

Структурные функции температуры воздуха над неоднородной подстилающей поверхностью. Часть I. Типичные формы структурных функций

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 5.06.2013 г.

Представлены результаты анализа структурных функций температуры воздуха в приземном слое атмосферы над неоднородной подстилающей поверхностью. На основе обработки экспериментальных данных выделены три основных типа структурных функций и предложены модели их параметризации в диапазоне сдвигов, относящихся к инерционному интервалу турбулентности. Оценена повторяемость выделенных типов структурных функций в различное время года в пункте наблюдения над урбанизированной территорией.

Ключевые слова: атмосфера, турбулентность, температура, структурные функции температуры; atmosphere, turbulence, temperature, structure functions of temperature.

Введение

Неоднородности плотности воздуха детерминированного или случайного характера активно влияют на распространение оптического излучения в атмосфере Земли. Поскольку плотность воздуха связана с его температурой, которую гораздо проще измерить в натуральных условиях, то корректное описание и учет структуры температурного поля в различных условиях являются одной из ключевых задач оптики атмосферы. Неослабевающий интерес к решению этой задачи обусловлен, в частности, развитием методов и технических средств беспроводной оптической связи на больших расстояниях и над территориями со сложной орографией. Обеспечение устойчивости этой связи подразумевает, в том числе, оптимальную адаптацию к текущим условиям распространения оптических сигналов (см., например, [1]). Аналогичная проблема возникает и при наблюдении различных объектов через земную атмосферу, когда имеющиеся модели температурной турбулентности не обеспечивают адекватную интерпретацию флуктуаций регистрируемых оптических сигналов [2].

Исследование изменчивости температуры воздуха на масштабах от единиц до сотен метров в пространственной области или от секунд до десятков минут – во временной, остается актуальной задачей не только для оптики атмосферы. Например, специалистами по физике атмосферы активно изучаются «упорядоченные» структуры в температурном поле,

пространственный масштаб которых составляет от единиц до десятков метров. Детальный анализ результатов подобных исследований не входит в круг наших задач. Укажем лишь несколько работ за последние годы, в которых в том или ином контексте обсуждаются структурные функции температуры воздуха (второго порядка), являющиеся предметом наших исследований.

В частности, в работах [3, 4] рассмотрены структурные функции температуры воздуха при наличии в ее временных развертках «упорядоченных» структур в форме «наклонных полок» (ramp features). В [4] приведены примеры таких структур с масштабами 10–20 с во времени и 4–6 °С по температуре. В работе [5] обсуждаются результаты оценок «интервалов пережимаемости» температуры воздуха, которые составляют (в среднем) от 20 до 30 с и характеризуют неоднородность температурного поля. Все перечисленные работы содержат результаты анализа ситуаций, когда температура в нижних слоях атмосферы по своим статистическим характеристикам, в том числе и по форме структурной функции, может заметно отличаться от «классического» случая (однородности и изотропии). Причинами могут являться сложная структура подстилающей поверхности (неоднородная по температуре, степени шероховатости и т.п.) и/или особенности потока ветра в стратифицированной по температуре атмосфере. Отметим также более раннюю работу [6], где обсуждаются в том числе результаты натуральных и лабораторных исследований структурных функций температуры разного порядка и «кросс-структурных» функций температуры и скорости ветра. В перечисленных работах имеется достаточно обширный перечень литературы, относящийся к исследуемой проблеме.

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

Проведенные нами ранее исследования над относительно ровной подстилающей поверхностью показали [7], что зависимость структурной функции температуры воздуха (второго порядка) при небольших сдвигах сложнее, чем это постулируется существующей теорией развитой турбулентности. Накопленный на протяжении последующих лет экспериментальный материал (в разных пунктах наблюдений и в разных климатических условиях) позволил продолжить исследования в данной области с уверенностью в статистической обеспеченности формулируемых выводов.

Основная цель работы заключалась в исследовании турбулентных составляющих температурного поля вблизи неоднородной подстилающей поверхности. Были поставлены и решены следующие задачи:

1) расчет и систематизация форм структурных функций температуры воздуха в различных условиях (разные типы подстилающей поверхности, различные сезоны года, разные условия стратификации атмосферы в точке наблюдений);

2) аппроксимация (параметризация) выделенных при систематизации эмпирических структурных функций аналитическими выражениями;

3) систематизация параметров аппроксимирующих функций.

В первой части статьи рассматриваются результаты решения первых двух задач, а во второй части – третьей задачи.

Оборудование и место проведения измерений

Для измерения температуры воздуха использовались ультразвуковые метеостанции (далее – УЗМ) типа «Метео-2», имеющие сертификат РФ об утверждении типа средств измерений. С методами измерения температуры воздуха и компонентов скорости ветра на основе ультразвуковых технологий можно ознакомиться, например, в работе [8]. Конкретные характеристики УЗМ «Метео-2» приведены в статье [9] (обзор различных типов ультразвуковых метеостанций опубликован в работе [10]). Отметим, что использованные для измерений экземпляры УЗМ «Метео-2» обеспечивали частоту измерений f_d порядка 10,7 Гц (с отклонением $\pm 0,2$ Гц в конкретных экземплярах) и работали в круглосуточном режиме. Регистрировались ортогональные компоненты вектора ветра и температура воздуха, статическое атмосферное давление и относительная влажность воздуха. Измеренные значения метеорологических параметров заносились в архив на жесткий диск управляющего компьютера. Для обработки архивных данных использовалось специализированное программное обеспечение.

Анализ структурных функций температуры воздуха проводился по результатам измерений в нескольких пунктах наблюдений, существенно различающихся по текстуре подстилающей поверхности, окружающей точку наблюдений: над открытой ровной

поверхностью, покрытой невысокой травой и окруженной лесным массивом, внутри лесопарковой зоны вблизи водохранилища, над урбанизированной территорией (на крыше здания), в горных условиях. Как правило, измерительная часть УЗМ «Метео-2» размещалась на мачтах высотой от 5 до 10 м, которые в свою очередь располагались или непосредственно на подстилающей поверхности, или на крышах зданий. Более подробное описание мест измерений будет приведено во второй части статьи.

Методика обработки экспериментальных данных

В соответствии с поставленными задачами исследовались квадраты разности температуры T воздуха со сдвигом во времени: $D_T(t, \tau) = [T(t + \tau) - T(t)]^2$, где t – некоторый момент времени (например, начало интервала обработки); τ – сдвиг по времени. Черта сверху обозначает процедуру усреднения по интервалу времени Δt . Для статистической обеспеченности оценок мы ограничивались величиной сдвига τ_{\max} не более 10–20% от длительности выборки Δt .

Для перехода из временной в пространственную область анализа использовалось соотношение $r = \tau V_h$, где V_h – средняя скорость (модуль) горизонтального ветра за интервал обработки Δt ; r – сдвиг в пространственной области. Величина V_h определяется на основе измеряемых с помощью УЗМ компонентов вектора ветра. Поскольку фактически имеется дискретная выборка температуры объемом $N = \{\Delta t f_d\}$ значений (здесь и далее фигурными скобками обозначено выделение целой части) с шагом по времени $\delta_d = 1/f_d$, то структурные функции в пространственной области оцениваются на интервале времени Δt с использованием формулы

$$D_T(t, \tau) \Leftrightarrow D_T(t_m, r_j) = \frac{1}{N_j} \sum_{i=0}^{N_j-1} \left[T\left(t_m + i\delta_d + \frac{r_j}{V_h}\right) - T(t_m + i\delta_d) \right]^2, \quad (1)$$

где объем «частной» выборки N_j при пространственном сдвиге r_j определяется формулой $N_j = N - j$; сдвиг по расстоянию $r_j = j V_h \delta_d$; число сдвигов при вычислениях определяется величиной τ_{\max} и имеет максимальное значение $\max j = K_{\max} = \{\tau_{\max} / \delta_d\}$, а момент времени t_m отвечает начальному моменту обрабатываемого интервала времени. При $j = 0$ структурная функция равна нулю.

Поскольку минимально возможный сдвиг по времени при вычислении структурных функций определяется фиксированным значением $\delta_d = \tau_{\min}$, то минимально возможный сдвиг в пространственной области составляет $r_{\min} = V_h \delta_d$ и зависит от средней скорости ветра в анализируемом интервале времени. По этой причине начальные точки r_{\min} структурных функций для разных моментов t_m могут не совпадать между собой.

Отметим, что в работе [11] при переходе от временных к пространственным сдвигам в структурных функциях температуры используется дополнительный нормирующий множитель, связанный с дисперсиями компонентов скорости ветра. Его применение несколько изменяет абсолютные значения структурных функций, но не изменяет общей формы, которая нас интересовала в первую очередь. По этой причине мы не применяли каких-либо дополнительных нормировок при вычислении структурных функций.

Использование усреднения по интервалу времени Δt подразумевает, что анализируемая выборка соответствует стационарному эргодическому процессу и поэтому усреднение по времени обосновано. Понятно, что изменение температуры воздуха во времени в общем нельзя отнести к стационарным процессам. Однако на достаточно коротких интервалах времени данное приближение чаще всего оказывается оправданным. Такой подход широко распространен при исследовании турбулентности, которая считается «замороженной» и переносится средним потоком без изменения статистических характеристик (гипотеза Тейлора). Тем не менее в разработанном и использованном нами программном обеспечении была предусмотрена возможность удаления детерминированной нестационарной составляющей температуры воздуха и последующей оценки структурных функций только по «вариационным» составляющим температуры. Детерминированная составляющая температуры $T_S(t_k)$ определялась путем применения к исходной выборке $T(t_k)$ операции скользящего усреднения с временным окном длительностью Δt . Затем определялись значения $T_P(t_k) = T(t_k) - T_S(t_k)$, соответствующие «вариациям» температуры различного масштаба, и по формуле (1) рассчитывалась структурная функция, где вместо значений $T(t_k)$ использовались значения $T_P(t_k)$.

Выбор величины Δt (как и величины Δt) может влиять на общую форму функции $D_T(t_m, r_j)$. Но при малых значениях r_j , отвечающих инерционному интервалу турбулентности, такое влияние практически отсутствует.

Типичные формы структурных функций температуры воздуха

Как уже отмечалось выше, основанием для проведенных исследований послужило часто встречающееся отличие эмпирических структурных функций температуры воздуха в инерционном интервале от формы, постулируемой теорией [12]. Согласно теории в случае локально однородной и изотропной турбулентности структурная функция в диапазоне сдвигов $l \ll r_j \ll L$, где l и L – внутренний и внешний масштаб температурной турбулентности, может быть параметризована (аппроксимирована) аналитической функцией в виде «закона 2/3»:

$$D_T(r_j) = C_T^2 r_j^\mu = C_T^2 (V_h \tau_j)^\mu, \quad (2)$$

где C_T^2 – структурная характеристика температуры воздуха, $K^2 \cdot m^{-4}$; $\tau_j = r_j / V_h$ – дискретный сдвиг (аргумент) структурной функции во временной области; $\mu = 2/3$ для «классической» формы [12]. Внутренний масштаб турбулентности l имеет величину порядка нескольких миллиметров, а внешний масштаб L – от единиц до десятков метров в зависимости от высоты измерений (см., например, [12, 13]).

Основная цель нашей работы заключалась в ответе на вопрос: если степенной закон (2) не выполняется, то можно ли с помощью иных, достаточно простых аналитических выражений параметризовать структурные функции температуры воздуха? Экспериментальные данные, полученные в различных условиях, показали, что такая возможность имеется. Помимо «классической» формы (2) значительная часть эмпирических структурных функций температуры (СФТ) воздуха имеет вид, представленный на рис. 1 двумя графиками.

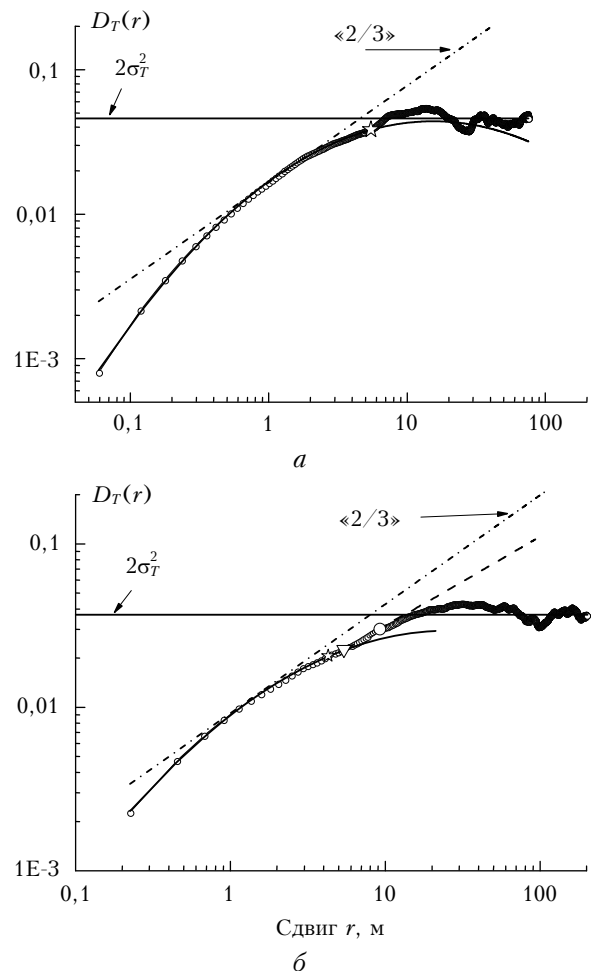


Рис. 1. Примеры эмпирических структурных функций температуры воздуха (мелкие символы). Горизонтальными линиями указан уровень, отвечающий удвоенной выборочной дисперсии температуры на интервале обработки. Сплошные кривые относятся к «параболической» аппроксимации. Штрихпунктирные прямые отвечают «закону 2/3», а штриховая линия (б) – «линейной» аппроксимации участка структурной функции. Крупными символами отмечены границы сдвигов, где выполняются соответствующие аппроксимации

Рис. 1, а демонстрирует случай, когда эмпирическая СФТ (символы) в инерционном интервале может быть успешно аппроксимирована одной функцией от минимального сдвига r_{\min} и до сдвига порядка 6 м (сплошная кривая). Рис. 1, б относится к более сложному случаю, когда эмпирическая СФТ (символы) на начальном участке (от r_{\min} до примерно 5 м) аппроксимирована одной функцией, а на завершающем (в диапазоне сдвигов примерно 6–10 м) — другой. Именно представленные на рис. 1 структурные функции в совокупности с формой (2) чаще всего имели место в проводившихся нами измерениях. «Классическая» форма СФТ дана с пометкой « $2/3$ ».

Один из важных выводов, следующих из представленных результатов, заключается в том, что поведение структурных функций температуры воздуха при малых сдвигах не подчиняется параметризации (2). Безусловно, этот вывод настораживает, поскольку общепринято (см., например, [12, 13]), что именно при малых сдвигах практически гарантировано выполнение параметризации (2), так как на малых масштабах естественным образом должна выполняться гипотеза локальной однородности и изотропии турбулентных скалярных полей.

Естественно возникает вопрос о корректности работы приборов, применявшихся для измерений. Как уже указывалось выше, основным инструментом диагностики турбулентных составляющих для нас служили ультразвуковые метеостанции типа «Метео-2» (разработка ИОА СО РАН). При этом использовались различные экземпляры метеостанций, работавшие в совершенно разных условиях. Тем не менее результат был одинаков — параметризация (2) в инерционном интервале выполняется лишь в редких случаях.

Можно допустить, что все УЗМ типа «Метео-2» имеют принципиальные аппаратно-программные погрешности при измерении пульсационных составляющих температуры. Для проверки этого предположения мы воспользовались результатами работы УЗМ других типов. В частности, на основе экспериментальных данных ультразвукового анемометра-термометра АМК-3 [14] с использованием формулы (1) были рассчитаны структурные функции температуры воздуха, измеренной над подстилающей поверхностью с различной текстурой. В результате установлено, что и для данного типа УЗМ справедлив сделанный вывод — параметризация (2) выполняется лишь в редких случаях. Для примера на рис. 2 приведены фрагменты нормированных эмпирических структурных функций температуры воздуха, полученных при работе АМК-3 над крышей здания. Здесь же кружочками показана модельная линия, соответствующая параметризации СФТ в форме (2) при $\mu = 2/3$.

Очевидно, что в инерционном интервале ($l \ll r_j \ll L$) отличие эмпирических СФТ от «классической» формы значительно. Отметим, что приведенные на рис. 2 результаты получены при частоте измерений $f_d \approx 160$ Гц. Поэтому имелась возможность построить СФТ для очень малых сдвигов r_j . Однако следует иметь в виду, что размеры «рабочей

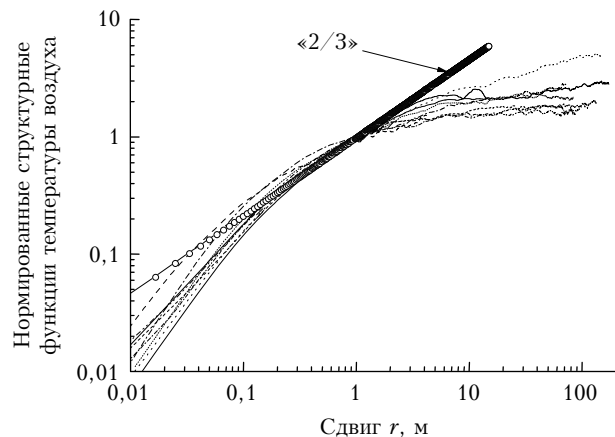


Рис. 2. Примеры нормированных эмпирических структурных функций температуры воздуха по измерениям анемометра-термометра АМК-3. Линия с символами отвечает «закону $2/3$ »

области» ультразвуковых анемометров-термометров (расстояния между соответствующими парами датчиков) обычно составляют несколько десятков сантиметров (10–30 см). Эти размеры фактически задают физический порог разрешения измерительной системы. В этой связи имеет смысл проводить анализ структурных функций только в тех диапазонах сдвигов r_j , где они превышают размеры «рабочих областей» измерителей.

Для анализа нами были использованы результаты работы и других типов ультразвуковых анемометров-термометров, которые также демонстрировали формы СФТ, отличные от «классической». Но статистическая обеспеченность (количество экспериментальных данных) этих измерений была невелика и здесь они не обсуждаются. Можно указать ряд работ, где эмпирические структурные функции в инерционном интервале также демонстрируют отличие от «классической» формы (2). Например, в работах [6, 15] приводятся экспериментальные данные о СФТ, полученные в лабораторных и натуральных условиях. Среди иллюстративного материала этих работ имеются СФТ второго порядка с признаками отклонения от закона « $2/3$ » в инерционном интервале, особенно для лабораторных результатов. В монографии [16, гл. 5] также приводятся результаты, демонстрирующие возможное отличие СФТ от «классической» формы (2). Таким образом, с определенной долей уверенности мы можем полагать, что измеряемые УЗМ «Метео-2» пульсации температуры воздуха и вычисляемые на их основе структурные функции достаточно адекватны реальным условиям.

В процессе анализа нами использовался переход к логарифмической форме СФТ. Предварительно осуществлялась нормировка структурных функций на их значение при сдвиге $r_j = 1$ м: $D_{T_n}(r_j) = D_T(r_j)/D_T(r = 1)$. Поскольку вычисления СФТ проводятся по выборкам с дискретным аргументом, то фактически нормировка осуществляется на значение СФТ при сдвиге r_j , наиболее близком к 1 м. Напомним, что при вычислении СФТ использовались «вариационные» значения температуры воздуха $T_p(t_k)$.

В итоге анализу подвергались эмпирические функции $y = \lg D_{Tn}(\lg r)$, которые проверялись на близость в инерционном интервале к трем типам формы:

1-й тип

$$\lg D_{Tn}(r_{\min} \leq r \leq r_{\max}) \Leftrightarrow y = b + \mu x, \quad (3)$$

2-й тип

$$\lg D_{Tn}(r_{\min} \leq r \leq r_{\max}) \Leftrightarrow y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2, \quad (4)$$

3-й тип

$$\begin{cases} \lg D_{Tn}(r_{\min} \leq r \leq r_p) \Leftrightarrow y = d_0 + d_1 x + d_2 x^2, \\ \lg D_{Tn}(r_p \leq r_1 < r \leq r_{\max}) \Leftrightarrow y = c + \gamma x. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $x = \lg r$; r_{\min} – минимально возможный сдвиг СФТ при скорости ветра V_b ; r_{\max} – максимальный сдвиг, до которого распространяется успешная аппроксимация СФТ; величины $b, c, \mu, \gamma, a_j, d_j$ – числовые параметры, получаемые в ходе аппроксимации. Первый тип СФТ в логарифмических координатах параметризуется линейной функцией, а второй тип – параболической (см. рис. 1, а). Третий тип СФТ является комбинацией второго и первого типов (см. рис. 1, б). Сдвиг r_p соответствует точке завершения «параболического» участка СФТ 3-го типа, а сдвиг r_1 – началу «линейного». Между точками r_p и r_1 может существовать переходная зона, имеющая размер $\Delta b = r_1 - r_p$.

Соотношения (3)–(5) удобны с точки зрения обработки экспериментальных данных. Но для использования в каких-либо приложениях более подходящим является «линейное» представление структурной функции температуры воздуха, например, в виде

$$D_T(r) = D_i(r) = A_i r^{\alpha_i} F_i(r), \quad (6)$$

где индекс i ($= 1, 2, 3$) обозначает тип СФТ, а входящая в данное соотношение константа A_i , показатель степени α_i и вид функции $F_i(r)$ определяются числовыми параметрами, входящими в правые части соотношений (3)–(5):

1-й тип

$$\alpha_1 = \mu; \quad A_1 = D(1) \cdot 10^b; \quad F_1(r) = 1; \quad r_{\min} \leq r \leq r_{\max}, \quad (7)$$

2-й тип

$$\alpha_2 = a_1; \quad A_2 = D(1) \cdot 10^{a_0}; \quad F_2(r) = 10^{a_2 (\lg r)^2}; \quad r_{\min} \leq r \leq r_{\max}, \quad (8)$$

3-й тип

$$\begin{cases} \alpha_{3p} = d_1; \quad A_{3p} = D(1) \cdot 10^{d_0}; \quad F_{3p}(r) = 10^{d_2 (\lg r)^2}; \\ r_{\min} \leq r \leq r_p, \\ \alpha_{3l} = \gamma; \quad A_{3l} = D(1) \Delta D \cdot 10^c; \quad F_{3l}(r) = 1; \\ r_p < r_1 \leq r \leq r_{\max}, \end{cases} \quad (9)$$

где $D(1)$ – значение эмпирической структурной функции температуры воздуха при сдвиге $r = 1$ м,

а $\Delta D = D_T(r = r_1)/D_T(r = 1)$ – отношение значений эмпирической СФТ при сдвигах r_1 и 1 м. Индексы $3p$ и $3l$ обозначают «параболический» и «линейный» участки структурной функции.

Отметим, что используемое для «линейного» участка СФТ третьего типа представление $A_{3l} = D(1) \Delta D \cdot 10^c$ носит условный характер, поскольку этот участок определен только в диапазоне $1 < r_1 \leq r \leq r_{\max}$. Тем не менее такое представление допустимо, поскольку константа A_{3l} будет сохранять свое значение во всем диапазоне изменений переменной r ($r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$).

Если для констант A_i ввести единое обозначение C_T^2 , отвечающее при «классическом» определении СФТ структурной характеристике (структурной постоянной) локально однородного и изотропного температурного поля, то соотношение (6) примет привычный вид

$$D_T(r) = C_T^2 r^\alpha F(r), \quad (10)$$

где C_T^2 , α и $F(r)$ определяются для каждого типа СФТ согласно соотношениям (7)–(9). Отметим, что в монографии [16, гл. 5] приведено представление СФТ в виде (10) при $\alpha = 2/3$ и с иным представлением функции $F(r)$ (характеризующим фактически второй тип СФТ).

Для вычисления структурных функций температуры воздуха и их анализа было подготовлено специализированное программное обеспечение. Не вдаваясь в детали, укажем лишь его основные функционалы: удаление «детерминированных» изменений температуры воздуха на основе скользящего среднего с временным окном Δt , вычисление структурных функций $D_T(r_j)$ по интервалам времени Δt , проверка близости дискретной функции $y(x_j) = \lg D_{Tn}(\lg r_j)$ к аппроксимирующим функциям (3)–(5), определение параметров аппроксимирующих функций.

Основная цель анализа заключалась в проверке принадлежности эмпирических СФТ к перечисленным выше типам. Качество аппроксимации оценивалось с помощью коэффициента детерминации k_d [17]. К «пороговым» значениям $k_d = k_{dL}$ были предъявлены достаточно жесткие (эмпирически определенные) требования, надежно обеспечивающие достоверность успешной аппроксимации. Пример аппроксимации эмпирических структурных функций, относящихся к первому типу, приведен на рис. 3.

Крупными символами отмечены границы r_{\max} , до которых проведена успешная аппроксимация при $k_{dL} = 0,99945$ (самый жесткий из использованных «порогов»). Следует отметить, что если снизить требования к качеству аппроксимации, т.е. уменьшить «пороговое» значение k_{dL} , то количество эмпирических структурных функций, успешно параметризуемых соотношением (3), увеличится. При этом могут несколько измениться параметры аппроксимации. Например, при уменьшении значения k_{dL} до величины 0,99850 граница r_{\max} для нижнего графика на рис. 3 увеличится с 7 до 22 м, а значение μ уменьшится с 0,456 до 0,440.

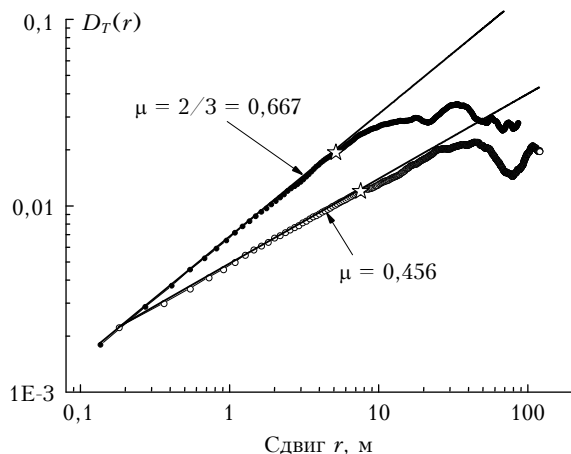


Рис. 3. Примеры структурных функций, относящихся к 1-му типу. Мелкие символы – экспериментальные данные. Линии – аппроксимирующие функции. Крупными символами обозначены границы успешной «подгонки» при заданном значении k_{dL} . Измерения проведены на высоте 5 м над естественным ландшафтом (поле с невысокой травой)

Примеры аппроксимации структурных функций температуры воздуха второго и третьего типов с пороговым значением $k_{dL} = 0,99945$ приведены на рис. 1.

Результаты анализа

Подробный анализ параметров аппроксимирующих функций будет представлен во второй части статьи. Здесь же приведем лишь некоторые результаты, характеризующие общие статистические выводы относительно повторяемости тех или иных типов СФТ.

Объем экспериментального материала, подвергнутого обработке, составил примерно 17 098 ч (суммарно по всем пунктам наблюдений). Структурные функции вычислялись по интервалам времени $\Delta t = 10$ мин. В процессе удаления «детерминированной» составляющей использовалось скользящее среднее при $\Delta t = 1$ мин. Анализ структурных функций проводился в диапазоне сдвигов $r_{\min} \leq r \leq 10$ м. Структурные функции причислялись к одному из трех рассматривавшихся типов только в случае $r_{\max} \geq 1$ м. Конкретные требования, применявшиеся при анализе СФТ, будут изложены во второй части статьи.

В результате проведенного анализа установлено, что в целом от 50 до 90% времени наблюдений (в зависимости от места и высоты размещения измерителя, от сезона года) СФТ воздуха принадлежали к одному из трех рассматриваемых типов. При этом СФТ соответствовала «классическому» типу (6), (7) в небольшом числе случаев. Более того, даже если имел место первый тип СФТ, «классическая» степень $\mu = 2/3$ отнюдь не доминировала в совокупности значений μ .

На рис. 4 показаны статистические данные по количеству обработанных в отдельные месяцы 2011–2012 гг. 10-минутных интервалов времени (правая шкала, звездочки на графике), по общей доле времени с успешной параметризацией и по доле отдельных типов структурных функций (суммарно за

этот период обработано примерно 10 723 ч наблюдений).

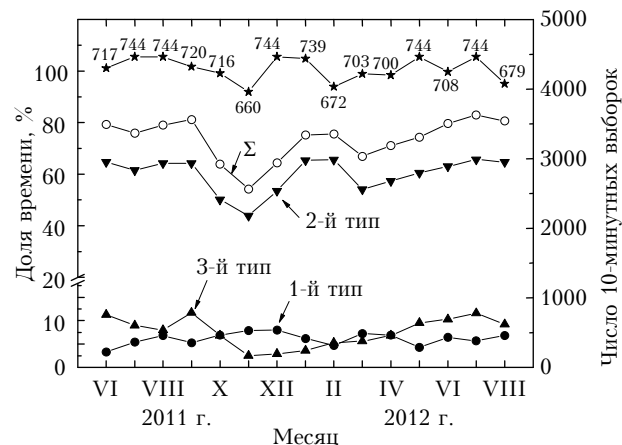


Рис. 4. Статистические данные обработанных наблюдений. Левая шкала ординат соответствует доле времени, когда имел место тот или иной тип СФТ, а также суммарно все типы СФТ (отмечено знаком Σ). Правая шкала ординат соответствует числу 10-минутных выборок (звездочки), по которым вычислялись структурные функции температуры воздуха. Над звездочками указана суммарная длительность (часы округленно) измерений в соответствующие месяцы 2011–2012 гг.

Измерения проводились над урбанизированной территорией (г. Томск, плоская крыша лабораторного корпуса ИОА СО РАН) на высоте 17 м над уровнем подстилающей поверхности (5 м над уровнем крыши). При обработке использовался порог «подгонки» $k_{dL} = 0,99850$, а также при выделении СФТ третьего типа требовалось выполнение условий $\Delta_b / (r_{\max} - r_{\min}) \leq 0,25$, $r_p - r_{\min} \leq r_{\max} - r_l$ и $\Delta_b / (r_p - r_{\min}) < 0,5$.

Согласно рис. 4 в 3–8% времени наблюдений структурные функции температуры воздуха соответствовали первому типу, в 45–65% – второму и в 3–12% времени – третьему типу. Например, в сентябре 2011 г. из 720 ч наблюдений (4 320 выборок по 10 мин каждая) структурные функции температуры воздуха в 81,2% времени параметризовались функцией (6), в том числе первым типом – 5,3%, вторым – 64,2%, третьим – 11,7% времени.

Близкие результаты были получены и для других мест наблюдений. Например, для условий с естественным ландшафтом (большая поляна, теплый период года, высота измерений 10 м, общая длительность наблюдений около 900 ч, условие $k_{dL} = 0,99850$) структурные функции температуры воздуха параметризовались функциями (3)–(5) примерно в 89% времени наблюдений. При этом первый тип СФТ наблюдался в 19, второй – в 57, а третий – в 13% времени.

Изложенные выше результаты были получены по интервалам обработки $\Delta t = 10$ мин. Увеличение длительности данного интервала до 20 мин приводит к некоторому изменению статистики. В частности, для условий с естественным ландшафтом (большая поляна, теплый период года, высота измерений 10 м) на 8–10% уменьшается повторяемость СФТ второго

и третьего типов при сохранении повторяемости первого типа. Физические причины данного эффекта нами пока не анализировались.

Закключение

Сформулируем основные выводы, следующие из представленных в статье результатов. Прежде всего, отметим, что в приземном слое атмосферы над существенно неоднородной подстилающей поверхностью структурные функции температуры воздуха могут быть параметризованы достаточно простыми аналитическими функциями (в диапазоне сдвигов, относящихся к инерционной области турбулентности). Выделено три характерных типа структурных функций, один из которых соответствует классическому степенному закону $D_T(r) = C_T^2 r^\mu$, а два других имеют более сложную зависимость $D_T(r) = C_T^2 r^\alpha F(r)$ и различаются видом функции $F(r)$. По результатам обработки экспериментальных данных, полученных в различных пунктах наблюдений, установлено, что от 50 до 90% времени наблюдений (в зависимости от места и высоты размещения измерителя, от сезона года) структурные функции температуры воздуха принадлежали к одному из трех выделенных типов. При этом повторяемость степенного закона « r^μ » существенно меньше суммарной повторяемости двух других типов структурных функций.

Экспериментальные данные, по которым проводился анализ структурных функций температуры воздуха, были получены с помощью ультразвуковых измерителей различных типов. Для верификации полученных результатов следует привлечь данные иных приборов, позволяющих измерять температуру воздуха с высокой точностью, даже если периодичность измерений будет не столь высокой, как у ультразвуковых анемометров-термометров.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта № 4.5 Президиума РАН, Программы ОФН РАН № 3.10 «Фундаментальные основы акустической диагностики искусственных и природных сред» (проект № 3.10.1), Минобрнауки (соглашение № 8325).

1. Воронцов М.А., Дудоров В.В., Зырянова М.О., Колосов В.В., Филимонов Г.А. Частота появлений ошибочных битов в системах беспроводной оптической связи с частично когерентным передающим пучком // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 936–940.
2. Большасова Л.А., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов В.В., Торгаев А.В. Особенности дрожания изображения оптического источника в случайной среде с конечным внеш-

- ним масштабом // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 845–851.
3. Shapland T.M., McElron A.J., Snyder R.L., Paw U.K.T. Structure function analysis of two-scale scalar ramps. Part I: Theory and modelling // Boundary-Layer Meteorol. 2012. V. 145, N 1. P. 5–25.
 4. Shapland T.M., McElron A.J., Snyder R.L., Paw U.K.T. Structure function analysis of two-scale scalar ramps. Part II: Ramp characteristics and surface renewal flux estimation // Boundary-Layer Meteorol. 2012. V. 145, N 1. P. 27–44.
 5. Krusche N., De Oliveira A.P. Characterization of coherent structures in the atmospheric surface layer // Boundary-Layer Meteorol. 2004. V. 110, N 2. P. 191–211.
 6. Zhu Y., Antonia R.A., Hosokawa I. Refined similarity hypotheses for turbulent velocity and temperature fields // Phys. Fluids. 1995. V. 7, N 7. P. 1637–1648.
 7. Гладких В.А., Одинцов С.Л. Анализ структурных функций температуры и скорости ветра в приземном слое атмосферы // Сб. трудов XVIII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2006. Т. 2. С. 139–143.
 8. Богушевич А.Я. Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 170–174.
 9. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7(109). С. 21–25.
 10. Тихомиров А.А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерений пульсирующей скорости и температуры воздушных потоков. Обзор // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 585–600.
 11. Braam M., Bosveld F.C., Moene A.F. On Monin–Obukhov Scaling in and Above the Atmospheric Surface Layer: The Complexities of Elevated Scintillometer Measurements // Boundary-Layer Meteorol. 2012. V. 144, N 2. P. 157–177.
 12. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Часть 2. Механика турбулентности. М.: Наука, 1967. 720 с.
 13. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
 14. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.И., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-3 // Метеорол. и гидрол. 2006. № 11. С. 89–97.
 15. Antonia R.A., Zhu Y., Anselment F., Ould-Rous M. Comparison between the sum of second-order structure functions and the second-order temperature structure function // Phys. Fluids. 1996. V. 8, N 11. P. 3105–3111.
 16. Банах В.А., Белов В.В., Землянов А.А., Креков Г.М., Лукин В.П., Матвиенко Г.Г., Носов В.В., Суханов А.Я., Фалиц А.В. Распространение оптических волн в неоднородных, случайных, нелинейных средах. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 402 с.
 17. Колмаев 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. Structural functions of air temperature over inhomogeneous surface. Part I. Typical forms of structural functions.

The paper analyzes structural functions of air temperature in the ground surface layer over an inhomogeneous surface. Three main types of structural functions are separated based on processing of experimental data. Parameterization models for these three types of structural functions are proposed in the shift range corresponding to the inertial range of turbulence. The frequency of occurrence of the separated types of structural functions in different seasons at the observation site over an urbanized territory is estimated.