значениям σ^2 и $\langle I \rangle$ рассчитывалась нормированная дисперсия $\sigma_s^2 = \sigma^2 / \langle I \rangle^2$, а затем уровень флуктуаций σ_s . Здесь угловые скобки означают временное усреднение. Время усреднения в наших измерениях было выбрано 20 с. Динамический диапазон всего приемного тракта не хуже 40 дБ в полосе частот от 0,01 до 20 кГц. Относительная ошибка измерений σ_s^2 , по нашим оценкам, не превышает 10%.

Для каждого значения σ_s^2 (или σ_s) мы имели значение оптической толщи снегопада, которое рассчитывалось по значениям прозрачности атмосферы. Прозрачность атмосферы определялась измерителем дальности видимости РДВ-3, который работал на трассе длиной 2×100 м. Прибор РДВ-3 был установлен на приемном конце трассы. Форма и размер максимальных частиц (D_M) оценивались визуально после их улавливания на мягкую подложку.

3. В измерениях было получено около двух тысяч пар значений σ_s^2 и τ . Из всей совокупности экспериментальных точек мы выделили три интервала значений D_M : интервал малых значений $D_M \approx 1$ мм; больших (хлопья) $D_M > 5$ мм и средних $D_M \approx 2-5$ мм. В последний интервал мы включали и случаи выпадения отдельных редких хлопьев с $D_M > 5$ мм.

В каждом интервале D_M мы построили зависимость $\sigma_s = f(\tau)$ для трех трасс длиной 390, 650 и 964 м. Они показаны на рис. 1, 2, 3.

Прежде всего, из анализа этих рисунков видно, что большинство кривых $\sigma_s = f(\tau, D_M)$ имеют близкий по своему характеру ход, а именно: 1) с ростом оптической толщи τ вначале плавно увеличивается до некоторого τ , а затем плавно насыщается на определенном уровне; 2) σ_s увеличивается с ростом D_M при одинаковых во всем исследованном диапазоне τ ($\tau \leq 4$). На рис. 4, а представлены усредненные кривые по данным рис. 1, 2, 3. Усреднение по τ проводилось с шагом, равным 0,1. На этом же рисунке показана зависимость $\sigma_s = f(\tau)$, полученная ранее нами на трассе 130 м в расходящемся пучке во время сильной метели [8, 13]. В этом случае имели место самые сильные замутнения атмосферы, в которых нам удалось провести измерения.

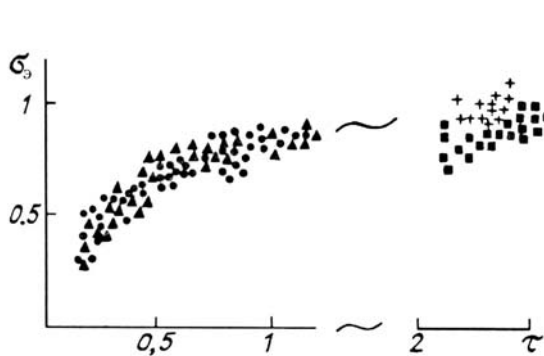


Рис. 1. Уровень флуктуаций на трассе 390 м: темные треугольники — $D_M = 1-3$ мм, темные квадраты — $D_M = 5$ мм, крестики — отдельные хлопья до 0,2 см (измерения проведены 5.04.81); темные кружки — $D_M < 5$ мм (18.02.87)

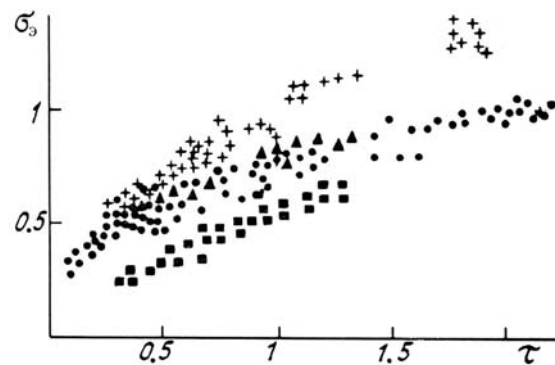


Рис. 2. Уровень флуктуаций на трассе 650 м: крестики — 19.02.87, $D_M \approx 7$ мм, сплошные хлопья; темные треугольники — 19.02.87, $D_M = 5$ мм; темные кружки — (14, 16, 15 февраля 1987 г.), $D_M \approx 2-5$ мм; темные квадраты — 13.04.87, $D_M \approx 1$ мм

Цифрами у кривых показана длина трассы; штриховые кривые соответствуют $D_M \approx 1$ мм; сплошные — $2-5$ мм; штрихпунктирная — 7 мм. На этом же рисунке приведены полученные путем аппроксимации 1 и 2 кривые, которые обозначены точками. Причем кривая 1 соответствует зависимости $\sigma_s = (1 - \exp(-\tau))^{0,5}$, а кривая 2 — $\sigma_s = 0,65[(1 - \exp(-\tau))^{1,4}]^{0,5}$. Эти зависимости удовлетворительно

описывают экспериментальные данные. Из рисунка 4, а отчетливо видно насыщение флуктуаций в отсутствие сплошных хлопьев; причем при $D_M \approx 1$ мм оно наступает при $\tau \approx 1$, а при $D_M \approx 2\div 5$ мм при несколько больших значениях τ . Важно и то, что оптическая толщина, при которой наступает насыщение (τ_n), практически одна и та же на существенно различных по длине трассах, например 964 и 130 м, или 390 и 964 м.

Большим темным кружком при $\tau \approx 0,5$ показано σ_3 в расходящемся пучке на трассе $L = 130$ м при выпадении града $D_M \approx 10$ мм [8].

Квадратами на рис. 4, а приведены данные из [2] (дождь, узкий коллимированный пучок, L равно 2×1250 и 4×1250 м). Здесь наблюдается насыщение флуктуаций интенсивности на уровне, равном 1,2 при $\tau_n \approx 4$.

Следует отдельно подчеркнуть, что в измерениях, описанных в [2, 3], основной вклад во флуктуации вносила турбулентность атмосферы, а в нашем случае на трассе 964 м была как раз обратная ситуация, а именно: основной вклад давали частицы осадков. Эту особенность качественно подтверждает рис 4, б. Спектры 1 и 2 [2] имеют максимум в области низких частот (турбулентный вклад), а в измеренных нами спектрах 3, 4 – максимум в области высоких частот (снеговой вклад). Светлым кружком при $\tau = 3,5$ показан вклад только частиц дождя [2]. Ясно, что он гораздо меньше соответствующего значения σ_3 . На рис. 4, а крестиками показан снеговой вклад в дисперсию на трассе 390 и 650 м при $D_M = 3-5$ мм.

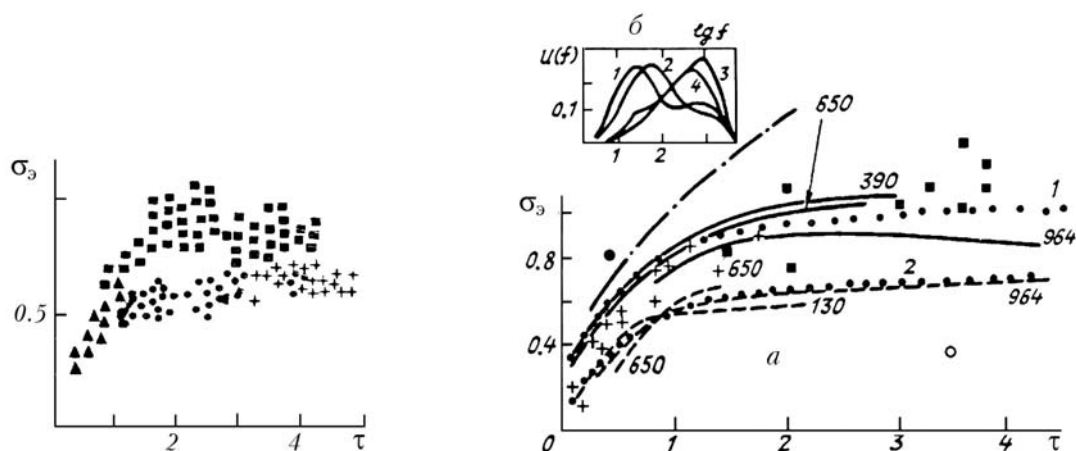


Рис. 3. Уровень флуктуаций на трассе 964 м: темные треугольники – 25.12.89, $D_M \approx 1$ мм; крестики – 25.12.89, $D_M \approx 1-2$ мм; темные кружки – 14.12.89, $D_M \approx 1$ мм; темные квадраты – 25.12.89, $D_M \approx 3-5$ мм

Рис. 4. Усредненные кривые зависимости $\sigma_3 = f(\tau, D_M)$ (а) и спектр флуктуаций $U(f) = fW(f) / \int W(f) df$ (б)

4. Таким образом, на основе анализа экспериментальных данных можно заключить, что формально модель флуктуаций, предложенная в [2, 9, 13], качественно подтверждается в следующих положениях: 1) флуктуации интенсивности с ростом оптической толщи в начале растут, а затем насыщаются; 2) флуктуации возрастают с увеличением максимальных размеров частиц. Что же касается положения об уменьшении флуктуаций при дальнейшем росте оптической толщи, то для его проверки нужны соответствующие измерения в условиях, когда существенно важным становится многократное рассеяние в сигнале, принятом в пределах прямого пучка.

Однако, несмотря на формальное подтверждение некоторых положений, принятых в [2, 9, 13, 14], у нас нет полной уверенности в их реализации в случае осадков на протяженных трассах. Особо это касается определяющего вклада во флуктуации зоны, прилегающей к приемнику. Сомнения в этом возникают, если принять во внимание отмеченный нами в этой статье факт, что при одинаковом значении $D_M \approx 1$ мм на разных трассах (130, 650 и 964 м) флуктуации интенсивности насыщаются примерно при одном и том же значении оптической толщи $\tau_n \approx 1$. Аналогичная ситуация наблюдается и при $D_M \approx 2\div 5$ мм.

Естественно, что поскольку размеры D_M частиц ($D_M \approx 1$) во время измерений близки, то длина так называемой прилегающей к приемнику зоны (L_n) на всех трех трассах должна мало отличаться. Это фактически означает, что оптическая толщина в пределах этой зоны (L_n) на трассе 964 м будет примерно в семь раз меньше по сравнению с трассой 130 м, поскольку она по всей длине на обеих трассах одинакова.

Известно, что при $L = L_n \approx kD_M^2$ дисперсия интенсивности возрастает по экспоненте $\sigma^2 = (e^\tau) - 1$ [2]. Иными словами, можно ожидать, что уровень флуктуаций от ближней зоны на различных по длине трассах при одинаковом τ должен существенно отличаться. Однако экспериментальные значения дисперсии близки между собой.

Все это наводит нас на мысль и том, что на флуктуации оказывает влияние не только прилегающая зона к приемнику, но и другие участки трассы. В частности, очевидна определенная роль участка трассы у передатчика, в пределах которого частицы перекрывают узкий лазерный пучок [9].

Кроме того, на пути от источника до прилегающего к приемнику слоя, т.е. $L = L - L_{\text{п}}$, происходит уменьшение степени когерентности поля за счет взаимодействия его с турбулентностью и частицами осадков. В силу того что тонкая структура теневой картины зависит от когерентности падающего излучения [16], то и уровень флуктуаций будет зависеть от длины трассы L_1 .

Нам пока не представилось случая провести измерения для $\tau > 2$ в осадках в виде сплошных хлопьев снега (вероятность выпадения таких осадков небольшая). Вместе с тем следует отметить важный, по нашему мнению, факт, что в отсутствие сплошных хлопьев уровень флуктуаций при $\tau \leq 4$ не превышает 1,2 (рис. 1–4). Подчеркнем еще раз, что уровень флуктуаций интенсивности в расходящемся пучке в области насыщения в турбулентной атмосфере, как правило, больше 1,2. С учетом этого можно считать, что флуктуации интенсивности в узком расходящемся пучке при выпадении снегопада без хлопьев не превышают флуктуаций в турбулентной атмосфере без осадков. В этом и состоит основной итог проведенных нами измерений.

В качестве резюме. Хотя флуктуации в осадках имеют ряд характерных особенностей в спектре и законе распределения, однако в первом приближении можно предположить, что максимальные случайные шумы, вносимые осадками, не превышают таковых в турбулентной атмосфере при отсутствии осадков.

1. Zhukov A. F., Kabanov M. V., Tsvyk R. S. // *Appl. Opt.* 1988. V. 27. № 3. P. 578–583.
2. Bogovoy A. G., Patrushev G. Ya., Petrov A. I. // *Appl. Opt.* 1988 V. 27. № 17. P. 3704–3714.
3. Патрушев Г. Я., Петров А. И. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1986. Т. 22. № 10. С. 1050–1059.
4. Вострецов Н. А., Жуков А. Ф., Кабанов М. В. и др. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1984. Т. 20. № 7. P. 581–587.
5. Жуков А. Ф., Кабанов М. В., Цвык Р. Ш. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1985. Т. 21. № 2. С. 147–153.
6. Жуков А. Ф., Цвык Р. Ш., Вострецов Н. А. // *Оптика атмосферы.* 1988. Т. 1. № 5. С. 114–115.
7. Жуков А. Ф., Цвык Р. Ш., Вострецов Н. А. // *Оптика атмосферы.* 1988. Т. 1. № 4. С. 30–35.
8. Галахов В. Н., Ефремов А. В., Жуков А. Ф. и др. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1976. Т. 12. № 12. P. 1254–1266.
9. Боровой А. Г., Жуков А. Ф., Цвык Р. Ш. // XII Всесоюз. конф. по распространению радиоволн. (Тезисы докл.). Ч. II. М.: Наука, 1978. С. 105–107.
10. Жуков А. Ф., Цвык Р. Ш. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1980. Т. 16. № 2. С. 164–171.
11. Ting-I Wang, Lawrence R. E., Tsay M. K. // *Appl. Opt.* 1980. V. 19. № 21. P. 3617–3624.
12. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере // А. С. Гурвич, А. И. Кон, В. Л. Миронов и др. М.: Наука, 1976. 277 с.
13. Боровой А. Г. // IV Всесоюз. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. (Тезисы докл.), Томск: ИОА СО АН СССР, 1977. С. 61–64.
14. Боровой А. Г. // *Изв. вузов. Сер. Радиофизика.* 1982. Т. 25. № 4. С. 391–400.
15. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Сов. радио, 1977. 368 с.
16. Shore R. A., Thompson B. J., Whithy R. E. // *JOSA.* 1966. V. 6. P. 733–738.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
30 декабря 1990 г.

A. F. Zhukov, M. V. Kabanov, R. Sh. Tsvyk, N. A. Vostretsov,
N. P. Krivopalov. **The Intensity Fluctuations of a Narrow Divergent Laser Beam in a Snowfall.**

The measurements have been made of the intensity fluctuations of a narrow divergent laser beam in a snowfall. It is shown that the above fluctuations increase with the increase of the snowfall optical depth and then saturate. The level of saturation increases with the growth of the flakes size.