

# Численное моделирование городской и региональной атмосферы и оценка ее влияния на перенос примеси\*

СТАРЧЕНКО А.В.  
*Томский Государственный Университет*

8 января 2004 г.

A numerical model and results of its application to investigation of impact of formed near industrial center atmospheric processes on transport of anthropogenic aerosol and gaseous compounds of atmospheric air are presented.

## **Введение**

Широкий круг задач физики атмосферы, климата, а также охраны окружающей среды в настоящее время решается с использованием методов математического моделирования. В крупных центрах исследования атмосферных процессов разработаны и активно применяются моделирующие системы (например, CMAQ (<http://www.cmaqcenter.org>), EURAD (EUROpean Acid Deposition model, <http://www.eurad.uni-koeln.de>), European Zooming Model (<http://aix.meng.auth.gr>)) при проведении сценарного анализа, при прогнозе погоды и оценке уровня загрязненности атмосферного воздуха.

В рамках проекта «Интегрированная информационно-измерительная Система для Мониторинга и Управления Состоянием окружающей среды в городе/регионе (на примере Томской области)» Пятой Рамочной Программы Европейского Сообщества (<http://isiremm.iao.ru>) создана компьютерная моделирующая система (МС) для анализа распределений метеорологических параметров и концентраций примесей в атмосферном пограничном слое (АПС) над неоднородной шероховатой подстилающей поверхностью. МС предназначена для изучения причин образования повышенного уровня загрязнения воздушного бассейна для исторических дат с целью понимания и управления качеством городского воздуха; для выполнения сценарных расчетов для оценки последствий размещения проектируемых промышленных предприятий, аэропортов и автострад.

Компонентами МС являются: блок инициализации модели, предназначенный для задания свойств подстилающей поверхности, результатов наземных наблюдений и данных о вертикальном распределении метеопараметров; информации о точечных, площадных и линейных источниках загрязнения воздуха; негидростатическая мезомасштабная метеорологическая модель; эйлерова модель переноса загрязнений; блок визуализации данных.

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Программы INCO COPERNICUS-2 Европейской комиссии, проект № ICA2-СТ-2000-10024

# 1. Численная негидростатическая модель атмосферного пограничного слоя

Для описания поля ветра и турбулентной структуры атмосферы использовались законы сохранения массы, импульса и энергии в дифференциальной форме, учитывающие пространственный и нестационарный характер атмосферных процессов. При этом применялись следующие упрощающие допущения.

- Предполагалось, что плотность воздуха зависит от давления, температуры, состава атмосферы, но вариации плотности с течением времени незначительны, и можно использовать предположение о квазистационарном характере ее изменения [1].
- В численной модели не учитывались процессы, связанные с фазовым превращением водяного пара в атмосфере (образование дождевой, облачной влаги, града, снега и т.п.). Однако процессы конденсации и испарения на подстилающей поверхности принимались во внимание.
- Радиационные тепловые потоки не модифицируются в атмосфере.
- Процессы молекулярной диффузии незначительны по сравнению с турбулентным обменом.

С учетом приведенных выше допущений система уравнений гидротермодинамики атмосферного пограничного слоя примет вид [1–3]:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f v + K_H \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_Z^m \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \rho f u + K_H \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_Z^m \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + K_H \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_Z^m \frac{\partial w}{\partial z} \right), \quad (4)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = K_H \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_Z^h \frac{\partial \theta}{\partial z} \right), \quad (5)$$

$$\rho \left( \frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_Z^h \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_Z^h \frac{\partial q}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_Z^h \frac{\partial q}{\partial z} \right), \quad (6)$$

$$p = \rho R T, \quad R = R_0 \left[ \frac{1-q}{M_{air}} + \frac{q}{M_{H_2O}} \right]. \quad (7)$$

Здесь  $x, y, z$  — декартовы координаты; ось  $Ox$  направлена на восток, ось  $Oy$  — на север;  $u, v, w$  — компоненты вектора скорости ветра;  $\rho, p, q, T$  — плотность, давление, влажность и температура воздуха;  $f$  — параметр Кориолиса;  $K_H, K_Z^m, K_Z^h$  — коэффициенты турбулентной диффузии (горизонтальной, вертикальной для количества движения и тепла);  $g$  — ускорение свободного падения;  $\theta = T(p_0/p)^{R/c_p}$  — потенциальная температура;  $R_0$  — газовая постоянная;  $M_{air}, M_{H_2O}$  — молекулярный вес сухого воздуха и паров воды;  $c_p = (1-q)c_{p_{air}} + qc_{p_{H_2O}}$  — теплоемкость воздуха. Коэффициенты турбулентной диффузии  $K_Z^m, K_Z^h$  рассчитывались с использованием двухпараметрической модели турбулентности, опирающейся на прогностические трехмерные уравнения для энергии турбулентности и масштаба турбулентности [4]:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} + w \frac{\partial k}{\partial z} \right) = K_Z^m \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{g}{\theta} K_Z^h \frac{\partial \theta}{\partial z} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left( 1, 2\sqrt{kl} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 1, 2\sqrt{kl} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( 1, 2\sqrt{kl} \frac{\partial k}{\partial z} \right) - \frac{C_D \rho k^{1,5}}{l}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial l}{\partial t} + u \frac{\partial l}{\partial x} + v \frac{\partial l}{\partial y} + w \frac{\partial l}{\partial z} \right) = \frac{C_{L1} l}{k} \left\{ K_Z^m \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{g}{\theta} K_Z^h \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left( 1, 2\sqrt{kl} \frac{\partial l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 1, 2\sqrt{kl} \frac{\partial l}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( 1, 2\sqrt{kl} \frac{\partial l}{\partial z} \right) + C_{L2} \sqrt{k} \left[ 1 - \left( \frac{l}{\kappa z} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$C_{L1} = -0,12; C_{L2} = 0,2,$$

$$C_D = 0,189;$$

и алгебраические соотношения

$$K_Z^m = \rho \sqrt{kl} C_m;$$

$$K_Z^h = \rho \sqrt{kl} C_h;$$

$$C_m = 0,5; C_h = 0,67.$$

Коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии  $K_H$  в уравнениях (2)–(5) вычисляется по формуле

$$K_H = \rho c L^2 \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (10)$$

где  $c$  — константа,  $L$  — горизонтальный шаг вычислительной сетки. На начальный момент времени при  $t = 0$

требуется определить пространственное распределение параметров, важных с точки зрения предсказания последующей эволюции динамического и термического состояния атмосферного пограничного слоя. Как правило, эти данные получают или с использованием результатов наземных и дистанционных наблюдений, либо с привлечением расчетных данных, выполненных с использованием глобальных или региональных моделей.

В данной работе инициализация численной модели проводилась следующим образом. В начальный момент времени значения компонент горизонтальной скорости, потенциальной

температуры и удельной влажности воздуха задавались с привлечением данных о вертикальной структуре атмосферы, получаемых ежедневно в 00.00 часов местного времени со станции г. Новосибирск (82053'E; 55001'N), и наземных наблюдений, проводимых на метеорологической станции г. Томска (84058'E; 56025'N). Далее в течение шести часов в режиме непосредственного численного интегрирования производилась адаптация модели к ландшафтным и метеорологическим условиям исследуемого региона.

Граничные условия для уравнений (1)–(7) и (8), (9) задаются на шести гранях параллелепипеда, ограничивающего область исследования. На верхней границе при  $z = H$  ( $H > 2000\text{м}$ ) использовались условия слабого влияния поверхностных возмущений

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = w = \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial l}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma - const. \quad (11)$$

На открытых боковых границах применялись так называемые «радиационные» условия [5]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + C_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \frac{\partial \varphi_S}{\partial t} + C_\varphi \frac{\partial \varphi_S}{\partial n}; \quad \frac{\partial w}{\partial n} = 0; \quad (12)$$

где  $n$  - внешняя нормаль к граничной поверхности;  $\varphi = u, v, \theta, q$ ; индекс ' $S$ ' соответствует «крупномасштабным» значениям переменных, которые определяются из наблюдений и последующей интерполяции либо из результатов применения моделей глобального или регионального масштаба. Фазовая скорость  $C_\varphi$  вычисляется для каждой переменной  $\varphi$  с использованием ее численных значений в приграничных узлах сетки в предшествующие моменты времени.

В приповерхностной части области исследования граничные условия, как правило, задаются в нижнем вычислительном уровне (первом узле вычислительной сетки над поверхностью). Положение этого вычислительного уровня выбирается таким образом, чтобы он находился в приземном слое, где справедливы положения теории подобия Монина-Обухова. Тогда при  $z = z_1 > 10z_0$  ( $z_0$  — высота шероховатости) можно рассматривать следующие граничные условия [1,2]:

$$K_Z^m \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\rho_1 v_*^2 u_1}{\sqrt{u_1^2 + v_1^2}};$$

$$K_Z^m \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\rho_1 v_*^2 v_1}{\sqrt{u_1^2 + v_1^2}};$$

$$K_Z^h \frac{\partial \theta}{\partial z} = \rho_1 v_* \theta_*;$$

$$K_Z^h \frac{\partial q}{\partial z} = \rho_1 v_* q_*;$$

$$(K_Z^m)_1 = \frac{\rho_1 \kappa v_* z_1}{\varphi_u(\zeta_1, \zeta_0)};$$

$$\zeta_1 = z_1/L;$$

$$\zeta_0 = \zeta_1 z_0/z_1.$$

Здесь  $L$  — масштаб Мони́на-Обухова,  $v_*$ ,  $\theta_*$ ,  $q_*$  — масштабы приземной скорости, потенциальной температуры, влажности, которые определяются по следующим формулам:

$$v_* = \frac{\kappa \sqrt{u_1^2 + v_1^2}}{f_u(\zeta_1, \zeta_0)};$$

$$\theta_* = \frac{\theta_1 - \theta_0}{f_\theta(\zeta_1, \zeta_0)};$$

$$q_* = \frac{q_1 - q_0}{f_\theta(\zeta_1, \zeta_0)}.$$

Значения безразмерного параметра  $\zeta(x, y)$  при  $z = z_1$  вычисляются итерационным методом из следующего нелинейного уравнения

$$\frac{\zeta_1 f_\theta(\zeta_1, \zeta_0)}{f_1^2(\zeta_1, \zeta_0)} = \frac{gz_1(\theta_1 - \theta_0)}{\theta(u_1^2 + v_1^2)}, \quad (13)$$

где  $f_u, f_\theta, \varphi_u$  — эмпирические функции [1]. Температура поверхности  $\theta_0$  определяется на основе численного решения прогностического уравнения Блэкадара:

$$\frac{\partial \theta_0}{\partial t} = \frac{3,72G_s}{c_s \rho_s d} - \frac{7,4(\theta_0 - T_s)}{\tau_d}, \quad (14)$$

где  $c_s, \rho_s, T_s$  — теплоемкость, плотность и температура нижних слоев почвы соответственно;  $\tau_d = 86400$  сек — протяженность суток в секундах;  $d = \sqrt{\lambda_s \tau_d / \rho_s c_s}$  — глубина эффективного слоя почвы, участвующего в обмене теплом с атмосферой. Поверхностный тепловой поток  $G_s$  вычисляется по формуле

$$G_s = (1 - A)F_S + F_A - F_L - H_s - E_s, \quad (15)$$

где  $A$  — альbedo подстилающей поверхности;  $F_S, F_L$  — результирующие потоки коротковолнового (солнечного) и суммы излучения с поверхности Земли и длинноволнового излучения атмосферы.  $F_S, F_L$  вычисляются на основе законов Альбрехта и Брента [2]. Потоки тепла за счет адвекции и потоки тепла, сопровождающие фазовые превращения воды на поверхности, определяются как

$$H_s = -\rho_1 c_p v_* \theta_*; E_s = -\rho_1 L_w v_* q_*. \quad (16)$$

Здесь  $c_p$  — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении,  $L_w$  — скрытая теплота образования водяного пара. Антропогенная составляющая суммарного теплового потока  $F_A$  на территории города вычислялась на основе эмпирической зависимости [2]:

$$F_A = \begin{cases} 20 + 28 \sin\left(\frac{\pi(t(\text{hour})-6)}{18}\right), & 6 \leq t(\text{hour}) \leq 24 \\ 20, & 0 \leq t(\text{hour}) \leq 6 \end{cases}, \quad (17)$$

где  $t(\text{hour})$  — время суток в часах.

Значение удельной влажности воздуха вблизи поверхности  $q_0$  рассчитывалось на основе соотношения [6]

$$q_0 = \Psi q_{sat} + (1 - \Psi) q_1, \quad (18)$$

где  $\Psi$  — параметр испарения, который изменяется от 0 до 1 и зависит от категории землепользования (вода:  $\Psi = 1$ , сухая почва:  $\Psi = 0$ ),  $q_{sat}, q_1$  — влажность воздуха в насыщенном состоянии и влажность воздуха при  $z = z_1$ .

Для решения поставленной задачи используется численный метод, опирающийся на представление термодинамических и динамических величин в виде суммы слагаемых: базового значения и вариации, обусловленной мезомасштабными возмущениями. Такой подход позволяет значительно ускорить вычислительный процесс [2,5]. Так, например, давление в уравнениях движения (2)-(4), согласно [6], можно разложить на четыре слагаемых:

$$p(t, x, y, z) = p_0(z) + p_g(t, x, y) + p_h(t, x, y, z) + p_{nh}(t, x, y, z), \quad (19)$$

где  $p_0(z), \rho_0(z)$  — давление и плотность <стандартной> атмосферы, связанные через уравнение состояния и гидростатики;  $p_g(t, x, y)$  — составляющая давления, которая через уравнения Экмана [1] определяет компоненты геострофического ветра  $U_g(t), V_g(t)$ ; сумма  $p_0 + p_g$  представляет базовое значение давления, а гидростатическая  $p_h$  и негидростатическая  $p_{nh}$  составляющие в сумме есть вариации давления, причинами которых являются мезомасштабные процессы. Гидростатическая составляющая давления рассчитывается из уравнения «гидростатического» типа

$$\frac{\partial p_h}{\partial z} = (\rho_0 - \rho)g. \quad (20)$$

Нижняя граница области исследования соприкасается с поверхностью Земли, поэтому, чтобы учесть неровности рельефа при построении вычислительной сетки, к прогностическим уравнениям было применено преобразование координат вида:

$$\xi_1 = x, \xi_2 = y, \xi_3 = H \frac{z - \delta(x, y)}{H - \delta(x, y)}, \quad (21)$$

где  $\delta(x, y)$  — функция, описывающая превышение поверхности Земли над уровнем моря;  $H$  — верхняя граница области исследования.

Задача решается численно методом конечного объема. Область исследования разбивается на заданное число непересекающихся объемов- параллелепипедов, горизонтальные размеры которых постоянны, а вертикальный размер уменьшается при приближении к поверхности Земли по логарифмическому закону. Вертикальный размер конечного объема, лежащего на поверхности Земли составляет величину порядка 20 метров. В численном методе используются разнесенные сетки: компоненты вектора скорости ветра определяются на соответствующих гранях объемов, в то время как значения скалярных характеристик связываются с центром каждого объема. Каждое дифференциальное уравнение интегрируется по отдельному конечному объему. При вычислении интегралов применяются различные интерполяционные формулы, обеспечивающие получение конечноразностных соотношений со вторым порядком аппроксимации по времени (схема Кранка-Николсона) и пространственным координатам. Адвективные члены прогностических уравнений аппроксимируются с использованием монотонизированной противопотоковой схемы Ван Лира [7].

Полученные разреженные системы алгебраических уравнений решаются явным методом Н.И. Булеева с компенсацией [8]. Согласование поля давления с векторным полем скорости производится с использованием алгоритма SIMPLE [9].

## 2. Моделирование переноса примеси в атмосферном пограничном слое

К настоящему времени разработано большое количество разнообразных моделей различного уровня сложности для расчета переноса загрязнителей воздуха [1,4,10]. Наиболее простые из них — модели гауссова типа — широко используются при оценке и прогнозе качества воздуха над индустриальными центрами. Более сложные, но применимые с меньшими ограничениями, дифференциальные модели реализуются, как правило, численно с использованием высокопроизводительной компьютерной техники.

В данной работе перенос загрязнений, выбрасываемых высотными точечными, наземными линейными (автотранспорт) и площадными источниками, рассчитывается на основе эйлеровой модели атмосферной диффузии [2,4].

В основе этой модели лежит использование прогностического уравнения «адвекции-диффузии»:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial wc}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_z^h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_z^h \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z^h \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q. \quad (22)$$

Здесь  $c$  — концентрация примеси ( $\text{мг/м}^3$ ),  $Q$  — источниковый член, моделирующий поступление примеси и ее сухое осаждение. В качестве граничных условий для уравнения (22) применяются простые градиентные условия на боковых границах области исследования, а также на нижней и верхней границах. Технология численного интегрирования уравнения (22) опирается на аппроксимации второго порядка по времени и координатам и использование итерационного явного метода Н.И. Булеева [8] для решения полученных систем алгебраических уравнений.

При расчете концентраций компонентов примеси, который выполняется после решения уравнений метеорологической модели, для ускорения получения результатов применяется многопроцессорная вычислительная техника с распределенной памятью (кластерные системы ТГУ и ИОА СО РАН). Организация параллельных вычислений осуществляется с использованием функций стандарта MPI, при этом реализуется геометрический принцип распараллеливания численного алгоритма, когда подлежащие определению сеточные значения концентраций равномерно распределяются по имеющимся в наличии вычислительным узлам [11]. В параллельном алгоритме используется одномерная декомпозиция области с межпроцессорным обменом сеточных значений, расположенных у общих границ подобластей.

## 3. Результаты расчетов

Разработанная компьютерная моделирующая система была применена к исследованию влияния метеорологических условий на характер распространения антропогенной примеси над городом Томском. При расчете характеристик АПС выбиралась область размером  $200 \times 200 \text{ км}^2$ , в которой располагается индустриальный центр. Географические координаты левого нижнего угла -  $83,4265^\circ\text{E}$ ,  $55,1407^\circ\text{N}$ . Для детализации поля ветра и распределения турбулентных характеристик затем с использованием полученных данных проводился расчет для вложенной области размером  $50 \times 50 \text{ км}^2$ , в центре которой находится г. Томск ( $85,0^\circ\text{E}$   $56,5^\circ\text{N}$ ). Такой подход позволил повысить разрешение метеорологической модели до 1 км и использовать в расчетах 30 уровней по вертикальной координате. Вертикальный

размер области исследования равен 2500 м. После расчета аэродинамики и температурного режима пограничного слоя, выполняются пострасчеты по дисперсии основных загрязнителей городской атмосферы. Для оценки содержания вредных веществ в атмосфере используется расчетная сетка с шагом по горизонтали 500 м, по вертикали размеры сеток совпадают.

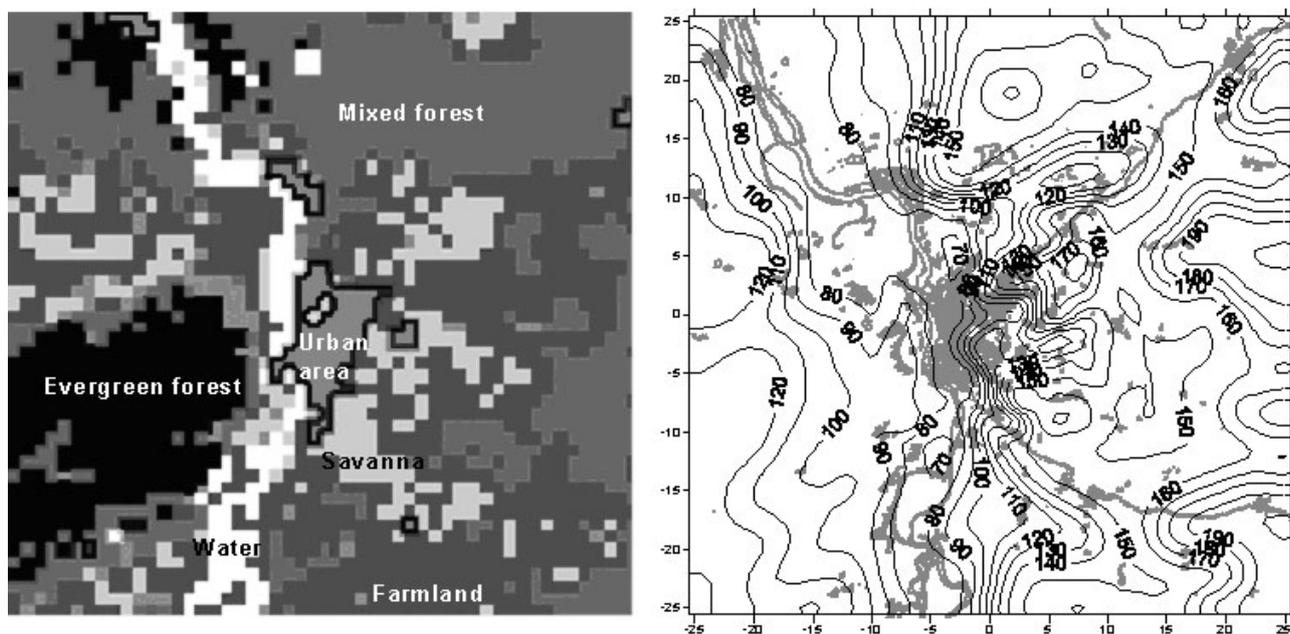


Рис. 1. Распределение категорий землепользования и превышения поверхности над уровнем моря для вложенной области

При задании свойств подстилающей поверхности рассматривалось семь категорий землепользования: водная поверхность, поверхность с незначительной растительностью, сельскохозяйственные угодья, лиственный, смешанный и хвойный лес и городская застройка (Рис. 1). Эти категории отличались по следующим параметрам: высота шероховатости, альbedo, теплофизические свойства почвы для категории (теплопроводность, теплоемкость, плотность), параметр испарения, степень черноты, температура на глубине 2 м (для почвы). Причем в расчетах эти параметры зависели от сезона (зима-лето), а температура почвы определялась для конкретной даты, при этом использовались данные наблюдений Климато-экологической обсерватории Института оптического мониторинга СО РАН. Для водной поверхности применялось значение средней температуры за период моделирования (обычно двое суток).

На рис. 2 для некоторых дат 2000 года представлены результаты сравнения рассчитанных и измеренных значений скорости, направления ветра, температуры воздуха в приземном слое над городом. Сопоставление расчетов производится с результатами наблюдений, полученных Гидрометцентром и ТОР-станцией ИОА СО РАН. Из рисунка видно, что используемая метеорологическая мезомасштабная модель удовлетворительно воспроизводит характер изменения основных параметров приземного атмосферного воздуха.

Выполненные расчеты показали, что над исследуемой областью наблюдается достаточно однородная картина приземного ветра (Рис. 3), что хорошо согласуется с результатами применения мезомасштабной метеорологической модели МЕМО [6] для условий горо-

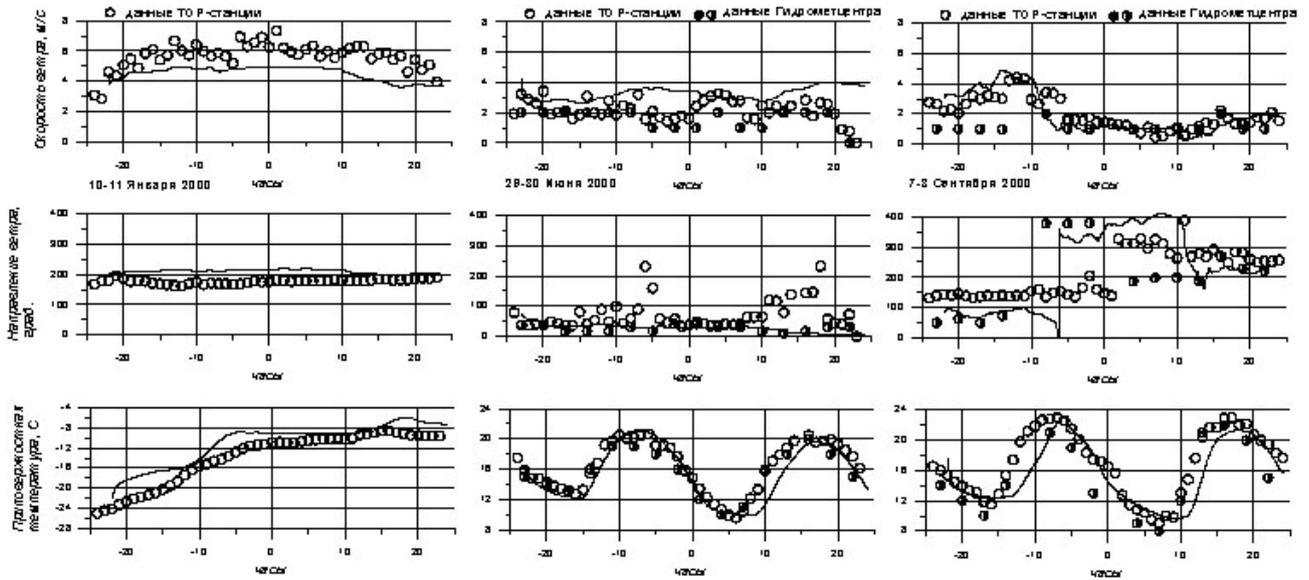


Рис. 2. Сравнение расчетов с данными наблюдений. Отрицательное значение времени соответствует первым суткам срока моделирования, положительные - вторым. Открытые значки — данные ТОР-станции ИОА СО РАН, закрытые и полуоткрытые — данные Гидрометцентра РФ

да Томска, выполненных в рамках проекта ISIREMM. Незначительные неоднородности обусловлены неравномерным распределением шероховатости подстилающей поверхности и топографии (Рис.1). При различном направлении ветра имеет место увеличение скорости над поверхностью с низкой шероховатостью (farmland, savanna, water, Рис.1). При юго-западном ветре расчеты фиксируют возникновение аэродинамических особенностей за городом, что в данном случае также объясняется резким изменением свойств подстилающей поверхности.

На рис. 4 приведены графики зависимости индекса загрязненности приземного воздуха в городе от времени суток. Индекс загрязненности в данной работе определяется как

$$Index = \frac{1}{2} \left( \frac{c_{CO}}{(c_{CO})_{\infty}} + \frac{c_{NO_2}}{(c_{NO_2})_{\infty}} \right),$$

где  $c_{CO}, c_{NO_2}$  — концентрации оксида углерода и диоксида азота ( $mg/m^3$ ) в приземном слое воздуха, значения с индексом « $\infty$ » соответствуют предельно допустимым значениям. Анализ полученных распределений указывает на существенную роль выбросов автотранспорта на качество воздуха в городе. Максимумы индекса загрязненности приходятся на дневное время суток. Также заметное влияние на содержание вредных веществ оказывает сила ветра. При штилевых условиях расчеты и измерения фиксируют их повышенные концентрации (8 сентября 2000 года). Причем максимальные значения индекса загрязненности воздуха приходятся на утренние часы, когда в атмосферном пограничном слое имеют место температурные инверсии. Кроме того, из рис. 2 и 4 видно, что накопление загрязнителей в приземном слое воздуха над городом происходит как при южном и юго-западном направлении ветра (7–8 сентября 2000 года), так и при северном и северо-восточном (29–30 июня 2000 года) ветре.

Таким образом, проведенные расчеты подтвердили непосредственную связь между ме-

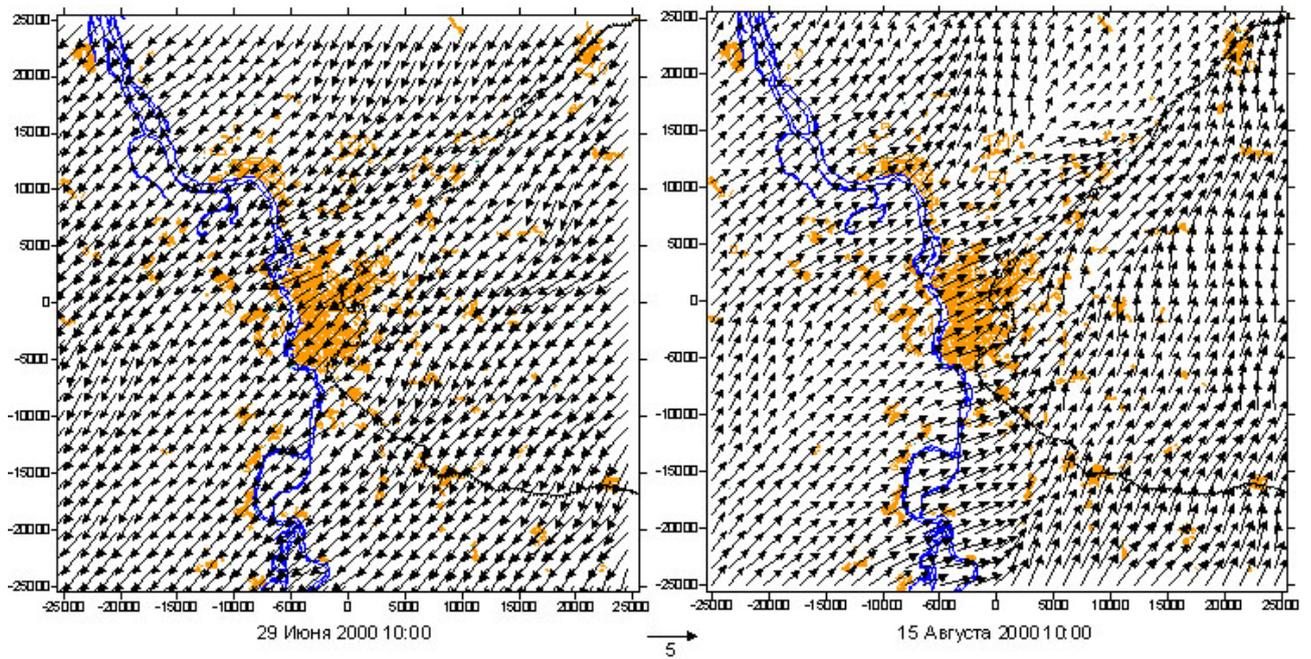


Рис. 3. Поле горизонтального ветра над исследуемой областью

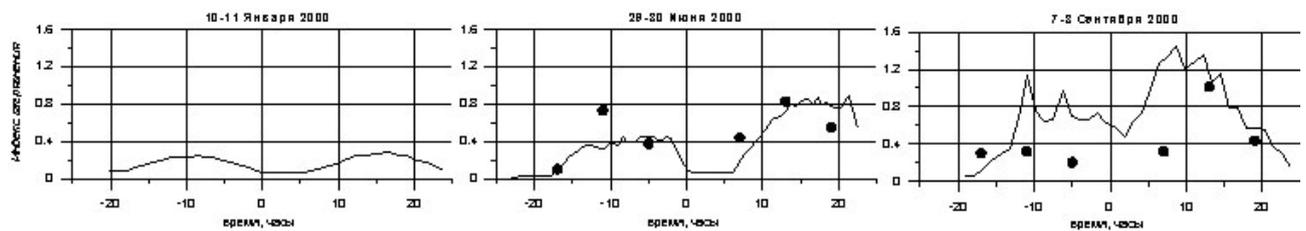


Рис. 4. Изменение индекса загрязненности приземного воздуха от времени суток. Значки — данные с постов экологического мониторинга

теорологией и качеством воздуха в индустриальном центре и его окрестностях. Нежелательные метеорологические ситуации для многих городов - штилевые условия в сочетании с утренними температурными инверсиями.

## Список литературы

- [1] Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей /Под ред. Ф.Т.М.Ньистадта и Х.Ван Допа., Л.:Гидрометеоиздат, 1985., 351 с.
- [2] ПЕНЕНКО В.В., АЛОЯН А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды., Новосибирск: Наука,, 1985., 256 с.
- [3] СТАРЧЕНКО А.В. Численное моделирование локальных атмосферных процессов //Вычислительная гидродинамика. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. С. 43–50.
- [4] СТАРЧЕНКО А.В. Моделирование переноса примеси в однородном атмосферном пограничном слое //Труды Международной конференции ENVIROMIS–2000. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2000. С. 77–82.
- [5] KLEMP J.B. AND WILHELMSON R.B. The simulation of three- dimensional convective storm dynamics // J. Atmos. Sci. 1978., Vol. 35, No 6., P. 1070-1096.
- [6] KUNZ R. AND MOUSSIOPOULOS N. Simulation of the wind field in Athens using refined boundary conditions //Atmos. Envir. 1995. Vol.29. P. 3375–3391.
- [7] VAN LEER B. Towards the ultimate conservative difference scheme. II. Monotonicity and conservation combined in second order scheme //J. Comp. Phys. 1974. Vol.14. P. 361–370.
- [8] ИЛЬИН В.П. Методы неполной факторизации для решения алгебраических систем. М.: Наука, 1994. 288 с.
- [9] ПАТАНКАР С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
- [10] БЕРЛЯНД М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.
- [11] СТАРЧЕНКО А.В., БЕЛИКОВ Д.А. Численная модель для оперативного контроля уровня загрязнения городского воздуха //Оптика атмосферы и океана. 2003. № 7. С. 657–665.