

А.Л. Афанасьев, А.П. Ростов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛИ СПЕКТРАЛЬНОГО ТЕНЗОРА ПОЛЯ СКОРОСТИ ВЕТРА

С целью исследования детальной структуры турбулентности нижних слоев атмосферы проведена серия экспериментов с использованием нескольких автоматических акустических метеостанций, управляемых с помощью персонального компьютера. В процессе автоматизированных измерений осуществлялось накопление данных при различных схемах пространственного расположения метеостанций в горизонтальной и в вертикальной плоскости. На основе полученной экспериментальной информации исследована возможность модельного описания спектрального тензора флуктуаций поля скорости ветра в приближении однородной анизотропной турбулентности. Проведены модельные расчеты и сравнение предсказанной когерентности и экспериментально найденной.

Детальная структура мелкомасштабной турбулентности нижних слоев атмосферы представляет интерес с самых различных точек зрения. Имеется широкий круг прикладных задач, требующих адекватного описания пространственного спектра турбулентных пульсаций скорости ветра в приземном слое. Такого рода информация необходима, например, в задачах о распространении оптического излучения и радиоволн в атмосфере, при решении проблем акустического и лидарного зондирования, для учета распространения загрязняющих примесей в задачах экологии, при оценках пространственной изменчивости давления ветра в расчетах конструкционных нагрузок и т.д.

Согласно современным экспериментальным и теоретическим данным трехмерный пространственный спектр турбулентных пульсаций скорости ветра представляет собой тензор второго ранга.

В приближении изотропной турбулентности [1] спектральный тензор $\Phi_{ij}(\mathbf{k})$ полностью определяется одной скалярной функцией волнового числа $k = |\mathbf{k}|$

$$\Phi_{ij}(\mathbf{k}) = (4\pi k^2)^{-1} \{\delta_{ij} - k_i k_j k^{-2}\} E(k), \quad (1)$$

а именно энергетическим спектром $E(k)$, для которого из соображений размерности следует закон «пяти третей» Колмогорова-Обухова $E(k) \sim \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$, где ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности.

Приближение изотропности в приземном слое достаточно хорошо выполняется в инерционном интервале волновых чисел, однако по мере увеличения пространственных масштабов и приближения к энергетическому интервалу спектра, турбулентность становится анизотропной [2]. Фактически, когда расстояние между точками наблюдения флуктуаций скорости ветра сравнимо с внешним масштабом турбулентности, гипотеза о пространственной изотропности флуктуаций нарушается. И здесь возникает необходимость в построении более совершенных моделей для спектрального тензора.

Согласно теории подобия Монина-Обухова в приземном слое атмосферы на высоте z безразмерные спектры флуктуаций компонент вектора скорости ветра оказываются универсальными функциями безразмерного волнового числа kz и параметра стратификации z/L , где L – масштаб Обухова. Это означает, что те или иные характерные частоты, соответствующие спектральным максимумам, низкочастотным границам инерционного интервала и т.п., зависят от стратификации [3]. Таким образом, теория подобия позволяет сделать ряд конкретных выводов о форме спектров при различных состояниях устойчивости приземного слоя. Поэтому попытки учета некоторых универсальных закономерностей приземного слоя, вытекающие из теории подобия и данных экспериментальных наблюдений, при моделировании спектрального тензора являются достаточно актуальными.

Среди исследований по данной проблеме особый интерес представляет кинематическая модель турбулентности, развитая в [4], в основе которой лежит представление пространственного спектра флуктуаций поля скорости в виде анизотропного тензора $\Phi_{ij}(\mathbf{k})$. В указанной работе в приближении однородного несжимаемого турбулентного потока для спектрального тензора предложен следующий вид:

$$\Phi_{ij}(\mathbf{k}) = \sum_{l=1}^3 A_l(k) \{ \delta_{li} - k_l k_i k^{-2} \} \{ \delta_{lj} - k_l k_j k^{-2} \}. \quad (2)$$

В отличие от случая изотропной турбулентности (1) для описания тензора (2) необходимо задание трех вещественных независимых скалярных функций $A_1(k)$, $A_2(k)$, $A_3(k)$, определяющих энергию турбулентных вихрей по трем ортогональным направлениям, задаваемым единичными векторами \mathbf{i}_1 , \mathbf{i}_2 , \mathbf{i}_3 .

В качестве параметров, описывающих поведение спектров продольной u , поперечной v и вертикальной w компонент поля скорости, в [4] используются дисперсии σ_u^2 , σ_v^2 , σ_w^2 , интегральные масштабы l_u , l_v , l_w и безразмерные параметры μ_u , μ_v , μ_w , характеризующие наклон спектра в области перехода от инерционного к энергетическому интервалу волновых чисел. При этом аналитические выражения для одномерных пространственных спектров флуктуаций компонент скорости имеют вид

$$F_u(k) = \frac{l_u \sigma_u^2}{\pi} \left\{ 1 + \left(\frac{l_u k}{a(\mu_u)} \right)^{2\mu_u} \right\}^{-\frac{5}{6\mu_u}}, \quad (3)$$

$$F_v(k) = \frac{l_v \sigma_v^2}{2\pi} \left\{ 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{l_v k}{a(\mu_v)} \right)^{2\mu_v} \right\} \left\{ 1 + \left(\frac{l_v k}{a(\mu_v)} \right)^{2\mu_v} \right\}^{-\frac{5}{6\mu_v} - 1},$$

где $a(\mu) = \{ \pi \Gamma[5/6\mu] \} / \{ \Gamma(1/2\mu) \Gamma[(1/3\mu)] \}$ – безразмерная константа, которая для каждого конкретного значения определяется условием нормировки $\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} F(k) dk$; k – волновое число

вдоль направления средней горизонтальной скорости. Выражение для $F_w(k)$ аналогично $F_v(k)$ при соответствующей замене индексов.

Таким образом, в качестве «входной» информации для построения модели тензора (2) используется девять параметров. Аналитические зависимости A -функций от этих параметров, предложенные в [4], здесь не приводим ввиду их громоздкости. Достоинством данного подхода, на наш взгляд, является то, что входные параметры модели могут быть получены двумя способами. Во-первых, путем их модельного задания в зависимости от условий стратификации и масштабирования на основе теории подобия. При этом, с целью достижения более высокого уровня обобщения и систематизации, могут быть использованы уже опубликованные данные. Во-вторых, путем определения искомых параметров непосредственно, на основе аппроксимации экспериментально измеренных спектров выражениями (3) по методу наименьших квадратов, с последующим вычислением A -функций и тензора (2). Вытекающая отсюда возможность модельного описания пространственной структуры однородной анизотропной турбулентности, исключающая необходимость проведения измерений во многих пространственных точках, с практической точки зрения является очень привлекательной. Однако данная модель обладает некоторыми недостатками, в частности она не может гарантировать положительной определенности тензора (2) для произвольных входных параметров.

Среди различных характеристик, используемых в целях описания статистических закономерностей пространственной структуры случайного поля скорости ветра, одной из наиболее информативных является функция когерентности

$$\Gamma_{ij}^2(\mathbf{R}, \omega) = |W_{ij}(\mathbf{R}, \omega)|^2 / |W_{ij}(0, \omega) W_{ji}(0, \omega)|, \quad (4)$$

где $W_{ij}(\mathbf{R}, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_{ij}(\mathbf{R}, \tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau$ – взаимный спектр флуктуаций в двух пространственно разнесенных точках.

При разнесении точек наблюдения в горизонтальной плоскости на расстояние R перпендикулярно направлению среднего ветра, используя для пространственно-временной корреляционной функции $B_{ij}(\mathbf{R}, \tau)$ гипотезу «замороженности» и разложение в трехмерный пространственный спектр, а также модельное представление (2), для взаимных спектров продольных, поперечных и вертикальных компонент скорости, можно получить следующие выражения [4]:

$$\begin{aligned}
 W_{11}(R, \omega) &= 2\pi v^{-1} \int_0^{\infty} k^3 \kappa^{-4} \{ \omega^2 J_0(Rk) A_1(\kappa) + \omega^2 v^{-2} [J_0(Rk) - R^{-1} k^{-1} J_1(Rk)] A_2(\kappa) + \omega^2 v^{-2} R^{-1} k^{-1} J_1(Rk) A_3(\kappa) \} dk; \\
 W_{22}(R, \omega) &= 2\pi v^{-1} \int_0^{\infty} k \kappa^{-4} \{ \omega^2 v^{-2} k^2 [J_0(Rk) - R^{-1} k^{-1} J_1(Rk)] A_1(\kappa) + [(\omega^4 v^{-4} - 3R^{-2} k^2) J_0(Rk) + \\
 &+ 2R^{-1} k(\omega^2 v^{-2} + 3R^{-2}) J_1(Rk)] A_2(\kappa) + R^{-2} k^2 [3J_0(Rk) + (R^2 k^2 - 6) R^{-1} k^{-1} J_1(Rk)] A_3(\kappa) \} dk; \\
 W_{33}(R, \omega) &= 2\pi v^{-1} \int_0^{\infty} k \kappa^{-4} \{ \omega^2 v^{-2} R^{-1} k J_1(Rk) A_1(\kappa) + R^{-2} k^2 [3J_0(Rk) + (R^2 k^2 - 6) R^{-1} k^{-1} J_1(Rk)] A_2(\kappa) + \\
 &+ [(\kappa^4 - 3R^{-2} k^2) J_0(Rk) - 2(\kappa^2 k^2 - 3R^{-2} k^2) R^{-1} k^{-1} J_1(Rk)] A_3(\kappa) \} dk, \tag{5}
 \end{aligned}$$

где $\kappa = \sqrt{k^2 + \omega^2 v^{-2}}$; $J_n(x)$ – функции Бесселя n -го порядка.

Таким образом, в рамках приближения однородной турбулентности, используя в качестве входной информации параметры автоспектров компонент скорости, экспериментально измеренные в одной точке пространства, мы можем рассчитать когерентность, т.е. получить информацию о пространственной структуре анизотропного поля скорости ветра в целом.

До сих пор экспериментальные измерения когерентности являются не достаточно полными для проведения детального сравнения с модельным предсказанием, поскольку большинство исследований ограничиваются приближением изотропной турбулентности.

Целью данной работы является экспериментальная проверка модели спектрального тензора [4], которая не является изотропной, но содержит изотропность как частный случай.

В проведенной серии экспериментов основным измерительным прибором была акустическая метеостанция [5], являющаяся компактным программно управляемым устройством и позволяющая получать синхронно информацию о каждой компоненте скорости ветра, температуре и их флуктуациях с частотой до 20 Гц, а также измерять давление и влажность воздуха. В экспериментах использовалось от двух до трех таких метеостанций, управляемых с помощью персонального компьютера, что позволяло осуществлять длительные автоматизированные измерения и накопление данных. В различных сериях экспериментов применялись различные схемы пространственного расположения метеостанций как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. В процессе обработки данных измерений рассчитывались автоспектры и спектры когерентности для всех трех компонент скорости, а также скорость трения, масштаб температуры, потоки количества движения и тепла, масштаб Обухова и число Ричардсона, что позволило контролировать состояние приземного слоя по условиям стратификации. Некоторые предварительные результаты исследований опубликованы в [6].

В целом проведенные исследования подтвердили наличие сильной анизотропии флуктуаций поля скорости ветра в приземном слое, а также наличие зависимости распределения энергии пульсаций по пространству волновых чисел от вида соответствующих одномерных спектров $F_u(k)$, $F_v(k)$, $F_w(k)$. Причем в ряде случаев для конкретных экспериментально найденных параметров спектров σ^2 , l и μ вычисленные в соответствии с моделью A функции оказываются отрицательными в области малых волновых чисел. Это приводит к нарушению условия положительной определенности тензора $\Phi_{ij}(k)$, и мы получаем когерентность больше единицы для соответствующей компоненты скорости. Данное несоответствие относится к недостаткам модели и связано с тем, что в реальных условиях проведения эксперимента нередко наблюда-

ется нестационарность, обусловленная суточными колебаниями радиации, которая приводит к изменениям потока тепла H в зависимости от времени и высоты. Особенно сильно этот эффект проявляется при разностях R , намного превышающих величину внешнего масштаба турбулентности. Однако для горизонтальных разностей, которые равны или несколько меньше l_u , вклад области отрицательных значений A_3 , соответствующий вихрям большого размера, уменьшается и модельная когерентность не превышает единицы.

В качестве примера на рис.1 изображены нормированные на дисперсии спектры компонент скорости ветра, измеренные над ровной подстилающей поверхностью в летнее околополуденное время в условиях неустойчивой стратификации приземного слоя при $z/L = -0,064$. Реализация содержит 8192 синхронных значения трех компонент скорости ветра и температуры. Измерения проводились с частотой 10 Гц, время измерения составляло 13,65 мин.

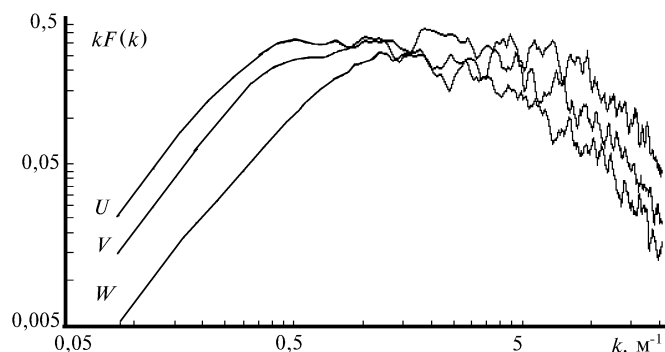


Рис. 1. Экспериментально найденные одномерные спектры для продольной U , поперечной V и вертикальной W компонент скорости ветра

С целью повышения числа степеней свободы в процессе спектральной обработки вся реализация разбивалась на 16 последовательных интервалов по 512 точек. На каждом интервале осуществлялась линейная фильтрация данных путем аппроксимации полиномом 1-й степени с последующим вычитанием из исходного массива данных. Таким путем исключались эффекты тренда в скорости ветра. Спектры, рассчитанные на каждом интервале, суммировались и нормировались на дисперсию реализации. Результирующие спектры сглаживались по пяти соседним точкам. Относительная погрешность оценки спектров при таком способе обработки, по нашим оценкам, не превышает 11%. За время измерений средние компоненты скорости ветра имели следующие значения: $V_u = 1,446$ м/с, $V_v = 0,000$ м/с, $V_w = 0,086$ м/с. Спектральные параметры, найденные по методу наименьших квадратов, для этих скоростей соответственно равны:

$$\begin{array}{lll} \sigma_u^2 = 0,190 \text{ м}^2/\text{с}^2 & \sigma_v^2 = 0,145 \text{ м}^2/\text{с}^2 & \sigma_w^2 = 0,056 \text{ м}^2/\text{с}^2 \\ l_u = 1,074 \text{ м} & l_v = 1,095 \text{ м} & l_w = 0,426 \text{ м} \\ \mu_u = 1,2 & \mu_v = 1,5 & \mu_w = 1,61 \end{array}$$

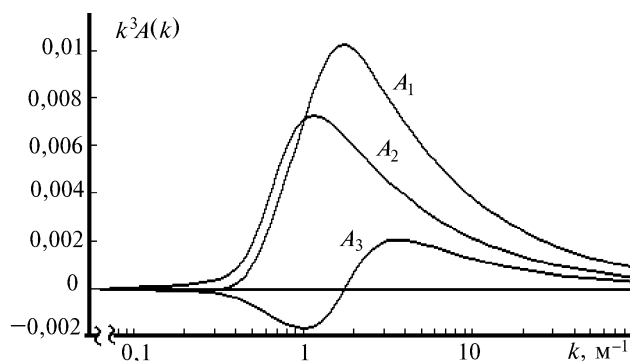


Рис. 2. Три модельные A -функции, определяющие спектральный тензор, рассчитанные для спектров, изображенных на рис. 1

На рис. 2 представлены три A -функции, определяющие спектральный тензор (2), рассчитанные для вышеуказанных параметров в соответствии с моделью [4]. На рис. 3 изображены спектры когерентности, рассчитанные по формулам (4) и (5), а также полученные экспериментально при поперечном горизонтальном разноме $R = 0,5$ м. Некоторое превышение экспериментальной когерентности над расчетной можно объяснить, с одной стороны, недостатками модели, ограниченной используемыми гипотезами «замороженной» и однородной турбулентности, а с другой – погрешностями при определении входных параметров модели и при проведении модельных расчетов. Поскольку данная модель предъявляет повышенные требования к корректности статистической обработки измеряемых данных, то с целью повышения достоверности спектральных оценок в области низких частот необходимо использовать процедуры устранения низкочастотного тренда в исходных временных реализациях.

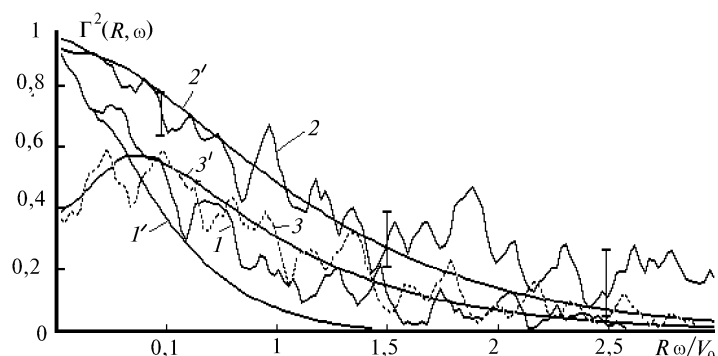


Рис. 3. Экспериментально найденные (кривые 1 – 3) и рассчитанные по модели (1' – 3') спектры когерентности для продольных (1, 1'), поперечных (2, 2') и вертикальных (3, 3') компонент скорости ветра

На основании удовлетворительного совпадения предсказанной когерентности и экспериментально измеренной можно сделать вывод о том, что при соответствии условий эксперимента заложенным гипотезам, данная модель может быть полезной при оценке пространственной статистики турбулентных пульсаций по информации, полученной в одной пространственной точке.

Исследования, описанные в этой работе, стали возможными при частичной финансовой поддержке фонда «Soros» (грант J29100) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 94-05-16601).

1. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
2. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей/ Под ред. Ф.Т.М. Ньистада и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеоздат. 1985. 351 с.
3. Зилитинкевич С.С. Динамика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 290 с.
4. Kristensen L., Lenschow D.H., Kirkegaard P., Courtney M. // Boundari-Layer Meteorology. 1989. V. 47. P. 149–193.
5. Ростов А.П. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 1. С. 102–106.
6. Афанасьев А.Л., Патрушев Г.Я., Ростов А.П. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 8. С. 1195–1198.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
27 декабря 1995 г.

A.L. Afanasyev, A.P. Rostov. Experimental Test of Wind Velocity Field Spectral Tensor.

A series of experiments was conducted in order to study in details the turbulence structure of the low atmospheric layers using several computerized acoustic weather stations. The data storage was conducted in the process of the computerized measurements under various spatial locations of the stations in horizontal and vertical planes. The possibility of the model description of the spectral tensor of wind velocity field fluctuation, approximated by homogeneous anisotropic turbulence, was studied based on the experimental data obtained. The model calculations were performed, and the predicted coherence was compared with that found experimentally.