

УДК 681.375.826:551.571.4

## Нормированная временная автокорреляционная функция флуктуаций рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка (0,63 мкм) в приземной атмосфере в дожде, мороси, тумане и дымке

Н.А. Вострецов, А.Ф. Жуков\*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 3.02.2016 г.

Проведены измерения нормированной временной автокорреляционной функции флуктуаций рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка (0,63 мкм) в приземной атмосфере в атмосферных осадках (дожде, мороси), тумане и дымке на трассе длиной 130 м. Установлено, что время корреляции флуктуаций рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка в дожде, мороси и дымке уменьшается с ростом перпендикулярной составляющей к трассе скорости ветра при сходных атмосферных условиях (при близких значениях оптической толщи и размера частиц). Время корреляции в мороси больше, чем в дожде, время корреляции в дымке больше, чем в дожде и мороси, а в тумане время корреляции больше на порядок и более, чем в дожде.

*Ключевые слова:* временная автокорреляционная функция, время корреляции, фокусированный пучок, рассеянное излучение, дождь, морось, туман, дымка; temporal autocorrelation function, time of the correlation, focused beam, scattered radiation, rain, drizzle, fog, haze.

Настоящая статья является продолжением наших предыдущих исследований [1] временной автокорреляционной функции (ВАКФ) флуктуаций рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка (0,63 мкм) в приземной атмосфере в снегопадах. В [1] установлено, что в близких (сходных) атмосферных условиях время корреляции уменьшается с ростом перпендикулярной составляющей к трассе скорости ветра  $V_{\perp}$  и уменьшением максимального размера снежинок  $l_{\max}$ . В данной статье приведены результаты анализа измерений, выполненных в дождях, мороси, тумане и дымке. Исследовано поведение ВАКФ в зависимости от скорости ветра и ее перпендикулярной составляющей к трассе. Установка и методика измерений подробно описаны в [1]. Измерения ВАКФ проведены на трассе длиной 130 м в рассеянном излучении фокусированного лазерного пучка (рис. 1). В качестве источника использовались гелий-неоновые лазеры ЛГ-38 и ЛГН-215. Длина волны излучения  $\lambda = 0,6328$  мкм. Диаметр пучка в плоскости приема был не более 3 мм. Диаметр приемной диафрагмы  $D_{\text{пр}} = 0,1$  мм. Угол поля зрения фотоприемника  $2,7 \cdot 10^{-2}$  рад. Расстояние от центра пучка  $\Delta l$ , на котором устанавливался фотоприемник, равно 10 или 15 мм. Прием излучения проводился в фокальной плоскости лазерного

пучка. Вначале фотоприемник размещался на оптической оси, а затем смещался на 10 или 15 мм параллельно в сторону от оптической оси пучка. Сигнал

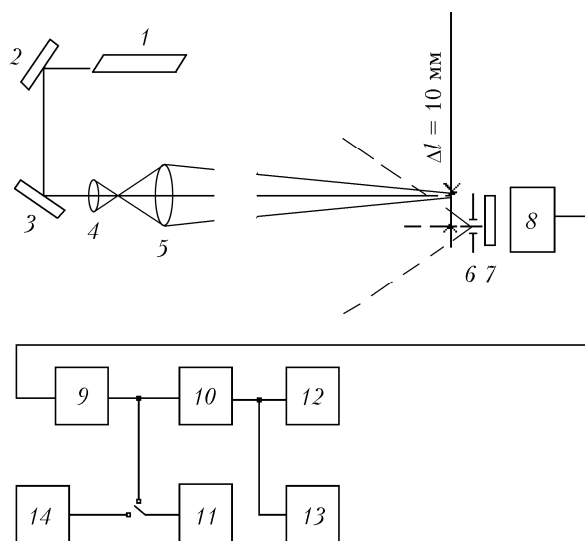


Рис. 1. Схема измерений: 1 — лазер; 2, 3 — плоские зеркала; 4, 5 — линзы Л1 и Л2; 6 — диафрагма; 7 — интерференционный светофильтр; 8 — фотоприемник (ФЭУ-38); 9 — усилитель; 10 — усилитель У7-10; 11 — анализатор спектра FSP-80; 12 — анализатор импульсов АИ-1024; 13 — коррелятор Х6-4; 14 — генератор шума NRG-201

\* Николай Арсеньевич Вострецов (vna@ioa.ru); Анатолий Фомич Жуков (tsvyk@iao.ru).

с фотоприемника (ФЭУ-38) одновременно подавался на дисперсиометр, частотный анализатор спектра FSP-80, анализатор импульсов АИ-1024 и коррелятор Х6-4. По измерениям на корреляторе рассчитывалась ВАКФ. Коррелятор одновременно измеряет 100 значений ВАКФ. Шаг задержки времени брался таким, чтобы значения ВАКФ в пределах ее первых 100 значений достигали  $0,05b_{\max}$ , где  $b_{\max}$  — максимальное значение ВАКФ. По значениям ВАКФ рассчитывалась нормированная временная автокорреляционная функция (НВАКФ). Нормировка проводилась на ее значение при нулевом шаге задержки. Относительная погрешность измерения дискретных значений ВАКФ, усредненная по всем ее значениям, не превышала 5%. Максимальное значение НВАКФ равно единице. По значениям ВАКФ ( $b(\delta t)$ ) определялось время корреляции. Для каждой НВАКФ рассчитывалось время корреляции  $t_k$  (временной сдвиг  $\delta t$ ), когда эта функция имеет значения 0,5; 0,367; 0,1; 0,05 и 0. Обозначим их как  $t_{0,5}$ ;  $t_{0,3}$ ;  $t_{0,1}$ ;  $t_{0,05}$  и  $t_0$ .

Проведено 18 серий измерений в дожде, мороси, тумане и дымке. В результате проведенного анализа НВАКФ установлено, что  $b(\delta t)$  вначале быстро падает во времени, а затем медленно приближается к нулю, как и в снегопадах. Это видно из рисунков. Время корреляции изменяется в широких пределах в зависимости от атмосферных условий. Скорость ветра изменялась от 0 до 10 м/с, ее перпендикулярная составляющая к трассе от 0 до 5,4 м/с. Оптическая толщина  $\tau$  от 0,02 до 0,5. Время корреляции на уровне 0,5  $t_{0,5}$  изменялось от 0,1 до 15,5 мс,  $t_{0,367}$  — от 0,15 до 21 мс,  $t_{0,1}$  — от 0,21 до 65 мс,  $t_{0,05}$  — от 0,23 до 80 мс и  $t_0$  — от 0,27 до 95 мс. Проанализировано 130 НВАКФ.

Проведено исследование зависимости времени корреляции  $t_k$  от перпендикулярной составляющей скорости ветра к трассе  $V_{\perp}$  при близких атмосферных условиях в дожде, мороси и дымке. В тумане  $V_{\perp}$  изменялась лишь от 0 до 1 м/с, поэтому в тумане не установлена зависимость  $t_k$  от  $V_{\perp}$ . Выявлено, что время корреляции  $t_k$  уменьшается с ростом перпендикулярной составляющей к трассе скорости ветра  $V_{\perp}$  в дожде, мороси и дымке. На рис. 2 показана зависимость НВАКФ от  $V_{\perp}$  при похожих атмосферных условиях (при близких дисперсии  $\sigma_s^2$ , оптической толщине  $\tau$ ) в дожде и мороси. Видно, что в мороси время корреляции больше, чем в дожде. На рис. 3 показана НВАКФ при близких атмосферных условиях (при схожих дисперсии  $\sigma_s^2$ , оптической толщине  $\tau$  и  $V_{\perp}$ ) в дожде, мороси и дымке. Из рис. 3 видно, что время корреляции в дымке больше, чем в дожде и мороси.

В тумане проведена лишь одна серия измерений (один день). В тумане не была установлена зависимость времени корреляции от оптической толщины и  $V_{\perp}$ . Оптическая толщина изменялась от 0,14 до 0,5,  $V_{\perp}$  изменялась лишь от 0 до 1 м/с. Установлено, что время корреляции в тумане больше на

порядок и более, чем в дожде при близких атмосферных условиях, как и в случае снегопада [1].

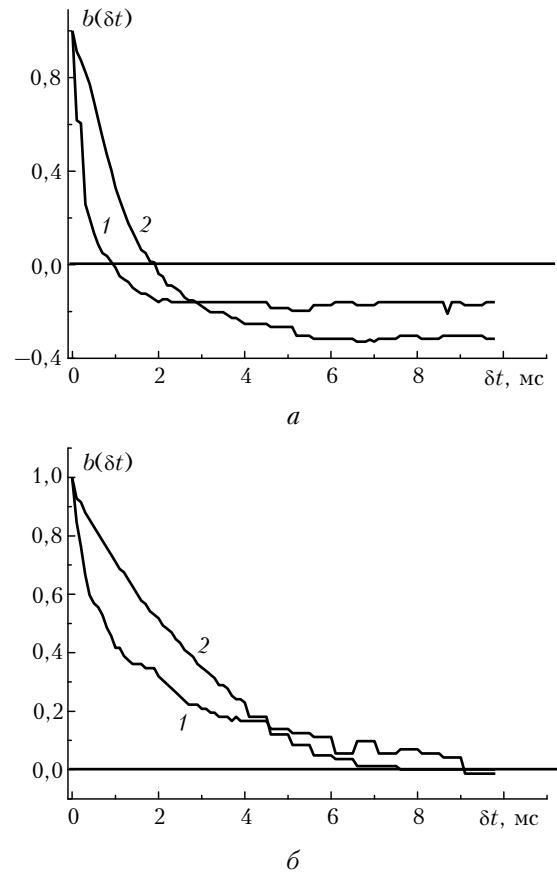


Рис. 2. Нормированная временная автокорреляционная функция: *a* —  $V_{\perp} = 5,2$  м/с,  $\sigma_s^2 = 0,09$ ,  $\tau = 0,11$  (1);  $V_{\perp} = 1,25$  м/с,  $\sigma_s^2 = 0,1$ ,  $\tau = 0,1$  (2) (дождь); *б* —  $V_{\perp} = 3,9$  м/с,  $\sigma_s^2 = 0,19$ ,  $\tau = 0,02$  (1);  $V_{\perp} = 1,9$  м/с,  $\sigma_s^2 = 0,19$ ,  $\tau = 0,02$  (2) (морось)

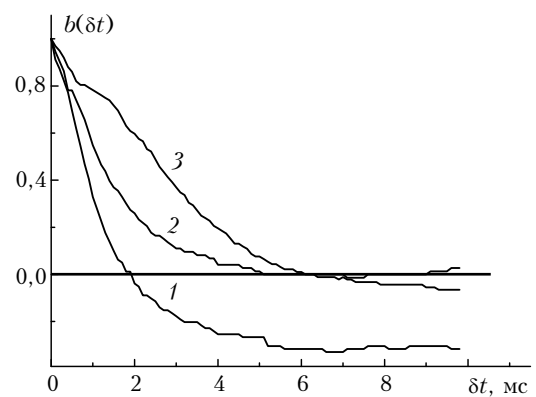


Рис. 3. Нормированная временная автокорреляционная функция: 1 —  $V_{\perp} = 1,7$  м/с,  $\sigma_s^2 = 0,18$ ,  $\tau = 0,09$  (дождь); 2 —  $V_{\perp} = 1,8$  м/с,  $\sigma_s^2 = 0,2$ ,  $\tau = 0,08$  (морось); 3 —  $V_{\perp} = 1,5$  м/с,  $\sigma_s^2 = 0,13$ ,  $\tau = 0,04$  (дымка)

На рис. 4 показана зависимость НВАКФ от  $V_{\perp}$  при близких атмосферных условиях в дожде и тумане.

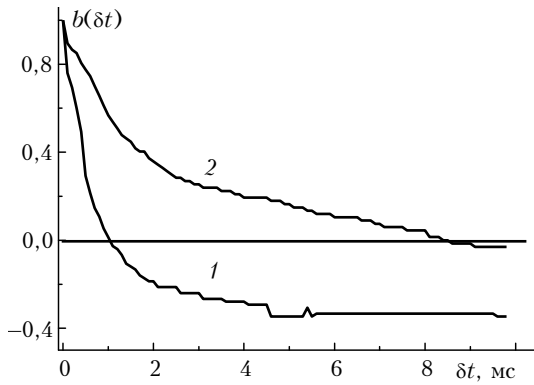


Рис. 4. Нормированная временная автокорреляционная функция: 1 –  $V_{\perp} = 0,77$  м/с,  $\sigma_s^2 = 0,09$ ,  $\tau = 0,18$  (дождь); 2 –  $V_{\perp} = 0,85$  м/с,  $\sigma_s^2 = 0,10$ ,  $\tau = 0,14$  (туман)

Значения времени корреляции в снеге, дожде, мороси, тумане и дымке на уровнях 0,5; 0,36; 0,1; 0,05 и 0, подтверждающие вышеприведенные результаты, даны в таблице.

Время корреляции в зависимости от типа атмосферных осадков

Тип атмосферных осадков	$\tau$	$V$ , м/с	$V_{\perp}$ , м/с	$t_k$ , мс				
				0,5	0,36	0,1	0,05	0
Снег	0,09	2,0	1,6	0,38	0,50	1,5	2,0	2,2
Дождь	0,09	2,5	1,7	0,74	0,95	1,5	1,75	1,9
Морось	0,08	4,0	1,8	1,40	2,00	4,5	4,7	4,9
Дымка	0,04	1,5	1,5	2,40	3,00	4,75	5,9	6,1
Туман	0,14	1,0	0,8	4,50	6,00	29	40	55

По-видимому, время корреляции  $t_k$  зависит от отношения скорости движения частиц  $V_{\text{дв}}$  к размеру

частиц  $l_{\text{max}}$ . Скорость движения частиц  $V_{\text{дв}}$  состоит из гравитационной скорости падения частицы  $W$  и скорости ветра  $V$  (ее перпендикулярной составляющей к трассе скорости ветра  $V_{\perp}$ ) [2]. Движение частиц осадков через оптический пучок вызывает естественную смену оптических свойств частиц и их количества в пучке. Отсюда и влияние скорости ветра на время корреляции, поскольку размеры капель дождя были 1–3 мм, мороси меньше 1 мм, а размеры капель тумана 1–10 мкм и дымки от  $10^{-2}$  до 1 мкм.

В результате проведенного анализа экспериментальных результатов установлено, что в зависимости от условий эксперимента время корреляции изменяется в широких пределах.

В сходных условиях (близких оптических толщах и размерах частиц) время корреляции уменьшается с возрастанием перпендикулярной составляющей к измерительной трассе скорости ветра, как в дожде (см. рис. 2, а), так и в мороси (см. рис. 2, б) и дымке. В мороси время корреляции больше, чем в дожде (см. рис. 2). Время корреляции в мороси больше, чем в снегопаде (см. таблицу). В тумане время корреляции больше на порядок и более, чем в дожде (см. рис. 4), как и в снегопаде [1]. В дымке время корреляции больше, чем в дожде и мороси (см. рис. 3).

1. *Вострецов Н.А., Жуков А.Ф.* Флуктуации интенсивности рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка в приземном слое атмосферы. Ч. 1. Снегопад // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 8. С. 689–693.
2. *Литвинов И.В.* Структура атмосферных осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 154 с.

*Vostretsov N.A., Zhukov A.F.* The normalized temporal autocorrelation function of fluctuations of the scattered radiation of a focused laser beam (0.63 μm) in the surface atmosphere in rain, drizzle, fog, and haze.

Normalized temporal autocorrelation function of fluctuations of the scattered radiation of a focused laser beam (0.63 μm) in the surface atmosphere in precipitation (rain, drizzle), fog, and haze on a path with a length of 130 m is measured. It is found that the time correlation of the fluctuations of the scattered radiation of a focused laser beam in the rain, drizzle, fog, and haze decreases with increasing wind speed component normal to the path at close atmospheric conditions (at close values of optical depth and particle size). The correlation time in drizzle is more than in the rain. The correlation time in haze is more than in the rain and drizzle. The correlation time in the fog is an order of magnitude or even more longer than in the rain.