

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКАЮЩЕЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ КОНВЕКЦИИ И РАССЕЙЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ТЕРМИЧЕСКИ УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ

Людмила Ивановна Курбацкая

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 6, старший научный сотрудник, тел. (383)330-61-52, e-mail: L.Kurbatskaya@ommgp.sccc.ru

Явление городского острова тепла и связанная с ним циркуляция, обусловленная энергией, генерируемой антропогенными источниками, наиболее интенсивна в ночное время при ясном небе и слабом окружающем ветре. Фундаментальными характеристиками ночного острова тепла являются его высота перемешивания, интенсивность, распределения кинетической энергии и температуры, а также, индуцируемая островом тепла циркуляция. При моделировании городского острова тепла необходимо аккуратное описание турбулентной конвекции в случае слабого окружающего ветра, когда турбулентное движение в центре города обусловлено, главным образом, архимедовой силой плавучести. Основная цель состояла в развитии модели турбулентного переноса для описания структуры городского острова тепла и рассеяния примесей в условиях устойчиво стратифицированной окружающей среды. Сформулирована четырехпараметрическая модель турбулентного переноса для описания эволюции полностью турбулентного плума над протяженным поверхностным источником тепла и распределения примеси от поверхностных источников.

Ключевые слова: турбулентность, планетарный пограничный слой, городской остров тепла, крупномасштабная циркуляция, рассеяние примесей, численное моделирование.

MODELING OF PENETRATING TURBULENT CONVECTION AND SCATTERING OF POLLUTION IN A THERMALLY SUSTAINABLE STRATIFIED ENVIRONMENT

Lyudmila I. Kurbatskaya

Institute Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Senior Researcher, phone: (383)330-61-52, e-mail: L.Kurbatskaya@ommgp.sccc.ru

The urban-heat-island phenomenon and its associated circulation, driven by the energy generated by anthropogenic sources are found to be most intense at nighttime under clear skies and weak ambient wind. A thermal plume is generated by an underlying heat island in the form of an area source. The fundamental characteristics of most concern for a nocturnal heat island are its mixing height, intensity, temperature and turbulent kinetic energy distributions, and heat-island-induced circulation. To model the urban-heat-island structure it is necessary to describe correctly the turbulent penetrative convection in the case of near-calm conditions when the ambient wind speed approaches zero and the turbulent motion at the urban center is dominated by the thermal buoyancy force. In most existent mathematical models the turbulence of an urban-heat-island is parameterized. The principal aim of this investigation is the development of turbulent transport model for the simulation of turbulent urban-heat-island structure and pollutant dispersion in the stably stratified environment. The four-parametric turbulent model describing an evolution of fully turbulent low-aspect-ratio buoyant plume with no initial momentum and dispersion of contaminant from a ground-level source under calm and stable stratified conditions is formulated and evaluated.

Key words: turbulence, stable stratification, atmospheric boundary layer, pollution dispersion, modeling.

Введение

При мезомасштабном моделировании структуры полей ветра и температуры город может рассматриваться в виде нагретого “пятна” внутри окружающих его окрестностей [1], а эффекты городской шероховатости на турбулентный перенос импульса, тепла и массы могут быть учтены в параметризованном виде [2, 3]. Поскольку на границе раздела “город-окрестности” развивается внутренний пограничный слой, имеющий как механическое, так и термическое происхождение, желательно сохранить анизотропию турбулентного переноса (в вертикальном и горизонтальном направлениях), которая не может быть адекватно воспроизведена в традиционно используемых одно- и двухпараметрических моделях турбулентного атмосферного пограничного слоя (АПС) (см., например, [2, 3]). Улучшенная мезомасштабная модель турбулентного АПС с анизотропными выражениями для турбулентных потоков импульса и тепла [4, 5] и параметризацией эффектов городской шероховатости на турбулентный перенос позволяет получить [5] картину полей ветра и температуры над урбанизированной поверхностью, которая качественно согласуется с данными наблюдений [6], зафиксировавшими повышение скорости ветра над городом. Кроме того, в силу горизонтальной термической неоднородности, создаваемой городом и его окрестностями, модель позволяет исследовать эффект влияния продольной турбулентной диффузии тепла на такие интегральные характеристики городского пограничного слоя, как его высота [1]. Выражения для турбулентных потоков импульса и тепла модели включают три параметра: кинетическую энергию турбулентности (КЭТ) $E \equiv (1/2)\langle u_i u_i \rangle$, скорость ее диссипации ε и дисперсию турбулентных флуктуаций температуры $\langle \theta^2 \rangle$, которые определяются из решения дифференциальных уравнений переноса трехпараметрической модели турбулентности [7, 8].

Определяющие уравнения эйлеровой диффузионной модели

Для описания рассеяния пассивной примеси в атмосферном пограничном слое (АПС) базовая трехпараметрическая $E - \varepsilon - \langle \theta^2 \rangle$ – модель турбулентности [9] должна быть дополнена уравнениями для осредненной концентрации $C(x_i, t)$, вектора турбулентного потока примеси $f_i \equiv \langle u_i c \rangle$ и корреляции между флуктуациями концентрации и температуры $\langle c \theta \rangle$. Поскольку результаты моделирования переноса активной примеси (тепла) [8] удовлетворительно согласуются с данными измерений [9], для турбулентного потока пассивного скаляра (массы вещества) также использована полностью явная анизотропная алгебраическая модель, полученная [10] в результате упрощения дифференциального уравнения переноса для потока $\langle u_i c \rangle$

$$\frac{D\langle u_i c \rangle}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ \alpha_{1s} \frac{E}{\varepsilon} \langle u_k u_l \rangle \frac{\partial \langle u_i c \rangle}{\partial x_l} \right\} = -\langle u_i u_j \rangle \frac{\partial C}{\partial x_j} - \langle u_j c \rangle \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \alpha_{1c} \frac{\varepsilon}{E} \langle u_i c \rangle + \alpha_{2c} \langle u_j c \rangle \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \alpha_{2c} g_i \beta \langle c \theta \rangle - g_i \beta \langle c \theta \rangle \quad (1)$$

в приближении локально равновесной турбулентности до алгебраического уравнения. В этом приближении левая часть уравнения (1) полагается равной нулю, и уравнение записывается в виде алгебраического уравнения для вектора турбулентного потока концентрации:

$$A_{ij} \cdot f_j = -\frac{E}{\varepsilon} (b_{ij} + \frac{2}{3} E \delta_{ij}) \frac{\partial C}{\partial x_j} + (1 - \alpha_{2c}) \beta g \delta_{i3} \frac{E}{\varepsilon} \langle c \theta \rangle, \quad (2)$$

где $b_{ij} = \langle u_i u_j \rangle - (2/3) E \delta_{ij}$ – тензор анизотропии. Прогностическое уравнение для корреляции $\langle c \theta \rangle$

$$\frac{D\langle c \theta \rangle}{Dt} - Diff_{\langle c \theta \rangle} = -\langle u_j \theta \rangle \frac{\partial C}{\partial x_j} - \langle u_j c \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial x_j} - \alpha_{3c} \frac{\varepsilon}{E} \langle c \theta \rangle \quad (3)$$

также упрощается в приближении слабо-равновесной турбулентности до алгебраического уравнения:

$$\langle c \theta \rangle = -\frac{1}{\alpha_{3c}} \frac{E}{\varepsilon} \left(\langle u_j c \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial x_j} + \langle u_j \theta \rangle \frac{\partial C}{\partial x_j} \right). \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2), получаем алгебраическое уравнение для потока f_j :

$$B_{ij} \cdot f_j = -\frac{E}{\varepsilon} \left\{ (b_{ij} + \frac{2}{3} E \delta_{ij}) + \frac{(1 - \alpha_{2c})}{\alpha_{3c}} \beta g \delta_{i3} \frac{E}{\varepsilon} \langle u_j \theta \rangle \right\} \frac{\partial C}{\partial x_j}, \quad (5)$$

где

$$B_{ij} = \alpha_{1c} \delta_{ij} + \frac{E}{\varepsilon} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \left(\frac{E}{\varepsilon} \right)^2 \frac{(1 - \alpha_{2c})}{\alpha_{3c}} \beta g \delta_{i3} \frac{\partial \Theta}{\partial x_j} \quad (6)$$

Выражения для вертикального $\langle w c \rangle$ и горизонтального $\langle u c \rangle$ турбулентных потоков концентрации выводятся с помощью символьной алгебры из (5) и записываются в следующем виде:

$$-\langle w c \rangle = \frac{1}{D} \left(\alpha_{1c} \frac{E}{\varepsilon} \left[\langle w^2 \rangle + \alpha^* \lambda_1 \langle w \theta \rangle \right] \right) \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{1}{D} \left(\alpha_{1c} \frac{E}{\varepsilon} \left[\langle u w \rangle + \alpha^* \lambda_1 \langle u \theta \rangle \right] \right) \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
-\langle uc \rangle = & \frac{1}{D} \left(\frac{E}{\varepsilon} \left[\langle u^2 \rangle \lambda_2 + \frac{E}{\varepsilon} \frac{\partial U}{\partial z} (\langle uw \rangle + \alpha^* \lambda_1 \langle u\theta \rangle) \right] \right) \frac{\partial C}{\partial x} + \\
& + \frac{1}{D} \left(\frac{E}{\varepsilon} \left[\langle uw \rangle \lambda_2 + \frac{E}{\varepsilon} \frac{\partial U}{\partial z} (\langle w^2 \rangle + \alpha^* \lambda_1 \langle w\theta \rangle) \right] \right) \frac{\partial C}{\partial z}.
\end{aligned} \tag{8}$$

В (7)–(8) введены обозначения: $\alpha^* = (1 - \alpha_{2C}) / \alpha_{3C}$, $\lambda_1 = \beta g(E / \varepsilon)$, $\lambda_3 = \beta g(E / \varepsilon)^2$, $\lambda_2 = \alpha_{1C} + \frac{E}{\varepsilon} \frac{\partial W}{\partial z} + \alpha^* \lambda_3 \frac{\partial \Theta}{\partial z}$.

С учетом выражений (7)–(8) уравнение для средней концентрации

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} C \cdot U + \frac{\partial}{\partial z} C \cdot W = -\frac{\partial}{\partial z} \langle wc \rangle - \frac{\partial}{\partial x} \langle uc \rangle \tag{9}$$

в пренебрежении (при больших числах Рейнольдса) молекулярной диффузией приобретает замкнутый вид. Откалиброванные численные значения констант диффузионной модели (7) – (9) равны: $\alpha_{1C} = \alpha_{3C} = 3,28$, $\alpha_{2C} = 0,4$.

Результаты численного моделирования дисперсии пассивной примеси над городом

Тестовые испытания модели проведены для критической метеорологической ситуации, возникающей в атмосферном пограничном слое в условиях слабого окружающего ветра и устойчивой стратификации атмосферы. Такая ситуация типична для формирования над городом турбулентной циркуляции воздуха – явления, называемого городским островом тепла. Было рассмотрено два сценария. Первый сценарий строился для лабораторного эксперимента [9], в котором проникающая турбулентная конвекция индуцируется поверхностным постоянным источником тепла в виде круглой пластины заданного диаметра. Этот источник тепла моделирует прототип городского острова тепла с малым относительным удлинением (вертикальный линейный масштаб много меньше горизонтального масштаба). Уравнения гидродинамики, описывающие циркуляцию над городским островом тепла малого относительного удлинения, могут быть записаны без учета силы Кориолиса и радиации в цилиндрической системе координат.

Кроме того, может быть принято гидростатическое приближение, а эффекты плавучести учтены в приближении Буссинеска [7, 8]. Необходимые метеорологические параметры такие, как средний ветер, температура, турбулентные величины полей скорости и температуры вычислялись с помощью трехпараметрической модели турбулентного переноса. Распределения этих величин в турбулентном термическом факеле, полученные для цилиндрической геомет-

рии турбулентной циркуляции над городским островом тепла, приведены в [7], и в настоящих тестах они используются в виде “входной информации” для диффузионных вычислений. Уравнения (1-9) модели записываются в цилиндрических координатах для искомых средней концентрации $C(r, z, t)$ и вторых моментов поля концентрации $\langle u_r c \rangle$, $\langle u_z c \rangle$ и $\langle c \theta \rangle$ [7].

Этот сценарий преследовал основную цель – выяснить роль эффектов плавуности на распределение средней концентрации примеси в перемешанном и инверсионном слоях.

Результаты моделирования структуры турбулентной циркуляции над городским островом тепла (различных величин турбулентных полей скорости и температуры) получены ранее, их можно найти в [1,10].

Следует при этом отметить, что поскольку нет данных измерений по рассеянию примеси от поверхностного источника над городским островом тепла в рассматриваемый критический метеорологический период, нет возможности подвергнуть результаты численной реализации диффузионных моделей прямой количественной проверке путем сопоставления с данными измерений. О степени их достоверности можно судить по косвенным признакам. Во-первых, аналогичная по своей сути модель переноса активной примеси (тепла) дает результаты [1], вполне удовлетворительно согласующиеся с данными прямых инструментальных измерений [11]. Во-вторых, точность численного решения проверена на последовательно измельченных сетках (25×116 узлов по горизонтали и вертикали, соответственно, и сетке 50×232 узла).

Непрерывный источник примеси заданной производительности Q реализован при численном моделировании в двух модификациях: а) – линейный размер источника совпадает с диаметром D городского острова тепла (нагреваемой пластины радиуса $D/2$) и б) – линейный размер источника составляет одну пятую часть радиуса. Начало источника совпадает с осью расчетной цилиндрической области ($r/D = 0$). На источнике задается постоянный вертикальный поток примеси: $-D_m \cdot (\partial C / \partial z) = H_c$, где $D_m = \nu / Sc$ – коэффициент молекулярной диффузии, ν – коэффициент кинематической вязкости, Sc – молекулярное число Шмидта, величина потока примеси $H_c = Q / (\Delta * D)$, $\Delta = 0,5$ или $0,1$, соответственно. Величина Q задавалась из условия, чтобы число Рейнольдса $Re = Q / \nu$ обеспечивало поступление примеси из источника без начального импульса и, таким образом, лимитировалось скоростью натекающего на источник внешнего потока.

В начальный момент времени окружающая среда находится в покое, начальные поля концентрации C и корреляции $\langle c \theta \rangle$ равны нулю. На рис. 1 нанесены: (а) – контуры концентрации для источника примеси, протяженность которого совпадает с протяженностью источника тепла (диаметром нагреваемого диска D), (б) – контуры функции тока, показывающие формирование в пределах перемешанного слоя ($0 \leq z/z_i \leq 1$) двух интенсивных вихрей, которые и формируют мощное восходящее движение в центральной части острова

тепла. Рис. 1, *a* показывает, что под влиянием интенсивного восходящего движения примесь, не накапливаясь вблизи поверхности, переносится в перемешанный слой и далее в слой инверсии, рассеивается в горизонтальном направлении, а также проникает за пределы инверсионного слоя ($z/z_i \approx 1$). На рис. 2 показаны: (*a*) – контуры концентрации для источника примеси, протяженность которого равна одной пятой протяженности источника тепла, (*b*) – контуры функции тока. В случае источника меньшей протяженности картина распространения примеси качественно похожа на картину, приведенную на рис. 1, *a*), однако в количественном распределении концентрации по высоте перемешанного слоя имеются различия.

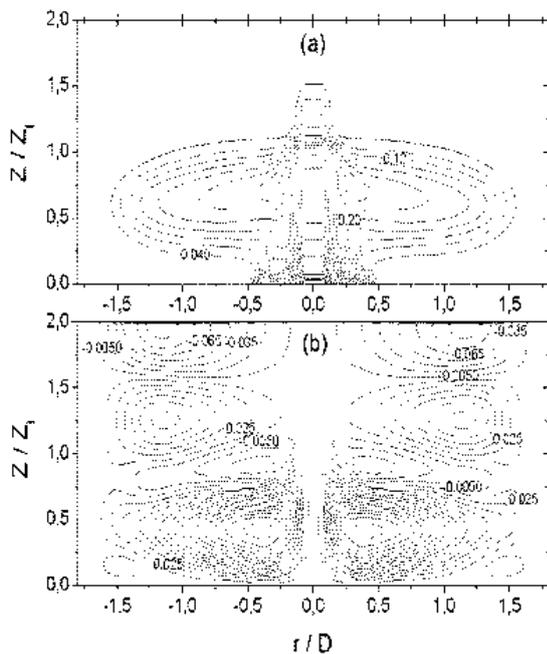


Рис. 1. Контурсы концентрации (*a*) и функции тока (*b*) для дисперсии примеси от непрерывного источника протяженности $0,5D$

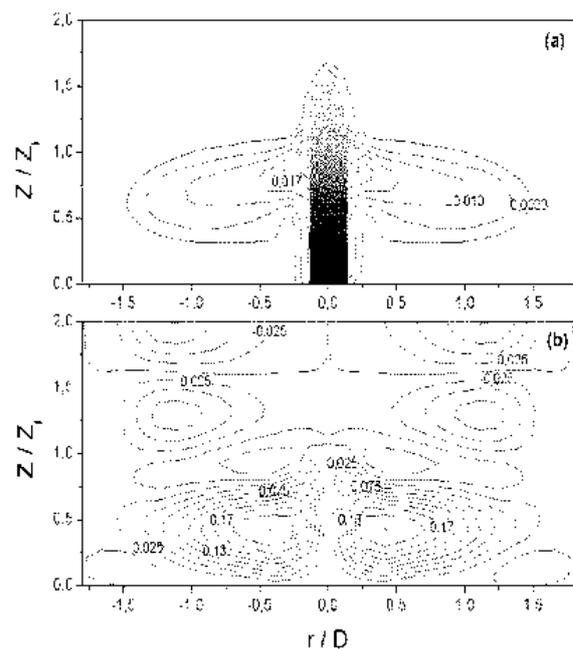


Рис. 2. Контурсы концентрации (*a*) и функции тока (*b*) для дисперсии примеси от непрерывного источника протяженности $0,1D$

Так, например, в сечении $z/z_i = 0,4$ (рис. 3, *a*, *b*) максимальная концентрация для источника меньшей протяженности, примерно, в пять раз меньше, чем для источника, размеры которого совпадают с протяженностью острова тепла (при одинаковой производительности Q от источника большей протяженности эмиссия примеси в ед. времени также, примерно, больше в пять раз). Проникновение примеси за пределы инверсионного слоя зафиксировано в лабораторных экспериментах по распространению пассивной примеси от непрерывного и мгновенного источников в конвективном пограничном слое [11].

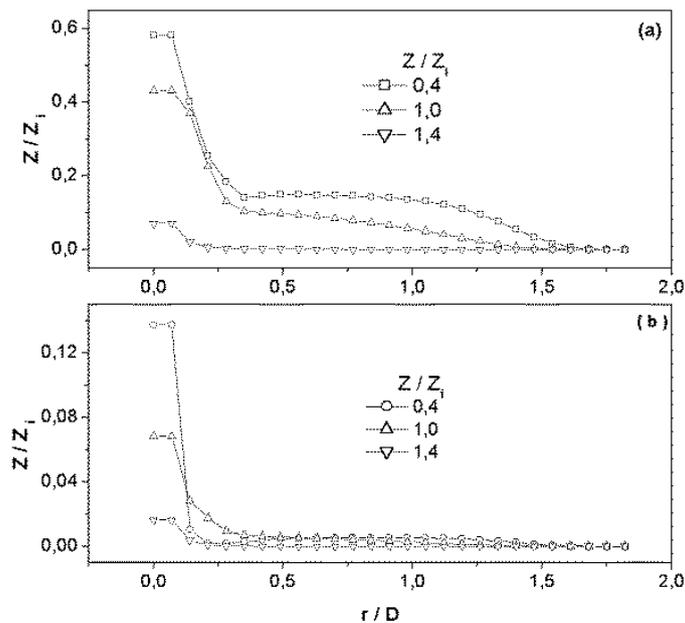


Рис. 3. Радиальные профили безразмерной концентрации C/C_{\max} для непрерывного источника пассивной примеси: а) источник протяженности $0,1D$; б) источник протяженности $0,5D$

Второй сценарий рассматривался для двумерного случая. Горизонтальная протяженность области интегрирования равнялась 100 км. Разрешение по горизонтали составляло 1 км, по вертикали – 10 м в пределах первых 50 м от подстилающей поверхности, с последующим растяжением сетки в вертикальном направлении вплоть до высоты 1000 м (выше, до 3000 м, шаг сетки постоянен). Топография поверхности плоская, с урбанизированной поверхностью (городом) протяженностью 10 км, расположенной в центре вычислительной области с абсциссой от 45 км до 55 км (на рис. 4 отмечен темной полоской). Метеорологические начальные условия определялись заданием геострофического ветра ($U_g = 3$ м/с) в направлении с запада на восток и атмосферной термической стратификацией, равной $3,5$ К/км для потенциальной температуры. Данные измерений температуры поверхности Земли аппроксимировались выражением $\Theta_g(x, 0, t) = 6 \sin(\pi t / 43200)$, где t – текущее время в секундах. Это единственное нестационарное граничное условие задачи, которое моделирует 24-часовой цикл нагревания солнцем земной поверхности. Остров тепла задавался в виде контраста температуры по отношению к температуре поверхности по той же формуле, но с амплитудой, увеличенной на 4 градуса.

На рис. 4 показаны распределения концентрации на нижнем расчетном уровне вблизи урбанизированной поверхности (города) в 13 часов дня и в 7 часов утра. Можно видеть, что к 07 часам утра происходит накопление концентрации трассера (символы ■ на рис. 4) в пределах города.

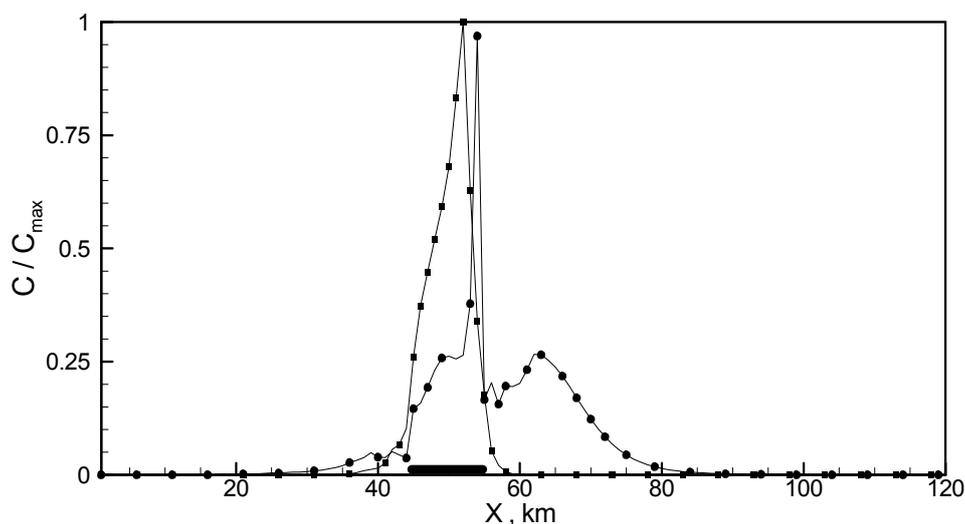


Рис. 4. Концентрация пассивного трассера C на самом нижнем расчетном уровне на 07 часов полных первых суток моделирования (■) и на 13 часов второго дня моделирования (●), как функция горизонтального расстояния

Заключение

Сформулирована эйлеровая дисперсионная модель для описания распространения пассивной примеси в городском атмосферном пограничном слое. Полностью явные алгебраические выражения для компонент вектора турбулентного потока концентрации физически корректно учитывают анизотропию турбулентного переноса, и эффекты плавучести на перенос примеси. Параметризация городской шероховатости, учитывающая как механические факторы (лобовое сопротивление зданий городской застройки), так и термические факторы (городской остров тепла), показывает, что концентрация пассивного трассера вблизи поверхности выше в ночные и ранние утренние часы по сравнению с концентрацией трассера в дневные часы. Кроме того, наличие пика концентрации вниз по ветру за пределами города отражает воздействие города на дисперсию трассера за его пределами.

Благодарности

Работа была выполнена в рамках госзадания Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН № 0315-2016-0004 и при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта 18-48-540005.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fernando H., Lee S., Anderson J., Princevac M., Pardyjak E. and Grossman-Clarke S. Urban Fluid Mechanics: Air Circulation and Contaminant Dispersion in Cities // Environmental Fluid Mechanics. – 2001. – Vol. 1. – P. 107–164.

2. Martilli A. Numerical Study of Urban Impact on Boundary Layer Structure: Sensitivity to Wind Speed, Urban Morphology, and Rural Soil Moisture // *J. Appl. Meteor.* – 2002. – Vol. 41, No. 12. – P. 1247–1266.
3. Vu T., Ashie Y., Asaeda T. A $k - \epsilon$ turbulence closure model for the atmospheric boundary layer including urban canopy // *Bound.-Layer Meteor.* – 2002. – Vol. 102. – P. 459–490.
4. Курбацкий А. Ф. Численное исследование воздействия поверхностного теплового пятна на структуру атмосферного пограничного слоя // *Теплофизика и аэромеханика.* – 2005. – Т. 12. – № 1. – С. 41–60.
5. Курбацкий А. Ф. Улучшенная вычислительная модель для турбулентного атмосферного пограничного слоя с параметризацией городской шероховатости // *Вычислительные технологии.* – 2005. – Т. 10. – Часть 2. – С. 53–60.
6. Bornstein R., Johnson D. Urban-Rural Wind Velocity Differences // *Atmos. Environ.* – 1977. – Vol. 11. – P. 597–604.
7. Курбацкий А. Ф., Курбацкая Л. И. Трехпараметрическая модель турбулентности для атмосферного пограничного слоя над урбанизированной поверхностью // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2006. – Т. 42. – № 4. – С. 476–494.
8. Kurbatskii A. Computational modeling of the turbulent penetrative convection above the urban heat island in stably stratified environment. // *J. Appl. Meteor.* – 2001. – Vol. 40. – No. 10. – P. 1748–1761.
9. Lu J., Arya P. et al. A Laboratory Study of the Urban Heat Island in a Calm and Stably Stratified Environment. Part I and II // *J. Appl. Meteor.* – 1997. – Vol. 36. – No. 10. – P. 1377–1402.
10. Курбацкий А. Ф., Курбацкая Л. И. Численное исследование городского острова тепла: верификация эйлеровых моделей атмосферной диффузии // *Оптика атмосферы и океана.* – 2004. – Т. 17. – № 5-6. – С. 470–477.
11. Snyder W. H., Lawson Jr. R.E., Shipman M.S., Lu J. Fluid modelling of atmospheric in the convective boundary layer // *Bound. Layer Meteorol.* – 2002. – Vol. 102. – No. 3. – P. 335–366.

© Л. И. Курбацкая, 2019