

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ОБРАЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ ГОРОДА

^{1,2}Беликов Д.А., ¹Старченко А.В.

¹Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина 36

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, belikov@iao.ru, starch@math.tsu.ru

В работе представлена оригинальная модель турбулентного переноса примеси, в которой в рамках приближения слабой неравновесности получены алгебраические соотношения для турбулентных потоков массы $\langle c_i u \rangle$, $\langle c_i v \rangle$, $\langle c_i w \rangle$ в виде простых градиентных замыкающих соотношений. Полученные соотношения для турбулентных потоков массы используются в модели переноса примеси, учитывающей химические превращения переносимых компонент, для исследования образования и рассеяния вторичных загрязнителей в приземном слое воздуха над городом Томском и его окрестностями.

Состояние атмосферы, особенно её нижней, соприкасающейся с земной поверхностью части – приземного слоя, имеет принципиальное значение для животного и растительного мира, а также человека. В настоящее время особую тревогу вызывает ухудшение качества воздуха, т.е. изменение его химического и аэрозольного состава вследствие выбросов в атмосферу отходов промышленных предприятий и выхлопных газов автотранспорта.

Для мониторинга и прогноза экологического состояния атмосферы города наряду с инструментальными исследованиями успешно применяются методы математического моделирования. Однако сложность и взаимосвязанность процессов распространения, рассеяния и химической трансформации компонент примеси, происходящих в турбулентном атмосферном пограничном слое (АПС), делают модели прогнозирования качества воздуха громоздкими в математической записи и весьма требовательными к вычислительным ресурсам. Кроме того достоверный расчет переноса примеси в вертикальном направлении, особенно в условиях конвективного пограничного слоя, требует привлечения современных моделей турбулентности с алгебраическими соотношениями для определения турбулентных потоков импульса, массы и тепла, что само по себе представляет непростую задачу.

Для расчета концентрации компонент примеси с учетом химических взаимодействий между ними в данной работе применяется эйлерова модель турбулентной диффузии, включающая транспортные уравнения с описанием адвекции, турбулентной диффузии и химических реакций [1]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial W_c C_i}{\partial x} + \frac{\partial V C_i}{\partial y} + \frac{\partial W_c C_i}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x} \langle c_i u \rangle - \frac{\partial}{\partial y} \langle c_i v \rangle - \frac{\partial}{\partial z} \langle c_i w_c \rangle + S_i + R_i; \quad i = 1, \dots, n_s. \quad (1)$$

Здесь $C_i(t, x, y, z)$ – концентрация i -ой компоненты примеси; W_c – вертикальная составляющая скорости примеси; S_i – источниковый член, представляющий выбросы компонент примеси в атмосферу; R_i описывает образование и трансформацию вещества за счет химических реакций с участием компонент примеси; n_s – количество химических компонент примеси, принятых к рассмотрению в выбранной схеме химических реакций.

Уравнения (1) незамкнуты, т.к. в них кроме концентрации C_i , которую необходимо определить, присутствуют дополнительные неизвестные – корреляции $\langle c_i u \rangle$, $\langle c_i v \rangle$, $\langle c_i w_c \rangle$, представляющие турбулентную диффузию примеси.

В данной работе предлагается оригинальный метод замыкания уравнений переноса примеси, которая состоит в следующем. Прогностические уравнения для нахождения корре-

ляций $\langle cu_j \rangle$ могут быть записаны в виде¹ [5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle cu_j \rangle}{\partial t} + U_i \frac{\partial \langle cu_j \rangle}{\partial x_i} = & - \left(\langle u_i u_j \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) - \left(\langle cu_i \rangle \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{\rho} \left\langle p \frac{\partial c}{\partial x_j} \right\rangle - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle pc \rangle}{\partial x_j} - \\ & - \frac{\partial}{\partial x_i} \langle cu_i u_j \rangle - g_j \frac{\langle c\theta \rangle}{\Theta} + D \frac{\partial^2 \langle cu_j \rangle}{\partial x_i \partial x_i} - (D + \nu) \left\langle \frac{\partial c}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\rangle; \quad (j = 1, 2, 3). \end{aligned} \quad (2)$$

В случае околоравновесного процесса уравнения (2) приобретают вид:

$$-\langle u_j u_i \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} + P_j + B_j + \Pi_j - \varepsilon_j = 0; \quad (j = 1, 2, 3). \quad (3)$$

Здесь $P_j = -\langle cu_i \rangle \frac{\partial U_j}{\partial x_i}$; $B_j = -g_j \frac{\langle c\theta \rangle}{\Theta}$; $\Pi_j = \frac{1}{\rho} \left\langle p \frac{\partial c}{\partial x_j} \right\rangle$; $\varepsilon_j = (D + \nu) \left\langle \frac{\partial c}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\rangle$.

Для $\Pi_j - \varepsilon_j$ согласно [5] примем:

$$\Pi_j - \varepsilon_j = -C_{10} \frac{1}{\tau} \langle cu_j \rangle - C_{20} P_j - C_{30} B_j - \delta_{j3} D_{1C} \frac{\langle cu_j \rangle}{\tau} F, \quad (j = 1, 2, 3). \quad (4)$$

здесь F – функция, определяющая влияние поверхности на турбулентную структуру течения, $C_{10} = 3.0$, $C_{20} = 0.346$, $C_{30} = 0.333$, $D_{1C} = 0.806$ – эмпирические константы, $\tau = l/C_D \sqrt{k}$ – временной масштаб турбулентных пульсаций, $\mathbf{g} = (0, 0, -g)$ – вектор ускорения свободного падения. Последний член в (4) учитывает перераспределение турбулентных потоков массы вблизи поверхности, δ_{ji} – символ Кронекера.

С учетом (4) уравнения (3) примут вид:

$$-\langle u_i u_j \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} + (1 - C_{20}) P_j + (1 - C_{30}) B_j - (C_{10} + \delta_{j3} D_{1C} F) \frac{\langle cu_j \rangle}{\tau} = 0; \quad (j = 1, 2, 3). \quad (5)$$

Полагая, что температура и скорость ветра являются функциями только времени и вертикальной координаты и $U_3 = 0$, разрешим уравнения (4) относительно $\langle cu_j \rangle$. Получим

$$\text{при } j=1: \quad -\langle cu_1 \rangle = \frac{\tau}{C_{10}} \left\{ (1 - C_{20}) \langle cu_3 \rangle \frac{\partial U_1}{\partial x_3} + \langle u_1 u_1 \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} \right\} \quad (6)$$

$$\text{при } j=2: \quad -\langle cu_2 \rangle = \frac{\tau}{C_{10}} \left\{ (1 - C_{20}) \langle cu_3 \rangle \frac{\partial U_2}{\partial x_3} + \langle u_2 u_2 \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} \right\} \quad (7)$$

$$\text{при } j=3: \quad -\langle cu_3 \rangle = \frac{\tau}{C_{10} + D_{1C} F} \left\{ -(1 - C_{30}) \frac{g}{\Theta} \langle c\theta \rangle + \langle u_3 u_3 \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} \right\} \quad (8)$$

Для нахождения неизвестной корреляции пульсаций температуры и концентрации $\langle c\theta \rangle$, входящей в (8), выведем дифференциальное уравнение в виде:

$$\frac{\partial \langle c\theta \rangle}{\partial t} + U_i \frac{\partial \langle c\theta \rangle}{\partial x_i} = -\langle cu_3 \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial x_3} - \langle \theta u_i \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{k}{\varepsilon} \langle u_i u_j \rangle \frac{\partial \langle c\theta \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{\tau \cdot c_x} \langle c\theta \rangle. \quad (9)$$

Заметим, что в случае слабонеравновесной турбулентности, когда генерация турбулентности почти уравнивает её диссипацию, можно получить:

¹ Здесь и далее считаем, что корреляции вида $\langle c_i u_j \rangle$; $i = 1, \dots, ns$; $j = 1, \dots, 3$; $u_j = (u, v, w_c)$ не зависят от номера компоненты примеси, т.е. $\langle c_i u_j \rangle = \langle cu_j \rangle$; $i = 1, \dots, ns$; $j = 1, \dots, 3$;

$$-\langle cu_3 \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial x_3} - \langle \theta u_i \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{2}{\tau \cdot c_x} \langle c\theta \rangle = 0; \text{ или } \langle c\theta \rangle = -\tau \frac{c_x}{2} \left(\langle cu_3 \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial x_3} + \langle \theta u_i \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

С учетом (12) соотношение (8) переписывается в виде:

$$-\langle cu_3 \rangle = \frac{\tau}{C_{10} + D_{10}F} \left(\tau(1 - C_{30}) \frac{g}{\Theta} \frac{c_x}{2} \langle \theta u_i \rangle + \langle u_i u_3 \rangle \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \cdot \quad (11)$$

$$1 + \frac{\tau^2(1 - C_{30})}{(C_{10} + D_{10}F)} \frac{g}{\Theta} \frac{c_x}{2} \frac{\partial \Theta}{\partial x_3}$$

При подстановке (13) в (6) и (7) получим соотношения для турбулентных потоков массы $\langle cu \rangle$, $\langle cv \rangle$, $\langle cw \rangle$, которые по внешнему виду напоминают градиентные замыкающие соотношения Буссинеска с компонентами тензора коэффициента диффузии:

$\langle cu_i \rangle = -K_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}$. При их подстановке в уравнении переноса (1) появляются смешанные про-

изводные, влияние которых может быть существенно.

Турбулентные потоки тепла и импульса, входящие в полученные выражения (6), (7) и (8) (или(11)) определяются при помощи алгебраических соотношений, представленных в [7].

Заметим также, что корреляции пульсаций концентрации и температуры $\langle c\theta \rangle$ могут быть рассчитаны с использованием транспортного уравнения (9).

Метеорологические параметры и турбулентные характеристики, необходимые для модели переноса, определяются на основе нестационарной модели в приближении однородного АПС [8]. При этом используется трехпараметрическая « $k-l-\langle \theta^2 \rangle$ » модель турбулентности, включающая прогностические уравнения для энергии и масштаба турбулентности, а также квадрата пульсации температуры [8]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = -\langle uw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} - \langle vw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{g}{\Theta} \langle w\theta \rangle + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_e \sqrt{k} l \frac{\partial k}{\partial z} \right) - \frac{C_D k^{\frac{3}{2}}}{l}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial l}{\partial t} = C_{l1} \left(-\langle uw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} - \langle vw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{g}{\Theta} \langle w\theta \rangle \right) \frac{l}{k} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_e \sqrt{k} l \frac{\partial l}{\partial z} \right) + C_{l2} \sqrt{k} \left[1 - \left(\frac{l}{\kappa z} \right)^2 \right]; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(C_\theta \sqrt{k} l \langle w \rangle^2 \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial z} \right) - 2 \langle w\theta \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial z} - 2 \frac{\langle \theta^2 \rangle}{C_\theta \tau}. \quad (14)$$

Здесь $k = 0.5(\langle u^2 \rangle + \langle v^2 \rangle + \langle w^2 \rangle)$ – кинетическая энергия турбулентности; l – интегральный масштаб турбулентности, $\sigma_e = 0.54$, $C_{l1} = -0.12$, $C_{l2} = 0.2$, $C_D = 0.19$, $C_\theta = 3.0$ – числовые коэффициенты, $\kappa = 0.41$. Турбулентные потоки импульса $\langle uw \rangle, \langle vw \rangle$ и тепла $\langle w\theta \rangle$ определяются при помощи алгебраических соотношений [7].

Начальные и граничные условия, численный метод решения дифференциальных уравнений переноса примеси подробно описаны в [1, 8].

Тестовые расчеты турбулентного пограничного слоя производились на задачах моделирования пограничного слоя над однородной поверхностью для различных условий температурной стратификации атмосферы и динамики нестационарного пограничного слоя над однородной поверхностью (Вангара-эксперимент).

Вангара-эксперимент (Wangara Experiment) является одним из наиболее удачных и достоверных натуральных экспериментов по изучению атмосферного пограничного слоя, его данные позволяют протестировать модель на условиях нестационарного изменения пограничного слоя атмосферы над однородной поверхностью [13].

На рис. 1 показаны результаты сравнения расчетов по предложенной модели и модели, использующей градиентные замыкающие соотношения Буссинеска и значение коэффициента турбулентной диффузии, с экспериментальными данными, полученными в ходе Вангара-эксперимента [13]. Видно, что явная анизотропная модель более качественно воспроизводит тонкую динамическую и термическую структуру АПС вблизи поверхности, а использование подхода основанного на понятии турбулентной диффузии в этом случае неэффективно.

Кроме того, тестирование так же осуществлялось на задаче распространения примеси в конвективном пограничном слое от приподнятого над поверхностью источника непрерывного действия.

Распространение примеси от приземного источника, расположенного на высоте $0,067z_i$ (z_i – высота слоя инверсии), показано на рис. 2. Условия проведения расчетов и данные для сравнения взяты из [2]. Здесь $C_y^* = C_y(x, z)z_i U_s / Q_i$ – безразмерная концентрация примеси; z_i – высота слоя инверсии; ось x^* в направлении вниз по потоку от источника $x^* = xw_*/U_s z_i$; $z^* = z/z_i$ – безразмерная вертикальная координата; $w_* = \sqrt[3]{\beta g q_0 z_i}$ – конвективный масштаб скорости; U_s – скорость ветра на высоте источника; $C_y(x, z)$ – концентрация примеси, осредненная по горизонтальной координате Oy , перпендикулярной направлению вектора скорости ветра; Q_i – мощность источника; β – коэффициент объемного расширения; g – ускорение свободного падения; q_0 – тепловой поток на поверхности.

Результаты расчетов по предложенной модели хорошо согласуются с результатами эксперимента, а локально изотропная модель, использующая замыкающие соотношения Буссинеска, (рис. 2в) в данных условиях не способна воспроизводить тонкую структуру турбулентного рассеяния примеси.

Апробация представленной модели переноса с использованием GRS механизма химической трансформации примеси [9] проводилась для условий города Томска на основе данных наблюдений, полученных ТОР-станцией ИОА СО

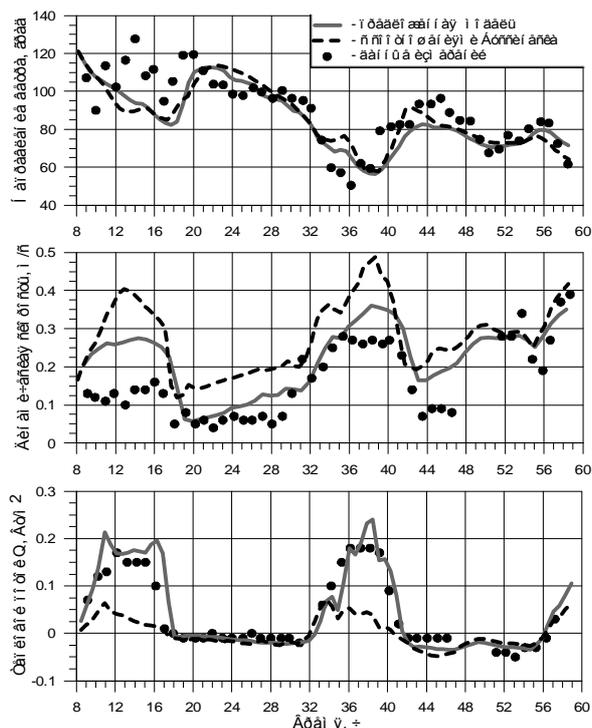


Рис. 1. Изменения направления ветра, динамической скорости конвективного теплового потока на поверхности Земли в течение Вангара-эксперимента (33-34 день)

эквивалентна безразмерному расстоянию

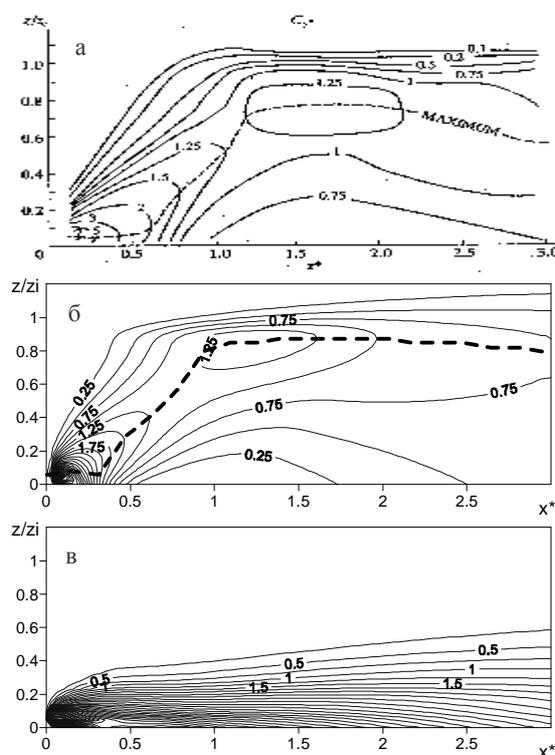


Рис. 2. Изолинии безразмерной концентрации примеси, (а) – результаты эксперимента [2], (б) – результат моделирования по предложенной модели, (в) – результат моделирования с использованием соотношений Буссинеска

РАН (<http://www.iao.ru/ru/measure/>), и данных моделирования по модели прогнозирования качества воздуха CAMx (Comprehensive Air quality Model with extensions) версия 4.20 [12], адаптированной для условий города Томска. Для проведения расчетов по модели CAMx используются метеорологические поля, полученные в результате расчетов по мезомасштабной метеорологической модели MM5, адаптированной для условий города Томска [6], а также данные по антропогенным источникам выбросов, обработанные при помощи предпроцессора [12].

Описание расчетной области, способ задания начальных и граничных условий, а также характеристика основных источников примеси города Томска дано в [1]

На рис. 3 приведено сравнение результатов расчетов, выполненных с использованием предложенной модели переноса примеси, с расчетными данными модели прогноза качества воздуха CAMx и измерениями TOR-станции ИОА СО РАН для условий 26-27 мая 2004 года.

Полученные профили показывают, что приземная концентрация озона начинает расти после восхода солнца и достигает своего максимума после полудня, когда солнечная активность начинает убывать (рис. 3а). Это обусловлено тем, что в дневное время значительной становится фотохимическая реакция фотолиза диоксида азота с образованием озона и оксида азота, скорость которой превосходит скорость обратной реакции. Такая ситуация приводит к снижению концентрации диоксида азота в дневное время, поскольку уровень его эмиссии невысок и не способен компенсировать потери.

Согласно реакциям химической схемы [9] образование озона сопровождается генерацией монооксида азота, максимальные концентрации которого также формируются днем и ограничивают рост концентрации озона. Однако если попутно выбрасываются или генерируются органические радикалы, то посредством достаточно быстрых реакций обеспечивается дополнительный механизм образования диоксида азота, а, следовательно, увеличивается выход озона. В ночное время фотохимические реакции отсутствуют, поэтому существенное значение приобретает реакция взаимодействия оксида азота с озоном с образованием диоксида азота, что обеспечивает накопление последнего в приземном слое атмосферы.

Таким образом, профили приземной концентрации озона коррелируют с профилями уровня солнечной радиации (рис. 3а,г) с максимальными значениями около полудня. В то время как для концентрации диоксида азота наоборот характерны дневные минимумы и ночные максимумы (рис. 3б).

Характерные ночные максимумы и дневные минимумы концентрации оксида углерода (рис. 3в), по всей видимости, обусловлены фактором запирающей инверсии. Радиацион-

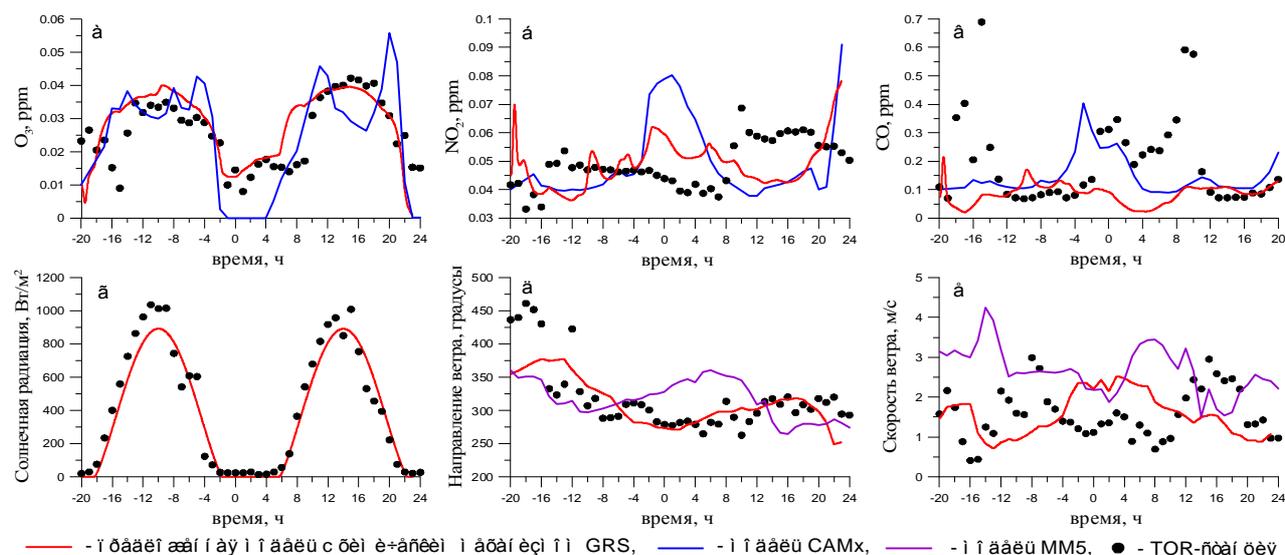


Рис. 3. Сравнения результатов расчетов моделям с данными наблюдений по концентрациям озона (а), диоксида азота (б), оксида углерода (в), суммарной солнечной радиации (г), направлению (д) и скорости ветра (е) для условий 26–27 мая 2004 года. Отрицательная часть временной оси соответствует первым суткам моделирования, положительная – вторым

ное выхолаживание поверхности в ночные часы снижает турбулентное перемешивание в приземном слое и, соответственно, вынос примеси в верхние слои атмосферного пограничного слоя, что способствует её накоплению вблизи поверхности. Утреннее разрушение инверсии за счет солнечной радиации и прогрева земной поверхности, наоборот, интенсифицирует обменные процессы между нижними и верхними слоями, следовательно, способствует рассеянию примеси. Данный эффект, по всей видимости, в некоторой степени характерен и для диоксида азота (Рис. 3б).

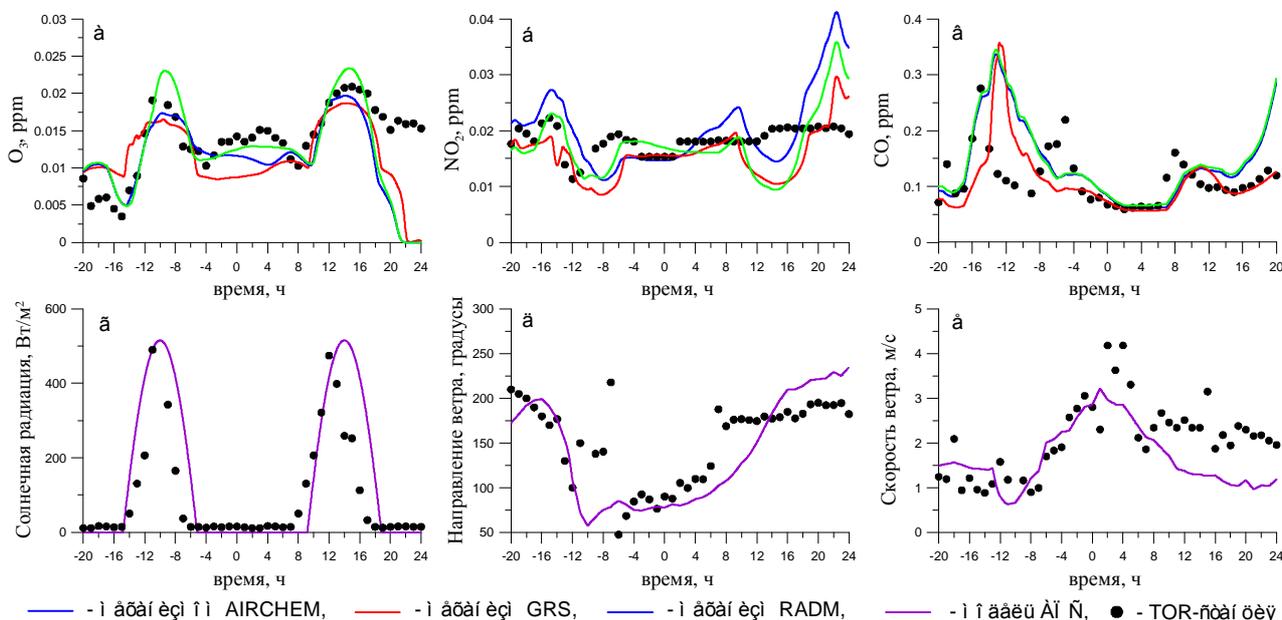


Рис. 4. Сравнения результатов расчетов по представленной модели с различными механизмами химических реакций с данными наблюдений для условий 19–20 февраля 2004 года. Обозначения см. рис 5.

Что касается сравнения по направлению и скорости ветра (рис. 5 (д,е)), то результаты расчета по модели однородного АПС согласуются с данными измерений чуть лучше, чем расчеты по мезомасштабной модели MM5.

Это обусловлено использованием предложенной моделью достоверных данных о структуре АПС в течение расчетного периода.

Таким образом, имеет место удовлетворительное соответствие предсказанных и измеренных значений приземной концентрации озона, диоксида азота, оксида углерода, а также метеорологических параметров.

На рис. 4 изображены значения приземных концентраций компонентов примеси и метеорологических параметров, рассчитанные по представленной модели с различ-

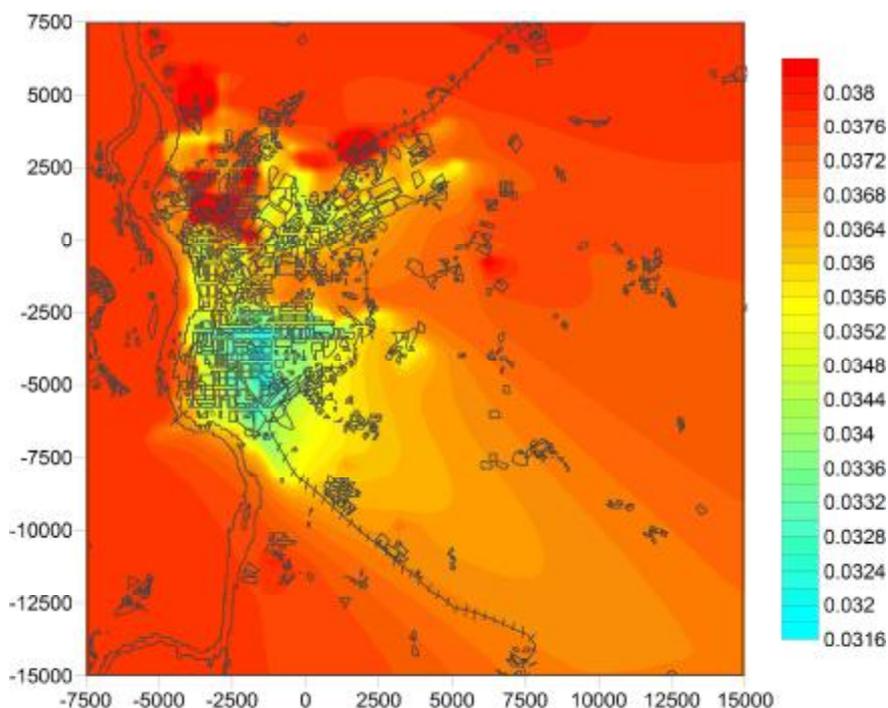


Рис. 5. Распределение концентрации озона (ppm) над городом Томск и его окрестностями. 10:00 27 мая 2004

ными механизмами химических реакций, а также данные наблюдений для условий 19–20 февраля 2004 года. Оценки загрязнения атмосферы тропосферным озоном и другими вторичными загрязнителями осуществляется с использованием, полуэмпирического механизма GRS (Generic Reaction Set) [9], модуля AIRCHEM [9] и упрощённой схемы RADM [3].

Низкий уровень солнечной радиации (рис. 4з), характерный для зимних месяцев, не способствует интенсивному протеканию фотохимических реакции, поэтому амплитуда изменения концентраций озона в течение суток невысока. В ночное время, так же как и в период 26-27 мая 2004 (рис. 3а) года фиксируются концентрации O_3 на уровне 0,015 *ppm*, а днем всего 0,020–0,022 *ppm* против 0,040–0,045 *ppm* в мае.

Незначительное изменение концентрации диоксида азота в течение суток также обусловлено низкой интенсивностью химических реакций. В течении почти всего рассматриваемого периода направление ветра соответствует северному и северо-восточному, т.е. набегающий поток приносит порции относительно чистого воздуха, поэтому концентрация NO_2 находится на отметке $\approx 0,02$ *ppm*. Лишь в начале и в конце периода моделирования поток направлен с города (как в случае 26-27 мая 2004) и концентрации изменяются существенно.

Оксид углерода с точки зрения рассматриваемых механизмов химических реакций является химически инертным соединением, поэтому распространение и рассеяние CO определяется скоростью и направлением ветра. Таким образом, повышение концентрации в середине первых суток моделирования и в конце вторых обусловлено понижением скорости ветра, а около 8 часов вторых суток изменением направления.

Подводя итоги, отметим, что представленная модель с упрощенными механизмами химических реакций в целом адекватно прогнозируют распространение примеси в атмосфере города.

Представленная модель переноса примеси с химическим механизмом GRS использовалась для исследования распределения концентрации озона над территорией города Томск и его пригородами. Погодные условия 27 мая 2004 года характеризуются ветром с постоянным северо-западным направлением и слабо меняющейся скоростью 1–3 *м/с*, безоблачным небом и позволяют достоверно оценить динамику озона над районами города. На рис. 5 представлено распределение

распределение концентрации озона над городом Томск и его окрестностями, соответствующие 10 часам 27 мая 2004. В это время уровень фотохимических реакций ещё невысок, а эмиссия примеси от источников протекает интенсивно. Озон вступает во взаимодействие с оксидом азота, поэтому в городе особенно вдоль интенсивных автодорог концентрация озона наименьшая.

Часть примеси с центра города сносится ветром на окраину, поэтому на юго-востоке образуется протяженный шлейф пониженной концентрации озона. Во второй половине дня, когда интенсивность фотохимиче-

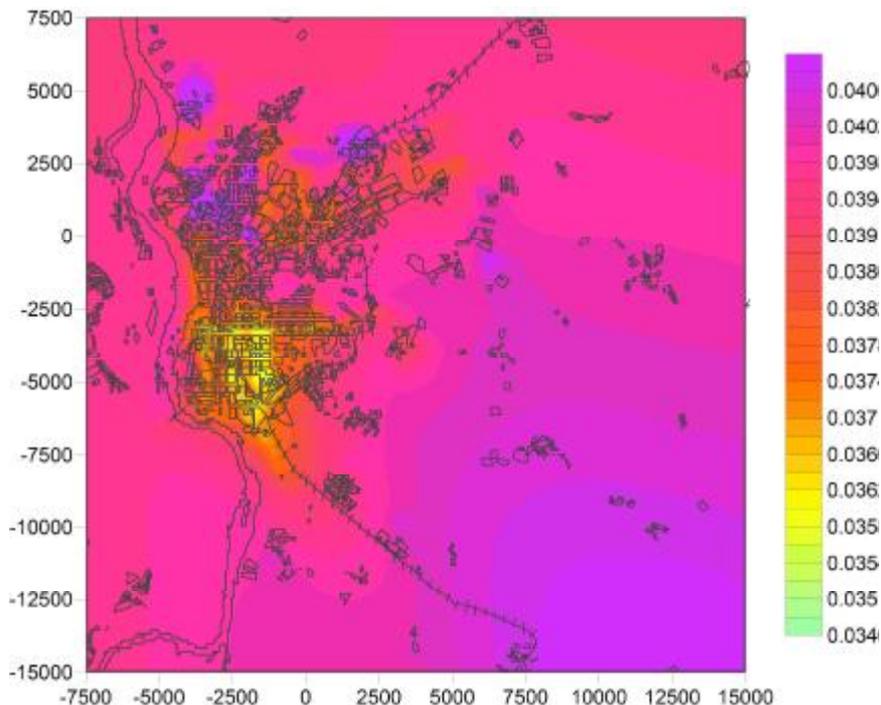


Рис. 6. Распределение концентрации озона (*ppm*) над городом Томск и его окрестностями. 16:00 27 мая 2004

ских реакций близка к максимальной, ситуация меняется диаметрально (рис. 6). Теперь в переносимой на юго-восток примеси создаются наиболее благоприятные условия для генерации приземного озона. Таким образом, максимальные концентрации озона образуются во второй половине дня на окраине города с его подветренной стороны [11]. При этом протяженность шлейфа определяется скоростью ветра. В условиях близких к штилевому область наибольших значений концентрации O_3 располагается ближе к городу, а с увеличением скорости ветра отодвигается от города.

11 июля 2005 года сотрудниками ТОР-станции при помощи мобильной станции АКВ-2 [4] были проведены комплексные измерения метеорологических параметров и концентраций веществ. Схема движения станции по городу представлена на рис. 7. Движение мобильная станция начала в 14:38 по местному времени в районе Лагерного сада (1), а закончила в 17:10 в Академгородке (2).

Сопоставление результатов расчета с данными измерений по направлению и скорости ветра приведены на рис. 8.

На рис. 9 представлены результаты расчета концентрации CO по представленной модели переноса примеси, соответствующие 16:00, и измерения с использованием мобильной станции АКВ-2. Поскольку измерения проводились в течение двух с половиной часов, а расчет соответствует точно определенному времени, то такое сопоставление данных, имеющих неоднородное временное распределение, можно рассматривать лишь как сравнение результатов по выявлению областей повышенных концентраций загрязнителей в городе. С этой точки зрения достигается хорошее качественное согласование.

По результатам моделирования и измерений отчетливо видны наиболее мощные источники оксида углерода (рис. 9): транспортный узел и ряд предприятий вблизи перекрестка пр. Фрунзе и пр. Комсомольский (область под номером 1), распределенные источники,

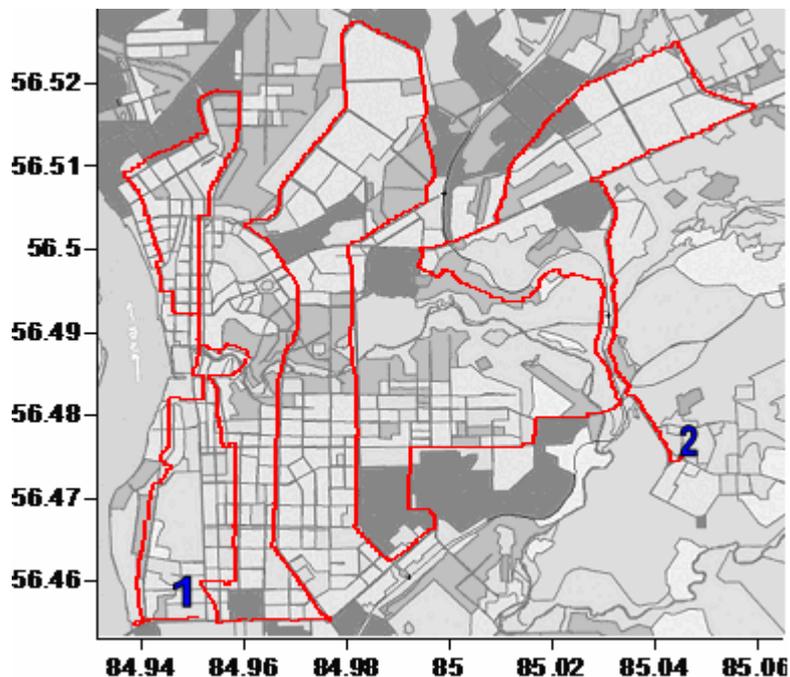


Рис. 7. Схема движения мобильной станции АКВ-2 по городу Томску

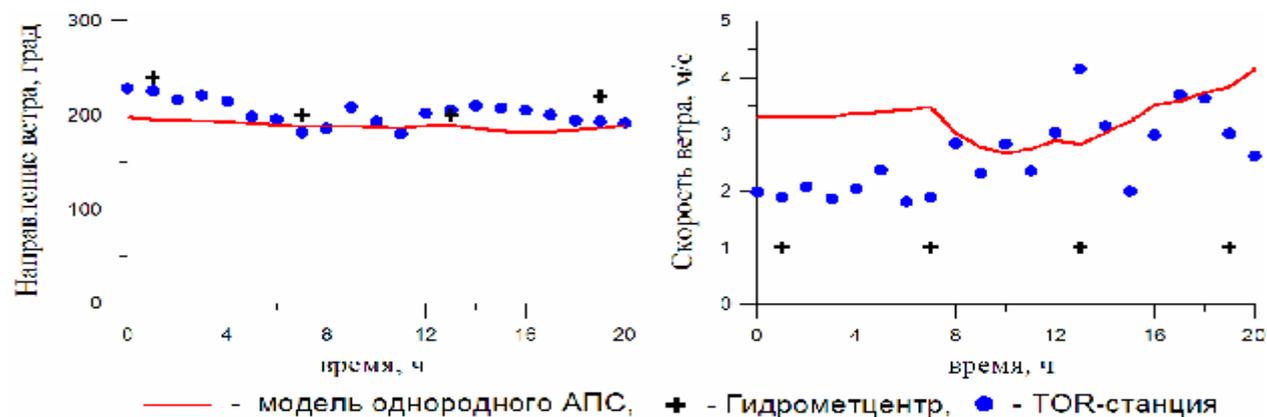


Рис. 8. Скорость и направление ветра в г. Томске в течение 11 июля 2005

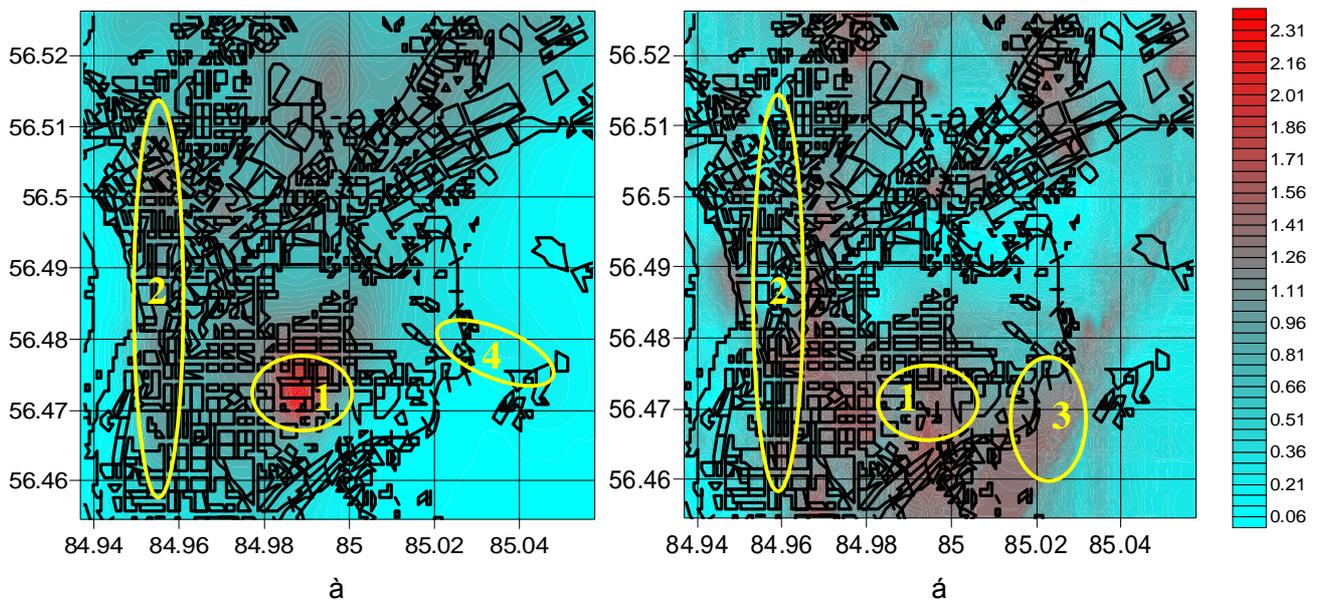


Рис. 9. Концентрации CO в атмосфере над г. Томском 11 июля 2005, (а) – моделирование, (б) – измерения

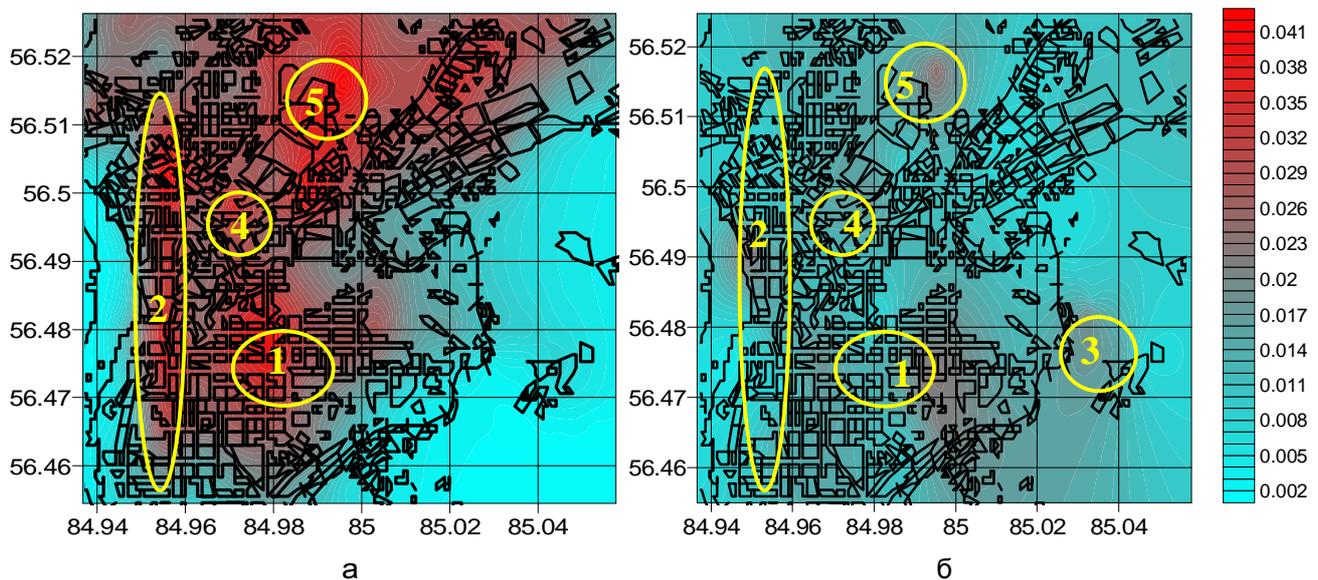


Рис. 10. Концентрации NO_2 в атмосфере над г. Томском 11 июля 2005, (а) – моделирование, (б) – измерения

расположенные вдоль пр. Ленина – крупной транспортной артерии города (2), и множество более мелких источников в северной части Томска.

По большому счету имеется только одно существенное рассогласование. В соответствии с данными моделирования не поддается объяснению повышенное значение концентрации оксида углерода в области 3, где нет мощных источников CO . Исключением является автодорога (4), но согласно расчетам её вклад незначителен.

Основным источником диоксида азота в городе является автотранспорт, поэтому зоны повышенной концентрации NO_2 образуются вдоль крупных автодорог, что хорошо видно по расчетным полям (рис. 10а). В результате измерений были выявлены лишь основные максимумы, образующиеся в районах перекрестков с интенсивным движением (области 1,2,3,4). На рис. 10 также, как на рис. 9 номером 3 обозначены области повышенной концентрации, зафиксированные измерениями и не проявившиеся при моделировании. По-видимому, в этой точке измерения отражают локальную ситуацию загрязнения воздуха в момент наблюдения.

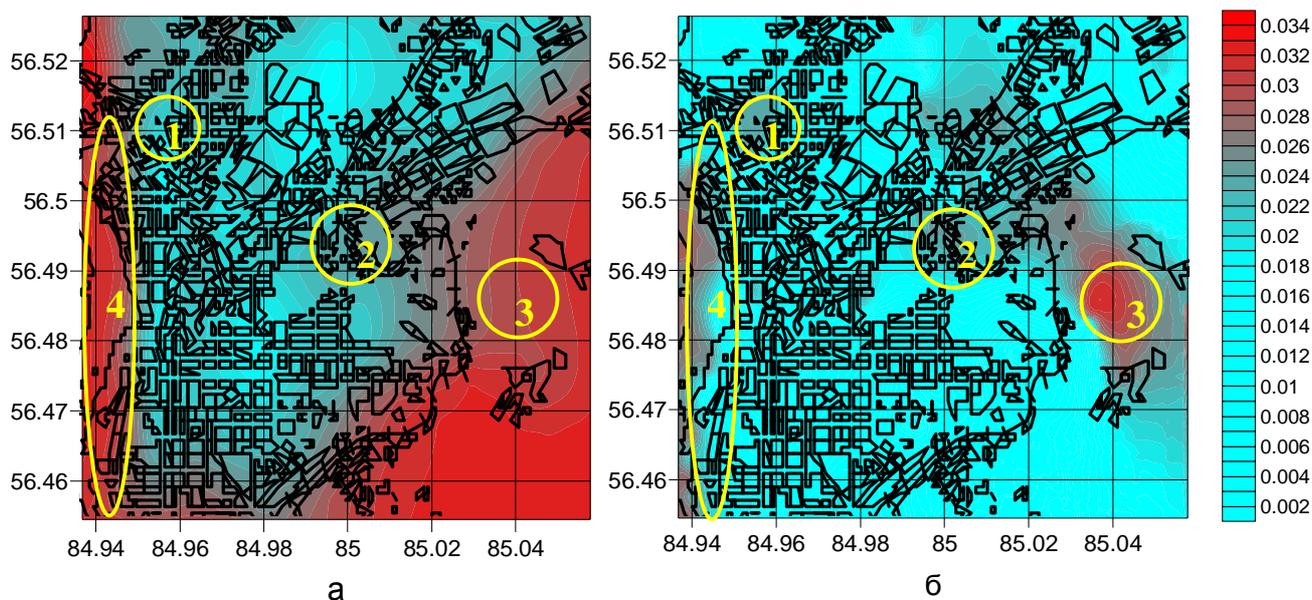


Рис. 11. Концентрации O_3 в атмосфере над г. Томском 11 июля 2005, (а) – моделирование, (б) – измерения

На рис. 11 представлены результаты моделирования и измерения концентрации озона. В соответствии с рис. 8-9 максимальные концентрации приземного озона формируются в пригороде, однако маршрут мобильной станции почти полностью пролегает в черте города, а окраины не были охвачены. Поэтому в результате моделирования были выявлены лишь некоторые небольшие участки повышенных концентрации тропосферного озона – области 1, 2, 3, 4.

Таким образом, для замыкания уравнений переноса примеси предложена явная анизотропная схема, в которой на основе околоравновесного приближения турбулентные потоки массы представляются в виде простых замыкающих соотношений градиентного типа. Результаты тестирования предложенной численной модели, опирающейся на оригинальную схему замыкания уравнения переноса и алгебраические соотношения для турбулентных потоков количества движения, тепла и массы показали хорошее согласование с результатами натуральных наблюдений для конвективных условий температурной стратификации АПС и Вангара-эксперимента.

Представлены результаты использования модели для воспроизведения полей концентраций химически инертных и реагирующих примесей, а также примеры численного исследования реальных метеорологических ситуаций, соответствующих условиям г. Томска. Проведенное сравнение с моделью прогнозирования качества воздуха САМх, а также результатами стационарных измерений ТОР-станции ИОА СО РАН показало удовлетворительную степень качественного и количественного соответствия вычислений по предложенной модели реальным атмосферным процессам и режимам рассеяния и трансформации рассматриваемых веществ. Кроме того, установлен суточный ход изменения концентрации озона в городе Томске и его пригородах, выявлены наиболее загрязнённые озонем, оксидами углерода и азота районы города.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 04-07-90219, 05-98010р-Обь.

Литература:

1. Беликов Д.А., Старченко А.В. Исследование образования вторичных загрязнителей (озона) в атмосфере г. Томска // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, № 05-06. – С. 435-443.

2. Илюшин Б.Б., Курбацкий А.Ф. Моделирование распространения примеси в конвективном пограничном слое атмосферы // Известия АН. Физика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 32, № 3. – С. 307–321.
3. Короленок Е. В., Нагорнов О. В. Моделирование приземных концентраций озона городского региона // Математическое моделирование. – 2002. – Т.14, № 4. – С. 80-94.
4. Мобильная станция АКВ-2 и её применение на примере города Томска / М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, Д.К. Давыдов и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, №8. – С. 643-648.
5. Методы расчета турбулентных течений: Пер. с англ. / Под ред. В. Колльмана. – М.: Мир. – 1984. – 463с.
6. Применение мезомасштабных моделей MM5 и WRF к исследованию атмосферных процессов / А.В. Старченко, Д.А. Беликов, Д.А. Вражнов, А.О. Есаулов // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т.18. – № 05-06. –С. 455-461.
7. Старченко А.В. Моделирование переноса примеси в однородном атмосферном пограничном слое // Труды Международной конференции ENVIRROMIS-2000. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. – 2000. – С. 77–82.
8. Старченко А.В., Беликов Д.А. Численная модель для оперативного контроля уровня загрязнения городского воздуха // Оптика атмосферы и океана. — 2003. – Т. 16, № 7. – С. 657–665.
9. Hurley P. J. The Air Pollution Model (TAPM) Version 2 / CSIRO Atmospheric Research Technical Paper. – 2002. – No.55. – P.37. Morison R.P., Leslie L.M., Speer M.S. Atmospheric modeling of air pollution as a tool for environmental prediction management // Meteorology and atmospheric physics. – 2002. – V.80. – P. 141-151.
10. Moussiopoulos N., Sahn P., Kessler C., Numerical simulation of photochemical smog formation in Athens, Greece – A case study // Atmospheric Environment. – 1995. – V.29. – No.24. – P. 3619-3632.
11. Tulet P., Maaley A., Crassier V., Rosset R. An episode of photooxidant plume pollution over the Paris region // Atmospheric Environment. – 1999. – V.33. – P. 1651–1662.
12. User's Guide. Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx) Version 4.20 / Environ International Corporation, Novato, CA, 2005. – Режим доступа: электронный ресурс – http://www.camx.com/files/CAMxUsersGuide_v4_20.pdf.
13. Yamada T., Mellor G. A Simulation of the Wangara Atmospheric Boundary Layer Data // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1975. – V.–32. – P. 2309–2329.

APPLICATION OF POLLUTION TURBULENT TRANSPORT MODEL TO ANALYSIS OF FORMATION OF SECONDARY POLLUTANTS IN THE URBAN ATMOSPHERE

Belikov Dmitry, Alexander Starchenko

In work the original explicit anisotropy model of turbulent transport pollution is presented. Original ratio for turbulent fluxes of mass $\langle c_i u \rangle$, $\langle c_i v \rangle$, $\langle c_i w \rangle$ are used in model of transport pollution considering chemical transformations of transferable substances which is applied to investigate of formation and dispersion secondary pollutants in city boundaries and its vicinities.