

Временной ход компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии аэрозоля в пограничном слое атмосферы*

К.Ю. Суковатов, Н.Н. Безуглова

Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

Time Variability of Turbulent Diffusion Coefficients Tensor for an Aerosol in Atmospheric Boundary Layer

K.Yu. Sukovatov, N.N. Bezuglova

Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the RAS (Barnaul, Russia)

Представлены результаты обработки и анализа данных, полученных с использованием автоматизированного акустического метеокомплекса АМК-03. Проанализированы результаты измерений турбулентных пульсаций компонент скорости приземного ветра и других характеристик турбулентности в пограничном слое атмосферы на высоте 25 м для городских условий. По данным о турбулентных пульсациях компонент скорости ветра в приземном слое атмосферы рассчитаны временные корреляционные функции турбулентных пульсаций скорости приземного ветра, компоненты тензора коэффициентов турбулентной диффузии аэрозоля и их среднеквадратичное отклонение. Проведено сравнение вертикальной диагональной компоненты тензора коэффициентов турбулентной диффузии с коэффициентом турбулентного обмена. Анализ показал, что в большинстве случаев указанные значения близки и находятся в пределах оценки среднеквадратичного отклонения вертикальной диагональной компоненты тензора коэффициентов турбулентной диффузии. Установлено наличие корреляционной связи между компонентами тензора турбулентной диффузии, кинетической энергией турбулентности, интенсивностью турбулентности и турбулентными потоками в приземном слое атмосферы. Сделан вывод о том, что временные пульсации рассчитанных компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии целом хорошо коррелируют с изменениями кинетической энергии турбулентности и других характеристик турбулентного обмена в приземном слое атмосферы, измеренных с использованием метеокомплекса.

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, тензор коэффициентов турбулентной диффузии, аэрозоль.

In this paper, data obtained by ultrasonic anemometer АМК-03 are presented and analyzed. Wind speed turbulent fluctuations and other turbulence characteristics are measured on 25 m height for urban territory. Data for anti-cyclone days and days with unstable atmospheric stratification conditions have been selected. Correlation functions for turbulent wind speed fluctuations, turbulent diffusion coefficients tensor, and its dispersion are calculated. The results of calculations of the vertical diagonal component of turbulent diffusion coefficients tensor are compared with Monin-Obukhov formulation results. Analysis demonstrates that for the most cases obtained values are close and lies within the standard deviation value of the vertical diagonal component. The correlation link between turbulent diffusion coefficients tensor components and turbulent kinetic energy, turbulence intensity, and turbulent fluxes are found. It is concluded that time variability of turbulent diffusion coefficients tensor components and other characteristics of turbulent mixing in a surface layer of atmosphere are well correlated.

Key words: atmospheric boundary layer, turbulent diffusion coefficients tensor, aerosol

DOI 10.14258/izvasu(2017)4-10

*Работа выполнена в рамках проекта ФНИ РАН № 0383-2016-0005.

Введение. Наиболее часто распространение аэрозоля и других атмосферных примесей моделируется с помощью полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии [1–3]. В большинстве случаев наиболее значимыми компонентами тензора коэффициентов турбулентной диффузии считаются диагональные компоненты [3–5]. В работах [6, 7] показано, что не всегда выполняются условия, в которых тензор коэффициентов турбулентной диффузии имеет диагональный вид. Во многих случаях недиагональными компонентами тензора коэффициентов турбулентной диффузии пренебрегают без достаточно строгого обоснования [6–8]. По этой причине является актуальной задача, направленная на экспериментальное определение компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии и накопление эмпирической информации относительно этих величин для дальнейшего ее использования при замыкании системы уравнений переноса аэрозоля и других примесей в турбулентной атмосфере, построении эмпирических аппроксимаций для компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии, которые могут быть использованы для получения аналитических решений полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии.

1. Метод рекурсивного замыкания. Авторами работы [8] был разработан метод рекурсивного замыкания, который позволяет получить соотношения, связывающие компоненты тензора коэффициентов турбулентной диффузии с корреляционными функциями поля скоростей. Этот метод дает возможность провести прямое определение компонент тензора коэффициентов турбулентного обмена.

Спектр турбулентных пульсаций рассматриваемых характеристик в приземном слое атмосферы при частотах, соответствующих указанным временам осреднения, имеет так называемый мезомасштабный минимум [9], в пределах которого зависимость характеристик турбулентности от периода осреднения практически отсутствует. Характерный временной масштаб пульсаций скорости ветра в приземном слое (временной масштаб Эйлера τ_E) имеет порядок десятков секунд. Таким образом, практически оправдано применение скользящего осреднения характеристик турбулентности с периодом осреднения $T \approx 10^2 - 10^3$ с.

Полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии позволяет моделировать распространение аэрозоля в безынерционной области спектра атмосферной турбулентности:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(v_i \cdot c) = \nu_c \Delta c, \quad (1)$$

где c — концентрация атмосферного аэрозоля; v_i — компоненты скорости ветра; ν_c — коэффициент молекулярной диффузии аэрозольных частиц; Δ —

оператор Лапласа. Мгновенные значения концентрации и скорости ветра представимы в виде суммы матожиданий $\langle c \rangle$, $\langle v_i \rangle$ и турбулентных пульсаций \hat{c} , \hat{v}_i :

$$c = \langle c \rangle + \hat{c}, \quad v_i = \langle v_i \rangle + \hat{v}_i. \quad (2)$$

Уравнение для пульсаций концентрации можно получить, вычитая из исходного (не осредненного) уравнения осредненное и проинтегрировав его по времени. Выражение для потока концентрации $\langle \hat{v}_i \cdot \hat{c} \rangle$ среднего за время T имеет следующий вид:

$$\langle \hat{v}_i \cdot \hat{c} \rangle = \frac{1}{T - \tau_E} \int_0^{T - \tau_E} \hat{v}_i(t + \tau_E) \hat{c}(t + \tau_E) dt. \quad (3)$$

Подставив уравнение для пульсаций концентрации в формулу для потока концентрации, получим выражение, состоящее из трех слагаемых, из которых только первое слагаемое не зависит от пульсаций концентрации, оно представляет собой обобщенный закон градиентного вида. Этот результат можно рассматривать как первое приближение для оценки турбулентного потока примеси, и это слагаемое имеет следующий вид:

$$\langle \hat{v}_i \cdot \hat{c} \rangle^{(1)} = -\frac{1}{T - \tau_E} \int_0^{T - \tau_E} \hat{v}_i(t + \tau_E) \int_t^{t + \tau_E} \hat{v}_j(t_1) dt_1 dt \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j}. \quad (4)$$

Это соотношение можно переписать в виде

$$\langle \hat{v}_i \cdot \hat{c} \rangle^{(1)} = -K_{ij}^{(1)} \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j},$$

$$K_{ij}^{(1)} = \frac{1}{T - \tau_E} \int_0^{T - \tau_E} \hat{v}_i(t + \tau_E) \int_t^{t + \tau_E} \hat{v}_j(t_1) dt_1 dt. \quad (5)$$

После замены переменных $t_1 = t + \tau_E - \theta$ и $t_2 = t + \tau_E$ соотношение (5) можно переписать в виде:

$$K_{ij}^{(1)} = \frac{1}{T - \tau_E} \int_{\tau_E}^T \int_0^{\tau_E} \hat{v}_i(t_2) \hat{v}_j(t_2 - \theta) d\theta dt_2 = \int_0^{\tau_E} B_{v_i v_j}(\theta) d\theta, \quad (6)$$

где $B_{v_i v_j}$ — корреляционная функция i ; j — компонент пульсаций скорости ветра.

Таким образом, в рамках первого приближения метода рекурсивного замыкания коэффициенты турбулентной диффузии $K_{ij}^{(1)}$ выражаются через интегралы от корреляционных функций турбулентных пульсаций скорости ветра.

2. Измерение метеорологических величин и обработка данных. Автоматизированный акустический метеоконекс АМК-03, разработанный в Институте мониторинга климатических и экологических систем

СО РАН [10], измеряет основные метеорологические величины, а также турбулентные пульсации компонент скорости ветра и температуры. Мачта метеокомплекса расположена на крыше здания Института водных и экологических проблем СО РАН.

Длина временных рядов метеопараметров и период временного осреднения, соответственно, не могут быть выбраны произвольно. Как известно [3, 9], все метеорологические явления являются нестационарными. Это приводит к зависимости усредненных значений от периода осреднения. При определенном выборе времени осреднения статистические моменты первого и второго порядков турбулентных пульсаций имеют устойчивые средние значения (область мезомасштабного минимума). Для согласования результатов измерений с результатами теоретической модели распространения примеси, основанной на полуэмпирическом уравнении турбулентной диффузии, необходимо задавать интервал осреднения измеряемых величин примерно 10^2 - 10^3 с.

Метеокомплекс осуществляет измерения в непрерывном режиме. Измеренные значения метеопараметров и результаты их первичной обработки сохраняются в текстовых ASCII-файлах каждые 10 минут. За 10 минутный промежуток времени метеокомплекс измеряет 6000 значений турбулентных пульсаций для каждой компоненты скорости ветра и температуры воздуха.

После накопления результатов измерений осуществлялась селекция данных для дней с различными метеорологическими ситуациями: поля высокого и низкого давления, малоградиентное поле. Также выделялись временные интервалы с различными типами стратификации в приземном слое атмосферы. В настоящей работе анализировались ситуации, соответствующие условиям антициклона и характеризующиеся преобладанием неустойчивой стратификации атмосферы в пограничном слое.

3. Определение компонент тензора турбулентной диффузии. Для обработки результатов измерений авторами разработана программа, которая формирует массивы метеопараметров за определенный временной интервал и рассчитывает компоненты тензора коэффициентов турбулентной диффузии. Программа считывает массив файлов за выбранный временной диапазон, вычисляет авто- и кросс-корреляционную функции случайной величины по заданным значениям случайной величины, интегрирует корреляционные функции и рассчитывает значения искомых величин. Верхний предел для численного интегрирования корреляционных функций (временной масштаб Эйлера) определяется через автокорреляционную функцию пульсаций x -компоненты скорости ветра в точке ее первого обращения в ноль. Рассчитанные корреляционные

функции аппроксимируются В-сплайнами, точка первого обращения корреляционной функции в ноль определяется как корень В-сплайна. Далее вычисляется определенный интеграл от В-сплайна по временному отрезку равному временному масштабу Эйлера. Программа разработана на языке программирования Python и использует возможности библиотек Scipy, Numpy [11] и Statsmodels [12].

По измеренным значениям турбулентных пульсаций компонент скорости приземного ветра рассчитаны временные авто- и кросс-корреляционные функции поля скоростей. Компоненты тензора коэффициентов турбулентной диффузии рассчитываются интегрированием корреляционных функций по времени от нуля до величины временного масштаба Эйлера. Также были получены оценки дисперсии корреляционных функций и среднеквадратичное отклонение для компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии.

4. Анализ полученных результатов. Тензор турбулентной диффузии имеет недиагональный вид, последнее может быть связано с наличием градиентов скорости в пограничном слое атмосферы и соответствующего потока импульса невозможно пренебречь во многих случаях с горизонтально неоднородной подстилающей поверхностью, а также и наличием корреляций между турбулентными пульсациями горизонтальных компонент скорости ветра [13, 14]. Этими корреляциями обычно пренебрегают в рамках наиболее часто используемых градиентных методов, используемых для измерения характеристик турбулентности, а также при проведении оценок характеристик турбулентности с помощью эмпирических соотношений, полученных в рамках теории Монина-Обухова. Анализ данных о турбулентных пульсациях горизонтальных компонент скорости ветра и их корреляциях показал, что между турбулентными пульсациями горизонтальных компонент скорости имеется статистическая связь.

Значения компонент тензора коэффициентов турбулентного диффузии в течение всего промежутка времени испытывали значительные колебания, амплитуда которых увеличивается по мере увеличения интенсивности турбулентного обмена (рис. 1). Однако в целом эти колебания хорошо коррелируют с изменениями турбулентных потоков, измеренных с использованием метеокомплекса. Статистический анализ показал наличие корреляции между значениями вертикальной компоненты K_{zz} тензора (K_{ij} , $i, j = x, y, z$) коэффициентов турбулентной диффузии аэрозоля и другими характеристиками турбулентности: кинетической энергией турбулентности (0.85), вертикальным турбулентным потоком импульса (0.74), интенсивностью атмосферной турбулентности (0.66) и вертикальным турбулентным потоком тепла (0.73).

Проведено сравнение временного хода коэффициента турбулентного обмена K_m , определенного в рамках

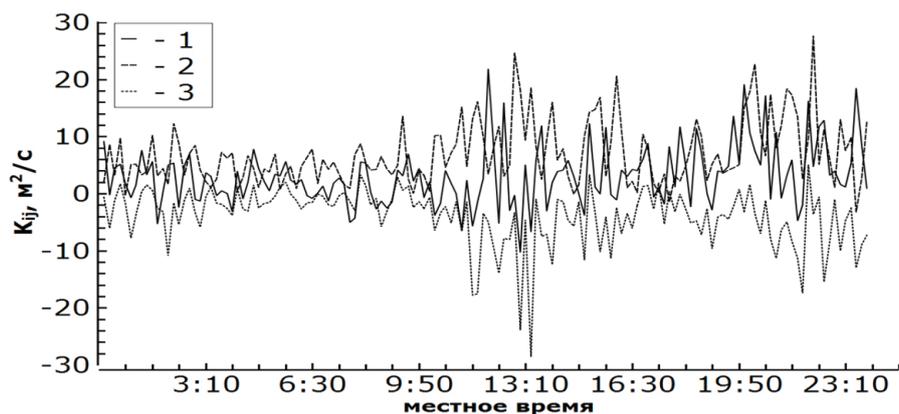


Рис. 1. Временной ход недиагональных компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии: 1 — K_{xy} , 2 — K_{yz} , 3 — K_{xz} . Данные за 11.07.2009

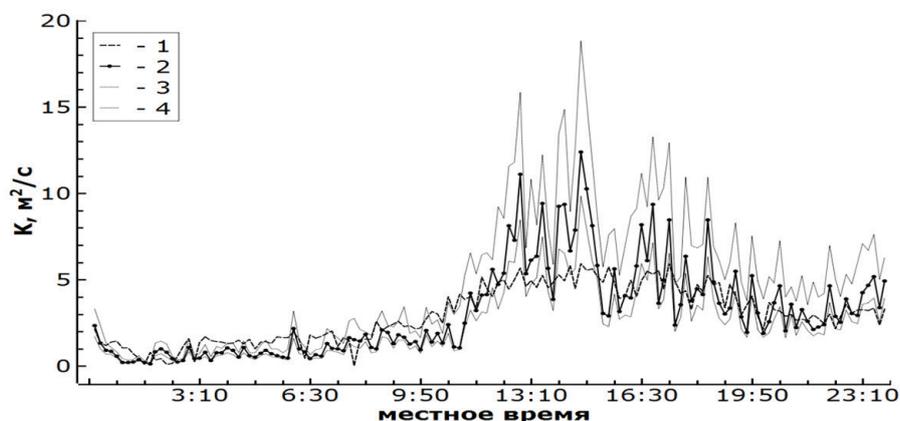


Рис. 2 Временной ход вертикальной диагональной компоненты: 1: K_m — коэффициент турбулентного обмена (теория Монина — Обухова); 2: K_{zz} — вертикальная диагональная компонента тензора коэффициентов турбулентной диффузии; 3,4: K_{zz1} , K_{zz2} — верхняя и нижняя границы среднеквадратичного отклонения величины K_{zz} . Данные за 30.06.2009

теории Монина — Обухова по данным метеоконцентра и вертикальной диагональной компоненты тензора коэффициентов турбулентной диффузии K_{zz} с учетом среднеквадратичного отклонения. В качестве примера на рисунке 2 приведена одна из зависимостей указанных величин. Корреляция между K_{zz} и K_m для рассматриваемого случая составила 0.7. Анализ показал, что в большинстве случаев указанные значения близки и находятся в пределах оценки среднеквадратичного отклонения вертикальной диагональной компоненты K_{zz} тензора K_{ij} турбулентной диффузии.

Заключение. По данным о турбулентных пульсациях компонент скорости ветра в приземном слое рассчитаны временные корреляционные функции турбулентных пульсаций скорости приземного ветра, компоненты тензора коэффициентов турбулентной диффузии аэрозоля и их среднеквадратичное

отклонение. Установлено наличие корреляционной связи между компонентами тензора турбулентной диффузии, кинетической энергией турбулентности, интенсивностью турбулентности и турбулентными потоками в приземном слое атмосферы. Сделан вывод о том, что временные пульсации рассчитанных компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии целом хорошо коррелируют с изменениями кинетической энергии турбулентности и других характеристик турбулентного обмена в приземном слое атмосферы. Проведено сравнение временного хода коэффициента турбулентного обмена K_m , определенного в рамках теории Монина — Обухова по данным метеоконцентра и вертикальной диагональной компоненты K_{zz} тензора коэффициентов турбулентной диффузии. В большинстве случаев различия между указанными величинами находятся в пределах оценки среднеквадратичного отклонения.

Библиографический список

1. Baklanov, A., L.T. Molina, M. Gauss. Megacities, air quality and climate // *Atmospheric Environment*. — 2016. — № 126.
2. Georgiadis T., Lokoshchenko M.A., Screti C., Vagnoli C. Two hundred years of urban meteorology in the heart of Florence // *Proceedings of the International Conference On Urban Climate And History Of Meteorology*. — 2013.
3. Baklanov, A. and B. Grisogono (Eds.). *Atmospheric Boundary Layers: Nature, Theory and Application to Environmental Modelling and Security*. — 2007.
4. Sokhi, R. and A. Baklanov (Eds). *Urban Meteorology and Air Pollution Processes // Special Issue from the 5th International Conference on Urban Air Quality, 29-31 March 2005, Valencia, Spain. Journal Boundary-Layer Meteorology*. — 2007. — № 124(1).
5. Baklanov A., U. Korsholm, A. Mahura, C. Petersen, A. Gross: ENVIRO-HIRLAM: on-line coupled modelling of urban meteorology and air pollution. // *Advances in Science and Research*. — 2008. — № 2.
6. Бызова Н.Д. Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы. — М., 1974.
7. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. — Новосибирск, 1985.
8. Галкин Л.М., Корнейчук А.И. Прямой метод вычисления компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии // *Динамика эколого-экономических систем*. — Новосибирск, 1982.
9. Монин А.С., Яглом А.М. *Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности*. — М., 1967. — Ч. 1.
10. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // *Метеорология и гидрология*. — 2006. — № 11.
11. Документация к библиотекам Scipy и Numpy [Electronic resource]. URL: <https://docs.scipy.org/doc/>
12. Документация к библиотеке Statsmodels [Electronic resource]. URL: <http://www.statsmodels.org/stable/index.html>
13. Бородулин А. И., Майстренко Г. М., Чалдин Б. М. Статистическое описание процесса турбулентной диффузии аэрозолей в атмосфере. Метод и приложения. — Новосибирск, 1992.
14. Бородулин А.И. Измерение тензора коэффициентов турбулентной диффузии в атмосфере и его некоторые свойства // *Оптика атмосферы и океана*. — 1996. — Т. 9, №6.