

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.551.2

Оценка параметров инерционного интервала турбулентного
спектра температуры из временных рядов данных
акустических метеостанций

Д.А. Маракасов[✉], А.Л. Афанасьев, Е.В. Гордеев*

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

Поступила в редакцию 30.05.2023;

после доработки 19.09.2023;

принята к печати 20.09.2023

Основой для оценок характеристик турбулентности с использованием первичных выходных данных акустических метеостанций в настоящее время является классическая модель однородной и изотропной турбулентности Колмогорова–Обухова со степенной структурной функцией с показателем 2/3. Температурные флуктуации в атмосфере не всегда соответствуют этой модели. Для описания неколмогоровской турбулентности представлен подход, основанный на использовании обобщенной степенной модели с показателем степени, структурной характеристикой и внешним масштабом, оцениваемыми непосредственно по измеренным временным рядам мгновенных значений регистрируемых метеопараметров. Предложены критерии применимости рассмотренной модели для оценки характеристик реальной атмосферной турбулентности. Полученные результаты будут полезны для исследований атмосферы на основе первичных выходных данных акустических измерений, содержащих массивы мгновенных значений температуры и трех ортогональных компонент скорости ветра.

Ключевые слова: неколмогоровская турбулентность, энергетический спектр, структурная постоянная, внешний масштаб, акустическая метеостанция; non-Kolmogorov turbulence, energy spectrum, structure constant, outer scale, sonic weather stations.

Введение

В настоящее время для измерения метеорологических и турбулентных параметров атмосферы активно используются акустические метеостанции [1–6]. Полученные данные сохраняются на электронных носителях в виде файлов отчета, в которых наряду с первичными временными рядами пульсаций компонент скорости ветра, температуры, давления и влажности также содержится большое число статистических оценок характеристик воздуха, ветра и турбулентности, рассчитываемых в реальном времени для предварительно заданного срока измерений. В частности, вычисляются односточечные моменты для трех компонент скорости ветра $\mathbf{V} = \{u, v, w\}$ и температуры воздуха, вертикальные турбулентные потоки импульса и тепла, а также масштабы скорости (скорость трения), температуры, Монина–Обухова. Оценивается также структурная постоянная температурных флуктуаций. Алгоритмы расчета, реализованные в программном обеспечении метеостанций, основаны на формуле [2]:

$$C_T^2 = \langle [T'(t + \Delta t) - T'(t)]^2 \rangle (\langle |\mathbf{V}| \rangle \Delta t)^{-2/3}, \quad (1)$$

где $\Delta t = 1/f$, f – частота регистрации метеовеличин; $T'(t)$ – флуктуации температуры; угловыми скобками обозначено усреднение по временному промежутку наблюдения. Для ветровых структурных постоянных формулы аналогичны.

Основой этих соотношений является классическая теория подобия, стандартная модель однородной и изотропной турбулентности Колмогорова–Обухова со степенной структурной функцией с показателем 2/3 [7], а также гипотеза замороженности [8, 9]. Кроме того, при оценке структурной постоянной расчет структурной функции (первый сомножитель в (1)) проводится только при одном (минимальном) значении временного разнеса Δt . При этом с учетом довольно высокой частоты регистрации (десятки Гц) при слабом ветре ($\sim 0,2$ – $0,5$ м/с) соответствующий пространственный разнос может лежать в области очень малых масштабов (несколько миллиметров), принадлежащих интервалу диссипации, где показатель степенной модели отличается от 2/3.

Как показывают многочисленные наблюдения в атмосфере, ситуация, когда реализуются условия однородной и изотропной турбулентности, является достаточно редкой. На практике степенная зависи-

* Дмитрий Анатольевич Маракасов (mda@iao.ru);
Алексей Леонидович Афанасьев (afanasiev@iao.ru);
Евгений Викторович Гордеев (gordeev@iao.ru).

мость структурных функций и энергетических спектров турбулентных микропульсаций отличается от Колмогоровской. Кроме того, при расчетах некоторых турбулентных параметров (например, структурной характеристики показателя преломления) для реальной атмосферной турбулентности классическая степенная модель применима далеко не всегда. В работах [10, 11] показана возможность появления двух степенных участков в спектре турбулентной кинетической энергии (ТКЕ) в устойчиво стратифицированной атмосфере, один из которых (высокочастотный) соответствует классическому каскадному распаду турбулентных вихрей, второй (низкочастотный) — инверсному каскаду формирования крупномасштабных неоднородностей из конвективной турбулентности. Авторы [12, 13] указывают на появление в условиях сложного рельефа турбулентности, связанной с распадом крупных энергонесущих структур, с более крутой зависимостью в спектре ТКЕ и предлагают интерпретировать изотропную развитую турбулентность как совокупность вихревых систем, порождаемых множеством энергонесущих структур разных масштабов.

Часто встречаются и ситуации, когда инерционный интервал со степенной зависимостью структурной функции формируется, но показатель степени заметно отличается от предсказываемого моделью развитой турбулентности. Оцениваемые в таких условиях неколмогоровские структурные постоянные флуктуаций температуры, продольной и поперечной компонент ветра имеют величину и размерность, отличающуюся от стандартной, а использование модели развитой турбулентности для оценки, например, характеристик распространяющегося в атмосфере оптического излучения может привести к значительным ошибкам. Это обуславливает интерес к разработке процедур оценки эквивалентной структурной характеристики [14–16], позволяющих сопоставить интенсивность турбулентных флуктуаций в различных условиях и уровень их влияния на качество работы открытых оптических систем.

В настоящее время накоплены многочисленные массивы данных акустических измерений метеопараметров для различных ветровых и турбулентных условий.

Цель исследования — разработка математических процедур и алгоритмов, позволяющих оценивать соответствие долговременных рядов выборок мгновенных значений метеопараметров степенной модели турбулентности, регистрируемых акустическими метеоконструкциями, и рассчитывать различные статистические характеристики случайных полей температуры при произвольном интервале осреднения.

1. Оценка параметров модели турбулентных флуктуаций температуры

1.1. Степенная модель структурной функции и спектра

Измерение метеопараметров акустическими метеостанциями основано на зависимости скорости распространения ультразвука от скорости, плотности

и влажности воздуха [17–19]. Получаемые оценки усредняются по пространственной области, размер которой определяется габаритами головки метеостанции. Обычно эта величина составляет порядка двух десятков сантиметров [1], что заметно превосходит характерные значения внутреннего масштаба турбулентности (в приземном слое несколько миллиметров). Поэтому при выборе модели турбулентности, с помощью которой мы будем анализировать временные ряды метеопараметров, нет необходимости детально описывать переход от инерционного интервала к вязкому, достаточно определить поведение структурной функции при переходе из инерционного интервала в энергетический.

Будем использовать для описания флуктуаций температуры изотропную степенную модель с внешним масштабом, в рамках которой структурная функция $D_T(\rho) = \langle [\tilde{T}(\mathbf{R} + \rho) - \tilde{T}(\mathbf{R})]^2 \rangle$ нормированной температуры $\tilde{T} = T/(T) - 1$ имеет вид, аналогичный формуле (B.58) в [20]:

$$D_T(\rho) = 2CA(\nu) \frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \kappa_0^{1-\nu} \times \left\{ \Gamma\left(\frac{\nu-1}{2}\right) - 2(\pi\kappa_0)^{(\nu-1)/2} K_{(1-\nu)/2}(2\pi\kappa_0) \right\}, \quad (2)$$

где ρ — пространственный разнос; κ_0 — обратный внешний масштаб; $\Gamma(x)$ — гамма-функция; $K_\alpha(x)$ — модифицированная функция Бесселя второго рода. Одномерный пространственный Фурье-спектр

$$\Phi_T(\kappa) = \int_0^\infty d\rho (D_T(\infty) - D_T(\rho)) \cos(2\pi\kappa\rho), \quad \text{соответствующий}$$

структурной функции (2), имеет вид

$$\Phi_T(\kappa) = CA(\nu) (\kappa^2 + \kappa_0^2)^{-\nu/2}. \quad (3)$$

Для значений показателя $1 < \nu < 3$ подстановка нормировочного коэффициента

$$A(\nu) = \left(-4(2\pi)^{\nu-1} \Gamma(1-\nu) \sin \frac{\pi\nu}{2} \right)^{-1} \quad (4)$$

обеспечивает степенной вид структурной функции (2) $D_T(\rho) \approx C\rho^\mu$ с показателем $\mu = \nu - 1$ при малых разнотах. Ограничиваясь указанным выше диапазоном значений ν , можно интерпретировать коэффициент C как структурную характеристику нормированной температуры.

Границу инерционного и энергетического интервалов естественно определить как абсциссу точки пересечения асимптот, соответствующих устремлению аргумента спектра к нулю и бесконечности. Для спектра (3) граничное значение $\kappa = \kappa_0$ совпадает с соответствующим параметром модели. Аналогично можно ввести внешний масштаб L_0 как абсциссу точки пересечения асимптот для структурной функции. Для модели (2), (3) масштабы связаны обратно пропорциональной зависимостью $L_0 = C_L \kappa_0^{-1}$ с коэффициентом, зависящим от показателя ν :

$$C_L = \left(-\frac{v-1}{2\pi^v} \cos \frac{\pi v}{2} \Gamma^2 \left(\frac{v-1}{2} \right) \right)^{1/(v-1)}. \quad (5)$$

Дисперсия флуктуаций нормированной температуры для модели (2), (3) связана с параметрами инерционного интервала выражением

$$\sigma_T^2 = \sqrt{\pi} A(v) C \kappa_0^{1-v} \frac{\Gamma \left(\frac{v-1}{2} \right)}{\Gamma \left(\frac{v}{2} \right)}. \quad (6)$$

1.2. Оценка параметров модели по данным измерений метеопараметров

С целью оценки применимости модели (2), (3) для описания экспериментальных данных и определения значений ее параметров будем использовать следующую процедуру. Пусть имеются измеренные временные последовательности значений температуры T и трех компонент $\{u, v, w\}$ скорости ветра с шагом оцифровки Δt , содержащие N отсчетов. Оценку структурной функции нормированной температуры в точках разносов $\rho_l = l \langle |\mathbf{V}| \rangle \Delta t$, где

$$l = 0, \dots, N-1, \langle |\mathbf{V}| \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} - \text{средний}$$

модуль скорости ветра, найдем как

$$D_T(\rho_l) = \frac{\sum_{j=0}^{N-l-1} (\tilde{T}_j - \tilde{T}_{j+l})^2}{N-l}. \quad (7)$$

Важным этапом при оценке параметров модели (2), (3) по измеренным временным рядам метеопараметров является выбор границ интервала (в области как пространственных разносов ρ , так и пространственных частот κ), на котором эта оценка будет произведена. Для большинства атмосферных задач можно явно указать такую пару значений пространственных разносов $\rho_{\min}$ и $\rho_{\max}$, что минимальный заведомо превосходит размеры области пространственного осреднения используемой метеостанции и внутренний масштаб турбулентности, а максимальный не достигает внешнего масштаба турбулентности. Таким образом, параметры модельной структурной функции в инерционном интервале будем определять, аппроксимируя экспериментальную структурную функцию степенным трендом в интервале $[\rho_{\min}, \rho_{\max}]$. В дальнейшем эти параметры будем обозначать индексом SF (Structure Function). Поскольку для степенной функции при достаточно большом отношении $\rho_{\max}/\rho_{\min}$ ее значения на краях интервала будут отличаться на порядок и более, влияние случайных ошибок на искомые параметры будет существенно зависеть от величины разноса. Для снижения этой неравномерности удобно проводить подгонку в логарифмических координатах.

Оценка параметров состоит в следующем. Для совокупности значений индекса l , соответствующих выбранному интервалу

$$l_{\min} = \left[\frac{\rho_{\min}}{\rho_1} \right], \quad l_{\max} = \left[\frac{\rho_{\max}}{\rho_1} \right], \quad (8)$$

где $\rho_1 = \langle |\mathbf{V}| \rangle \Delta t$ — минимальный пространственный разнос, обусловленный временным шагом оцифровки Δt и средней скоростью ветра, построим пару безразмерных векторов

$$\left\{ \begin{array}{l} X_m = \lg \left(\frac{\rho_{l_{\min}+m}}{\rho_{\min}} \right) \\ Y_m = \lg(D_T(\rho_{l_{\min}+m})) \end{array} \right\}, \quad (9)$$

где $m = 0, \dots, l_{\max} - l_{\min}$. Для модельной структурной функции степенного вида элементы векторов (9) будут связаны линейно. Построенные на основе экспериментальных данных вектора будут, очевидно, содержать отклонения от линейной зависимости. Параметры наилучшим образом соответствующей экспериментальным векторам (9) линейной функции $\tilde{Y}_m = \tilde{A}X_m + \tilde{C}$ должны обеспечить минимум СКО для разностного вектора $\{\tilde{Y}_m - Y_m\}$. Искомые значения параметров определяются из следующих соотношений:

$$\tilde{C} = \frac{s_{01} - \tilde{A}s_{10}}{s_{00}}, \quad \tilde{A} = \frac{s_{11}s_{00} - s_{01}s_{10}}{s_{20}s_{00} - s_{10}^2}, \quad (10)$$

где $s_{jk} = \sum_{m=0}^{l_{\max}-l_{\min}} X_m^j Y_m^k$, $j = 0, 1, 2$; $k = 0, 1$. Тогда

для параметров инерционного интервала модельной структурной функции получим оценки

$$v_{\text{SF}} = \tilde{A} + 1, \quad C_{\text{SF}} = 10^{\tilde{C}} \rho_{\min}^{1-v_{\text{SF}}}. \quad (11)$$

Аналогичным образом процедуру оценки параметров можно построить и для спектров. Разобьем анализируемый интервал наблюдения на n участков длиной $N_s = N/n$ [21] точек и для каждого вычислим Фурье-спектр ряда флуктуаций нормированной температуры $\tilde{T}$:

$$\tilde{T}_m = \sum_{j=0}^{N_s-1} \tilde{T}_j e^{-2\pi i \frac{mj}{N_s}}, \quad m = 0, 1, \dots, N_s - 1. \quad (12)$$

Усредняя по ансамблю независимых реализаций квадрат модуля спектра (12), получим

$$\langle |\tilde{T}_m|^2 \rangle = \sum_{\alpha=1-N_s}^{N_s-1} (N_s - |\alpha|) \langle \tilde{T}_j \tilde{T}_{j+\alpha} \rangle e^{-2\pi i \frac{m\alpha}{N_s}}. \quad (13)$$

Считая, что коррелятор в правой части (13) быстро убывает с ростом α , а шаг оцифровки временных рядов достаточно мал, в (13) суммирование по α можно заменить интегрированием, тогда получим

$$\langle |\tilde{T}_m|^2 \rangle \approx \frac{N_s}{\rho_1} \Phi_T \left(\frac{m}{\rho_1 N_s} \right), \quad (14)$$

где $\Phi_T(\kappa)$ — энергетический спектр. Наконец, заменяя в (14) усреднение по ансамблю на усреднение

по n последовательным участкам, получим выражение для построения спектра (3) из временных рядов метеоданных длиной N :

$$\Phi_T\left(\frac{m}{\rho_1 N_s}\right) = \frac{\rho_1}{N} \sum_{\beta=0}^{N_s-1} \left(\left| \tilde{T}_m \right|_{\beta}^2 \right). \quad (15)$$

Так же как и ранее при оценке параметров структурной функции, зададим такую пару значений в области пространственных частот $\kappa_{\min}$ и $\kappa_{\max}$, что меньшее из них заведомо превосходит обратный внешний масштаб турбулентности κ_0 , а большее не достигает обратного внутреннего масштаба. Совокупность значений индекса l , соответствующих этому интервалу, определим как

$$l_{\min} = [N_s \rho_1 \kappa_{\min}], \quad l_{\max} = [N_s \rho_1 \kappa_{\max}]. \quad (16)$$

Безразмерные векторы, аналогичные (9), зададим соотношениями

$$\left\{ \begin{aligned} X_m &= \lg \frac{l_{\min} + m}{\rho_1 N_s \kappa_{\min}} \\ Y_m &= \lg \left(\frac{l_{\min} + m}{\rho_1 N_s} \Phi_n \left(\frac{l_{\min} + m}{\rho_1 N_s} \right) \right) \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

где, как и в (9), индекс $m = 0 \dots l_{\max} - l_{\min}$. Вычислив параметры $\tilde{A}$, $\tilde{C}$ с помощью выражений (10), получим оценки для параметров модельного спектра (3), которые будем обозначать индексом Sp:

$$v_{Sp} = 1 - \tilde{A}, \quad C_{Sp} = 10^{\tilde{C}} \frac{\kappa_{\min}^{v_{Sp}-1}}{A(v_{Sp})}. \quad (18)$$

Разумеется, модель (2), (3) не описывает всего многообразия вариантов атмосферной турбулентности. Поэтому при обработке результатов измерений следует контролировать соответствие модельных и экспериментальных структурных функций и спектров. Критерии соответствия можно сформулировать, основываясь на том, что в области значений показателя $1 < v < 3$ для модели (2), (3) должны выполняться соотношения

$$v_{Sp} = 1 + \mu_{SF}, \quad C_{Sp} = C_{SF}, \quad (19)$$

связывающие параметры степенных интервалов структурной функции и спектра. Оценки, основанные на экспериментальных данных, уже не будут удовлетворять равенствам (19). Соответствие степенной модели (2), (3) экспериментальным данным можно охарактеризовать по степени расхождения параметров, оцененных по структурной функции и спектру. Для оценок показателя v удобно воспользоваться относительной ошибкой отклонений

$$\varepsilon_v = \left| 1 - \frac{v_{Sp}}{v_{SF}} \right|. \quad (20)$$

Поскольку при невыполнении первого из равенств (19) размерности левой и правой частей второго

из них не совпадают, непосредственное сопоставление оценок амплитудных коэффициентов $\tilde{N}_{Sp}$, $\tilde{N}_{SF}$ невозможно. Поэтому в качестве сравниваемых величин выберем значения структурной функции (2) в некоторой точке степенного интервала ρ_c , рассчитанные на основе параметров, найденных с помощью структурной функции $D_{SF} = C_{SF} \rho_c^{v_{SF}-1}$ и спектру $D_{Sp} = C_{Sp} \rho_c^{v_{Sp}-1}$. Эти величины имеют одинаковую размерность, что позволяет оценить относительную ошибку отклонений как

$$\varepsilon_c(\rho_c) = \left| 1 - \frac{D_{Sp}}{D_{SF}} \right|. \quad (21)$$

Полученная величина будет зависеть от разности ρ_c , поэтому можно использовать ее значение, усредненное по всему степенному интервалу структурной функции. Относительные ошибки (20), (21) могут лечь в основу критерия применимости степенной модели (2), (3) для описания рядов экспериментальных данных акустической метеостанции. Предельно допустимые ошибки будут, очевидно, зависеть от конкретной задачи, для решения которой используются результаты измерений.

1.3. Оценка внешнего масштаба

Для определения обратного внешнего масштаба κ_0 можно воспользоваться соотношением (6). Подставляя в него найденные из временных рядов метеопараметров параметры инерционного интервала C , v и оценку дисперсии флуктуаций нормированной температуры

$$\sigma_T^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \tilde{T}_j^2, \quad (22)$$

получим

$$\kappa_0 = \left(\frac{\sigma_T^2 \Gamma\left(\frac{v}{2}\right)}{\tilde{N} \sqrt{\pi} A(v) \Gamma\left(\frac{v-1}{2}\right)} \right)^{1/(1-v)}. \quad (23)$$

Можно предложить также способ, основанный на поведении спектра (3) в области низких частот. Для этого найдем максимум функции $\kappa^{0.5v_{Sp}} \Phi_T(\kappa)$. Простой расчет показывает, что его абсцисса в точности совпадает с обратным внешним масштабом: $q_{\max} = \kappa_0$.

Аналогично можно найти абсциссу максимума функции $\rho^{-(v_{SF}-1)/2} D_T(\rho)$. В этом случае для модельной структурной функции (2) справедливо приближенное равенство $r_{\max} \approx C_p \kappa_0^{-1}$. В интервале значений $1 < v < 3$ изменения коэффициента C_p невелики ($C_p = 0,19 \pm 0,015$), так что ими в дальнейшем можно пренебречь, положив $C_p = 0,19$.

Внешний масштаб L_0 найдем из соотношения $L_0 = C_L \kappa_0^{-1}$ с коэффициентом, рассчитанным по формуле (5).

Критерий соответствия экспериментальных данных степенной модели (2), (3) можно построить и на основе сопоставления оценок внешнего масштаба турбулентности, однако следует ожидать заметно большего их расхождения вследствие более медленного осреднения структурной функции при больших значениях аргумента и энергетического спектра при малых. Отметим также, что все три варианта оценки внешнего масштаба опираются на параметры спектра или структурную функцию, найденные на степенном интервале, поэтому на результат будет влиять, причем в различной степени, точность их определения.

2. Результаты обработки экспериментальных данных

Примеры обработки рядов метеоданных по изложенной выше методике представлены на рис. 1–3. Измерения проводились на полигоне Базового экспериментального комплекса Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Метеостанция АМК-03 [2] располагалась на высоте $H = 3$ м над поверхностью земли. Частота регистрации метеоданных составляла $f = 80$ Гц. Статистические характеристики температуры рассчитывались по интервалам наблюдения длительностью 20 мин. Для расчета спектров интервалы разбивались на 10 промежутков по 120 с. Были выбраны следующие границы подынтервалов аппроксимации степенным трендом: для структурной функции $\rho_{\min} = 0,3$ м, $\rho_{\max} = 3$ м и для спектра $\kappa_{\min} = 0,3$ м⁻¹, $\kappa_{\max} = 3$ м⁻¹.

На рис. 1 представлены оценки показателя по структурной функции v_{SF} и спектру v_{Sp} . Видно, что в основном обе оценки лежат заметно ниже значения $5/3$, соответствующего модели развитой турбулентности [7, 8]. В целом они хорошо согласуются между собой (коэффициент корреляции $r = 0,89$). СКО для разности оценок $\sqrt{\langle (v_{SF} - v_{Sp})^2 \rangle} = 0,092$ существенно меньше, чем диапазон изменения каждой из них за время измерений. Как следствие, относительная ошибка (20), усредненная по всему времени измерений, невелика: $\langle \epsilon_v \rangle = 0,054$. Отметим также, что оценка по структурной функции v_{SF} флуктуирует несколько меньше, чем по спектру v_{Sp} .

Для сопоставления оценок структурной постоянной необходимо привести их к одинаковой размерности. Простейший способ – сравнить значения модельной структурной функции (2) на фиксированном разnose. В качестве опорного значения была выбрана величина $\rho_c = 1$ м, заведомо находящаяся внутри степенного интервала. Оценки значений D_{SF} и D_{Sp} по структурной функции и спектру показаны на рис. 2.

Сравнение представленных временных рядов показывает их хорошее согласие, которое характеризуется коэффициентом корреляции $r = 0,99$ и СКО разности оценок $\sqrt{\langle (D_{SF} - D_{Sp})^2 \rangle} = 8,9 \cdot 10^{-8}$.

Средняя относительная ошибка $\langle \epsilon_c \rangle = 0,17$ приблизительно в три раза больше, чем ошибка для показателей $\langle \epsilon_v \rangle$. Основной вклад в увеличение ошибки вносят прежде всего интервалы с оценками

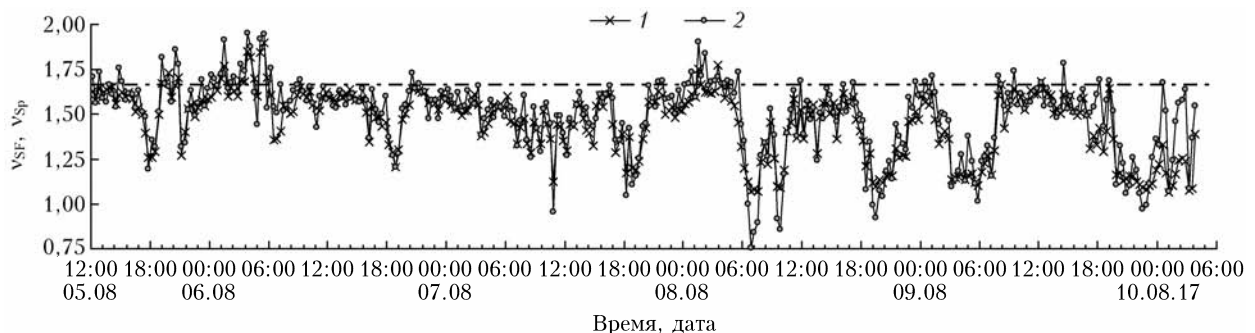


Рис. 1. Параметры v степенной модели, рассчитанные по v_{SF} (1) и v_{Sp} (2); здесь и далее штрихпунктирной линией отмечено значение $5/3$, соответствующее модели Колмогорова–Обухова

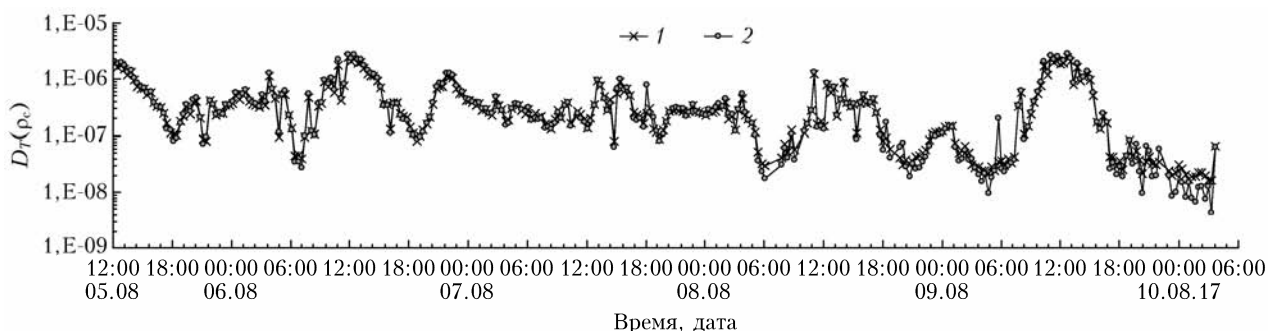


Рис. 2. Оценки модельной структурной функции флуктуаций температуры на разnose $\rho_c = 1$ м по D_{SF} (1) и D_{Sp} (2)

показателя $\nu < 1,3$, близкими к нижней границе области определения степенной модели (2), (3) $1 < \nu < 3$.

Оценки внешнего масштаба L_0 , рассчитанные тремя описанными выше способами (по структурной функции, по спектру и дисперсии), представлены на рис. 3. Налицо хорошее соответствие оценок, полученных по абсциссам максимумов структурной функции и спектра ($r = 0,88$), что в совокупности с согласием оценок структурной постоянной и показателя (см. рис. 1, 2) позволяет сделать вывод о применимости степенной модели (2), (3) для анализа рассмотренных временных рядов метеоданных. Отметим также, что оценка внешнего масштаба по дисперсии нормированной температуры почти везде не сильно отличается от двух остальных способов, но в точках, где значение показателя ν опускается ниже 1,3, наблюдается ее резкий (на несколько порядков) рост. При этом структурная

функция на интервале наблюдения не выходит на насыщение, что заставляет с осторожностью относиться к оценкам внешнего масштаба в эти моменты времени.

Хорошее согласие неколмогоровской степенной модели (2), (3) с результатами наблюдений можно видеть не только в летний период. На рис. 4, а показана динамика оценок показателя по ν_{SF} и ν_{Sp} из данных метеокомплекса АМК-03, располагавшегося на крыше южной башни ИОА СО РАН (высота ~ 20 м), в январе-феврале 2020 г. Оценки получены при тех же параметрах регистрации и обработки, что и на рис. 1. В целом выводы по этому графику аналогичны: экспериментальные данные хорошо соответствуют данным модели (2), (3) на всем интервале измерений, что подтверждается $r = 0,91$, СКО разности оценок $\sqrt{\langle (\nu_{SF} - \nu_{Sp})^2 \rangle} = 0,11$ и относительной ошибкой (20), усредненной по всему времени измерений, $\langle \epsilon_\nu \rangle = 0,065$. Отметим, что использовать

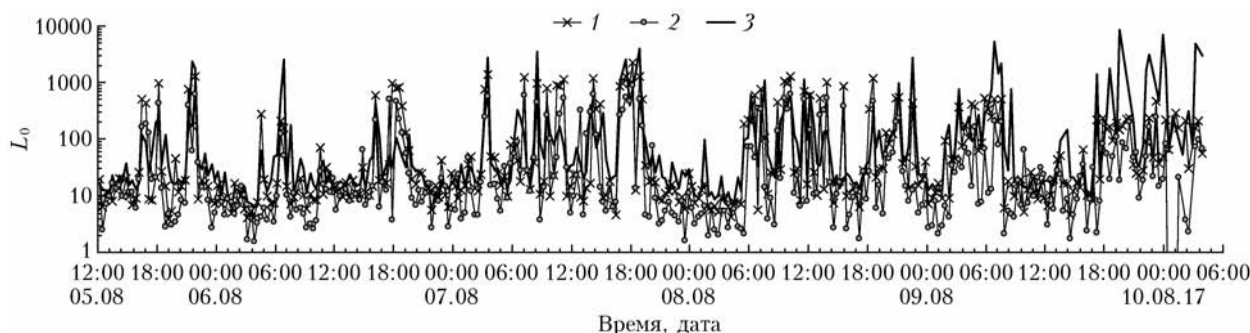


Рис. 3. Оценки внешнего масштаба по структурной функции (1), спектру (2) и дисперсии (3)

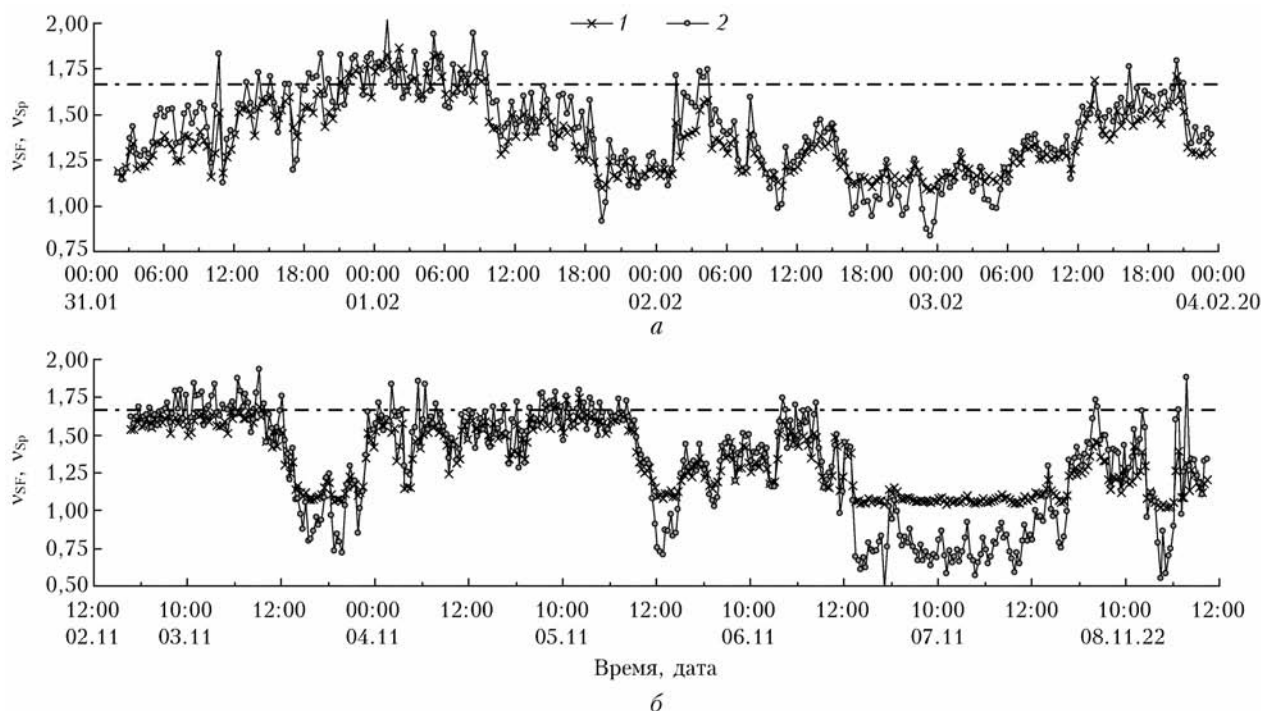


Рис. 4. Примеры временной динамики оценок параметров ν_{SF} (кривые 1) и ν_{Sp} (кривые 2) в зимний (а) и осенний (б) периоды

классическую колмогоровскую модель развитой турбулентности можно лишь ночью в течение короткого периода — с 31.01 по 01.02, в остальное время оценки показателя заметно меньше требуемого этой моделью значения 5/3.

При обработке результатов измерений в ноябре 2020 г. на полигоне БЭК ИОА СО РАН метеокомплексом АМК-03, помещенным на высоте 5 м над поверхностью земли, обнаружены несколько периодов длительностью от 1 ч до 1 сут, когда соответствие экспериментальных данных и степенной модели (2), (3) нарушается (рис. 4, б). Несмотря на высокое значение коэффициента корреляции рядов оценок на всем интервале наблюдения ($r = 0,92$), СКО разности оценок увеличилась примерно в два раза: $\sqrt{\langle (v_{SF} - v_{Sp})^2 \rangle} = 0,19$, а относительная ошибка (20) в этих промежутках возрастает на порядок, до $\langle \epsilon_v \rangle = 0,4$. Выявление причины расхождения и необходимой модификации модели требует детального анализа статистики температурных флуктуаций в этих промежутках, что выходит за рамки настоящей статьи. Тем не менее применение представленного выше алгоритма обработки позволяет уверенно их обнаруживать.

Заключение

Представлен алгоритм обработки временных рядов мгновенных значений метеопараметров, позволяющий оценивать их соответствие степенной модели турбулентности, а также параметры модели для поля микропульсаций температуры при произвольном задании интервала осреднения. Обработка результатов измерений, проведенных на полигоне БЭК ИОА СО РАН акустическим метеокомплексом АМК-03, и полученные оценки параметров модели показывают, что степенная модель (2), (3) пригодна для описания флуктуаций температуры и показателя преломления в приземном слое атмосферы. Обнаружены значительные отклонения параметров модели от значений, предсказываемых моделью развитой турбулентности Колмогорова—Обухова, что может потребовать корректировки известных оценок характеристик оптических волн, распространяющихся на атмосферных трассах.

Полученные результаты могут быть применены для анализа первичных выходных данных акустических метеокомплексов и оценки турбулентных характеристик атмосфер.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Тихомиров А.А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости и температуры воздушных потоков. Обзор // Оптика атмосфер и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 585–600.

2. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Щелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорол. и гидрол. 2006. № 11. С. 89–98.
3. 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.
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. Zhou X., Gao T., Takle E.S., Zhen X., Suyker A.E., Awada T., Okalebo J., Zhu J. Air temperature equation derived from sonic temperature and water vapor mixing ratio for turbulent airflow sampled through closed-path eddy-covariance flux systems // Atmos. Meas. Tech. 2022. V. 15. P. 95–115.
6. Mauder M., Zeeman M.J. Field intercomparison of prevailing sonic anemometers // Atmos. Meas. Tech. 2018. V. 11. P. 249–263.
7. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н. Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 286 с.
8. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
9. Glegg S., Devenport W. Aeroacoustics of Low Mach Number Flows: Fundamentals, Analysis, and Measurement. Oxford: Academic Press, 2017. 537 p.
10. Zilitinkevich S., Kadantsev E., Repina I., Mortikov E., Glazunov A. Order out of chaos: Shifting paradigm of convective turbulence // J. Atmos. Sci. 2021. V. 78. P. 3925–3932.
11. Banerjee T., Katul G.G., Salesky S.T., Chamecki M. Revisiting the formulations for the longitudinal velocity variance in the unstable atmospheric surface layer // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2014. V. 141, N 690. P. 1699–1711.
12. 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; Nosov V.V., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Torgaev A.V. Atmospheric coherent turbulence // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 201–206.
13. Носов В.В., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Носов Е.В., Торгаев А.В. Оптические свойства турбулентности в горном пограничном слое атмосферы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 153 с.
14. Li Y., Zhu W., Wu X., Rao R. Equivalent refractive-index structure constant of non-Kolmogorov turbulence // Opt. Express. 2015. V. 23, N 18. P. 23004–23012.
15. Baykal Y., Gerzekcioğlu H. Equivalence of structure constants in non-Kolmogorov and Kolmogorov spectra // Opt. Lett. 2011. V. 36, N 23. P. 4554–4556.
16. Chao Z. A novel idea: Calculating anisotropic turbulence only by Kolmogorov structure constant C_n^2 and power law α // Results Phys. 2020. V. 19, N 2. P. 103483–1–103483-4.
17. Barrett E.W., Suomi V.E. Preliminary report on temperature measurement by sonic means // J. Atmos. Sci. 1949. V. 6. P. 273–276.
18. Kaimal J.C., Gaynor J.E. Another look at sonic thermometry // Bound. Lay. Meteorol. 1991. V. 56. P. 410–418.

19. Loescher H.W., Ocheltree T., Tanner B., Swiatek E., Dano B., Wong J., Zimmerman G., Campbell J., Stock C., Jacobsen L., Shiga Y., Kollasi J., Liburdy J. Law B.E. Comparison of temperature and wind statistics in contrasting environments among different sonic anemometer–thermometers // Agric. For. Meteorol. 2005. V. 133. P. 119–139.
20. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 2. Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование. М.: Мир, 1981. 317 с.
21. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.

D.A. Marakasov, A.L. Afanasiev, E.V. Gordeev. Estimation of parameters of the inertial interval of turbulent temperature spectrum from time series of data from sonic weather stations.

The basis for estimating turbulence characteristics using the primary output data of sonic weather stations is currently the classical Kolmogorov–Obukhov model of homogeneous and isotropic turbulence with a power-law structure function with an exponent of $2/3$. In practice, such conditions are not always implemented in the atmosphere. In this article, to describe the non-Kolmogorov turbulence, an approach based on the use of a generalized power model with an exponent, a structural characteristic, and an outer scale estimated directly from the measured time series of instantaneous values of recorded meteorological parameters is suggested. The criteria of applicability of the model for estimating characteristics of real atmospheric turbulence are derived.