

А.Ф. Жуков, Н.А. Вострецов

Влияние диаметра приемника на флуктуации светового потока при распространении узкого расходящегося лазерного пучка в снегопаде. Ч. 2. Автокорреляционная функция

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 19.06.2000 г.

Проведены измерения автокорреляционной функции (АКФ) на 10 трассах длиной от 14 до 1928 м в узком расходящемся лазерном пучке, распространяющемся в снегопаде. Анализировалось время корреляции на уровне 0,5; 0,3; 0,1; 0,05 и нулевом в зависимости от диаметра приемника $D_{пр}$, скорости ветра V_{\perp} и максимального размера частиц снегопада D_m . Установлено, что в близких (сходных) атмосферных условиях по V_{\perp} и D_m время корреляции на уровне 0,5 уменьшается с уменьшением диаметра приемника. При фиксированном $D_{пр}$ оно также уменьшается с ростом V_{\perp} и уменьшением D_m .

Введение

Известно, что атмосфера во время выпадения осадков значительно ухудшает некоторые характеристики лазерного пучка. Он ослабляется вследствие рассеяния на частицах осадков и аэрозоля. Более того, совместно с турбулентными флуктуациями показателя преломления воздуха частицы осадков вызывают сильные временные флуктуации принимаемого излучения, так что сигнал на выходе фотоприемника можно считать случайным во времени. Особенно это очевидно в тех случаях, когда размеры приемника меньше, сравнимы или несколько больше размеров частиц.

Естественно, что статистические характеристики таких флуктуаций отличаются от аналогичных в турбулентной атмосфере без осадков. Последние давно интересуют исследователей и к настоящему времени хорошо изучены.

Нормированная автокорреляционная временная функция (НАКФ) является одной из основных статистических характеристик случайного процесса. Она задает меру зависимости значений случайных сигналов, сдвинутых относительно друг друга на определенный интервал времени.

Совместно с другими статистическими характеристиками она используется для оптимизации приема излучения, распространяющегося в атмосфере. Особенности НАКФ в атмосферных осадках мало изучены. Однако следует ожидать уменьшения времени корреляции, поскольку временной спектр флуктуаций в осадках заметно уширяется в область высоких частот.

Цель данной статьи – установить характерные особенности НАКФ при изменении диаметра приемника $D_{пр}$. Измерения НАКФ проводятся в узком расходящемся пучке (УРП) во время снегопада. Данная статья является продолжением [1], где подробно описаны используемая аппаратура и методика измерений. Поэтому не будем детально описывать суть измерений и ограничимся рассмотрением особенностей корреляционной функции.

1. Краткое описание эксперимента

Измерения автокорреляционных функций (АКФ) были проведены при разных диаметрах приемника $D_{пр}$. При

$D_{пр} = 0,1$ мм измерения в снегопаде велись на трассах 14, 37, 130, 260, 780, 964 и 1928 м, при других диаметрах приемника ($D_{пр} > 0,1$ мм) – на трассах 260, 520 и 780 м.

В качестве светового пучка использовалось излучение от лазеров ЛГН-215 и ЛГ-38А. Они работали в квазиодномодовом режиме с линейной поляризацией излучения. Плоскость поляризации была приблизительно перпендикулярна к поверхности Земли. Лазерный пучок без каких-либо преобразований направлялся в атмосферу. Основные параметры пучка: длина волны $\lambda = 0,6238$ мкм; начальный диаметр (на уровне $1/e$) – $3 \div 4$ мм; полный угол расходимости – $5 \cdot 10^{-4}$ рад.

Излучение принималось фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), перед которым устанавливались диафрагмы диаметром $D_{пр} = 0,1 \div 25$ мм, интерференционный и нейтральный светофильтры. Бленда, установленная перед приемником, ограничивала угол поля зрения приемника. Полный угол поля зрения приемника равнялся $2,7 \cdot 10^{-2}$ рад. Сигнал с фотоприемника усиливался и поступал на коррелятор Х6-4, анализатор спектра FSP-38, анализатор импульсов АИ-1024 и дисперсиометр, который был разработан в соответствии с идеями, изложенными в [2].

Приведем некоторые сведения о корреляторе Х6-4. Это цифровой прибор, который измеряет одновременно 100 значений корреляционной функции. Нормировка АКФ проводилась на ее значение при нулевом шаге задержки.

Для характеристики НАКФ мы использовали пять ее значений, равных 0,5; 0,367; 0,1; 0,05, первое значение равно нулю. Для каждого из них находили соответствующий временной сдвиг, называемый нами временем корреляции на уровне 0,5; 0,3; 0,1; 0,05 и на нулевом уровне. Обозначим их $t_{0,5}$; $t_{0,3}$; $t_{0,1}$; $t_{0,05}$ и t_0 . Эти значения времени наряду с самими НАКФ были предметом исследования. Подчеркнем, что в соответствии с [3, с. 264] время $t_{0,05}$ можно взять в качестве максимального интервала корреляции, с учетом там же высказанных замечаний. Расчетное время усреднения АКФ было не менее 4 с. Погрешность измерения значений АКФ, по нашим оценкам, не превышала 10%. Проанализировано 200 НАКФ, измеренных в 55 снегопадах.

Атмосферные условия характеризовались оптической толщиной на измерительной трассе τ , максимальным размером частиц снегопада D_m и скоростью ветра V и V_{\perp} .

Несколько слов о важных для измерений особенностях снегопада.

1. Снегопад, как и другие осадки, – это нестационарное природное явление, так как его интенсивность и микроструктура частиц меняются во времени. Более того, они не зависят от экспериментатора и, естественно, их невозможно предсказать во времени.

2. Снегопад влияет на оптические характеристики атмосферной турбулентности.

Наряду с этими естественными особенностями следует принять во внимание тот факт, что в эксперименте измерялся не полный набор оптически важных характеристик атмосферы.

Эти обстоятельства в сильной мере затрудняют выбор сходных (близких) условий эксперимента, необходимых при сравнительном анализе результатов.

Измерения проводились нами таким образом, чтобы процесс флуктуаций оптического излучения во время измерений можно было считать стационарным, хотя в целом его нельзя заведомо считать строго стационарным. Это, скорее, квазистационарный процесс в течение некоторого короткого промежутка времени. Такие промежутки времени устанавливались нами по величине среднего сигнала и его дисперсии на измерительной трассе. Постоянная времени RC-фильтров в измерительных трактах (среднего и дисперсии) равнялась 20 с. Случаи быстрого изменения вышеуказанных величин исключались из измерений. Быстрыми изменениями считались те, которые происходили за время меньше 20 с, а величина этих изменений превышала 10%. Для таких же целей на трассах с отражением (кратных 130 м) использовались данные о дальности видимости, получаемые измерителем дальности видимости РДВ-3.

2. Результаты анализа

2.1. Условия эксперимента

В анализируемых данных L изменялась от 14 до 2048 м; $D_{пр}$ – от 0,1 до 25 мм; V – от 0 до 7 м/с; V_{\perp} – от 0 до 5,6 м/с; D_m – от 1 до 20 мм, τ – 0,03 до 3, S_m от 10 до 0,2 км. В условиях, пределы которых определены выше, наибольшее время корреляции на уровне 0,5 $t_{0,5} = 4,9$ мс получено при $\tau = 0,53$; $D_m = 5 \div 7$ мм; $D_{пр} = 25$ мм; $V = 3,5$ м/с; $V_{\perp} = 1,2$ м/с на трассе длиной 520 м (рис. 1, б, кривая 5), а наименьшее – $t_{0,5} = 0,07$ мс, получено при $\tau = 0,05$; $D_m = 1 \div 2$ мм; $D_{пр} = 0,1$ мм; $V = 6$ м/с; $V_{\perp} = 5,6$ м/с на трассе 37 м (рис. 3, д, кривая 1). Таким образом, изменение времени корреляции $t_{0,5}$ в анализируемых данных происходит от нескольких миллисекунд до нескольких сотых миллисекунды. В дальнейшем НАКФ обозначим как $b(t)$.

2.2. Зависимость НАКФ от диаметра приемника

На рис. 1 показаны $b(t)$ при разных значениях $D_{пр}$ на трассах длиной 260 (а), 520 (б) и 780 м (в). Обращаем внимание на то, что масштаб на горизонтальных осях на рис. 1 разный и явно виден рост $t_{0,5}$ и $t_{0,3}$ с увеличением диаметра приемника. Атмосферные условия табл. 1 при измерениях заметно изменялись на трассах 780 и 520 и оставались близкими на трассе 260 м. Но во всех трех случаях время

корреляции $t_{0,5}$ и $t_{0,3}$ растет с ростом $D_{пр}$. Это подчеркивает важность диаметра приемника.

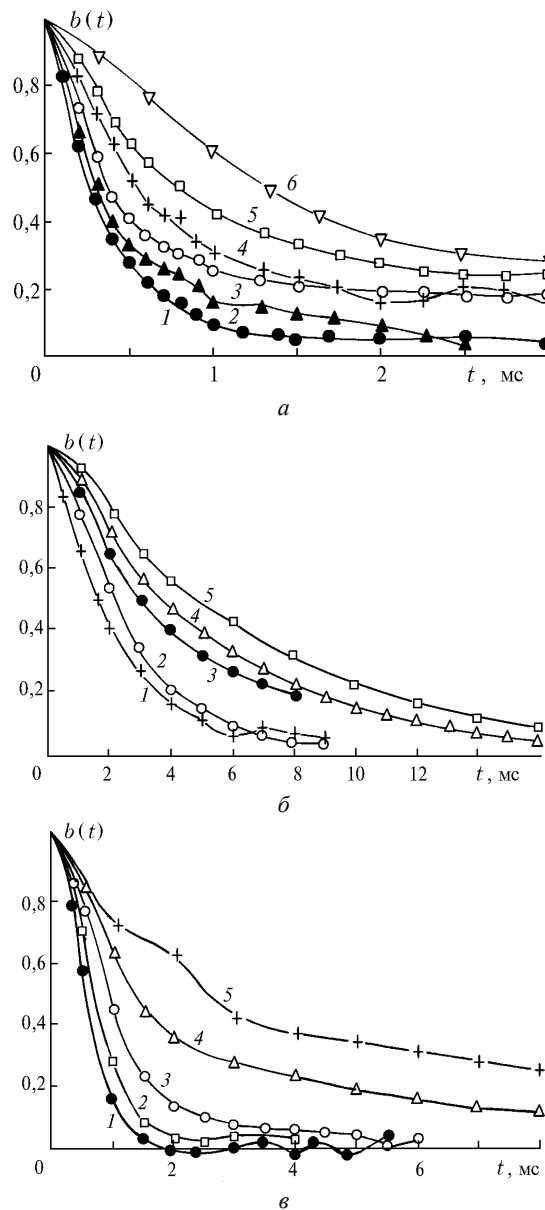


Рис. 1

На рис. 2, а показана зависимость логарифма времени корреляции от логарифма диаметра приемника на трассе длиной 520 м, где 1 – $t_{0,5}$; 2 – $t_{0,3}$ и 3 – $t_{0,1}$. Значения t_k (и их $\lg t_k$) взяты из рис. 1, б, соответствующие метеосостояния приведены в табл. 1. Характерен линейный рост зависимости $\lg t_k$ от $\lg D_{пр}$. В координатах $t_k = F(D_{пр})$ хорошо выполняется степенная зависимость $t_k = A_0 D_{пр}^{B_0}$. Для $t_{0,5}$ значения $A_0 = 2398$; $B_0 = 0,205$, для $t_{0,3}$ – $A_0 = 3113$, $B_0 = 0,205$, для $t_{0,1}$ – $A_0 = 6982$, $B_0 = 0,21$ (t_k , мс; $D_{пр}$, мм).

Рис. 2, б аналогичен рис. 2, а, но здесь показано изменение $t_{0,5}$ с ростом $D_{пр}$ на трех трассах (1 – 520, 2 – 260, 3 – 780 м) в разных метеосостояниях. Характерен близкий к линейному рост времени корреляции ($t_{0,5}$) с увеличением $D_{пр}$. Это и есть одна из важнейших особенностей $b(t)$.

Таблица 1

Дата	$D_{пр}, мм$	$L, м$	σ^2	τ	$D_m, мм$	$V, м/с$		$t, мс$					Рис.	Кривая	$A_{0,5}$
						V	V_{\perp}	0,5	0,3	0,1	0,05	0			
06.11.93	0,1	260	0,08	0,26	1	4,5	1,1	0,272	0,388	0,999	1,665	—	1,а	1	0,43
»	0,8	»	0,07	0,27	1	4	1,4	0,310	0,466	1,655	—	—	»	2	0,41
»	1,5	»	0,06	0,27	1	4,5	1,1	0,377	0,610	—	—	—	»	3	0,38
»	2,0	»	0,04	0,28	1	4	0,7	0,549	0,822	—	—	—	»	4	0,48
»	3,1	»	0,04	0,29	1	4	0,7	0,685	1,332	—	—	—	»	5	0,93
»	25	»	0,01	0,30	1	4	0,7	1,332	1,998	—	—	—	»	6	0,23
20.02.95	0,1	520	0,38	0,58	3-5	2	0,7	1,660	2,300	5,500	—	—	1,б	1	—
»	0,8	»	0,34	0,58	о.х.*	—	—	—	—	—	—	—	»	2	—
»	3,1	»	0,28	0,55	3-5	3	—	3,000	4,500	—	—	—	»	3	—
»	10	»	0,17	0,44	о.х.*	—	—	—	—	—	—	—	»	4	—
»	25	»	0,09	0,53	5-7	3,5	1,2	4,900	7,099	15,00	30,00	70,00	»	5	0,84
10.03.95	0,1	780	0,74	1,70	1-2	—	—	0,577	0,716	1,260	1,400	1,900	1,в	1	—
»	0,8	»	0,62	1,37	1-3	—	—	0,728	0,864	1,490	1,600	3,500	»	2	—
»	3,1	»	0,38	2,63	1-3	0,5	0,2	0,928	1,170	2,600	5,000	—	»	3	0,06
»	10	»	0,11	2,22	1-2	0,5	0,2	1,300	1,800	—	—	—	»	4	0,13
»	25	»	—	—	1-2	—	—	2,684	4,660	16,00	63,00	80,00	»	5	—
19.01.94	0,1	260	0,05	0,28	1	1	0,8	0,350	0,530	4,500	—	—	3,а	1	0,28
09.10.93	»	»	0,48	0,45	10	2,5	2,5	0,470	0,760	6,000	—	—	»	2	0,12
17.01.94	»	»	0,34	0,51	10	3	0,4	1,025	1,460	4,000	7,000	—	»	3	0,04
04.02.94	3,1	»	0,03	0,42	1	2	1	0,560	0,750	1,500	3,500	5,500	3,б	1	0,56
»	»	»	0,39	1	3-5	2	0,8	1,000	1,350	3,500	7,000	—	»	2	0,16
»	»	»	0,01	0,18	1-4	1,2	0,7	1,550	1,950	5,000	6,000	8,400	»	3	0,27
08.11.94	»	520	0,31	0,98	2	4	1,4	0,400	0,550	2,000	3,500	—	3,в	1	0,28
»	»	»	0,38	1,38	2-5	5	1,7	0,825	1,200	3,900	9,500	—	»	2	0,28
»	»	»	0,74	3,04	5-10	3,5	1,9	1,085	1,600	6,000	8,000	—	»	3	0,20
02.11.95	25	»	0,01	0,30	1	4	0,7	1,330	1,910	9,930	13,00	19,80	3,г	1	0,93
10.10.95	»	»	0,09	0,74	3-5	2	2	2,000	3,880	8,000	11,00	65,00	»	2	0,80
20.02.95	»	»	0,09	0,63	5-7	3,5	1,2	4,600	6,600	16,00	32,00	65,00	»	3	0,78
14.12.95	0,1	37	0,02	0,05	1-2	6	5,6	0,07	0,101	0,295	0,365	0,550	3,д	1	0,20
24.01.96	»	»	0,05	0,12	1-2	5	4,3	0,14	0,19	0,53	0,75	—	»	2	0,30
14.12.95	»	»	0,09	0,15	1-3	5	4,3	0,17	0,29	0,60	0,85	—	»	3	0,24
02.11.93	»	260	0,03	0,12	1-2	5,5	1,9	0,16	0,26	1,71	—	—	3,е	1	0,15
»	»	»	0,02	0,07	1	2,5	1,25	0,25	0,42	—	—	—	»	2	0,31
»	»	»	0,22	0,41	1-2	3,5	0,6	0,41	0,60	1,99	—	—	»	3	0,12

* Отдельные хлопья.

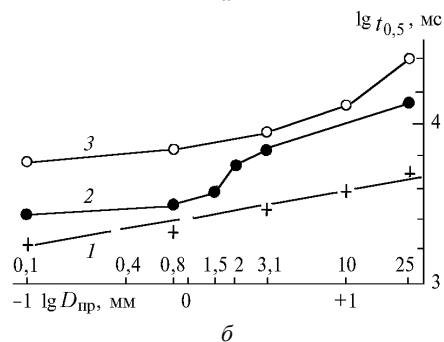
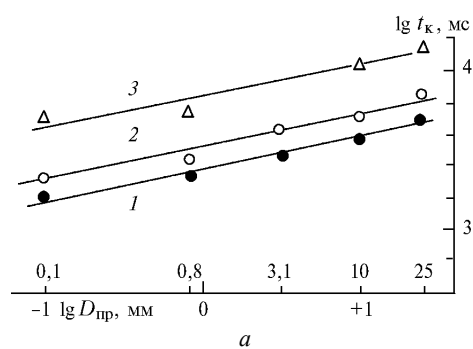


Рис. 2

2.3. Зависимость НАКФ от скорости ветра V_{\perp} и максимального размера частиц D_m

НАКФ явно зависит от V_{\perp} и D_m при фиксированных значениях $D_{пр}$, в чем мы неоднократно убеждались во время проведения экспериментов. Зависимость $b(t)$ от D_m продемонстрирована на рис. 3, а-д (пояснения даны в табл. 1). Из этих данных следует, что время корреляции на уровнях 0,5 и 0,3 существенно сокращается с уменьшением максимального размера частиц снегопада (D_m) при близких значениях скорости ветра (V_{\perp}). Об этом мы уже сообщали в [4, с. 133], где приведены таблица и графики $b(t)$, измеренных на одной трассе длиной 260 м.

С другой стороны, корреляция уменьшается с ростом V_{\perp} и эта особенность имеет место для других трасс и приемников (рис. 3, д, е).

В отличие от $b(t)$ усредненный уровень флуктуаций \bar{b} , по нашим данным, не зависит от скорости ветра V и V_{\perp} (рис. 4, где приведены результаты измерений, рассмотренных ранее в [5]).

На рис. 4 хорошо прослеживается ранее обсуждаемая зависимость уровня флуктуаций от D_m и фактически нейтральная зависимость \bar{b}_l от скорости ветра V и ее V_{\perp} (1 - $D_m > 5 мм$, $\tau = 2,3-2,4$; 2 - $D_m > 5 мм$, $\tau = 0,5-0,6$; 3 - $D_m = 1 мм$, $\tau = 0,7-0,8$).

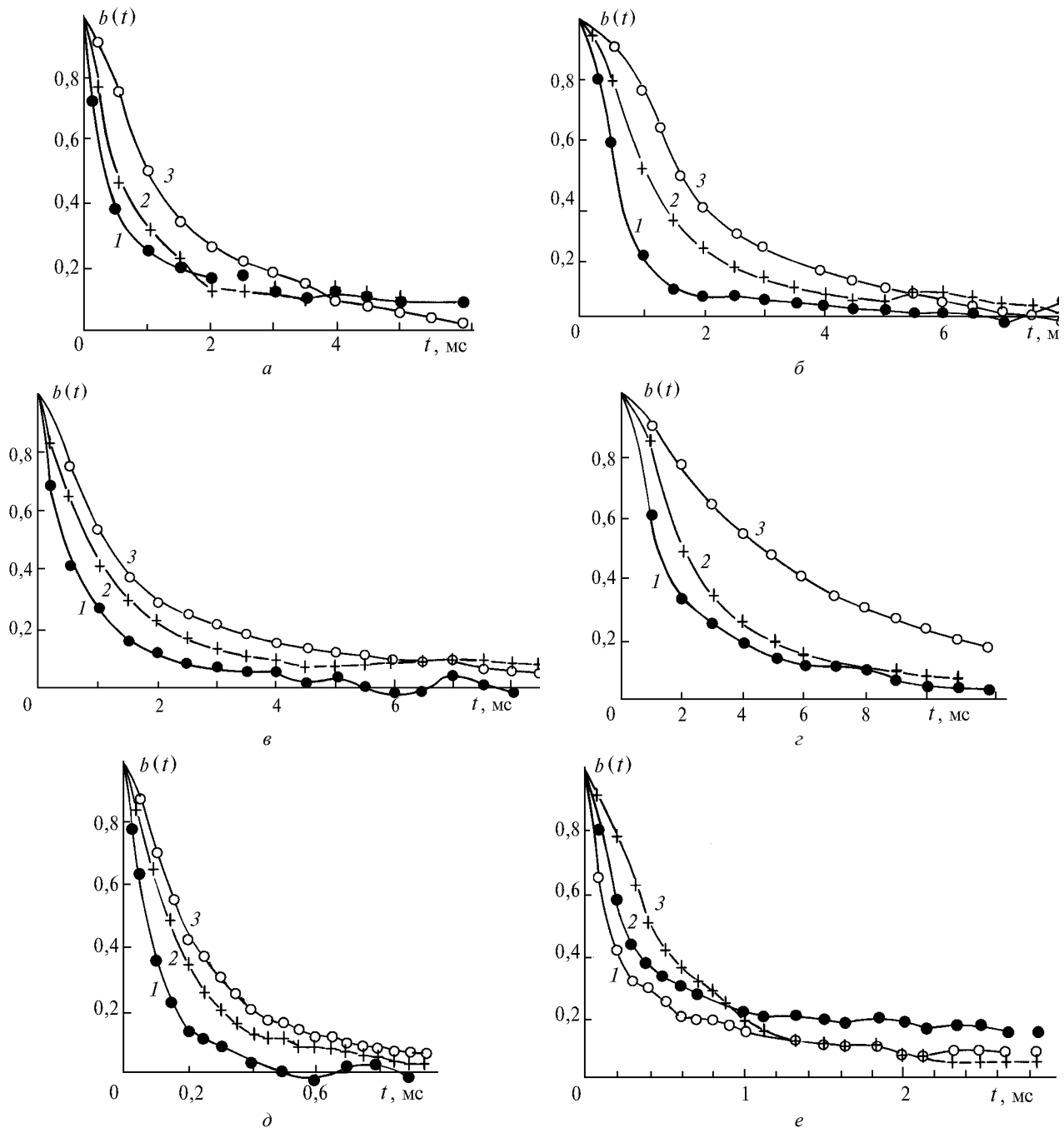


Рис. 3

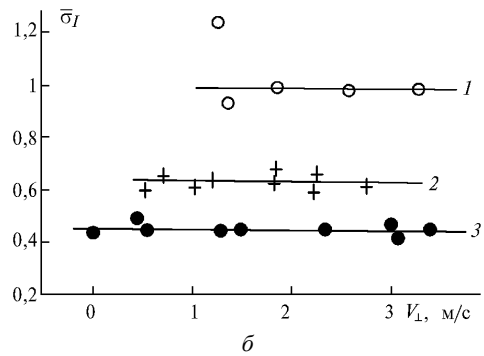
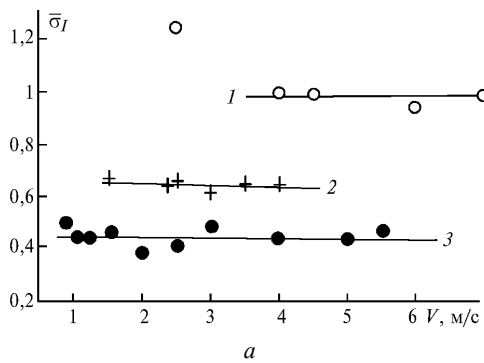


Рис. 4

Из предыдущего можно предположить, что для времени корреляции на уровне 0,5 справедливо следующее соотношение:

$$t_{0,5} = A_{0,5} (D_M/V_{\perp}),$$

где $A_{0,5}$ – безразмерный неизвестный коэффициент, который мы желаем определить:

$$A_{0,5} = (t_{0,5} V_{\perp})/D_M.$$

Что можно ожидать в изменении $A_{0,5}$?

1. Коэффициент $A_{0,5}$ будет возрастать с ростом диаметра приемника, ибо при равном отношении V_{\perp}/D_M время корреляции увеличивается (при равных или близких значениях τ) с ростом $D_{пр}$.

2. Коэффициент $A_{0,5}$ не должен зависеть от отношения V_{\perp}/D_M при фиксированном $D_{пр}$ и близких значениях τ .

3. При существенно разных τ коэффициент $A_{0,5}$ должен уменьшаться при больших τ , так как уменьшается пространственный радиус корреляции интенсивности [16]. $D_{пр}$ в этом случае постоянен.

4. Мы полагаем, что особенности, отмеченные в пп. 1÷3, должны регулярно проявляться, когда скорость ветра V_{\perp} больше скорости гравитационного падения частиц снегопада и при измерениях среднего (возможно, и наиболее вероятного) размера частиц снегопада.

В отсутствие таких сведений вышеуказанные особенности в $A_{0,5}$ могут вовсе не проявиться или обнаружиться как случайная тенденция.

В качестве такого примера в табл. 2 приведены средние значения $A_{0,5}$ для четырех $D_{пр}$ и указаны минимальное и максимальное значения $A_{0,5}$, а также количество N используемых $A_{0,5}$ при расчете его среднего значения.

Т а б л и ц а 2

$D_{пр}, \text{мм}$	$\bar{A}_{0,5}$	N	$A_{0,5}^{\min}$	$A_{0,5}^{\max}$
2,5	1,52	10	0,16	3,78
3,1	0,48	28	0,06	1,95
0,8	0,309	33	0,08	0,68
0,1	0,266	72	0,01	0,99

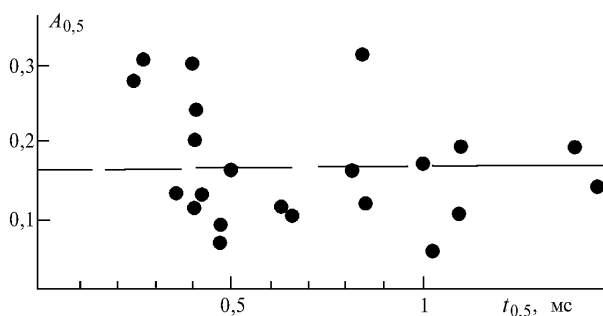


Рис. 5

На рис. 5 приведены значения $A_{0,5}$ для приемника $D_{пр} = 0,1$ мм на трассе 260 м при $\tau = 0,07 \pm 0,51$; $D_M = 1 \div 10$ мм, $V = 1,0 \div 4,5$ м/с, $V_{\perp} = 0,3 \div 1,9$ м/с и $\sigma_l = 0,03 \div 0,58$. Измерения проведены в 9 снегопадах. Из этого рисунка видно, что $A_{0,5}$ в указанном диапазоне условий фактически не зависит от времени корреляции $t_{0,5}$. Среднее его значение равно 0,16, максимальное 0,3, а минимальное 0,06. Отличие достигает 5 раз. Мы полагаем,

что это вызвано естественными вариациями в D_M , его средним значением размера частиц $D_{ср}$ снегопада, который мы не измеряли в эксперименте. Мы также полагаем, что знание $D_{ср}$, V_{\perp} , а также гравитационной скорости падения частиц осадков позволит понять поведение $A_{0,5}$ в осадках.

2.4. Некоторые характеристики НАКФ

Еще одна особенность в $b(t)$ состоит в том, что $b(t)$ не имеет явно выраженных масштабов (участков), обусловленных турбулентностью и частицами снегопада. Хотя, как видно из приведенных рисунков, $b(t)$ вначале быстро спадает во времени, а затем медленно приближается к нулю. Но приписать эту особенность в $b(t)$ двум разномасштабным причинам флуктуаций у нас нет веских оснований. Для решения этого вопроса полезны будут прямые измерения пространственной функции корреляции флуктуаций интенсивности $B(r)$. Подчеркнем, что в спектре флуктуаций (особенно при слабых осадках) наблюдаются турбулентный (низкочастотный) и гидрометеорный (высокочастотный) максимумы, но между максимумами спектр не спадает до нуля [6]. Последнее обстоятельство, по-видимому, приводит к тому, что $b(t)$ не имеет явно выраженных масштабов.

Оптическая толща имеет особую значимость, так как играет существенную роль [7] в ослаблении излучения. Более того, она в значительной мере изменяет фактическую картину флуктуаций [8]. Нетрудно согласиться с тем, что одинаковые значения оптической толщи можно иметь на разных трассах при неодинаковой концентрации частиц снегопада. А это фактически означает, что в данном случае будут реализованы неодинаковые турбулентные условия, поскольку $\sigma_t^2 \sim L^{1/6}$ [9, с. 538] в области слабых флуктуаций, в то же время $\tau \sim L$ (здесь σ_t^2 – турбулентный вклад в экспериментально измеренные флуктуации σ_s^2). Наряду с этой неопределенностью во время измерений могут быть разные D_M и V_{\perp} , которые, как уже ясно, значительно влияют на $b(t)$.

В связи с этими обстоятельствами мы провели сравнительный анализ $b(t)$ при разных τ , но при близких значениях τ_0 , σ_t^2 , V_{\perp} , D_M и равных $D_{пр}$. В качестве концентрации частиц была взята оптическая толща τ_0 на трассе 130 м. Она рассчитывалась по данным измерителя дальности видимости РДВ-3. Оценка σ_t^2 проводилась по спектру флуктуаций и σ_s^2 . Считалось, что $\sigma_s^2 = \sigma_t^2 + \sigma_r^2$, где σ_r^2 – гидрометеорный вклад в σ_s^2 . Атмосферные условия, при которых проводился сравнительный анализ $b(t)$, при разных τ весьма жестки и значительно сужают наши возможности. Таких данных оказалось недостаточно для обоснованных выводов. Поэтому влияние τ на $b(t)$ даже при фиксированных $D_{пр}$ пока остается неопределенным.

Что касается формы НАКФ, то она варьирует во времени. Чаще всего НАКФ с ростом задержки t линейно спадает во времени до уровня 0,5, а иногда до уровня 0,3. Эту особенность мы обнаружили в 150 НАКФ из 175 проанализированных. Однако зависимость НАКФ от t не всегда описывается линейной зависимостью при малых t . Аппроксимация НАКФ линейной зависимостью при $t = 0$ дает иногда значения $b(t)$ больше единицы (но не более 1,1).

3. Обсуждение результатов

Начнем с особенностей движения частиц снегопада. Они имеют малую скорость гравитационного падения W – не более 2 м/с. При некоторой скорости ветра V частицы снегопада двигаются по наклонной к Земле траектории со скоростью $V_{\text{дв}} = \sqrt{W^2 + V^2}$ [10, глава 3]. Когда $W < V$, то скорость движения частиц $V_{\text{дв}}$ примерно равна скорости ветра. Движение частиц осадков через оптический пучок вызывает естественную смену оптических свойств рассеивателей и их количества в прямом пучке. Отсюда и появляется влияние V_{\perp} на $b(t)$. Влияние V_{\perp} на турбулентный спектр флуктуаций оптического излучения в атмосфере при ясной погоде (без осадков) хорошо изучено в [9,11] и, по нашему мнению, не требует дополнительных разъяснений.

Влияние D_m на $b(t)$ установлено для всех $D_{\text{пр}}$. Для объяснения этой особенности следует принять во внимание следующие факты. Независимо от причин формирования неоднородностей оптического поля в плоскости приема влияние усредняющего действия апертуры приемного устройства на величину флуктуаций принимаемого сигнала зависит от отношения радиуса приемника к пространственному радиусу корреляции флуктуаций интенсивности излучения (r_l). Эффективность усреднения увеличивается с ростом этого отношения.

В турбулентной атмосфере (без осадков) для плоской волны при $K_m L/k \ll 1$ (где $K_m = 2\pi/l_0$, l_0 – внутренний масштаб турбулентности) пространственный радиус корреляции r_l имеет порядок $\sqrt{\lambda L}$ [9, § 53]. Физика усреднения изложена в монографии В.И. Татарского. В случае, если диаметр объектива телескопа значительно превышает радиус корреляции флуктуаций $\sqrt{\lambda L}$, в его пределах будут находиться участки фронта волны с противоположными знаками флуктуаций, в результате полный световой поток через объектив будет флуктуировать относительно слабее, чем для маленького (по сравнению с $\sqrt{\lambda L}$) объектива [9, § 53; 11]. В анализируемых экспериментах диаметр объектива заменяет диаметр приемной диафрагмы ($D_{\text{пр}}$), установленной перед ФЭУ. Физика усреднения приемником оптического излучения в осадках та же, что и в турбулентной атмосфере без осадков. Поэтому рост $D_{\text{пр}}$ (при близких τ , V_{\perp} и D_m) приводит к уменьшению уровня флуктуаций, сужению со стороны высоких частот временного спектра и естественному увеличению времени корреляции, что и отражено на рис. 1 и 2. Для пространственно ограниченного пучка в области слабых флуктуаций масштабом пространственной корреляции является дифракционный размер пучка [11, § 5.1.3]. Усреднение флуктуаций сферической волны на приемной апертуре в области слабых флуктуаций рассмотрено в [12, 13]. Влияние внутреннего масштаба турбулентности на усреднение рассмотрено в [14]. Здесь же проведено сравнение расчета с экспериментом. Учет внутреннего масштаба турбулентности позволяет улучшить согласие между теорией и экспериментом.

В [15] анализируются экспериментальные функции усреднения кольцевой приемной апертуры при отражении сферической волны от зеркального диска и двумерной матрицы уголкового отражателя. При малых апертурах (до 50 мм) результаты работы [15] близки к данным [14]. Считается, это связано с тем, что для отраженной «квази-сферической» волны флуктуации интенсивности имеют

большой, чем на прямой трассе, радиус пространственной корреляции в ближней области, что и проявляется при использовании небольших апертур. Таковы особенности r_l в турбулентной атмосфере без осадков. В осадках эти турбулентные особенности могут быть иными, зависящими от времени и интенсивности осадков.

Несколько слов о возможном поведении r_l в рассеивающей среде. Каждый снегопад имеет свою индивидуальность, так как для оптических волн существенными оказываются не только концентрация частиц, но и их внешняя форма и внутренняя структура. Они существенно варьируют в разных снегопадах. Более того, даже в течение одного и того же снегопада оптические свойства частиц осадков существенно изменяются во времени.

В связи с этим нами были анализированы синхронные измерения $V(V_{\perp})$, $\tau(\tau_0)$, D_m и $b(t)$ на приемном конце трассы, но при этом остаются неучтенными пространственные вариации оптических характеристик осадков вдоль протяженной трассы. Подобные затруднения имеют место и при измерениях флуктуаций на длинных трассах при ясной погоде (без осадков).

Несколько слов о возможном поведении r_l в рассеивающей среде. Как и в [8, 16, 17], разделим поле, рассеянное на отдельной частице осадков, на две качественно различающиеся между собой компоненты:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_g + \mathbf{E}_n.$$

Здесь \mathbf{E}_g – дифрагированное поле на контуре частицы; \mathbf{E}_n – преломленное и отраженное поле внутри частицы. Суперпозиция полей $\mathbf{E}_g + \mathbf{E}_n$ характерна и для поля, рассеянного ансамблем частиц осадков. Радиус корреляции флуктуаций интенсивности преломленного поля равен длине волны [17], и такие флуктуации не могут быть измерены в обычных схемах измерения, в которых $D_{\text{пр}} \gg \lambda$. Для дифрагированного поля ситуация иная. Если все частицы рассеивающей среды находятся в волновой зоне, т.е. на расстояниях $r \gg s$ от приемника излучения, то дифрагированное поле на приемнике является суперпозицией расходящихся волн и радиус корреляции флуктуаций интенсивности согласно [8, 16, 17] оценивается $r_l \sim d/\tau$ при $\tau > 1$ и $r_l \sim d$ при $\tau < 1$. Здесь $s = kd^2$, $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, d – диаметр частицы, τ – оптическая толщина среды. Те частицы, которые находятся в ближнем от приемника ($r \ll s$) слое, образуют тени в плоскости приемника, которые увеличивают роль во флуктуациях прилегающего к приемнику слоя трассы. Радиус корреляции флуктуаций интенсивности дифрагированного поля на частицах из прилегающего слоя оценивается равным диаметру частицы.

В эксперименте на протяженных трассах частицы осадков находились как в ближней, так и в дальней зоне относительно приемника излучения. Но значимость во флуктуациях прилегающего к приемнику слоя частиц считается определяющей [16, 17]. Толщина этого слоя, который мы грубо оцениваем, зависит от размеров частиц. Для узких расходящихся пучков важную роль во флуктуациях излучения играет слой толщиной $r \sim s$, прилегающий к источнику излучения. В этом слое будет происходить полная экранировка пучка частицами снегопада. Отсюда становится понятна и зависимость $b(t)$ от D_m . Уменьшение r_l с ростом τ можно оценить по соответствующему уменьшению $t_{0,5}$. По анализируемым данным регулярного уменьшения r_l с ростом τ не установлено. Возможно, сказалось малое число данных при больших τ ($\tau > 5$), а также ошибки в определении D_m , τ и σ_{τ}^2 .

Основные выводы

Результаты анализа экспериментальных данных позволяют установить следующую главную характерную особенность во времени корреляции ($t_{0,5}$). В близких (сходных) атмосферных условиях при D_m и V_{\perp} время корреляции $t_{0,5}$ уменьшается при уменьшении диаметра приемника. Кроме того, оно уменьшается с ростом V_{\perp} и уменьшением максимального размера частиц снегопада, что сглаживает главную особенность в различающихся по D_m и V_{\perp} атмосферных условиях.

Такое поведение для $t_{0,5}$ вполне ожидаемое, но его нельзя признать очевидным.

Работы выполнены при частичном финансировании Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 99-02-16933.

1. Жуков А.Ф., Вострецов Н.А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 1058–1068.
2. Галахов В.Н., Цвык Р.Ш. // ПТЭ. 1980. № 3. С. 140–141.
3. Мирский Г.Я. Электронные измерения. М.: Мир, 1986. 439 с.
4. Вострецов Н.А., Жуков А.Ф. // II Межреспубл. симпоз. «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Томск, 1996. Ч. 1. С. 133–134.

5. Жуков А.Ф. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 1. С. 33–39.
6. Боровой А.Г., Вострецов Н.А., Жуков А.Ф., Цвык Р.Ш., Якубов В.П. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 12. С. 1609–1612.
7. Seagraves M.A. // J. Atmosp. Scien. 1984. V. 41. N 6. P. 1827–1835.
8. Боровой А.Г., Вострецов Н.А., Жуков А.Ф., Каргин Б.А., Пригарин С.М. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 3. С. 227–233.
9. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
10. Литвинов И.В. Структура атмосферных осадков. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 154 с.
11. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 270 с.
12. Кон А.И. // Изв. вузов «Радиофизика». 1969. Т. 12. № 1. С. 149–152.
13. Homstad G.E., Strohhahn I.W., Berger R.H., Hene-ghan I.M. // JOSA. 1974. V. 64. N 2. P. 162–166.
14. Churnside I.H. // Appl. Opt. 1991. V. 30. N 15. P. 1982–1994.
15. Патрушев Г.Я., Рубцова О.А. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 11. С. 1390–1395.
16. Боровой А.Г. // Изв. вузов «Радиофизика». 1982. Т. 25. № 4. С. 391–400.
17. Боровой А.Г. Многократное рассеяние оптических волн в средах с дискретными рассеивателями: Автореф. дис. докт. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 1984. 36 с.

A.F. Zhukov, N.A. Vostretsov. Influence of receiver's diameter on light flux fluctuations at propagation of narrow divergent laser beam under snowfall conditions. 2. Autocorrelated function.

Measurements of the autocorrelated function in a narrow divergent laser beam along 10 paths (from 14 to 1928 m) under snowfall conditions were conducted. The correlation time was analyzed at the levels of 0.5, 0.3, 0.1, 0.05, and zero depending on the receiver's diameter (D_r), velocity of wind (V_{\perp}), and maximum size of particles in the snowfall (D_m). It is shown that under close (similar) atmospheric conditions with respect to V_{\perp} and D_m the correlation time at 0.5 level decreases with decrease of the receiver's diameter. It also decreases at fixed D_r with V_{\perp} growth and D_m decrease.