

А.В. Старченко, Д.А. Беликов

Численная модель для оперативного контроля уровня загрязнения городского воздуха

Томский государственный университет

Поступила в редакцию 14.01.2003 г.

Для осуществления оперативного контроля загрязнения воздуха в черте города предлагается математическая модель, опирающаяся на данные наблюдений за изменением метеорологической обстановки. Расчет элементов городской погоды выполняется с использованием одномерной нестационарной модели атмосферного пограничного слоя. Высокая степень достоверности результатов предсказания метеорологии достигается благодаря учету математической моделью данных измерений метеорологических параметров (направление, скорость ветра, температура и влажность воздуха) как вблизи поверхности, так и по высоте пограничного слоя. Модель рассчитывает подробную картину вертикального распределения компонентов горизонтального ветра, турбулентных характеристик, что весьма важно при моделировании распределения загрязнителей в приземном слое воздуха.

Расчет распространения примеси в воздушном бассейне над городом проводится на основе пространственных уравнений переноса для концентраций выбранных в исследовании вредных веществ. В качестве источников поступления загрязнителей воздуха рассматриваются трубы промышленных предприятий и предприятий теплоэнергетики (точечные источники), потоки автотранспорта по сети городских автодорог (линейные источники) и предприятия с множественными выбросами вредных веществ (площадные источники).

Задача решается численно с использованием метода конечного объема при дискретизации дифференциальных уравнений, методов факторизации для решения разреженных систем линейных алгебраических уравнений. Для ускорения получения результатов расчетов применяются многопроцессорные вычислительные установки ТГУ и ИОА СО РАН. Параллельный вычислительный алгоритм решения задачи опирается на принцип декомпозиции расчетной области.

Предложенная модель применяется для численной детализации экологической ситуации в г. Томске для некоторых дат 2000 г. Результаты сравнения расчетов и измерений позволяют говорить о применимости предложенного подхода, основным преимуществом которого является высокая оперативность получения детальной картины распределения загрязнителей над районами города.

Введение

При расчете распределения концентраций первичных и вторичных загрязнителей городского воздуха необходимо привлекать транспортные модели, представляющие перенос субстанции ветром, ее рассеяние за счет турбулентности и возможное протекание химических реакций. Для учета первых двух факторов требуется знание детальной информации о структуре и динамике развития параметров пограничного слоя над городом. Наиболее полная картина атмосферных процессов может быть получена в результате применения пространственных прогностических мезомасштабных моделей в сочетании с использованием данных наблюдений [1, 2]. Тем не менее даже при таком детальном и теоретически оправданном способе предсказания поведения окружающей среды качество прогноза может оказаться невысоким из-за неполноты информации о начальном состоянии моделируемой системы и неопределенности ее параметров. Кроме того, в силу большой трудоемкости проведения численных расчетов даже на суперкомпьютерной технике использование трехмерных нестационарных моделей атмосферного пограничного слоя ограничивается в настоящее время

лишь осуществлением сценарного анализа для выявления основных возмущающих факторов изучаемой системы.

Для оперативного расчета содержания вредных веществ в городском воздухе можно также привлекать основанные на результатах наблюдений упрощенные эмпирические модели. Самым простым способом оценки распределения скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии является применение степенных зависимостей от вертикальной координаты [3, 4]. При этом значение показателя зависит от стратификации атмосферы. Для использования таких моделей необходимы данные наблюдений за состоянием атмосферы.

Другим способом количественного описания поведения метеорологических характеристик и вертикальной турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя является использование одномерных нестационарных моделей. В 70–80-х гг. такой подход интенсивно привлекался для разработки теорий турбулентности атмосферы. Появились работы, в которых одномерные нестационарные модели АПС служили основой для определения вертикальных профилей горизонтальных компонент ветра и турбулентных характеристик, используемых затем для

изучения переноса примеси в приземном слое воздуха над термически и орографически однородной поверхностью [5, 6].

Одномерные модели представляют собой упрощенный вариант пространственных, в которых метеорологические параметры (температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра) считаются постоянными в горизонтальной плоскости, и их изменение рассматривается только с высотой и со временем. В реальном атмосферном пограничном слое (АПС) величина горизонтальной компоненты вектора скорости, как правило, значительно превосходит вертикальную, а диффузионные процессы протекают более интенсивно в вертикальном направлении, поэтому переход к одномерной модели может рассматриваться как результат упрощения сложной трехмерной гидростатической мезомасштабной модели, численная реализация которой требует существенных вычислительных затрат даже при невысоком вертикальном разрешении.

Вместе с тем одномерные модели, опирающиеся на данные атмосферных наблюдений, имеют высокое разрешение по времени и вертикальной координате и для небольших территорий удовлетворительно описывают суточную изменчивость метеорологических параметров. Поскольку в их основе заложено использование законов сохранения, они имеют безусловное преимущество перед простейшими моделями степенных зависимостей компонент горизонтальной скорости и турбулентной диффузии, не уступая последним в быстродействии получения результатов. Кроме того, одномерные нестационарные модели учитывают суточную динамику турбулентной структуры, что в совокупности, например, с диагностической моделью ветра [7] позволяет учесть также влияние мезомасштабных особенностей, связанных с неоднородностью свойств подстилающей поверхности, на перенос и рассеяние выбросов в приземном слое атмосферы.

Формулировка одномерной модели

Для описания поля горизонтального ветра и турбулентной структуры атмосферы, что весьма важно для адекватного представления переноса примеси, использовались законы сохранения импульса, энергии в дифференциальной форме. При этом применялись следующие допущения:

- предполагалось, что плотность воздуха зависит от базовых значений давления и температуры атмосферного пограничного слоя, вариации плотности в зависимости от изменения температуры учитываются только при моделировании турбулентности;
- в численной модели не рассматривались процессы, связанные с фазовыми превращениями водяного пара в атмосфере и модификацией радиационных тепловых потоков, проходящих через атмосферу;
- процессы молекулярной диффузии незначительны по сравнению с турбулентным обменом;
- предполагается, что метеорологические параметры (горизонтальные компоненты скорости и тем-

пература) изменяются лишь во времени и от вертикальной координаты.

С учетом сделанных допущений уравнения для компонент среднего ветра и потенциальной температуры и влажности имеют вид [8]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}\langle uw \rangle + f(V - V_g), \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}\langle vw \rangle - f(U - U_g), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}\langle \theta w \rangle, \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}\langle qw \rangle, \quad (4)$$

где U, V – компоненты горизонтальной скорости ветра в атмосферном пограничном слое ($W \cong 0$), ось Ox направлена на восток, Oy – на север; u, v, w – пульсационные составляющие горизонтальных и вертикальной компонент скорости соответственно; $\langle uw \rangle, \langle vw \rangle, \langle \theta w \rangle, \langle qw \rangle$ – турбулентные корреляции пульсаций вертикальной и компонент горизонтальной скорости ветра и температуры или влажности);

$$(U_g, V_g) = \frac{1}{\rho f} \left(-\frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

– компоненты скорости геострофического ветра, ρ – плотность; t – время; z – вертикальная координата; $\Theta = T(P_0/P)^{R/c_p}$ – потенциальная температура; $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Н/м², c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, T – абсолютная температура, R – газовая постоянная; $f = 2\Omega \sin \psi$ – параметр Кориолиса, ψ – географическая широта рассматриваемой точки, Ω – угловая скорость вращения Земли.

Поскольку нижний слой атмосферы примерно до высоты 1000–1500 м характеризуется наличием турбулентного перемешивания, оказывающего существенное влияние на структуру атмосферного пограничного слоя, особое внимание уделяется моделированию турбулентности. В данной работе применяется « $E-l$ »-модель турбулентности, включающая уравнения переноса для энергии и масштаба турбулентных пульсаций и алгебраические соотношения для напряжений Рейнольдса и турбулентных тепловых потоков [8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} = & -\langle uw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} - \langle vw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{g}{\Theta} \langle \theta w \rangle + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_e \sqrt{E} l \frac{\partial E}{\partial z} \right) - \frac{C_D E^{\frac{3}{2}}}{l}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial l}{\partial t} = & C_{L1} \left(-\langle uw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} - \langle vw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{g}{\Theta} \langle \theta w \rangle \right) \frac{l}{E} + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_e \sqrt{E} l \frac{\partial l}{\partial z} \right) + C_{L2} \sqrt{E} \left[1 - \left(\frac{l}{\kappa z} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (6)$$

$$[\langle u\omega \rangle, \langle v\omega \rangle, \langle \theta\omega \rangle] = -F_{m,h} \sqrt{El} \left[\frac{\partial U}{\partial z}, \frac{\partial V}{\partial z}, \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right]. \quad (7)$$

Здесь $E = 0,5 (\langle u^2 \rangle + \langle v^2 \rangle + \langle \omega^2 \rangle)$ – кинетическая энергия турбулентности; l – масштаб турбулентности; $\sigma_e = 0,54$; $C_{L1} = -0,12$, $C_{L2} = 0,2$, $C_D = 0,19$; $\kappa = 0,4$. F_m, F_h представляют собой функции локальных турбулентных характеристик [8].

Граничные условия для уравнений (1)–(6) формулируются следующим образом [8]:

при $z = z_1 \gg z_0$

$$U = \frac{v_*}{\kappa} f_u(\zeta_1) \cos \beta; \quad V = \frac{v_*}{\kappa} f_u(\zeta_1) \sin \beta;$$

$$\Theta = \Theta_1^{\text{obs}}(t); \quad q = q_1^{\text{obs}}(t); \quad E = v_*^2 f_k(\zeta_1); \quad l = \kappa z f_l(\zeta_1);$$

при $z = H$

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\partial l}{\partial z} = \frac{\partial q}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \gamma.$$

Здесь z_0, z_1, H – высота шероховатости, высота положения первого вычислительного уровня, высота расчетной области; v_* – динамическая скорость; f_u, f_k, f_l – эмпирические функции; $\zeta = z/L$, L – масштаб Монина–Обухова.

Начальные условия для уравнений (1)–(4) задавались с использованием данных наблюдений вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя. Для турбулентных характеристик начальные профили генерировались предварительными расчетами по представленной выше модели при фиксированных осредненных динамических и температурных параметрах АПС.

Использование данных наблюдений при моделировании

Для повышения качества расчета метеорологических полей применялось несколько способов ассимиляции данных наблюдений в модели.

А. Метеорологические измерения, как наземные, так и выполненные с помощью приборов удаленного зондирования атмосферы (содары, лидары, радары и др.), использовались для восстановления вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя (зависимости значений влажности, потенциальной температуры и компонент горизонтальной скорости от высоты) [9]:

$$\varphi_S(z) = \varphi_{\text{sound}}^*(z) [1 - \chi(z)] + \varphi_{\text{ground}} \chi(z) \min [1, 0; (z/50)^k],$$

где $\varphi_{\text{sound}}^*(z)$ – функция, построенная в результате сплайн-интерполяции измеренных значений $\varphi_{\text{sound}}(z_i)$; φ_{ground} – значения измерений у поверхности; k – степень, зависящая от стратификации атмосферы ($k = 0$ для $\varphi = \Theta, q$);

$$\chi(z) = 1 - \min [1, 0; (z/200)^2].$$

Построенные таким образом профили $\varphi_S(z)$ использовались при задании начальных распределений скорости, температуры и влажности.

Кроме того, полученные вертикальные распределения применялись для корректировки результатов численного расчета данными наблюдений. С этой целью в уравнения (1)–(4) добавлялись слагаемые вида [10]: $-\varphi(t, z) - \bar{\varphi}_S(t, z)] / \tau_S$.

Здесь

$$\bar{\varphi}_S(t, z) = \varphi_{S1}(z) + \frac{\varphi_{S2}(z) - \varphi_{S1}(z)}{\tau_S} (t - t_1),$$

$t_1 \leq t \leq t_2$; $\tau_S = t_2 - t_1$; $\varphi_{S1}(z), \varphi_{S2}(z)$ – восстановленные вертикальные профили для моментов времени t_1 и t_2 .

Б. Наблюдения за изменением приземной температуры и влажности непосредственно использовались моделью как граничные условия для уравнений (3) и (4). В отличие от наблюдений за вертикальной структурой АПС частота измерений приповерхностной температуры и влажности выше (в расчетах применялись измеренные через 1 ч значения). Применение результатов наблюдений температуры и влажности воздуха в качестве граничных условий существенно упрощает формулировку задачи, снимая необходимость в моделировании интенсивности тепло- и влагообмена на земной поверхности [6].

В. Учет влияния синоптической метеорологии в локальных динамических процессах производится путем задания значений компонент скорости геострофического ветра U_g, V_g . В данной работе для оценки геострофического ветра использовалась модифицированная методика В.А. Шнайдемана [11], которая опирается на данные наблюдений за изменением приземного атмосферного давления на ближайших крупных метеорологических станциях (использовались результаты Гидрометцентра [12] на метеостанциях гт. Колпашево, Новосибирск, Кемерово и Томск).

Основные вычислительные шаги этой методики:

1. Измеренное для определенного момента времени приземное давление на высоте над уровнем моря i -й метеостанции пересчитывается на высоту над уровнем моря населенного пункта z^* , для которого будет производиться моделирование атмосферных процессов:

$$p_i(z^*) = p_i(z_i) \exp(g(z_i - z^*) / RT_i), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

(p_i, T_i – давление и температура, измеренные на высоте z_i над уровнем моря для i -й станции).

2. Далее для набора данных $p_i(z^*) = f(x_i, y_i)$ ((x_i, y_i) – координаты метеостанций) ($i = 1, \dots, n$) с помощью метода наименьших квадратов строится аппроксимирующая синоптическое распределение давления зависимость вида

$$\tilde{p}(x, y, z^*) = p^* + d_x(x - x^*) + d_y(y - y^*),$$

$$d_x, d_y - \text{const.}$$

3. Затем рассчитываются значения производных при $x = x^*$, $y = y^*$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \frac{RT_* d_x}{\rho^*}; \quad -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} = \frac{RT_* d_y}{\rho^*}.$$

4. По значениям градиента давления для различных моментов времени из уравнений Экмана

$$\frac{\partial U_g}{\partial t} = fV_g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x},$$

$$\frac{\partial V_g}{\partial t} = -fU_g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y}$$

определяются компоненты геострофического ветра $U_g(t)$, $V_g(t)$.

Моделирование переноса примеси

В данной работе для расчета переноса, рассеяния и трансформации малых составляющих приземного слоя атмосферы используется прогностическое уравнение «адвекции-диффузии» [3]:

$$\frac{\partial c_j}{\partial t} + \frac{\partial U c_j}{\partial x} + \frac{\partial V c_j}{\partial y} + \frac{\partial W_j c_j}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_z^h \frac{\partial c_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_z^h \frac{\partial c_j}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^h \frac{\partial c_j}{\partial z} \right) + Q_j, \quad j = 1, \dots, s. \quad (8)$$

Здесь c_j – концентрация j -й компоненты примеси; Q_j – источниковый член, моделирующий поступление примеси от источников выбросов и изменение концентрации вследствие химических реакций; W_j – скорость вертикального движения j -й компоненты примеси; s – количество компонентов примеси; $K_z^h = F_h \sqrt{El}$. В качестве граничных условий для уравнения (8) используются простые градиентные условия на боковых, верхней и нижней границах области исследования.

Метод расчета

Задача (1)–(8) вместе с граничными и начальными условиями решалась численно конечно-разностным методом на сетке, сгущающейся в направлении к поверхности. Сгущение задавалось таким образом, что отношение размеров соседних ячеек выдерживалось постоянным. Положение первого вычислительного уровня существенно превышало высоту шероховатости подстилающей поверхности z_0 . Дискретный аналог дифференциальной задачи (1)–(7) строился со вторым порядком аппроксимации по времени и вертикальной координате. Полученные системы разностных уравнений решались эффективным методом прогонки [13].

Пространственные нестационарные уравнения (8) решались численно для параллелепипеда с многочисленными линейными, точечными и площадными источниками выбросов на подстилающей поверх-

ности и высотными точечными источниками. В области исследования, охватывающей город и его окрестности, строилась конечно-разностная сетка с постоянными размерами ячеек по горизонтальным направлениям и переменными вертикальными, уменьшающимися при приближении к поверхности. Аппроксимация дифференциальных операторов в (8) осуществлена со вторым порядком точности по координатам и первым – по времени с использованием явных разностных схем для всех членов уравнения за исключением вертикальной диффузии. Такой способ дискретизации дифференциальной задачи позволяет решить проблемы, возникающие из-за нелинейности уравнения (8), и существенно ускорить получение результата вследствие применения экономичного метода прогонки при приемлемом ограничении на величину шага по времени. Адвективные члены уравнений переноса (8) аппроксимируются с использованием монотонизированной противопотоковой схемы Ван Лиры [14], не допускающей появления «нефизических» значений концентрации.

В предлагаемой приближенной модели атмосферных процессов и переноса загрязнителей городского воздуха основная вычислительная нагрузка связана с решением 3D нестационарных уравнений (8). Требования контроля качества воздуха указывают на необходимость получения детальной картины распределения загрязнений в приземном слое воздуха над городскими кварталами, поэтому расчетная сетка должна иметь высокую плотность узлов в области исследования. Кроме того, для учета протекания химических реакций, приводящих к появлению вторичных загрязнителей воздушного бассейна (озон, стирол), необходимо рассмотрение переноса и рассеяния большого количества компонентов примеси. Такие условия проведения численных расчетов заставляют привлекать высокопроизводительную вычислительную технику, в частности имеющиеся в распоряжении многопроцессорные кластерные системы Института оптики атмосферы СО РАН (<http://cluster.iao.ru>) и Томского государственного университета (<http://cluster.tsu.ru>), на которых установлен интерфейс передачи сообщений MPI (Message Passing Interface) [15].

Распараллеливание численного метода решения уравнений (8) производилось с использованием геометрического принципа – декомпозиции по данным. Вся область исследования разделялась на одинаковые подобласти. В данной работе параллелепипед области исследования ($-L_x/2 \leq x \leq L_x/2$; $-L_y/2 \leq y \leq L_y/2$; $0 \leq z \leq L_z$) разрезался сечениями $y = \text{const}$ с распределением данных каждой подобласти соответствующему процессорному элементу. Все сеточные значения концентрации $(c_j)_{k,l,m}^{n+1}$ равномерно размещались по вычислительным узлам многопроцессорной системы с распределенной памятью. Внутри каждой подобласти сеточные уравнения, полученные в результате принятого подхода дискретизации уравнений (8), решались одновременно методом прогонки. Однако из-за выбранного разностного шаблона при расчете значений концен-

траций вдоль приграничной сеточной линии (вблизи верхней или нижней границы подобласти) необходимы два сеточных значения концентрации из соседней подобласти (рис. 1).

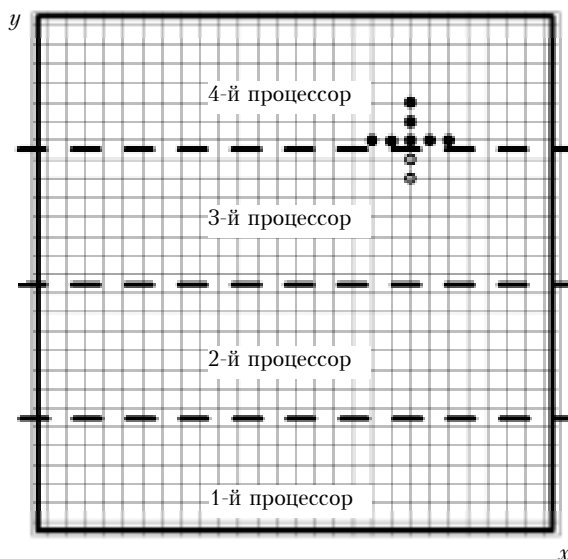


Рис. 1. Расчетная сетка в плоскости xOy с указанием распределения подобластей по четырем процессорам. На приграничной сеточной линии приведен разностный шаблон. Светлые кружки указывают на сеточные значения, которые необходимо получить с соседнего процессора

Поэтому для корректной работы параллельной программы необходимо организовать межпроцессорные обмены приграничных сеточных значений. Это было выполнено с использованием функций библиотеки передачи сообщений MPI_SendRecv. Кроме того, при подготовке проведения параллельных расчетов применялись следующие функции библиотеки Message Passing Interface: MPI_Bcast, MPI_Scatter.

Условия проведения расчетов и обсуждение результатов

Предложенный метод решения задачи о расчете распределения концентраций основных загрязнителей с использованием высокопроизводительной вычислительной системы был применен для условий г. Томска. Рассматривались четыре компоненты примеси атмосферы: пыль, CO , SO_2 и NO_2 . Учитывались 119 линейных, 12 площадных и 338 точечных источников выбросов г. Томска (рис. 2). При проведении расчетов предполагалось, что компоненты примеси химически инертны. Расчеты выполнялись на сетке $100 \times 100 \times 50$ с шагом 30 с при определении параметров атмосферы и с шагом 15 с для вычисления распределений концентраций основных загрязнителей городского воздуха.

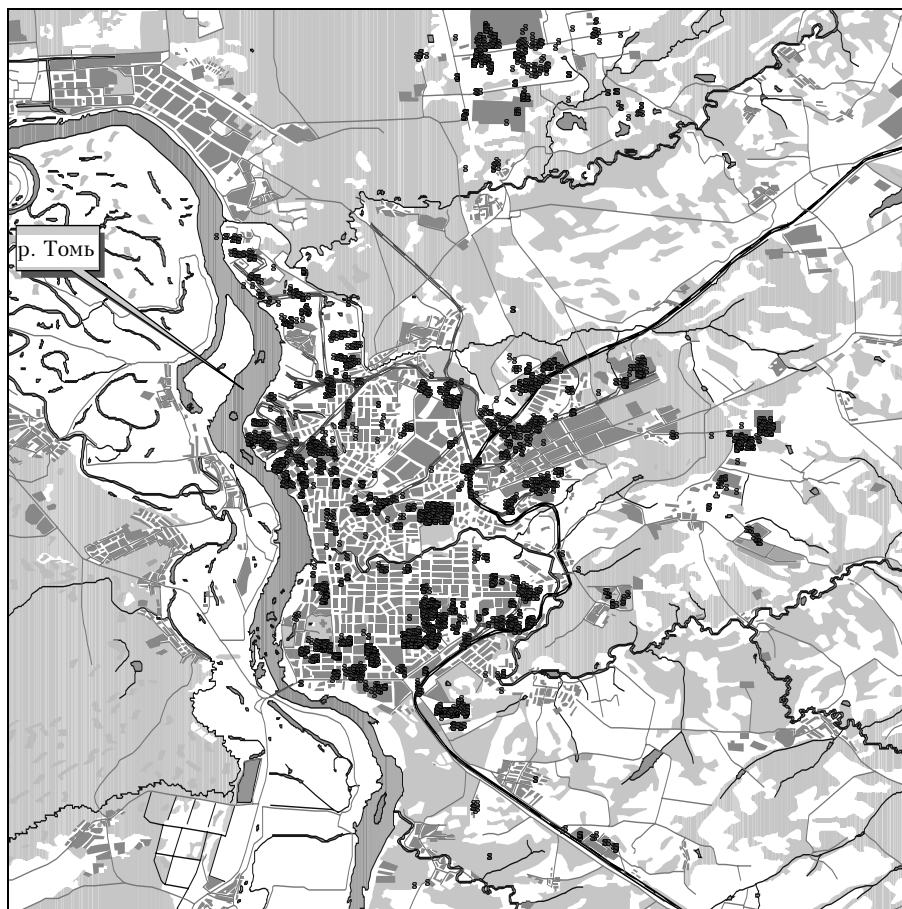


Рис. 2. Распределение стационарных источников загрязнения атмосферы г. Томска

Интенсивность выбросов автотранспорта зависела от времени суток и рассчитывалась по следующему закону:

$$Q/Q_0 = \begin{cases} 0,1 & 0 \leq t(h) \leq 6, \\ 0,1 + 1,9 \sin\left(\pi \frac{t(h) - 6}{18}\right), & 6 \leq t(h) \leq 24, \end{cases} \quad (9)$$

где Q_0 – среднесуточная интенсивность выбросов линейного источника; $t(h)$ – время суток, ч.

На рис. 3 представлены значения ускорения рассмотренного выше параллельного алгоритма решения задачи, полученные при ее запуске на кластерной установке Томского государственного университета (9 двухпроцессорных вычислительных узлов с процессорами Pentium III 650 МГц, RAM 256 Мбайт соединены сетью Fast Ethernet 100 Мбит).

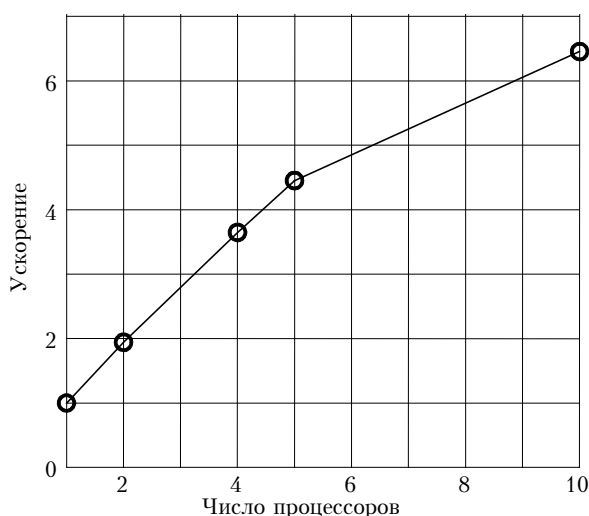


Рис. 3. Ускорение параллельного вычислительного процесса в зависимости от числа используемых в расчетах процессоров

Ускорение рассчитывается как отношение времени выполнения всей задачи на одном процессоре к времени решения задачи на p процессорах. Из рисунка видно, что при выполнении параллельной программы на 10 процессорах кластера Томского госуниверситета при указанных выше параметрах удастся получить ускорение вычислений более чем в 6 раз. В то же время величина эффективности параллельной программы (отношение ускорения к числу использованных в расчетах процессоров) с ростом p уменьшается. Это объясняется тем, что при фиксированном количестве узлов конечно-разностной сетки отношение объема вычислительной работы к числу совершаемых обменов снижается. Сравнительные расчеты, выполненные на многопроцессорной вычислительной системе Института оптики атмосферы СО РАН (10 двухпроцессорных элементов Pentium III 1 ГГц, RAM 1 Гбайт, сеть Gigabit Ethernet 1 Гбит), показали, что временные затраты на десяти процессорах на получение распределения четырех основных загрязнителей городского воздуха в течение 2 сут моделирования занимают чуть более 3 ч реального времени.

Для доказательства возможности применения описанной выше модели к описанию реальной картины качества воздуха в городе была предпринята широкая программа ее тестирования. Во-первых, были проведены сравнения результатов расчетов одномерной модели атмосферного пограничного слоя с фундаментальными данными (экспериментальными и теоретическими) для нейтрального, устойчивого и конвективного состояния планетарного пограничного слоя [8, 16, 17] и получено удовлетворительное согласование.

Во-вторых, эта модель применялась для выбранных дат 2000 г. (10–11 января, 16–17 марта, 29–30 июня, 7–8 сентября) для условий г. Томска. Полученные результаты сравнивались с результатами расчетов по мезомасштабной негидростатической модели атмосферного пограничного слоя [2] и ранее полученными данными наблюдений. На рис. 4–7 представлено сопоставление расчетных и измеренных значений скорости и направления приземного ветра в г. Томске для указанных сроков. Светлые кружки соответствуют результатам наблюдений за ветром на ТОР-станции ИОА СО РАН, расположенной на некотором возвышении на восточной окраине Томска (<http://meteo.iao.ru>). Полуоткрытые кружки представляют измерения Гидрометцентра РФ [12] на метеостанции, расположенной на южной окраине г. Томска. Заметим, что эти данные не усваивались моделью и рассматривались как контрольные. Расчетные значения скорости и направления ветра, полученные по 3D мезомасштабной негидростатической модели [2], приводятся для центра города. В целом получено удовлетворительное согласование с данными наблюдений по силе и направлению ветра для г. Томска.

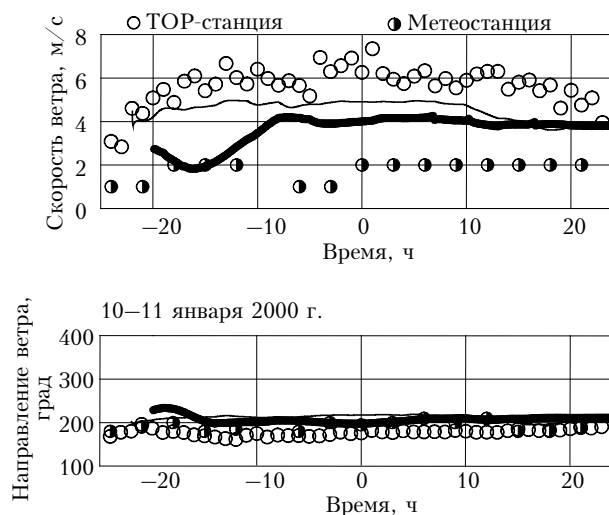


Рис. 4. Сравнение рассчитанных и измеренных значений скорости и направления ветра в г. Томске 10–11 января 2000 г.: значки – наблюдения Гидрометцентра и ТОР-станции; жирная кривая – одномерная модель (1)–(7); тонкая – расчет по 3D мезомасштабной негидростатической модели. Отрицательные значения оси абсцисс соответствуют первым суткам промежутка моделирования, положительные – вторым

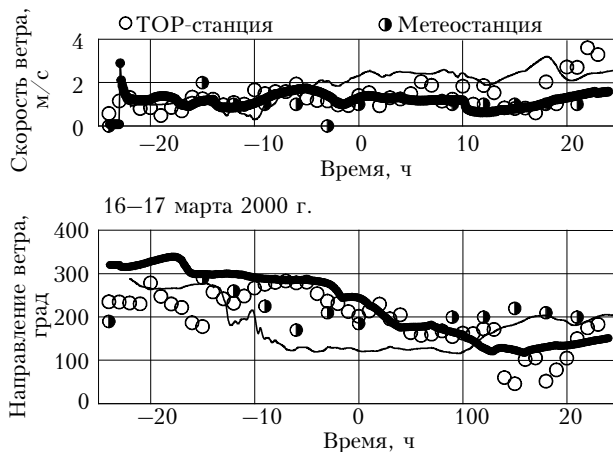


Рис. 5. Сравнение рассчитанных и измеренных значений скорости направления ветра в г. Томске 16–17 марта 2000 г. Остальные обозначения см. на рис. 4

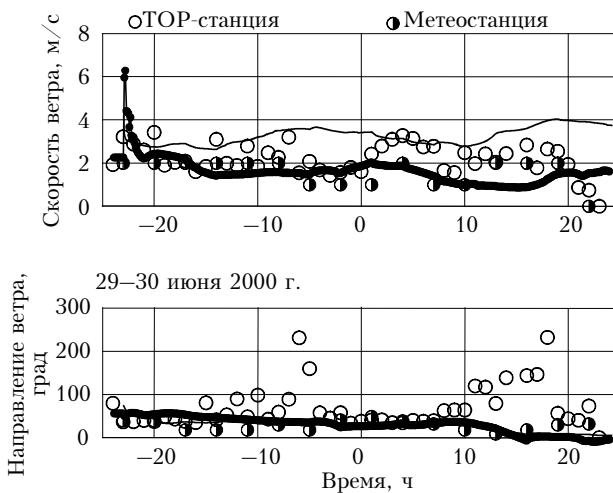


Рис. 6. Сравнение рассчитанных и измеренных значений скорости направления ветра в г. Томске 29–30 июня 2000 г. Остальные обозначения см. на рис. 4

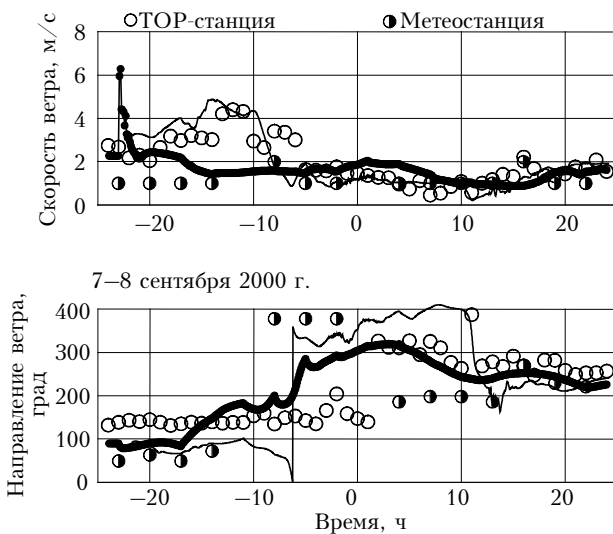


Рис. 7. Сравнение рассчитанных и измеренных значений скорости направления ветра в г. Томске 7–8 сентября 2000 г. Остальные обозначения см. на рис. 4

Кроме того, предложенная модель (1)–(7) совместно с эйлеровой моделью переноса и рассеяния примеси (8) применялась для оценки характера распределения концентрации СО над г. Томском. В расчетах для стационарных источников (предприятий) использовались значения интенсивности выбросов, предоставленные административными органами по охране окружающей среды. Выбросы автотранспорта оценивались по интенсивности потока автомобилей по конкретным городским автотранспортным магистралям и с использованием эмпирической зависимости (9).

На рис. 8 представлены рассчитанные и измеренные значения концентрации СО в течение 7–8 сентября 2000 г. Заполненные кружки соответствуют

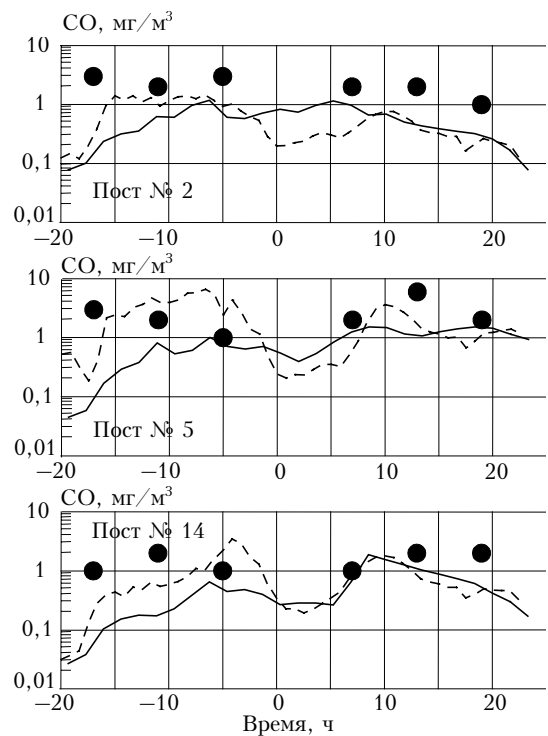


Рис. 8. Изменение концентрации СО на экологических постах г. Томска 7–8 сентября 2000 г. Значки – данные наблюдений. Штриховая кривая – расчет на основе 1D эмпирической модели. Сплошная кривая – расчет с использованием 3D прогностической мезомасштабной модели

результатам, полученным с экологических постов г. Томска, расположенных в его центре (пост № 2), в восточной части (пост № 5) и в северной части (пост № 14). Сплошные кривые есть результаты расчета, выполненного с использованием эйлеровой модели переноса примеси (8) на основе полей скорости и турбулентных характеристик, полученных после применения пространственной мезомасштабной негидростатической модели атмосферного пограничного слоя [2]. Штриховые кривые соответствуют результатам расчетов концентрации СО с использованием описанной выше приближенной модели с усвоением данных наблюдений. Рис. 9 и 10 показывают динамику изменения концентрации СО и NO₂ в течение 10–11 января 2000 г. вблизи указанных экологических постов наблюдения за качеством воздуха.

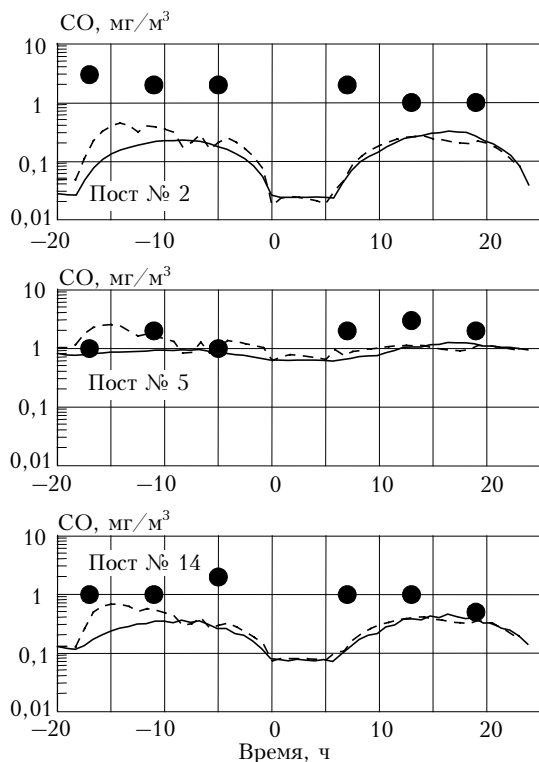


Рис. 9. Изменение концентрации CO на экологических постах г. Томска 10–11 января 2000 г. Обозначения см. на рис. 8

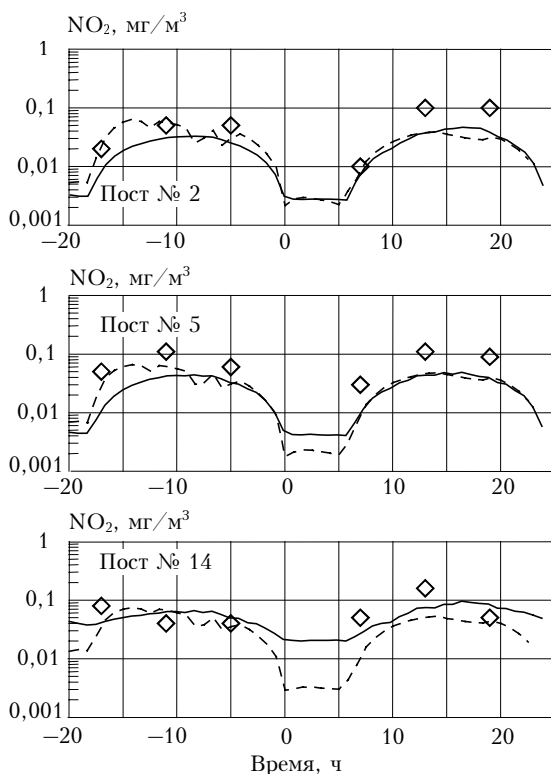


Рис. 10. Изменение концентрации NO₂ на экологических постах г. Томска 10–11 января 2000 г. Обозначения см. на рис. 8

Анализируя результаты расчетов, представленные на рис. 4, 9, 10 и 7, 8, можно отметить, что значительное влияние на характер изменения концентрации компонентов оказывают сила и направление ветра. 10–11 января 2000 г. (см. рис. 4) наблюдался устойчивый юго-западный ветер. Так как температура воздуха менялась в эти дни незначительно (от -20° до -10°), предприятия ТЭК работали с постоянной интенсивностью и изменение концентрации CO и NO₂, в основном, определялось выбросами автотранспорта. Исключение составляет поведение концентрации CO у поста № 5, вблизи которого расположены мощные промышленные источники выбросов CO. Поэтому здесь суточные колебания этого загрязнителя атмосферы весьма незначительны. Так, 7–8 сентября 2000 г. фиксировались колебания направления и силы ветра (см. рис. 7). Вечером 7 сентября установился слабый ветер со скоростью 1–2 м/с. Его направление медленно менялось с северного на западное. Такой характер поведения метеорологических параметров стал причиной менее ярко выраженного колебания концентрации CO в течение суток (см. рис. 8). В эти дни уровень CO в воздухе превысил уровень 10–11 января 2000 г., несмотря на то, что предприятия ТЭК работали с неполной нагрузкой (см., например, данные поста № 2).

В целом результаты сопоставления следует признать удовлетворительными. Более низкие значения расчетной концентрации CO объясняются тем, что отбор проб воздуха производится в точках пространства вблизи автомагистралей с интенсивным движением транспорта. В расчетах же значения концентрации вблизи поста наблюдения есть осредненная в расчетной ячейке (параллелепипеде со сторонами $500 \text{ м} \times 500 \text{ м} \times 20 \text{ м}$) величина. Кроме того, при проведении вычислений фоновые значения концентраций компонентов примеси в силу неопределенности полагались равными нулю, что также могло сказаться на итоговом результате.

Заключение

В настоящее время выполняется тестирование разработанной численной модели, уточняется база данных источников загрязнений атмосферы в г. Томске, проводится учет химических реакций между компонентами выбросов. Создаваемая компьютерная система для многопроцессорной вычислительной техники может быть использована при решении различных задач, связанных с охраной окружающей среды: например при прогнозировании и оценке качества атмосферного воздуха в городах, моделировании последствий техногенных катастроф и аварий, определении перспектив размещения вновь создаваемых промышленных предприятий, авто-трасс, аэродромов и т.д.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы INCO COPERNICUS-2, грант № ICA 2-СТ-2000-10024.

1. *Fast J.D., O'Steen B., Lance and Addis Robert P.* Advanced Atmospheric Modeling for Emergency Response // *J. Appl. Meteorol.* 1995. V. 34. P. 626–649.
2. *Старченко А.В., Беликов Д.А., Есаулов А.О.* Численное исследование влияния метеорологических параметров на качество воздуха в городе // *Материалы конференции ENVIROMIS2002.* Томск: Изд-во ЦНТИ, 2002. С. 142–151.
3. *Берлянд М.Е.* Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1985. 448 с.
4. *Irwin J.S.* A theoretical variation of the wind profile power law exponent at as a function of surface roughness and stability // *Atmos. Environ.* 1979. V. 13. P. 191–194.
5. *McNider R.T., Moran M.D. and Pielke R.A.* Influence of diurnal and inertial boundary-layer oscillation on long-range dispersion // *Atmos. Environ.* 1988. V. 22. P. 2445–2462.
6. *Satyanaarayana A.N.V., Lykossov V.N. and Mohanty U.C.* A Study of Atmospheric Boundary Layer Characteristics at Anand, India Using LCP Experimental Data Sets // *Boundary-Layer Meteorol.* 2000. V. 96. P. 393–419.
7. *Sherman C.A.* A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain // *J. Appl. Meteorol.* 1978. V. 17. P. 312–319.
8. *Старченко А.В.* Моделирование переноса примеси в однородном атмосферном пограничном слое // *Материалы конференции ENVIROMIS.* Томск, 2000. С. 77–82.
9. *Kunz R., Moussiopoulos N.* Simulation of the Wind Field in Athens Using Refined Boundary Conditions // *Atmos. Environ.* 1995. V. 29. P. 3375–3391.
10. *Hurley P.J.* The Air Pollution Model (TAPM) Version 1: Technical Description and Examples // *CSIRO Atmospheric Research Technical Paper N 43.* Aspen dale: CSIRO. 1999. 39 p.
11. *Шнайдман В.А., Бродская Н.С., Лосев В.М.* Расчет характеристик пограничного слоя по данным аэрооптической сети станций в районе г. Москвы // *Тр. Гидрометцентра СССР.* 1981. Вып. 238. С. 64–74.
12. <http://meteo.infospace.ru>
13. *Самарский А.А., Николаев Е.С.* Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978. 590 с.
14. *Van Leer B.* Towards the ultimate conservative difference scheme. II. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme // *J. Comput. Phys.* 1974. V. 14. P. 361–370.
15. *Старченко А.В., Есаулов А.О.* Параллельные вычисления на многопроцессорных вычислительных системах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 56 с.
16. *Беликов Д.А., Старченко А.В.* Исследование влияния параметров атмосферы на перенос и рассеяние примеси // *Тезисы IX Рабочей группы «Аэрозоли Сибири».* Томск, 26–29 ноября 2002. С. 46.
17. *Starchenko A.V. and Karyakin A.S.* Simulation of Turbulent Transport During 24-hour Evolution of the Atmospheric Boundary Layer // *Proc. SPIE.* 2000. V. 4341. P. 626–633.

A.V. Starchenko, D.A. Belikov. A numerical model for real-time monitoring of urban air quality.

To monitor the urban air quality, a prognostic model based on data assimilation is proposed. A short-term forecast of urban weather is realized with usage of an one-dimensional unsteady model of the atmospheric boundary layer. High reliability of meteorology forecast is reached by meteorological data (wind velocity, temperature and humidity) assimilation in the model. The model predicts a detailed pattern of vertical distribution of horizontal wind components, turbulent parameters, which are very important in simulation of pollution dispersion in near surface air.

Prediction of pollution transport through urban airshed is realized on the basis of spatial governing equations for pollutants. The following pollution sources are considered: industrial and heat-and-power stacks (point sources), vehicle emissions (linear sources) and large industrial area (area sources).

The mathematical problem is solved with usage of a finite volume method and factorization method. To speed up getting solution of the problem, we use high-performance computers of TSU and IAO SBRAS. Parallel algorithm of numerical solution is based on domain decomposition.

The developed model is applied to prediction of air quality in Tomsk for some dates of 2000. Results of comparison of predictions and observations demonstrate applicability of the proposed approach, whose main advantage is high performance in forecasting of air pollution distribution above urban regions.