

УДК 551.551

Структурные функции температуры воздуха над неоднородной подстилающей поверхностью. Часть II. Статистика параметров 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.

Приводится статистика параметров, входящих в аналитические представления структурных функций температуры воздуха в приземном слое атмосферы над неоднородной подстилающей поверхностью. Основное внимание уделено анализу гистограмм этих параметров. Отмечается достаточно высокая степень изменчивости параметров, связанная, в том числе, с местом проводившихся наблюдений и высотой размещения измерительного прибора. Рассмотрена связь параметров структурных функций со среднеквадратическими отклонениями скорости ветра и температуры воздуха.

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

Введение

Экспериментальные исследования ветровой и температурной турбулентности в приземном слое атмосферы имеют в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН давнюю историю. Интерес к этой проблеме обусловлен существенным влиянием турбулентности на распространение оптического излучения. Для изучения микроструктуры турбулентности были разработаны и успешно применены многопозиционные ультразвуковые измерители компонентов вектора ветра и температуры воздуха [1–4]. В основном измерения проводились в теплое время года над ровной открытой поверхностью на высотах от 2 до 30 м. Согласно опубликованным результатам (см., например, [4]) форма частотных (временных) спектров температуры воздуха могла заметно отклоняться от закона « $f^{-5/3}$ », соответствующего степенному закону « $r^{2/3}$ » в пространственной области (при параметризации структурных функций температуры в инерционном интервале турбулентности).

Значительный объем экспериментального материала по микроструктуре турбулентности в приземном слое атмосферы горной местности был получен и проанализирован в работах [5–8]. Согласно представленным в них результатам точное соблюдение закономерностей « $f^{-5/3} \leftrightarrow r^{2/3}$ » для температуры воздуха является скорее исключением, чем правилом.

Указанные выше работы подтверждают необходимость дальнейшего изучения микроструктуры тур-

булентности температурного поля в приземном слое атмосферы. Основная цель проведенных нами исследований заключалась в решении следующих задач:

- 1) систематизация форм структурных функций температуры воздуха в различных условиях (разные типы подстилающей поверхности, различные сезоны года);
- 2) аппроксимация (параметризация) выделенных типов эмпирических структурных функций аналитическими выражениями;
- 3) систематизация параметров аппроксимирующих функций.

Результаты решения первых двух задач изложены в первой части нашей статьи [9]. Во второй части представлены результаты решения третьей задачи, в основном в виде гистограмм эмпирических распределений параметров аппроксимирующих функций. Данные результаты частично опубликованы в [10].

Оборудование и описание мест проведения измерений

В качестве измерителя температуры воздуха использовались ультразвуковые анемометры-термометры (ультразвуковые метеостанции – УЗМ) типа «Метео-2», имеющие сертификат РФ об утверждении типа средств измерений. Применявшиеся для измерений экземпляры УЗМ «Метео-2» [11] 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

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

в архив на жесткий диск управляющего компьютера. Для обработки архивных данных использовалось специализированное программное обеспечение.

Для расчета структурных функций температуры (СФТ) воздуха были выбраны результаты измерений в четырех наблюдательных пунктах. Первый пункт наблюдения – урбанизированная территория (г. Томск, Академгородок), крыша лабораторного корпуса ИОА СО РАН (5 м над уровнем плоской крыши, 17 м над уровнем подстилающей поверхности). Измерения проводились в круглосуточном режиме во все сезоны года. Со структурой окружающих данный пункт наблюдения элементов застройки и растительности можно ознакомиться в статье [12].

Общее количество времени обработанных наблюдений в этом пункте составило 11 844 ч. Мачта с УЗМ «Метео-2» представлена на рис. 1, *а*.

Второй пункт наблюдений располагался в сельской местности (обсерватория ИОА СО РАН «Фоновая») на ровной поляне, окруженной лесом с трех сторон и р. Обь с четвертой. Ближайшее расстояние от мачты с размещенной на ней УЗМ «Метео-2» (рис. 1, *б*) до леса и до реки составляло примерно 100 м. На поляне имелись одноэтажные строения с наименьшим расстоянием до мачты около 30 м. Измерения проводились в круглосуточном режиме в теплое время года на высотах 5 или 10 м. Суммарная длительность наблюдений составила 3 074 ч.

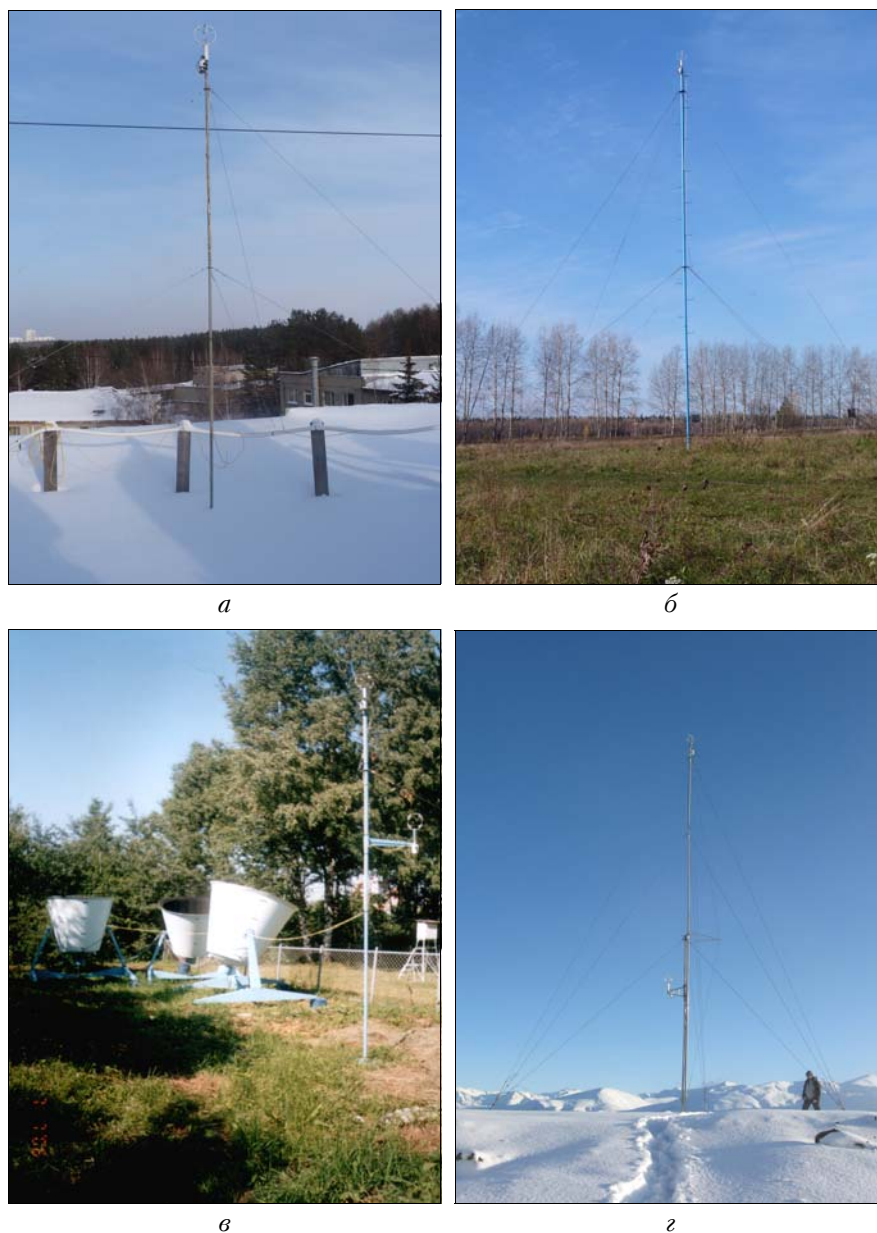


Рис. 1. Места размещения ультразвуковых метеостанций: *а* – г. Томск, крыша лабораторного корпуса ИОА СО РАН, 11 844 ч наблюдений; *б* – сельская местность (обсерватория ИОА СО РАН «Фоновая»), открытая поляна, 3 074 ч наблюдений; *в* – г. Москва, поляна, окруженная лесопосадками, 1 859 ч наблюдений; *г* – вершина горы высотой около 2 100 м, 321 ч наблюдений

Для анализа СФТ были использованы также результаты измерений на небольшой поляне в лесопарковой зоне на берегу Химкинского водохранилища (метеостанция «Северное Тушино», г. Москва), полученные в 2008 г. на высоте 5 м. Мачта в данном пункте представлена на рис. 1, в. Общее время обработанных наблюдений составило 1 859 ч.

Четвертый пункт наблюдений находился в горной местности (Кавказ, рис. 1, з). Обработывались результаты измерений на высоте 10 м (321 ч) в апреле–мае 2012 г.

Общее время наблюдений, послуживших для анализа структурных функций температуры воздуха во всех перечисленных пунктах, составило 17 098 ч.

Сводка формул и их графические примеры

Для более удобного представления полученных результатов по статистике параметров структурных функций воспроизведем некоторый материал из первой части нашей статьи [9]. Как было определено в [9], значительное количество эмпирических структурных функций температуры воздуха в «инерционном» интервале сдвигов r (м) подчиняется одному из трех возможных типов, которые можно представить в обобщенной форме:

$$D_T(r) = C_T^2 r^\alpha F(r), \quad (1)$$

где C_T^2 , α и $F(r)$ определяются для каждого из трех типов СФТ соотношениями:

1-й тип

$$\alpha = \mu, \quad C_T^2 = D(1) \cdot 10^b, \quad F(r) = 1, \quad r_{\min} \leq r \leq r_{\max}; \quad (2)$$

2-й тип

$$\alpha = a_1, \quad C_T^2 = D(1) \cdot 10^{a_0}, \quad F(r) = 10^{a_2(\lg r)^2}, \quad r_{\min} \leq r \leq r_{\max}; \quad (3)$$

3-й тип

$$\begin{cases} \alpha = d_1, \quad C_T^2 = D(1) \cdot 10^{d_0}, \quad F(r) = 10^{d_2(\lg r)^2}, \\ r_{\min} \leq r \leq r_p; \\ \alpha = \gamma, \quad C_T^2 = D(1) \Delta D \cdot 10^c, \quad F(r) = 1, \\ r_p < r_l \leq r \leq r_{\max}, \end{cases} \quad (4)$$

где $\Delta D = D_T(r_l)/D_T(1)$, а $D(1)$ и $D_T(r_l)$ – значения эмпирической СФТ при сдвигах $r = 1$ м и $r = r_l$ м соответственно, величины b , c , μ , γ , a_j , d_j – числовые параметры, получаемые в ходе аппроксимации. Соотношения (1)–(4) после нормировки и в логарифмической форме имеют вид:

1-й тип

$$\lg D_{Tn}(r) = b + \mu x, \quad r_{\min} \leq r \leq r_{\max}; \quad (5)$$

2-й тип

$$\lg D_{Tn}(r) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2, \quad r_{\min} \leq r \leq r_{\max}; \quad (6)$$

3-й тип

$$\begin{cases} \lg D_{Tn}(r) = d_0 + d_1 x + d_2 x^2, \quad r_{\min} \leq r \leq r_p; \\ \lg D_{Tn}(r) = c + \gamma x, \quad r_p < r_l \leq r \leq r_{\max}. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь $D_{Tn}(r) = D_T(r)/D_T(r = 1)$; $x = \lg r$; r_{\min} – минимально возможный сдвиг СФТ при средней скорости ветра V_h на интервале обработки (см. [9]); r_{\max} – максимальный сдвиг, до которого распространяется успешная аппроксимация СФТ. Первый тип СФТ в логарифмических координатах параметризуется линейной функцией (с параметрами b и μ), а второй тип – параболической (с параметрами a_0 , a_1 и a_2). Третий тип СФТ является комбинацией второго (с параметрами d_0 , d_1 и d_2) и первого (с параметрами c и γ) типов. Сдвиг r_p соответствует точке завершения «параболического» участка СФТ третьего типа, а сдвиг r_l – началу линейного. Входящие в правые части соотношений (2)–(4) и (5)–(7) параметры, включая величины сдвигов r_{\max} , r_p и r_l , определяются в ходе проверки принадлежности эмпирических СФТ к одному из указанных типов.

Приведем графические примеры выделенных типов структурных функций. На рис. 2 в логарифмическом масштабе мелкими символами показана нормированная эмпирическая СФТ, соответствующая первому типу, а линиями – аппроксимации этой функции соотношением (5) с различным качеством.

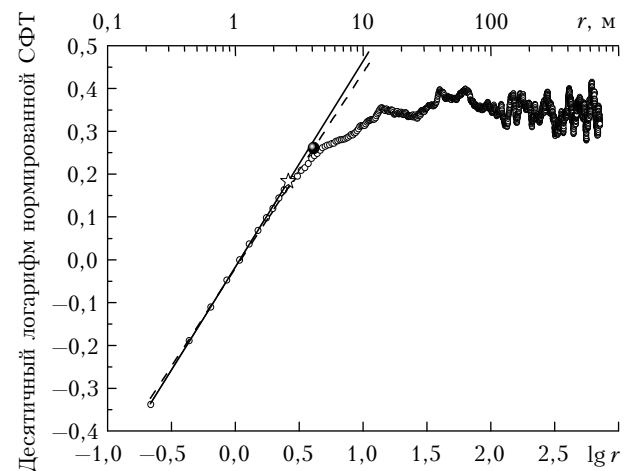


Рис. 2. Нормированная эмпирическая СФТ в логарифмическом масштабе (мелкие символы). Верхняя шкала – линейный масштаб сдвигов. Наклонные линии соответствуют аппроксимирующим функциям при $k_{dL} = 0,99945$ (сплошная линия) и $0,99600$ (штриховая). Границы применимости этих аппроксимаций приведены в виде крупных символов на соответствующих линиях

Качество аппроксимации определялось сравнением вычисляемого коэффициента детерминации k_d [13] с предварительно заданным уровнем k_{dL} . Выполнение условия $k_d \geq k_{dL}$ свидетельствовало об успешности аппроксимации на участке от минимального сдвига r_{\min} до тестируемого сдвига r . Поэтапное увеличение r в процессе аппроксимации и сопоставление на каждом этапе вычисляемых k_d с заданным

уровнем k_{dL} обеспечивали оценку максимального сдвига r_{\max} , до которого распространяется аппроксимация с требуемым качеством. Если в процессе аппроксимации было установлено, что $r_{\max} \leq 1$ м при заданном k_{dL} , то полагалась, что данная СФТ не принадлежит к тестируемому типу.

Изложенная процедура применялась для проверки принадлежности эмпирических СФТ ко всем рассматриваемым типам (с некоторыми особенностями для третьего типа). На рис. 2 сплошная линия соответствует аппроксимации СФТ соотношением (5) с уровнем $k_{dL} = 0,99945$. Указанный на этой линии символ – звездочка – отвечает сдвигу $r_{\max} \approx 2,6$ м, до которого проведена аппроксимация с заданным качеством. Штриховая линия соответствует аппроксимации с уровнем $k_{dL} = 0,99600$. Символ на этой линии – большая точка – отвечает сдвигу $r_{\max} \approx 4,1$ м. Согласно графикам аппроксимирующие функции несколько различаются наклонами [параметром μ аппроксимации (5)] и граничными значениями r_{\max} . При этом сплошная линия практически точно проходит через все экспериментальные точки (на участке $r_{\min} \leq r \leq r_{\max} = 2,6$ м). Штриховая линия хотя и достаточно близка на участке $r_{\min} \leq r \leq r_{\max} = 4,1$ м к графику эмпирической СФТ, но все же качество этой «подгонки» мы считаем неудовлетворительным.

Примеры структурной функции второго типа, определяемой в логарифмических координатах соотношением (6), а в «линейных» – соотношением (3), приведены на рис. 3.

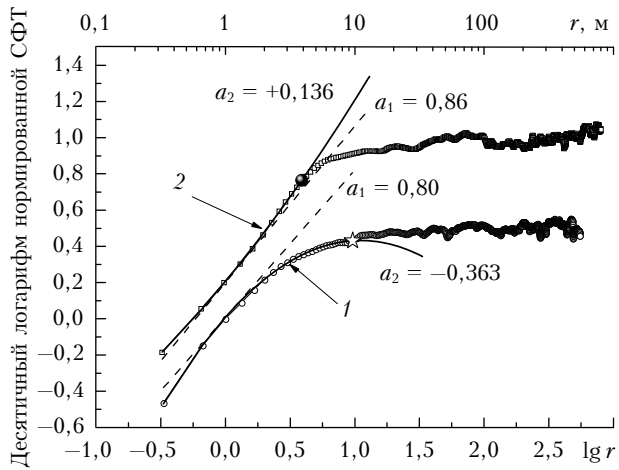


Рис. 3. Нормированные эмпирические СФТ в логарифмическом масштабе (мелкие символы). Группа графиков с пометкой «2» принудительно смещена вверх по шкале ординат (на 0,2 единицы) для большей наглядности. Верхняя шкала – линейный масштаб сдвигов. Сплошные линии – результат аппроксимации вторым типом СФТ. Крупные символы – границы применимости аппроксимации. Штриховые линии – касательные к аппроксимирующим функциям в точке $\lg r = 0$ (сдвиг $r = 1$ м)

Здесь представлены две разновидности СФТ второго типа, отличающиеся знаками коэффициентов a_2 в аппроксимирующих функциях. Первая разновидность («прямая парабола»), помеченная цифрой 1, встречается в подавляющем большинстве слу-

чаев СФТ второго типа и имеет отрицательное значение коэффициента a_2 . Вторая разновидность («обратная парабола»), помеченная цифрой 2, характеризуется положительным значением коэффициента a_2 . Частота появления «обратной параболы» не превышает 1,5% от всей рассмотренной совокупности СФТ второго типа, причем чем выше расположен измеритель, тем чаще она встречается. Указанные значения коэффициентов a_1 и a_2 аппроксимирующих функций вычислены с применением условия $k_{dL} = 0,99945$.

Пример структурной функции температуры воздуха третьего типа, определяемой соотношениями (4) или (7), приведен на рис. 4 сплошной линией.

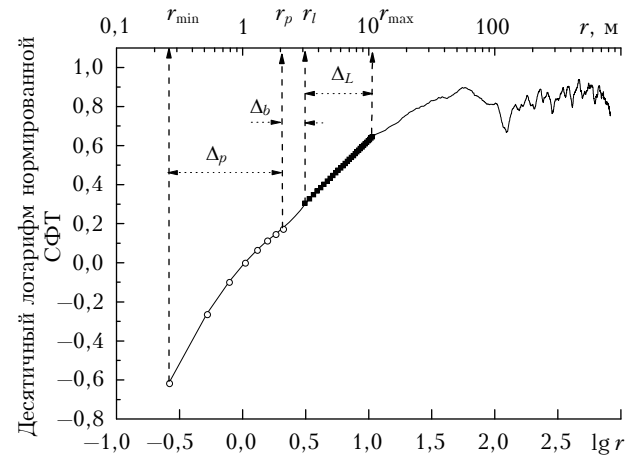


Рис. 4. Нормированная эмпирическая СФТ в логарифмическом масштабе (сплошная линия). Символы – результаты аппроксимации третьим типом СФТ. Стрелками указаны границы успешных аппроксимаций

Символами отмечены участки успешной аппроксимации «параболической» и «линейной» частей эмпирической СФТ. Между ними имеется переходная зона. Введем обозначения для «длин» этих участков: $\Delta_p = r_p - r_{\min}$ – «параболический», $\Delta_b = r_l - r_p$ – «переходный», $\Delta_L = r_{\max} - r_l$ – «линейный», а также обозначение для размера суммарной длины зон с успешной параметризацией $S_A = \Delta_p + \Delta_L$. В процессе обработки экспериментальных данных мы полагали, что эмпирическая СФТ относится к третьему типу, если одновременно выполнялись условия $\Delta_b/S_A \leq 0,25$, $\Delta_b/\Delta_p \leq 0,5$, $\Delta_p/\Delta_L \leq 1$ (выполнение двух последних условий автоматически приводит и к выполнению первого). В противном случае эмпирическая СФТ полагалась принадлежащей ко второму типу СФТ с максимальным сдвигом $r_{\max} = r_p$ (естественно, при выполнении условия $r_{\max} \geq 1$ м). Отметим, что среди выделенных случаев СФТ третьего типа «обратные параболы» на начальном участке также имели место. В приведенном примере аппроксимация «параболического» участка проведена с условием $k_{dL} = 0,99945$, а «линейного» – с условием $k_{dL} = 0,99850$.

Во всех последующих вычислениях использовались эмпирически выбранные «уровни качества» $k_{dL} = 0,99850$ для СФТ первого типа, $k_{dL} = 0,99945$ для СФТ второго типа и комбинация этих уровней для СФТ третьего типа. Эти уровни обеспечивают,

с одной стороны, надежную аппроксимацию экспериментальных данных аналитическими функциями, а с другой — не исключают из рассмотрения структурные функции с небольшими «дефектами», обусловленными случайной природой температурного поля в приземном слое над поверхностью со сложной структурой.

Завершая описание выделенных типов структурных функций, еще раз подчеркнем, что они составляют основную часть параметризуемых аналитическими выражениями (1)–(4) эмпирических СФТ. Хотя встречаются и другие «регулярные» формы, например комбинации «линия + переходная зона + линия» или «парабола + переходная зона + парабола» с различными параметрами на выделенных участках. Однако их количество в рассмотренном массиве данных невелико и в анализ типов они не включались.

Статистика параметров структурных функций температуры воздуха

В первой части статьи [9] приведена общая статистика повторяемости рассматриваемых типов структурных функций. Напомним, что по результатам анализа примерно 17 098 ч наблюдений в различных пунктах и в различные сезоны года от 50 до 90% времени эмпирические структурные функции температуры воздуха могли быть аппроксимированы (параметризованы) соотношением (1) в формах (2)–(4).

Рассмотрим более подробно статистику параметров, входящих в параметризирующие функции (2)–(4). При этом не будем рассматривать статистику структурной характеристики температуры C_T^2 . Укажем только, что она меняется на несколько порядков.

Статистика других параметров будет представлена ниже и в основном в виде гистограмм — относительных частот попадания параметра в тот или иной интервал диапазона изменений. Такое представление, на наш взгляд, дает наиболее оптимальный вариант изложения полученных данных, учитывая допустимый объем публикации.

Естественно, что величины параметров должны быть связаны с условиями, при которых проводились измерения, в частности, с местом размещения наблюдательного пункта и текущими метеорологическими условиями. Однако в настоящей статье мы не будем детально исследовать данные связи, ограничиваясь лишь выделением общих тенденций зависимости параметров от среднеквадратических отклонений (СКО) температуры воздуха σ_T и скорости (модуля) ветра σ_V .

Первый тип СФТ

Согласно (1) и (2) данный тип характеризуется только параметром μ , отвечающим за «наклон» линейного участка СФТ в логарифмическом масштабе (см. рис. 2). Гистограмма распределения μ суммар-

но по всем измерениям представлена на рис. 5. Медианное значение μ составляет 0,660, а среднее — 0,711. «Классическое» значение $\mu = 2/3 \approx 0,667$ попадает в диапазон 0,65–0,7. В этом диапазоне параметр μ находился примерно в 11% случаев СФТ первого типа. Имеет место заметная положительная асимметрия распределения параметра μ .

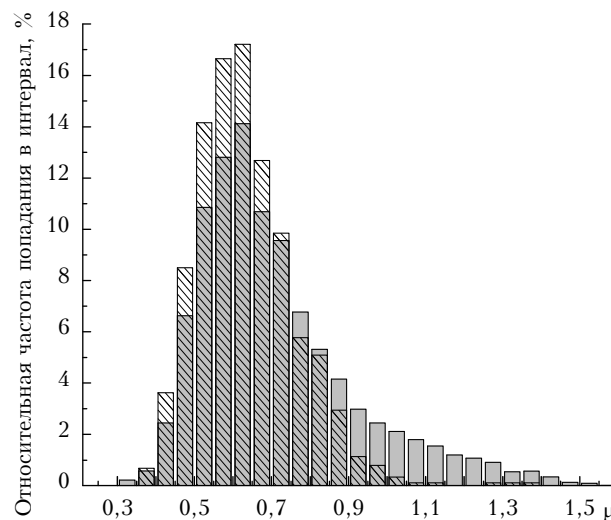


Рис. 5. Гистограммы параметра μ по всему массиву экспериментальных данных (серый фон) и по измерениям на высоте 10 м над ровной поляной в теплое время года (штриховка)

Для сравнения на рис. 5 представлена гистограмма параметра μ , полученного при измерениях только на высоте 10 м над ровной поверхностью в теплое время года (см. рис. 1, б). Очевидно, что данная гистограмма имеет существенно меньшую асимметрию. Медианное значение параметра μ для рассматриваемого случая составляет 0,619, а среднее — 0,634.

Отметим, что с увеличением расстояния от подстилающей поверхности до точки наблюдения повторяемость структурных функций первого типа увеличивается. Обратим также внимание на связь параметра μ с величиной σ_T в форме $\mu \sim \sigma_T^\beta$, причем для разных мест и высот наблюдений показатель степени β в целом достаточно стабилен ($0,33 \leq \beta \leq 0,38$) и в среднем $\beta = 0,35$. Есть связь и с величиной σ_V , показывающая уменьшение параметра μ с увеличением σ_V (в среднем $\mu \sim \sigma_T^{-0,178}$).

Рассмотрим теперь статистику величины r_{\max} — максимального сдвига в структурных функциях первого типа, до которого справедлива исследуемая параметризация. На рис. 6 представлена гистограмма r_{\max} , построенная по всему массиву экспериментальных данных. Напомним, что параметризация СФТ производилась только в диапазоне сдвигов $1 \leq r_{\max} \leq 10$ м. Среднее значение r_{\max} составило 3,1 м, а медианное — 2,6 м. Отметим, что чем выше измеритель температура находится над подстилающей поверхностью, тем больше были средние и медианные значения r_{\max} . Но в целом для каждого из рассмотренных пунктов наблюдений в среднем они не превосходили 3,8 м.

Без иллюстраций отметим также тенденцию уменьшения параметра μ при увеличении r_{\max} .

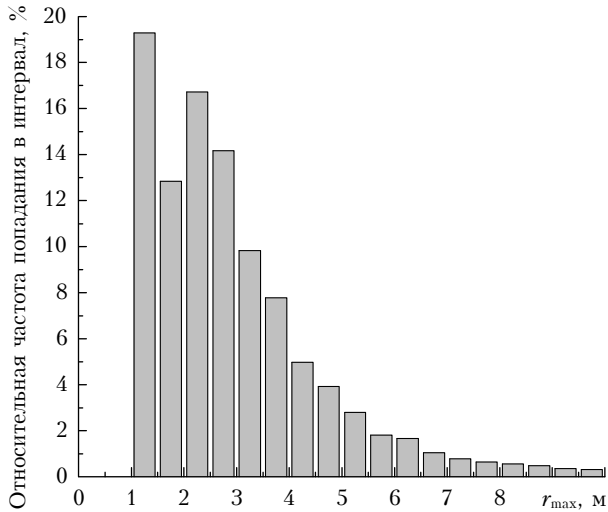


Рис. 6. Гистограмма параметра r_{\max} для структурной функции температуры воздуха первого типа по всему массиву экспериментальных данных

Таким образом, СФТ первого типа на небольших высотах в условиях усложненной структуры подстилающей поверхности встречаются редко. При этом параметр μ в параметризации (1), (2), оцененный по всему объему обработанных экспериментальных данных, близок к «классическому» значению 0,667 только по медианному значению. Чем выше находилась точка измерений, тем чаще имели место СФТ первого типа.

Второй тип СФТ

Данный тип структурной функции температуры воздуха (см. рис. 3) чаще всего имел место в обработанном массиве данных. Параметры a_1 и a_2 в соотношениях (1) и (3) характеризуют, соответственно, «наклон параболы» (наклон касательной к СФТ в логарифмическом виде при сдвиге $r = 1$ м или $\lg r = 0$) и степень «фокусировки параболы» (чем больше a_2 , тем меньше радиус кривизны «параболы»). Отметим, что чем больше фокальный параметр $F_p = 1/(2|a_2|)$, тем меньше структурные функции второго типа в диапазоне $r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$ отличаются от структурных функций первого типа. С практической точки зрения при $F_p > 10$ (или $|a_2| < 0,05$) структурную функцию с некоторой погрешностью уже можно считать принадлежащей к первому типу.

Гистограмма распределения параметра a_1 по совокупности всех измерений приведена на рис. 7. Его среднее значение равно 0,654, а медиана — 0,665. Имеет место заметная отрицательная асимметрия распределения a_1 .

Распределение параметра a_1 для разных мест измерений достаточно однотипное. Его средние и медианные значения также различаются не очень сильно. Для примера на рис. 7 представлено распре-

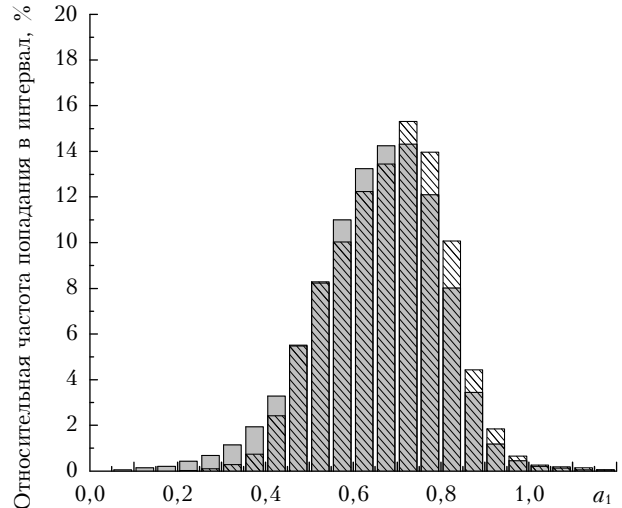


Рис. 7. Гистограммы параметра a_1 по всему массиву экспериментальных данных (серый фон) и по измерениям на высоте 10 м над ровной поляной в теплое время года (штриховка)

ление a_1 , полученное на высоте 10 м над ровной поверхностью в теплое время года (см. рис. 1, б). Среднее значение a_1 для данного места наблюдений равно 0,681, а медиана — 0,689.

Следует отметить, что параметр a_1 по совокупности всех измерений практически не зависит ни от σ_T , ни от σ_V . И только для пунктов измерений, представленных на рис. 1, б, в, просматриваются связи вида $a_1 \sim \sigma_T^{0,2}$ и $a_1 \sim \sigma_V^{-0,1}$.

Рассмотрим теперь статистику параметра a_2 . На рис. 8 представлена его гистограмма для всей совокупности измерений, характеризующаяся слабо выраженной отрицательной асимметрией. Среднее значение параметра a_2 и его медиана равны соответственно $-0,318$ и $-0,311$. Распределение a_2 заметно различается в отдельных пунктах наблюдений.

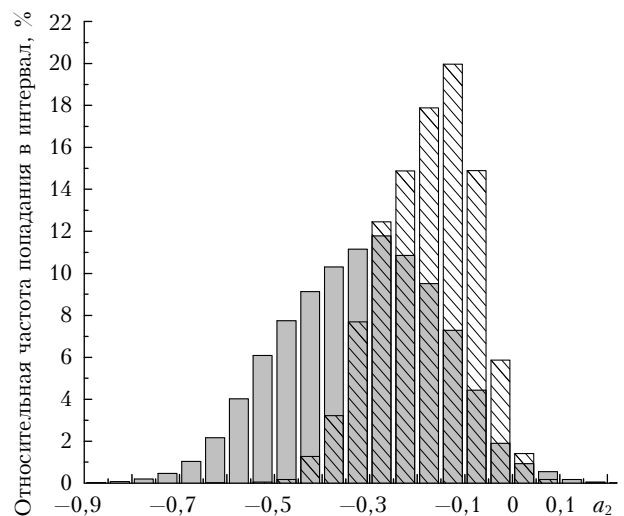


Рис. 8. Гистограммы параметра a_2 по всему массиву экспериментальных данных (серый фон) и по измерениям на высоте 10 м над ровной поляной в теплое время года (штриховка)

На рис. 8 показана гистограмма a_2 (колонки со штриховкой), полученная только по результатам измерений на открытой поляне (см. рис. 1, б). Очевидно, что степень «фокусировки парабол» в данном случае заметно меньше (среднее значение параметра a_2 и его медиана равны соответственно $-0,18$ и $-0,17$), чем совокупно по всем пунктам наблюдений.

Явной связи параметра a_2 с величиной σ_V нет. В то же время во всех пунктах наблюдений имеется связь a_2 со среднеквадратическим отклонением температуры σ_T , приведенная на рис. 9 (ось ординат соответствует величине $\lg|a_2|$). Согласно рис. 9 степень «фокусировки парабол» увеличивается с увеличением σ_T , стремясь к насыщению при больших значениях σ_T . Отметим, что большие значения σ_T соответствуют измерениям в зимнее время в городских условиях (см. рис. 1, а), когда значительное влияние на температурное поле оказывают антропогенные источники тепла.

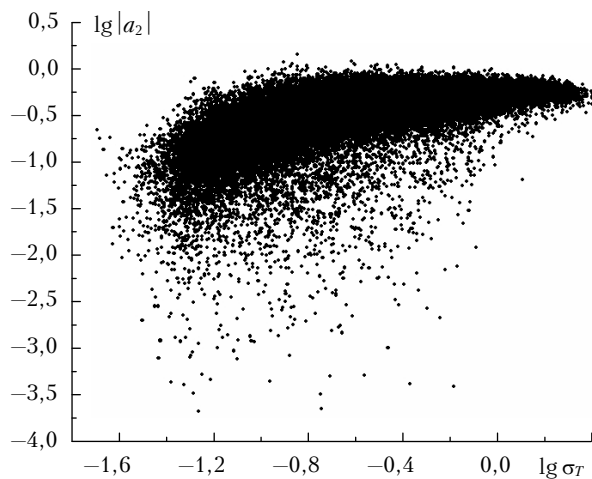


Рис. 9. Зависимость десятичного логарифма абсолютных значений параметра a_2 от десятичного логарифма среднеквадратического отклонения температуры σ_T

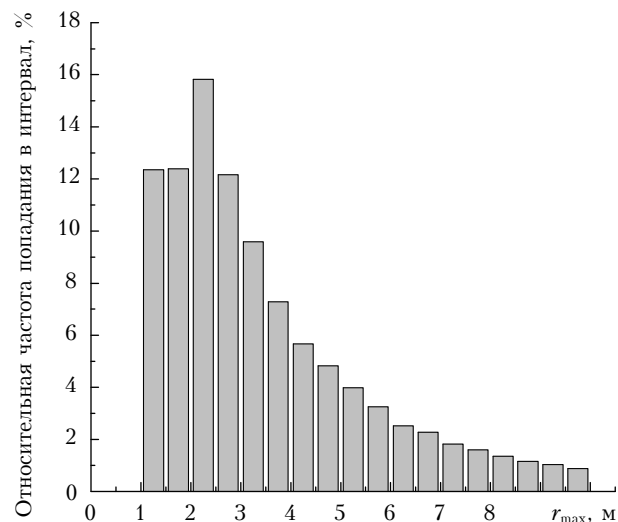


Рис. 10. Гистограмма параметра r_{\max} для структурной функции температуры воздуха второго типа по всему массиву экспериментальных данных

Завершая описание параметров СФТ второго типа, приведем на рис. 10 распределение максимальных сдвигов r_{\max} , до которых распространяется успешная аппроксимация. Среднее значение r_{\max} составило 3,5 м, а медианное — 2,9 м. Отметим, что чем выше измеритель температуры находился над подстилающей поверхностью, тем больше были средние значения r_{\max} . Но в целом для каждого из рассмотренных пунктов наблюдений они не превосходили 4,5 м.

Третий тип СФТ

Повторяемость СФТ третьего типа в целом невелика и сопоставима с повторяемостью СФТ первого типа (от 2–3 до 15–20% времени наблюдений в зависимости от пункта проводившихся измерений и сезона года). Поскольку данный тип СФТ является комбинацией первых двух типов, то в его аналитическом представлении (1) и (4) фигурируют параметры, аналогичные рассмотренным выше. Сразу же отметим, что принципиальных различий в диапазонах изменений и в средних значениях «сопоставимых» параметров ($d_1 \leftrightarrow a_1$, $d_2 \leftrightarrow a_2$, $\gamma \leftrightarrow \mu$) нет. Имеются лишь некоторые особенности, которые будут изложены ниже.

Среднее значение (0,684) и медиана (0,690) параметра d_1 по совокупности всех измерений несколько больше, чем параметра a_1 , что означает в среднем более быстрое возрастание СФТ третьего типа на «параболическом» участке по сравнению с СФТ второго типа. Гистограмма распределения d_1 примерно такая же, как и гистограмма параметра a_1 , полученная для условий, приведенных на рис. 1, б (см. рис. 7, штриховку). Зависимость параметра d_1 от среднеквадратического отклонения температуры (σ_T) и скорости ветра (σ_V) по совокупности всех измерений практически отсутствует. Однако на открытой местности (см. рис. 1, б) связь параметра d_1 с σ_T и σ_V более заметна: $d_1 \sim \sigma_T^{0,2}$ и $d_1 \sim \sigma_V^{-0,1}$.

Для всех измерений среднее значение ($-0,343$) и медиана ($-0,342$) параметра d_2 по абсолютному значению больше, чем у сопоставимого параметра a_2 во втором типе СФТ, что означает в среднем более сильную «фокусировку» СФТ третьего типа на «параболическом» участке по сравнению с СФТ второго типа. Гистограмма параметра d_2 близка по форме к нормальному распределению. Зависимость параметра d_2 от σ_T имеет примерно такой же вид, какой представлен на рис. 9 для параметра a_2 . Однако в отличие от параметра a_2 параметр d_2 по всей совокупности измерений зависит от σ_V в форме $|d_2| \sim \sigma_V^{0,108}$, причем показатель степени в этой зависимости заметно различается для различных мест измерений (от 0,05 до 0,3).

Диапазон сдвигов Δ_p СФТ третьего типа (см. рис. 4), в котором выполняется «параболическая» аппроксимация, при обработке был жестко увязан с диапазонами Δ_b и Δ_L . Поэтому его отдельный анализ не представляется целесообразным. В дальнейшем будет рассмотрен только общий диапазон сдвигов r_{\max} , в котором выполняется параметризация третьего типа (1) и (4).

Среднее значение (0,618) и медиана (0,606) параметра γ в формуле (4) по совокупности всех измерений заметно меньше, чем у параметра μ в СФТ первого типа, что означает в целом более медленное возрастание СФТ третьего типа на «линейном» участке по сравнению с СФТ первого типа. При этом асимметрия в распределении параметра γ невелика. Это отличает его от распределения параметра μ , имеющего значительную положительную асимметрию (см. рис. 5). Связь параметра γ с величиной σ_T по совокупности измерений практически отсутствует. И только на открытой поляне (см. рис. 1, б) наблюдается зависимость $\gamma \sim \sigma_T^{0,18}$, которая показывает более слабую зависимость γ от σ_T по сравнению с аналогичной зависимостью параметра μ (напомним, что в среднем $\mu \sim \sigma_T^{0,35}$). В то же время зависимость параметра γ от σ_V носит отчетливый характер и может быть представлена для всей совокупности измерений в форме $\gamma \sim \sigma_V^{-0,139}$ (показатель степени меняется в разных пунктах наблюдений от $-0,06$ до $-0,2$). Такая зависимость близка к зависимости $\mu \sim \sigma_V^{-0,178}$, характерной для СФТ первого типа.

Поскольку параметры d_1 и γ в СФТ третьего типа определяют «наклон» этой функции соответственно на «параболическом» и «линейном» участках, то возникает вопрос об их возможной взаимосвязи. Такая взаимосвязь имеется. Для примера на рис. 11 символами представлены экспериментальные данные по зависимости $\gamma(d_1)$ для пункта наблюдений на открытой поляне в теплое время года (см. рис. 1, б). Прямая линия – результат линейной аппроксимации: $\gamma = 0,195 + 0,705d_1$. Понятно, что данная аппроксимация весьма условна. Тем не менее она характеризует определенную взаимосвязь γ и d_1 . Для всей совокупности измерений аналогичная аппроксимация имеет вид $\gamma = 0,366 + 0,368d_1$, а «облако» экспериментальных данных занимает более широкую область.

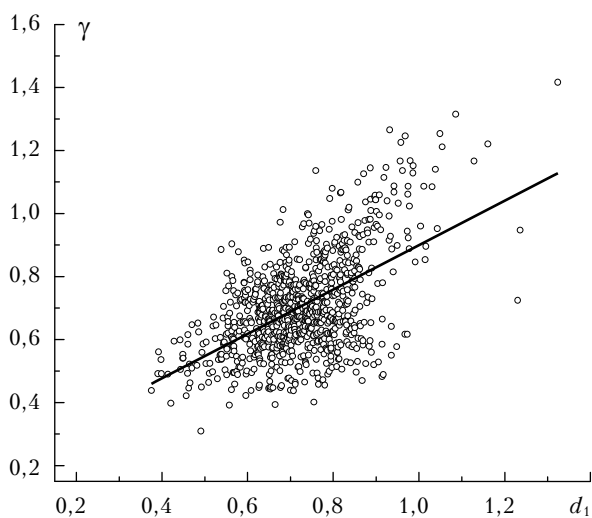


Рис. 11. Взаимосвязь параметров γ и d_1 структурной функции температуры воздуха третьего типа для пункта наблюдений на открытой поляне на высоте 10 м в теплое время года

Завершая описание статистики параметров структурной функции температуры воздуха третьего типа, рассмотрим статистику «размера» r_{\max} области ее успешной аппроксимации. Сразу же отметим, что по совокупности всех измерений как среднее значение (5,6 м) величины r_{\max} , так и ее медиана (5,1 м) заметно превышают аналогичные оценки для двух других типов СФТ. Средние (и медианные) значения величины r_{\max} структурной функции третьего типа заметно различаются в отдельных пунктах наблюдений. Например, на открытой поляне (см. рис. 1, б) среднее значение r_{\max} составляет 6,8 м, а медиана 5,9 м. Отметим также, что по всей совокупности измерений до 10%, а в отдельных пунктах наблюдений и до 15% случаев величина r_{\max} СФТ третьего типа превосходила исследовавшийся нами диапазон $1 \leq r_{\max} \leq 10$ м, достигая 15–17 м, а иногда и 25–30 м. Для других типов СФТ таких случаев практически не было.

В таблице приведены сводные данные по средним и медианным значениям параметров различных типов структурных функций температуры воздуха, полученных по всей совокупности измерений в различных пунктах наблюдений. Для каждого типа СФТ указана также доля времени в процентах (суммарно – 74,2%) от общего времени наблюдений (17 098 ч), когда данный тип имел место.

Тип СФТ и его доля времени в совокупности измерений, %	Параметр	Среднее/медиана
1-й тип СФТ 7,5%	μ	0,711/0,660
	r_{\max}	3,1/2,6
2-й тип СФТ 57,7%	a_1	0,654/0,665
	$-a_2$	-0,318/-0,311
	r_{\max}	3,5/2,9
3-й тип СФТ 9,0%	d_1	0,684/0,690
	d_2	-0,343/-0,342
	γ	0,618/0,606
	r_{\max}	5,6/5,1

Еще раз подчеркнем, что вариации приведенных в таблице параметров как совокупно по всем пунктам наблюдений, так и в каждом отдельно взятом пункте значительны. Обсуждавшиеся выше зависимости этих параметров от СКО температуры воздуха (σ_T) и скорости ветра (σ_V) носят, в целом, приближенный характер и требуют более детального исследования.

Заключение

Сформулируем основные выводы, следующие из представленных результатов. Прежде всего, еще раз отметим, что в приземном слое атмосферы над неоднородной подстилающей поверхностью структурные функции температуры воздуха могут быть параметризованы аналитическими функциями. Выделено три характерных типа структурных функций, один из которых соответствует классическому степенному закону $D_T(r) = C_T^2 r^\alpha$, а два других имеют более сложную зависимость $D_T(r) = C_T^2 r^\alpha F(r)$ и различаются видом функции $F(r)$.

Параметр α , характеризующий «наклон» структурной функции при сдвиге $r = 1$ м, имеет относительно большой диапазон вариаций, но по своему медианному значению достаточно близок к «классическому» значению $2/3 \approx 0,667$ (прежде всего для структурных функций первого и второго типов). Распределение α в целом асимметрично, причем «знак» асимметрии зависит от типа структурной функции.

Пространственные масштабы сдвигов, на которых структурные функции подчиняются тому или иному типу параметризующих функций, в целом составляют единицы метров и не превышают 8–9 м. И только структурные функции третьего типа могут иметь масштабы сдвигов с успешной параметризацией до нескольких десятков метров.

Детальный анализ связей параметров структурных функций с текущими метеорологическими условиями не проводился. Были рассмотрены лишь общие тенденции зависимости параметров от среднеквадратических отклонений скорости ветра и температуры воздуха. Установлено, что с ростом амплитуды пульсаций температуры параметры структурных функций (по абсолютному значению) имеют тенденцию к возрастанию, а с ростом амплитуды пульсаций скорости ветра — к убыванию. Связь максимальных сдвигов структурных функций, до которых распространяется успешная параметризация, с метеорологическими параметрами на данном этапе работ не рассматривалась. В целом исследование связи параметров структурных функций с метеорологическими условиями носит самостоятельный характер и должно выполняться как при учете более широкого круга характеристик турбулентности, так и в совокупности со спектральным анализом температурного поля.

Как и в первой части нашей статьи, подчеркнем, что экспериментальные данные, по которым проводился анализ структурных функций температуры воздуха, были получены с помощью ультразвуковых измерителей различных типов. Для верификации представленных 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.

Основные измерения проводились с использованием технических средств ЦКП ИОА СО РАН «Атмосфера».

Авторы выражают признательность сотрудникам ИОА СО РАН А.П. Ростову, М.Ю. Аршинову и А.М. Морозову, а также ООО «НПО АТТЕХ», предоставившим результаты работы различных типов ультразвуковых анемометров-термометров для проверки выводов, сделанных в нашей статье.

Работа выполнена при 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. *Ростов А.П.* Экспериментальное исследование возможности измерения структурной характеристики температурного поля атмосферы акустической метеостанцией // *Оптика атмосфер. и океана.* 1993. Т. 6, № 1. С. 102–106.
2. *Патрушев Г.Я., Ростов А.П., Иванов А.П.* Автоматизированный ультразвуковой анемометр-термометр для измерения турбулентных характеристик в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 1994. Т. 7, № 11–12. С. 1636–1638.
3. *Ростов А.П.* Ультразвуковой комплекс для исследования пространственно-временных характеристик полей ветра и температуры // *Оптика атмосфер. и океана.* 1999. Т. 12, № 2. С. 154–158.
4. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П.* Пространственно-временная статистика мелкомасштабной турбулентности приземного слоя атмосферы по результатам измерений с помощью массива ультразвуковых датчиков // *Оптика атмосфер. и океана.* 1999. Т. 12, № 8. С. 701–707.
5. *Носов В.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Носов Е.В.* Полуэмпирические гипотезы теории турбулентности в анизотропном пограничном слое // *Оптика атмосфер. и океана.* 2005. Т. 18, № 10. С. 845–862.
6. *Носов В.В., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Торгаев А.В.* Атмосферная когерентная турбулентность // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 9. С. 753–759.
7. *Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 12. С. 1099–1110.
8. *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.
9. *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 атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 11. С. 948–954.
10. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* К вопросу о форме структурных функций температуры воздуха // *Аэрозоли Сибири. XIX Рабочая группа: Тезисы докл.* Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. С. 64.
11. *Гладких В.А., Макиенко А.Э.* Цифровая ультразвуковая метеостанция // *Приборы.* 2009. № 7 (109). С. 21–25.
12. *Мамышева А.А., Одинцов С.Л.* Экспериментальная оценка кинетической энергии турбулентности в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 817–827.
13. *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 II. Statistics of parameters of structural functions.

The paper presents statistics of parameters entering into analytical equations for structural functions of air temperature in the ground surface layer over an inhomogeneous underlying surface. The main attention is paid to analysis of histograms of these parameters. A rather high degree of variability of the parameters is noticed, which is connected, in particular, with the observation site and with the height of installation of the measuring instrument. The relation between parameters of the structural functions and standard deviations of the wind velocity and air temperature is considered briefly.