

УДК 551.551.2

Структурные функции компонент вектора ветра над неоднородной подстилающей поверхностью

В.А. Гладких, И.В. Невзорова, С.Л. Одинцов, В.А. Фёдоров*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 25.04.2014 г.

Рассматриваются результаты анализа структурных функций компонент вектора ветра в приземном слое атмосферы над неоднородной подстилающей поверхностью. На основе обработки экспериментальных данных выделены три основных типа структурных функций и предложены аналитические модели для их аппроксимации в диапазоне сдвигов, относящихся к инерционному интервалу турбулентности. Оценена повторяемость выделенных типов структурных функций в различных пунктах наблюдений, рассмотрена статистика параметров аппроксимирующих функций.

Ключевые слова: атмосфера, ветер, приземный слой, структурные функции; atmosphere, wind, surface layer, structure functions.

Введение

Структура турбулентности в поле ветра приземного слоя атмосферы над неоднородной подстилающей поверхностью может существенно отличаться от случая статистически однородной и изотропной (локально однородной и изотропной) турбулентности, характерной для условий ровной подстилающей поверхности. В этой связи возникает вопрос о возможности построения моделей статистических характеристик турбулентности при ее «усложненной» структуре. В частности, определенное внимание при исследованиях турбулентности уделяется структурным функциям компонент вектора ветра различного порядка (см., например, [1–3]). Анализ этих функций оказывается полезным и для изучения взаимодействия неоднородностей поля ветра разного масштаба [1], исследования анизотропии турбулентности [2], уточнения фундаментальных статистических свойств турбулентности [3].

В настоящей статье рассмотрены диагональные элементы структурного тензора (второго порядка) вектора ветра [4] на основе экспериментальных данных, полученных в приземном слое атмосферы на территориях с различной структурой подстилающей поверхности. Была поставлена задача подбора аппроксимирующих функций для элементов структурного тензора в диапазоне аргументов (сдвигов), соответствующих «инерционному» интервалу турбулентности [4], и анализа полученных при аппро-

ксимации параметров. Отметим, что подобные исследования были проведены нами ранее для структурных функций температуры воздуха [5, 6].

1. Экспериментальные данные и методика их обработки

Экспериментальные данные были получены с использованием ультразвуковых анемометров-термометров (ультразвуковых метеостанций – УЗМ) «Метео-2» [7], измеряющих ортогональные составляющие вектора ветра, температуру и относительную влажность воздуха, а также атмосферное давление с частотой измерений $f_d \approx 10,7$ Гц. Измерения проводились в различные сезоны года в четырех пунктах наблюдения, перечисленных в табл. 1 и отличающихся структурой подстилающей поверхности. Измерительная часть приборов располагалась на мачтах высотой от 5 до 10 м, которые устанавливались либо на земле, либо на крыше зданий. Суммарное время обработанных экспериментальных данных по всем пунктам наблюдений составило 17 630 ч.

Вычислялись диагональные элементы структурного тензора (далее – структурные функции ($\text{м}^2/\text{с}^2$) турбулентных составляющих компонент V_i вектора ветра)

$$D_i(t_S, \tau) = \overline{[V_i(t_S + \tau) - V_i(t_S)]^2}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3$; t_S – некоторый момент времени (например, начало интервала обработки); τ – сдвиг по времени; черта сверху обозначает усреднение по заданному интервалу времени Δt . Процедура получения продольной V_1 , поперечной V_2 и вертикальной V_3

* Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Ирина Витальевна Невзорова (nevzorova@iao.ru); Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru); Валерий Александрович Фёдоров (fva21@iao.ru).

Место, годы и длительность проведения измерений

Номер пункта наблюдений	Краткая характеристика места наблюдений	Год, сезон и общая длительность наблюдений (ч)
1	г. Томск, Академгородок, 5 м над крышей четырехэтажного здания, суммарная высота измерителя 17 м	2013 г. (круглогодично) 8 451 ч
2	Обсерватория ИОА СО РАН «Фоновый», большая поляна, 5 и 10 м от уровня земли	2010–2013 гг. (теплое время года) 5 м: 2 190 ч 10 м: 2 379 ч
3	Обсерватория ИОА СО РАН «Фоновый», 5 м над крышей одноэтажного здания, суммарная высота измерителя 12 м	2009–2012 гг. (теплое время года) 2 050 ч
4	Обсерватория ИОА СО РАН «Базовый экспериментальный комплекс», большая поляна, 6 м от уровня земли	2013–2014 гг. (осень–зима) 2 560 ч
<i>Суммарно</i>		17 630 ч

компонент вектора ветра на основе результатов измерений меридиональной V_x , широтной V_y и вертикальной $V_z = V_3$ компонент ветра описана в работе [8].

Усреднение по интервалу времени Δt в (1) подразумевает, что анализируемая выборка должна соответствовать стационарному процессу (или случайному процессу со стационарными первыми приращениями). Для обеспечения стационарности (хотя бы приближенно) было применено предварительное удаление из исходной выборки скользящего среднего с интервалом усреднения («временным окном») 1 мин. Проверкой установлено, что операция удаления скользящего среднего с заданным «временным окном» практически не влияет на оценки структурных функций (СФ) в области сдвигов, соответствующих «инерционному» интервалу турбулентности. Все представленные далее результаты были получены с использованием интервала усреднения $\Delta t = 10$ мин.

Обычно СФ рассматриваются как функции пространственных сдвигов. Поэтому для перехода от сдвига во времени τ к пространственному сдвигу r было использовано (с учетом дискретности обрабатываемой выборки) соотношение $r_j = \tau_j V_h = j \delta_d V_h$, где V_h – среднее значение скорости горизонтального ветра на интервале Δt ; $\delta_d = 1/f_d$; $1 \leq j \leq K = \{0, 1 \Delta t f_d\}$ (при расчетах сдвиг СФ не превышал 10% от длительности обрабатываемой выборки Δt). Фигурные скобки здесь и далее обозначают выделение целого значения. В итоге формула (1) преобразуется в дискретный аналог с переходом к пространственному сдвигу r_j :

$$D_i(t_S, r_j) = \frac{1}{N_j} \sum_{m=0}^{N_j-1} [V_i(t_S + m\delta_d + \frac{r_j}{V_h}) - V_i(t_S + m\delta_d)]^2, \quad (2)$$

где $N_j = N - j$, $N = \{\Delta t f_d\}$.

Для более удобного анализа эмпирические структурные функции $D_i(t_S, r_j)$ нормировались на свои значения при сдвиге r_j , ближайшем к 1 м:

$$D_{in}(t_S, r_j) = D_i(t_S, r_j) / D_i(t_S, r_j \approx 1). \quad (3)$$

Поскольку обработке подвергается дискретная выборка, то величина сдвига r_j может и не принимать значение, тождественно равное 1 м. Далее переменная t_S , связанная с «меткой» интервала обработки, не указывается.

Одна из задач состояла в проверке принадлежности десятичного логарифма нормированной эмпирической СФ $\tilde{y}_i(r_j) = \lg D_{in}(r_j)$ к одному из трех типов аппроксимирующих (непрерывных) функций $y_i(r)$:

1-й тип

$$\tilde{y}_i(r_{\min} \leq r_j \leq r_{\max}) \Leftrightarrow y_i = {}^i b + {}^i \mu x, \quad (4)$$

2-й тип

$$\tilde{y}_i(r_{\min} \leq r_j \leq r_{\max}) \Leftrightarrow y_i = {}^i a_0 + {}^i a_1 x + {}^i a_2 x^2, \quad (5)$$

3-й тип

$$\begin{cases} \tilde{y}_i(r_{\min} \leq r_j \leq r_p) \Leftrightarrow y_i = {}^i d_0 + {}^i d_1 x + {}^i d_2 x^2, \\ \tilde{y}_i(r_p \leq r_j < r_{\max}) \Leftrightarrow y_i = {}^i c + {}^i \gamma x. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $x = \lg r_n$ и $r_n = r/r_N$ – нормированный сдвиг. В дальнейшем полагаем, что $r_N = 1$ м. Такая нормировка позволяет отождествлять величины и статистику нормированных сдвигов r_n с величинами и статистикой «размерных» сдвигов r . В соотношениях (4)–(6) величина r_{\min} – минимальный сдвиг СФ при скорости горизонтального ветра V_h и частоте измерений f_d , r_{\max} – максимальный сдвиг, до которого распространяется успешная аппроксимация СФ. Верхний левый индекс i у параметров аппроксимирующих функций указывает на их принадлежность к компоненте V_i вектора ветра. Первый тип СФ в логарифмических координатах параметризуется линейной функцией (рис. 1, а), второй тип – параболической (рис. 1, б). Третий тип СФ является комбинацией второго и первого типов (рис. 1, в).

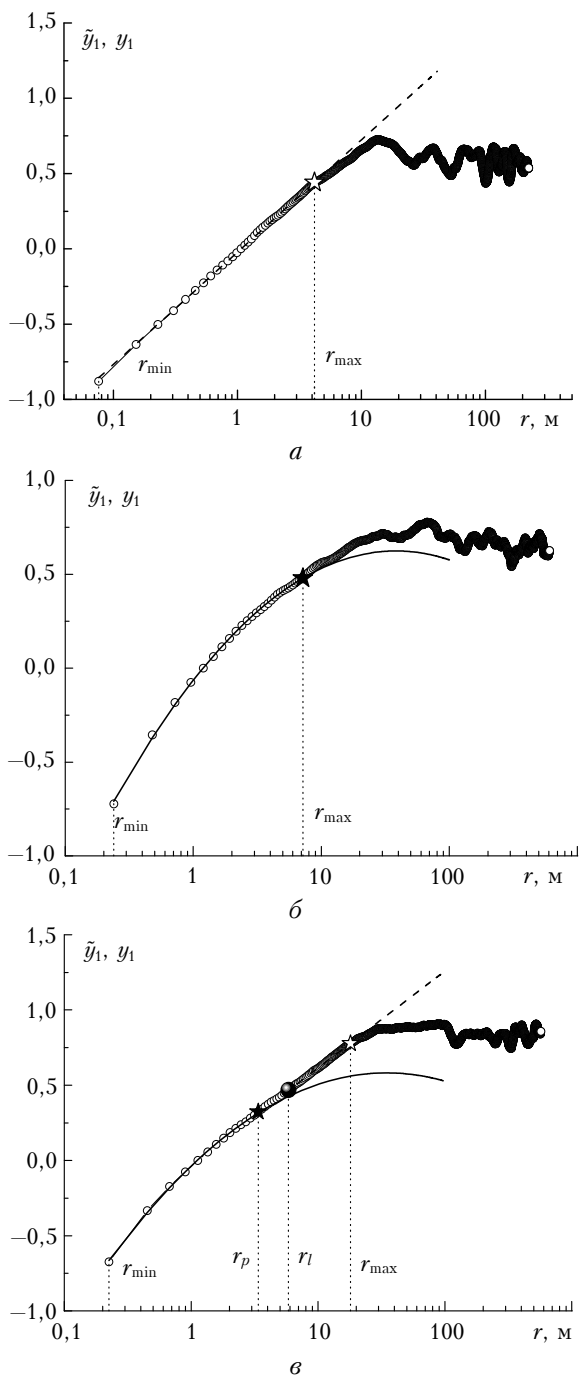


Рис. 1. Примеры функций $\tilde{y}_i(r_j)$ и $y_i(r)$ для продольной составляющей: а – первый, б – второй, в – третий тип. Мелкие символы – эмпирические значения СФ (\tilde{y}_i). Сплошные линии – «параболическая», штриховые – «линейная» аппроксимации (y_i). Крупные символы обозначают границы участков успешной аппроксимации

Сдвиг r_p в СФ третьего типа соответствует завершению «параболического» участка, а сдвиг r_l – началу «линейного». Между точками r_p и r_l может существовать переходная зона, имеющая размер $\Delta_B = r_l - r_p$. Структурная функция относилась к третьему типу только в тех случаях, когда переходная зона Δ_B была небольшой по сравнению

с $\Delta_A = r_{\max} - r_l + r_p - r_{\min}$ (условие $\Delta_B / \Delta_A < 0,25$) при одновременном выполнении условия $r_p - r_{\min} \leq r_{\max} - r_l$. В противном случае СФ причислялась ко второму типу. Параметры, входящие в правые части равенств (4)–(6), определялись в процессе численной «подгонки» теоретических функций $y_i(r)$ к эмпирическим (дискретным) функциям $\tilde{y}_i(r_j)$. Отметим также, что для $r_{\min} > 1$ м (случай очень больших скоростей ветра) анализ СФ на интервале времени Δt не проводился.

Запишем модельные структурные функции (4)–(6) в обобщенной форме для диапазона сдвигов $r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$, переходя от логарифмического представления к «линейному»:

$$D_i(r) = C_i F_i(r) r_n^{\alpha_i} \quad (7)$$

Здесь введены обозначения $C_i = 10^{\beta_i} D_i(r=1)$ и $F_i(r) = 10^{\eta_i (\lg r)^2}$. Показатель степени β_i в соотношении для C_i может принимать, согласно (4)–(6), значения ${}^i b, {}^i a_0, {}^i d_0, {}^i c$ в зависимости от типа СФ. В свою очередь параметр η_i в соотношении для F_i принимает значения ${}^i a_2$ или ${}^i d_2$, а показатель степени α_i в (7) – значения ${}^i \mu, {}^i a_1, {}^i d_1, {}^i \gamma$. Функция $F_i(r) = \text{const} = 1$ для СФ первого типа и для «линейного» участка СФ третьего типа. Согласно проведенным вычислениям значения множителя 10^{β_i} , входящего в определение величины C_i , близки к единице. Поэтому можно положить, что $C_i \approx D_i(r=1)$. Для случая $\beta_i = {}^i c$ это приближение является достаточно грубым и требует в перспективе некоторого уточнения. Размерность правой части соотношения (7) определяется размерностью C_i ($\text{м}^2/\text{с}^2$). Остальные множители в (7) безразмерны.

Отметим, что подбор аппроксимирующих функций вида (4)–(6) был использован нами и при исследовании структурных функций температуры воздуха [5, 6]. Как будет показано далее, заданные типы СФ охватывают подавляющее большинство случаев, когда типизация СФ компонент вектора ветра возможна в принципе.

Качество аппроксимации (степень расхождения эмпирической и теоретической функций) определялось сравнением вычисляемого в процессе обработки коэффициента детерминации k_d [9] с предварительно заданным «уровнем качества» k_{dL} . Выполнение условия $k_d \geq k_{dL}$ свидетельствовало об успешной аппроксимации структурной функции на участке от минимального сдвига r_{\min} до сдвига r . Поэтапное увеличение r (формально r_n) и сопоставление на каждом этапе вычисляемых k_d с заданным уровнем k_{dL} обеспечивали оценку максимального сдвига r_{\max} , до которого распространяется аппроксимация с требуемой точностью. Если в итоге аппроксимации $r_{\max} < 1$ м, то принималось решение, что структурная функция не соответствует выбранному типу. Это условие было задано в связи с тем, что при повышенной скорости ветра V_h количество точек в диапазоне сдвигов $r_j < 1$ м, обеспечиваемое частотой измерений f_d , может быть слишком малым

для достоверной проверки соответствия эмпирической СФ тестируемому типу. Во всех представленных ниже результатах использовался эмпирически выбранный «уровень качества» $k_{dL} = 0,99850$. Обоснованность такого уровня демонстрируют примеры успешной аппроксимации (см. рис. 1).

Для реализации изложенной выше процедуры вычисления структурных функций, проверки их принадлежности к одному из рассматриваемых типов (4)–(6) и определения параметров аппроксимирующей функций было подготовлено, протестировано и использовано специализированное программное обеспечение.

2. Результаты обработки данных

2.1. Статистика повторяемости типов структурных функций

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что структурные функции компонент вектора ветра в приземном слое атмосферы над территориями с различной степенью неоднородности подстилающей поверхности в большинстве случаев могут быть аппроксимированы (в пределах интервала $r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$) обобщенной функцией вида (7). Три частных случая этой функции (три типа СФ) определяются соотношениями (4)–(6). В табл. 2 приведена повторяемость (доля времени) разных типов структурных функций продольной, поперечной и вертикальной составляющих вектора

ветра в отдельных пунктах наблюдений, а также суммарно по всем пунктам. Далее будет употребляться обозначение $SF_{m,i}$, соответствующее структурной функции m -го типа для компоненты V_i вектора ветра. Напомним, что СФ оценивались по 10-минутным интервалам времени с предварительным удалением из исходных выборок V_i скользящих средних с интервалом сглаживания 60 с. В табл. 2 показаны доли времени (в процентах от длительности наблюдений), когда имел место тот или иной тип СФ. В колонке 2 указана доля времени наблюдений, когда СФ в целом подчинялась параметризации вида (7) (суммарно все типы СФ). В колонках 3–5 указаны доли времени, когда имел место конкретный тип СФ.

Согласно табл. 2 СФ могут быть аппроксимированы формулой (7) в подавляющем большинстве случаев. При этом для всех компонент вектора ветра доминирует второй тип СФ ($SF_{2,i}$), определяемый соотношением (5) и имеющий форму, представленную на рис. 1, б. Доминирование $SF_{2,i}$ характерно для всех пунктов и на всех высотах проведенных нами измерений. Доля времени, когда реализуется тот или иной тип СФ, несколько изменяется в зависимости от пункта наблюдения. Отметим, что в пункте 1 СФ первого типа ($SF_{1,i}$) практически нет. Над относительно ровной подстилающей поверхностью (пункты наблюдения 2–4) разнообразие типов СФ более высокое по сравнению с урбанизированной территорией (пункт 1).

Таблица 2

Доли времени (повторяемость) реализаций $SF_{m,i}$

Пункт и длительность наблюдений, ч	Компонента ветра, V_i	Суммарно все типы, %	Тип 1 ($SF_{1,i}$), %	Тип 2 ($SF_{2,i}$), %	Тип 3 ($SF_{3,i}$), %
	1		3	4	5
Пункт 1 8 451 ч	V_1	99,25	0,14	90,68	8,43
	V_2	98,69	0,06	91,11	7,52
	V_3	98,86	0,15	97,44	1,27
Пункт 2 10 м 2 379 ч	V_1	97,77	4,41	87,05	6,31
	V_2	95,0	1,12	87,73	6,15
	V_3	95,2	0,11	91,00	4,09
Пункт 2 5 м 2 190 ч	V_1	95,29	6,44	81,78	7,07
	V_2	94,35	1,00	85,80	7,53
	V_3	93,32	0,14	91,1	2,08
Пункт 3 2 050 ч	V_1	95,59	5,07	85,32	5,20
	V_2	97,04	1,27	88,44	7,33
	V_3	88,49	0,08	86,24	2,17
Пункт 4 2 560 ч	V_1	85,77	10,16	71,84	3,77
	V_2	86,69	8,48	75,55	2,66
	V_3	89,61	1,05	87,93	0,63
Суммарно по всем пунктам 17 630 ч	V_1	96,17	3,53	85,72	6,92
	V_2	95,72	1,69	87,42	6,61
	V_3	95,12	0,26	93,1	1,76

Связь типов СФ с какими-либо синоптическими условиями подробно не рассматривалась. При этом статистика повторяемости типов СФ в различные сезоны года могла быть получена только для пункта 1. Не приводя каких-либо иллюстративных материалов, отметим, что сезонный ход повторяемости $SF_{2,i}$ и $SF_{3,i}$ по измерениям в пункте 1 в 2013 г. практически отсутствовал (повторяемость $SF_{1,i}$ из-за недостаточной статистической обеспеченности не рассматривалась).

Если на одном и том же интервале времени Δt структурные функции трех составляющих вектора ветра могут быть аппроксимированы функцией (7), то будут ли совпадать их типы? Для $SF_{1,i}$ можно достаточно уверенно ответить что нет. Для $SF_{3,i}$ совпадение наблюдается примерно в 10% случаев (доля от средней повторяемости данного типа), для $SF_{2,i}$ – до 30%. Если же рассматривать только «парные» комбинации, например одновременную реализацию $SF_{3,1}$ и $SF_{3,2}$, или $SF_{2,1}$ и $SF_{2,2}$, то они могут составлять от 20 до 60% случаев в зависимости от типа СФ, сравниваемой пары, пункта наблюдений. Более детальный анализ подобных случаев не проводился.

2.2. Статистика параметров аппроксимирующих функций

Рассмотрим параметры (коэффициенты) аппроксимирующих функций (4)–(6). Детальный анализ каждого параметра и их взаимосвязей невозможен в рамках одной статьи, поэтому при изложении результатов мы ограничились только общей статистикой параметров.

Структурные функции первого типа

Для функций первого типа ($SF_{1,i}$) формула (7) с учетом (4) принимает вид

$$D_i(r) = C_i r_n^{i\mu}, \quad r_{\min} \leq r \leq i r_{\max}. \quad (8)$$

Не анализируя величину C_i , укажем лишь, что для каждой из компонент вектора ветра V_i она меняется в некотором «среднем» диапазоне $0,01 < C_i < 0,2$. Этот диапазон C_i характерен и для других типов СФ. Напомним также, что $r_n = r / r_N$ и $r_N = 1$ м, поэтому статистика нормированных сдвигов r_n может быть полностью перенесена на статистику «размерных» сдвигов r . Далее речь пойдет о статистике «размерных» сдвигов $i r_{\max}$.

Отметим, что параметризация структурных функций компонент вектора ветра в форме (8) является общепринятой для условий локально однородной и изотропной турбулентности [4]. При этом $i\mu = 2/3 \approx 0,667$. Одной из целей нашей работы была проверка применимости данной параметризации в приземном слое атмосферы с различной структурой подстилающей поверхности.

При анализе результатов нас интересовала в первую очередь общая статистика параметра $i\mu$ и «размера» области успешной аппроксимации $i r_{\max}$. Количество времени, когда реализовывался случай $SF_{1,i}$, невелико (см. колонку 3 табл. 2). При этом в пункте 1 реализация $SF_{1,i}$ была настолько редкой, что не позволила провести достоверный анализ статистики $i\mu$ и $i r_{\max}$. Кроме того, во всех пунктах наблюдения вертикальная составляющая ветра V_3 крайне редко имела структурную функцию вида (8). И только в пункте 4 реализация случая $SF_{1,3}$ достигала примерно 1% времени наблюдений (суммарно около 27 ч). Таким образом, достоверная статистика параметров $i\mu$ и $i r_{\max}$ может быть получена только в пунктах наблюдений с относительно ровной подстилающей поверхностью (пункты 2–4) и только для продольной (V_1) и поперечной (V_2) составляющих вектора ветра.

На рис. 2, а приведены гистограммы параметров $i\mu$ и $i r_{\max}$, полученные суммарно по пунктам наблюдений 2–4, а также по некоторым отдельным пунктам.

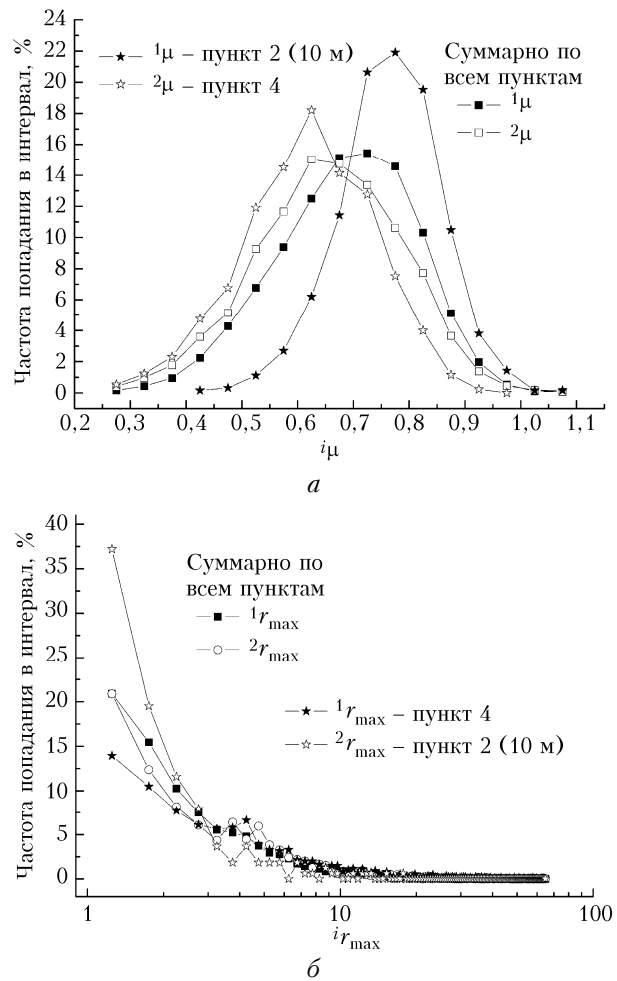


Рис. 2. Гистограммы параметров $i\mu$ (а) и $i r_{\max}$ (б). Абсцисса символов соответствует середине интервала

В табл. 3 собраны средние значения этих параметров (медианные значения отличаются не более чем на 0,01). Напомним, что в случае изотропной турбулентности должно быть $i_{\mu} = 2/3 \approx 0,667$. Рис. 2, а демонстрирует достаточно высокую изменчивость параметра i_{μ} . При этом области изменения i_{μ} в разных пунктах немного отличаются. Связь i_{μ} с текущими условиями (тип стратификации, характеристики среднего ветра и т.п.) на данном этапе работы подробно не рассматривалась. Отметим лишь, что есть тенденция уменьшения i_{μ} с увеличением средней скорости ветра.

Таблица 3
Средние значения i_{μ} и $i_{r_{\max}}$ для компонент вектора ветра V_1 и V_2 ($SF_{1,i}$)

Пункт наблюдения	V_1		V_2	
	i_{μ}	$i_{r_{\max}}$, М	i_{μ}	$i_{r_{\max}}$, М
Пункт 2 (10 м)	0,764	2,9	0,791	2,9
Пункт 2 (5 м)	0,710	3,3	0,736	2,8
Пункт 3	0,710	3,6	0,760	3,2
Пункт 4	0,628	6,9	0,616	6,2
Суммарно по пунктам 2–4	0,684	4,8	0,653	5,4

Средние значения сдвигов $i_{r_{\max}}$, при которых выполняется аппроксимация (8), также приведены в табл. 3. Медианные значения $i_{r_{\max}}$ примерно в 1,5 раза меньше средних значений. Гистограммы $i_{r_{\max}}$ и $i_{r_{\max}}$, рассчитанные с шагом 0,5 м, показаны на рис. 2, б (как суммарно по пунктам наблюдения 2–4, так и для некоторых отдельных пунктов). Основная особенность распределения — доминирование значений $i_{r_{\max}}$ в диапазоне 1,0–1,5 м. Отметим, что в пункте 4 величина $i_{r_{\max}}$ достаточно часто достигала значений 10 м и более, в то время как в других пунктах такие случаи были редки. Для всех пунктов наблюдения есть тенденция роста $i_{r_{\max}}$ с увеличением средней скорости ветра. Взаимосвязь i_{μ} и $i_{r_{\max}}$ характеризуется тем, что с ростом $i_{r_{\max}}$ величина i_{μ} уменьшается.

Структурные функции второго типа

Для структурных функций второго типа ($SF_{2,i}$) формула (7) с учетом (5) имеет вид

$$D_i(r) = C_i \cdot 10^{i_{a_2} (\lg r)^2} r_n^{i_{a_1}}, \quad r_{\min} \leq r \leq i_{r_{\max}}. \quad (9)$$

Наиболее часто имела место структурная функция данного типа. По этой причине статистическая обеспеченность оценок не вызывает сомнения. В табл. 4 представлены средние значения i_{a_j} и $i_{r_{\max}}$ для всех компонент вектора ветра, полученные в отдельных пунктах наблюдения, а также суммарно по всем пунктам.

Гистограммы параметров i_{a_1} и i_{a_2} , рассчитанных суммарно по всем пунктам наблюдений и характеризующих соответственно общий «наклон» и степень «фокусировки» $SF_{2,i}$ в интервале $r \leq i_{r_{\max}}$, приведены на рис. 3, а. В отдельных пунктах наблюдения форма гистограмм i_{a_j} остается такой же, только положение моды может немного смещаться по оси абсцисс (для i_{a_1} — в пределах $\pm 0,03$, для i_{a_2} — в пределах $\pm 0,05$). Обратим внимание на то, что положение мод i_{a_j} на оси абсцисс немного отличается от средних значений, приведенных в табл. 4 (суммарно по всем пунктам наблюдения). Отметим также, что согласно рис. 3, а параметры i_{a_2} могут иметь положительные значения. Это указывает на то, что форма $SF_{2,i}$ при $i_{a_2} > 0$ имеет противоположный «прогиб» аппроксимирующей кривой в диапазоне сдвигов $r \leq i_{r_{\max}}$ по отношению к той форме, которая приведена на рис. 1, б.

Далее рассмотрим статистику величины $i_{r_{\max}}$. Отметим, что значения $i_{r_{\max}}$ для $SF_{2,i}$ существенно больше, чем для $SF_{1,i}$. Средние значения $i_{r_{\max}}$ (табл. 4) примерно в 1,2–1,6 раза больше медиан. В отличие от первого типа СФ, гистограммы $i_{r_{\max}}$ для второго типа имеют моды (максимумы), абсциссы которых лежат в пределах 4–6 м в зависимости от пункта наблюдения и компоненты вектора ветра. Примеры гистограмм $i_{r_{\max}}$, построенных с шагом 0,5 м, приведены на рис. 3, б. Обратим внимание на то, что для $SF_{2,i}$ имеется значительное число случаев, когда область успешной аппроксимации достигает больших сдвигов $i_{r_{\max}}$ (многие десятки метров). Примеры гистограмм $i_{r_{\max}}$ (рис. 3, б) для отдельных пунктов наблюдения являются «граничными» как по положению моды, так и по ее «остроте» в совокупности комбинаций «пункт наблюдения/компонента вектора ветра».

Таблица 4
Средние значения i_{a_j} и $i_{r_{\max}}$ для разных компонент вектора ветра ($SF_{2,i}$)

Пункт наблюдения	V_1			V_2			V_3		
	i_{a_1}	i_{a_2}	$i_{r_{\max}}$	i_{a_1}	i_{a_2}	$i_{r_{\max}}$	i_{a_1}	i_{a_2}	$i_{r_{\max}}$
Пункт 1	0,799	-0,212	14,15	0,804	-0,231	14,60	0,734	-0,312	10,48
Пункт 2 (10 м)	0,780	-0,187	13,29	0,784	-0,200	13,39	0,746	-0,232	12,76
Пункт 2 (5 м)	0,750	-0,184	11,55	0,734	-0,202	10,07	0,686	-0,267	9,37
Пункт 3	0,796	-0,182	16,80	0,812	-0,199	18,00	0,778	-0,257	16,71
Пункт 4	0,775	-0,174	18,03	0,790	-0,205	17,69	0,764	-0,300	13,54
Суммарно по всем пунктам	0,787	-0,197	14,50	0,792	-0,216	14,67	0,737	-0,288	11,74

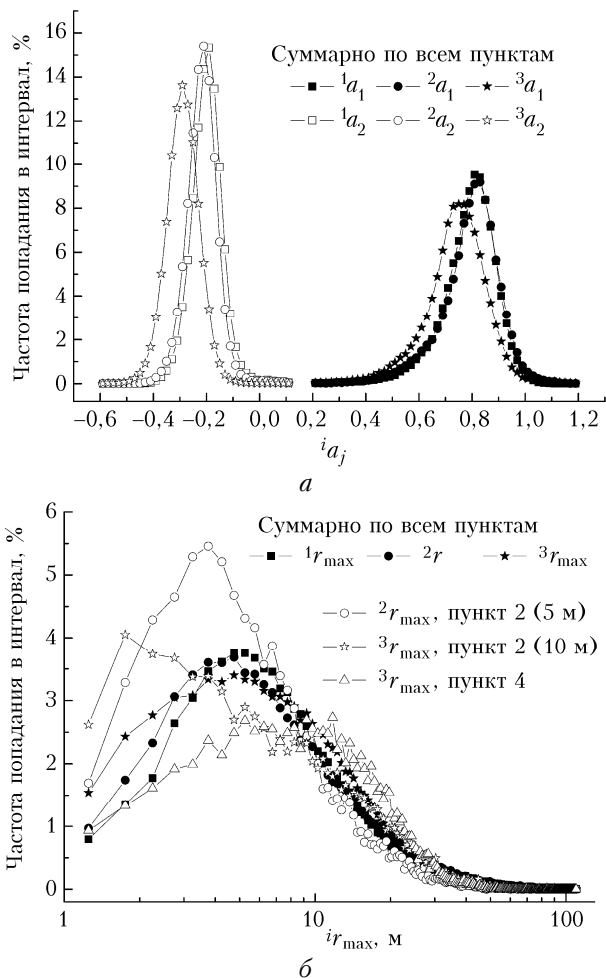


Рис. 3. Гистограммы параметров i_{a_j} (а) и $i_{r_{\max}}$ (б). Абсцисса символов соответствует середине интервала

Структурные функции третьего типа

Для структурных функций третьего типа ($SF_{3,i}$) формула (7) с учетом (6) принимает вид

$$D_i(r) \approx C_i \cdot \begin{cases} r_n^{i_{d_1}} 10^{i_{d_2}(\lg r_n)^2}, & r_{\min} \leq r \leq i_{r_S}, \\ r_n^{i_\gamma}, & i_{r_S} < r \leq i_{r_{\max}}. \end{cases} \quad (10)$$

Здесь знак примерного равенства обусловлен дополнительно введенным предположением о том, что

переходная область между участками с различной формой СФ отсутствует. Точкой перехода от одной формы к другой в этом случае является сдвиг $r_S = (r_p + r_l)/2$. Сделанное допущение справедливо только при малых величинах $\Delta_B = r_l - r_p$. Как уже указывалось ранее, при обработке экспериментальных данных к третьему типу СФ относились только те случаи, когда выполнялись условия $\Delta_B/\Delta_A < 0,25$ и $r_S - r_{\min} \leq r_{\max} - r_S$. Иначе СФ относилась ко второму типу (9) и полагалось $r_{\max} = r_p$. Модельная функция (10) может иметь в точке r_S разрыв. Однако его наличие не влияет на величины и статистику параметров i_{d_j} и i_γ .

Рассмотрим параметры i_{d_j} , i_γ и величины $i_{r_{\max}}$. В табл. 5 приведены их средние значения для отдельных пунктов наблюдений и суммарно для всех пунктов. Отметим, что медианные значения параметров i_{d_j} ($j = 2, 3$) и i_γ достаточно близки к их средним значениям. В то же время медианные значения $i_{r_{\max}}$ для СФ данного типа примерно в 1,2–1,4 раза меньше средних значений. Диапазоны изменений i_{d_j} , i_γ и $i_{r_{\max}}$ для всех пунктов наблюдений приведены в виде гистограмм на рис. 4.

Понятно, что в разных пунктах гистограммы этих параметров будут несколько отличаться как по положению моды, так и по форме. Но эти отличия не носят кардинального характера. Следует подчеркнуть, что по условиям отбора структурных функций третьего типа значение $i_{r_{\max}}$ не могло быть меньше 2 м. Согласно рис. 4, б значения $i_{r_{\max}}$ для $SF_{3,1}$ и $SF_{3,2}$ могут достигать, так же как и для $SF_{2,i}$, многих десятков метров. В то же время величины $i_{r_{\max}}$ для $SF_{3,3}$ гораздо меньше.

Если сравнить между собой параметры i_{a_1} и i_{d_1} , характеризующие наклоны касательных к структурным функциям $SF_{2,i}$ и $SF_{3,i}$ при сдвигах $r = 1$ м (см. табл. 4 и 5), то можно прийти к выводу, что для продольных V_1 и поперечных V_2 составляющих вектора ветра они примерно одинаковы (вывод сделан совокупно по всем пунктам наблюдений). В то же время параметры 3a_1 и 3d_1 , относящиеся к вертикальной составляющей ветра V_3 , заметно различаются (${}^3a_1 > {}^3d_1$).

Таблица 5

Средние значения i_{d_j} , i_γ и $i_{r_{\max}}$ для разных компонент вектора ветра ($SF_{3,i}$)

Пункт наблюдения	V_1				V_2				V_3			
	1d_1	1d_2	${}^1\gamma$	${}^1r_{\max}$	2d_1	2d_2	${}^2\gamma$	${}^2r_{\max}$	3d_1	3d_2	${}^3\gamma$	${}^3r_{\max}$
Пункт 1	0,798	-0,269	0,647	13,87	0,776	-0,287	0,625	11,09	0,639	-0,358	0,514	5,63
Пункт 2 (10 м)	0,766	-0,234	0,690	11,41	0,758	-0,247	0,692	9,75	0,675	-0,266	0,673	6,16
Пункт 2 (5 м)	0,735	-0,232	0,685	11,24	0,724	-0,254	0,674	9,64	0,621	-0,281	0,632	4,68
Пункт 3	0,807	-0,223	0,686	15,36	0,797	-0,246	0,676	15,06	0,722	-0,277	0,652	11,97
Пункт 4	0,791	-0,241	0,618	14,11	0,792	-0,256	0,597	12,31	0,674	-0,336	0,527	5,92
Суммарно по всем пунктам	0,786	-0,254	0,658	13,38	0,770	-0,270	0,645	11,30	0,661	-0,305	0,602	6,58

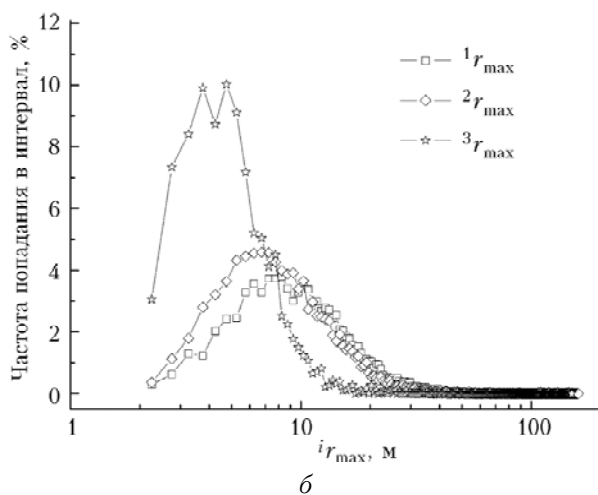
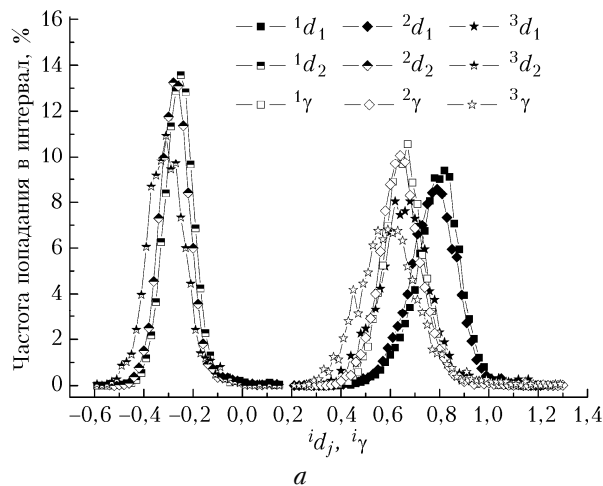


Рис. 4. Гистограммы параметров i_{d_j} , i_γ (а) и $i_{r_{\max}}$ (б). Гистограммы построены по совокупности данных по всем пунктам наблюдений

Сравнение параметров i_{a_2} и i_{d_2} , характеризующих степень «фокусировки» структурных функций второго и третьего типа на «параболических» участках, показывает, что «фокусировка» $SF_{3,i}$ в целом несколько больше «фокусировки» $SF_{2,i}$ ($|i_{d_2}| > |i_{a_2}|$; см. табл. 4 и 5). Это справедливо для всех компонент вектора ветра.

Заключение

Подводя итог, можно сделать следующие основные выводы. Структурные функции второго порядка продольной, поперечной и вертикальной составляющих вектора ветра в приземном слое атмосферы в подавляющем большинстве случаев могут быть аппроксимированы в «инерционной» области пространственных сдвигов одной из трех функций (8)–(10). Структурные функции со степенной зависимостью от сдвига (8), которую можно отнести к «классической» форме, встречаются редко, особенно для вертикальной составляющей вет-

ра. Наиболее распространенной формой зависимости структурной функции от сдвига является функция (9). Сдвиги, до которых распространяется область успешной аппроксимации структурных функций, зависят от типа структурной функции, компоненты вектора ветра и, в меньшей степени, от пункта наблюдений. Их средние значения составляют от единиц до десятков метров, а максимальные – до сотен метров (для структурных функций второго и третьего типа продольной и поперечной составляющих). Плотности распределения параметров аппроксимирующих функций (8)–(10) являются одномодовыми и близкими к нормальному распределению (точная оценка вида распределений не проводилась).

Подробное исследование взаимосвязей типов структурных функций и параметров их аппроксимаций с текущими метеорологическими условиями на данном этапе работ не проводилось и планируется провести в дальнейшем. Отметим лишь, что основным фактором, определяющим тип и параметры структурных функций, является скорость основного потока ветра. Дополнительными факторами служат прежде всего направление набегающего потока и структура подстилающей поверхности, а также текущая стратификация приземного слоя атмосферы.

Особо отметим, что типы структурных функций компонент вектора ветра, выделенные для анализа, аналогичны типам структурных функций температуры воздуха в приземном слое атмосферы, исследованных нами ранее [5, 6]. При этом параметры аппроксимирующих функций сопоставимы между собой по величинам.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ИОА СО РАН «Атмосфера» на территориях обсерваторий ИОА СО РАН «БЭК» и «Фоновый».

1. Giostra U., Cava D., Schipa S. Structure functions in a wall-turbulent shear flow // Boundary-Layer Meteorol. 2002. V. 103, N 3. P. 357–359
2. Katul G.G., Parlange M.B., Albertson J.D., Chu C.R. Local isotropy and anisotropy in the sheared and heated atmospheric surface layer // Boundary-Layer Meteorol. 1995. V. 72, N 1–2. P. 123–148.
3. Hunt J.C.R., Sandham N.D., Vassilicos J.C., Launder B.E., Monkewitz P.A., Hewitt G.F. Developments in turbulence research: A review based on the Programme of the Isaac Newton Institute, Cambridge // J. Fluid Mech. 2001. V. 436. P. 353–391.
4. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
5. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Фёдоров В.А. Структурные функции температуры воздуха над неоднородной подстилающей поверхностью. Часть I. Типичные формы структурных функций // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 948–954.
6. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Фёдоров В.А. Структурные функции температуры воздуха над неоднородной подстилающей поверхностью. Часть II.

Статистика параметров структурных функций // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 955–963.
7. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7 (109). С. 21–25.
8. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Фёдоров В.А. Экспериментальные оценки компонентов

тензора анизотропии турбулентности в приземном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 689–697.

9. Колемаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. школа, 1991. 400 с.

V.A. Gladkikh, I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov, V.A. Fedorov. **Structure functions of wind velocity components over inhomogeneous underlying surface.**

In the paper, we consider the results of analysis of structure functions of wind velocity components in the surface air layer over inhomogeneous underlying surface. Based on processing of experimental data, we singled out three basic types of structure functions and suggested analytical models for their approximation in the range of shifts, referring to inertial turbulence interval. The frequency of occurrence of the identified types of structure functions at different observation sites is estimated, and the statistics of the parameters of approximating functions is considered.