

Научная статья

УДК 519.6

MSC: 65M08, 86A10

doi: 10.17223/19988621/79/3

Численное моделирование качества воздуха над городом Томском при слабом ветре

Александр Васильевич Старченко¹, Елена Александровна Шельмина²,
Любовь Ильинична Кижнер³, Сергей Леонидович Одинцов⁴

^{1, 2, 3} Томский государственный университет, Томск, Россия

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия

⁴ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН, Томск, Россия

¹ starch@math.tsu.ru

² eashelmina@mail.ru

³ kdm@mail.tsu.ru

⁴ odintsov@iao.ru

Аннотация. Представлены математическая модель и численный метод расчета метеорологических параметров и величин, характеризующих качество атмосферного воздуха в городе, полученные с использованием мезомасштабных моделей численного прогноза погоды и переноса примеси. Результаты численных расчетов сравнивались с данными наблюдений, выполненных с помощью приборов ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН. Проведенные исследования показали, что наиболее неблагоприятные метеорологические условия, приводящие к накоплению примеси вблизи земной поверхности, наблюдаются в утренние и вечерние часы, – это слабый ветер переменного направления и устойчивая или нейтральная стратификация приземного слоя воздуха.

Ключевые слова: математическое моделирование, качество воздуха, полуневянные разностные схемы, параллельные вычисления, слабый ветер, устойчивая стратификация

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-71-20042).

Для цитирования: Старченко А.В., Шельмина Е.А., Кижнер Л.И., Одинцов С.Л. Численное моделирование качества воздуха над городом Томском при слабом ветре // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 79. С. 25–43. doi: 10.17223/19988621/79/3

Numerical simulation of air quality over a Tomsk city in light wind

Alexander V. Starchenko¹, Elena A. Shelmina²,
Lyubov I. Kizhner³, Sergej L. Odintsov⁴

^{1, 2, 3} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

⁴ Institute of Atmospheric Optics of V.E. Zuev, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

¹ starch@math.tsu.ru

² eashelmina@mail.ru

³ kdm@mail.tsu.ru

⁴ odintsov@iao.ru

Abstract. The article presents a mathematical model and a numerical method for calculating meteorological parameters and parameters characterizing the quality of atmospheric air in the city. The model and the method are obtained using mesoscale models of numerical weather forecasting and impurity transport.

The equations of the applied mathematical model, along with the non-stationary term, include terms describing horizontal and vertical advection, turbulent diffusion, sedimentation, the influx of primary atmospheric air pollutants, and chemical reactions between the active components of the impurity:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial UC_i}{\partial x} + \frac{\partial VC_i}{\partial y} + \frac{\partial WC_i}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) - \sigma_i C_i + S_i + R_i, \quad i = 1, \dots, n_s. \end{aligned} \quad (1)$$

$$-L/2 \leq x \leq L/2; \quad -L/2 \leq y \leq L/2; \quad h(x, y) \leq z \leq H; \quad 0 \leq t \leq T.$$

Here, C_i is concentration of the i th impurity component; U , V are the components of the horizontal wind velocity vector; W_i is the impurity velocity vertical component; K_{xy} , K_z are the coefficients of horizontal and vertical diffusion; S_i is the source term representing emissions of pollutant components into the atmosphere due to elevated and ground sources; R_i describes the formation and transformation of a substance due to chemical and photochemical reactions involving impurity components; σ_i is the rate rate of wet deposition of an impurity due to precipitation; n_s is the amount of chemical components of the impurity; x , y are the horizontal coordinates, the Ox axis is directed to the east and the Oy axis to the north; z is the vertical coordinate; t is time; T is the simulation period; L is the horizontal dimension of the area; H is the height of the studied area; and $h(x, y)$ is the height of surface topography above the sea level. The upper boundary of the area under study is set at a height of 1 km; the horizontal dimension $L = 50$ km.

Equations of the form (1) are solved numerically using semi-implicit difference schemes and the finite volume method by grids with a uniform step along the horizontal directions Ox and Oy and condensing towards the Earth's surface along the vertical direction Oz . When approximating the differential equation (1), the finite volume method with the second order of approximation in spatial variables is used. Efficient parallel programs have been developed with an efficiency of at least 70% when using up to 100 processes of the Cyberia computing cluster at Tomsk State University.

The results of numerical calculations were compared with the experimental data obtained using the instruments of the Atmosphere Research Equipment Sharing Center, Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. Good agreement of results obtained. In addition, the studies performed have shown that the most unfavorable meteorological conditions leading to the accumulation of impurities near the Earth's surface in the morning and evening hours are a weak wind of variable direction and stable or neutral stratification of the surface air layer.

Keywords: mathematical modeling, air quality, semi-implicit difference schemes, parallel computing, weak wind, stable stratification

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation (project No.19-71-20042).

For citation: Starchenko, A.V., Shelmina, E.A., Kizhner, L.I., Odintsov, S.L. (2022) Numerical simulation of air quality over a Tomsk city in light wind. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 79. pp. 25–43. doi: 10.17223/19988621/79/3

Введение

Формирование загрязнения атмосферного воздуха в городах зависит от многих факторов. Наиболее важными из них являются выбросы промышленных предприятий, автотранспорта и метеорологические условия: направление и скорость ветра, температура воздуха, стратификация атмосферы, туманы, осадки и др. [1]. Кроме этого, существенное влияние на рассеивание примесей оказывают физико-географические условия местности, а также характеристики урбанизированной территории, зеленые массивы и водные объекты, которые образуют разные формы наземных препятствий воздушному потоку и приводят к возникновению особых метеорологических условий в городе [2].

За последние несколько десятилетий мезомасштабное (горизонтальный масштаб от 2 до 2 000 км) моделирование метеорологических процессов и загрязнения воздуха стало надежным способом проведения научных и практических исследований атмосферных процессов с целью оценки и регулирования вредных выбросов, оказывающих влияние на здоровье людей и окружающую среду [3]. Развитие вычислительных методов и параллельных компьютерных технологий в численном прогнозе погоды дало возможность эффективно использовать подходы математического моделирования для оперативных приложений и приложений, позволяющих на основе результатов моделирования принимать административные решения, регулирующие антропогенные выбросы в городах.

В настоящее время в мире существует большое количество информационно-вычислительных систем краткосрочного численного прогноза качества атмосферного воздуха в городах [3]. Эти системы в основном позволяют прогнозировать погодные условия, в первую очередь ветровые характеристики, температуру и влажность в нижней части пограничного слоя. Целью прогноза являются возможные неблагоприятные метеоусловия, которые могут привести к высокому уровню загрязнения воздуха. Передовые технологии прогнозирования загрязнения воздуха основываются на создании региональных моделей атмосферы, учитывающих состояние атмосферы, рассеяние и осаждение основных загрязняющих примесей, включая влияние автомобильного транспорта. Например, в Европе

используется система Enviro-HIRLAM [4] (Environment – High Resolution Limited Area Model), которая разработана как сопряженная модель численного прогноза погоды и атмосферного химического переноса для исследования и прогнозирования совместной метеорологической, химической и биологической погоды. Модель учитывает перенос и рассеивание загрязняющих веществ, химию, динамику и осаждение аэрозолей, метеопараметры. В настоящее время Enviro-HIRLAM используется для различных исследований, включая оперативное прогнозирование пыльцы для Дании и состава атмосферы для Китая. Во многих странах широкое распространение получила разработанная в США система моделирования WRF-Chem (Weather Research and Forecasting), которая активно применяется для решения многих практических задач исследования и прогноза погоды и качества атмосферного воздуха [5]. WRF-Chem моделирует выбросы, перенос, смешивание и химическое преобразование газовых примесей и аэрозолей одновременно с метеорологией.

В Гидрометцентре России созданы и функционируют в режиме регулярного счета комплексы мезомасштабных моделей WRF/CHIMERE, COSMO-Ru7-ART, COSMO-Ru7/CHIMERE [6, 7]. Модель численного прогноза погоды COSMO-Ru создана в рамках международного сотрудничества стран Европы и России. Расчеты выполняются для центральных областей европейской части России. Для Европейской территории РФ реализованы версии модели COSMO с шагом сетки от 1,1 до 13,2 км, а для Сибирского региона функционирует технология COSMO-Ru-Sib с разрешением от 2,2 до 13,2 км. Модель химического переноса CHIMERE позволяет количественно предсказывать эволюцию шлейфа загрязняющих веществ с учетом химических реакций в зависимости от времени. С помощью комплексов COSMO-Ru7-ART, COSMO-Ru7/CHIMERE оценивается содержание в атмосфере различных компонентов примеси (CO , NO_x , O_3 и ряда других) на 2–3 суток вперед (с дискретностью по времени 1 ч) и составляются прогностические карты приземной концентрации некоторых компонент примеси с указанием температуры воздуха, скорости и направления ветра. Тестирование рассмотренных численных моделей прогноза загрязнения воздуха показало, что их погрешность соответствует погрешности существующих физико-статистических методов и обусловлена ошибками в прогнозе температуры и ветра в пограничном слое атмосферы [6, 7]. Точность прогноза температурно-влажностных характеристик определяет возможность численного предсказания условий для загрязнения атмосферы и его интенсивности. При неблагоприятных для загрязнения условиях требуется особо точное предвычисление температурно-ветровых характеристик.

В этой связи являются актуальными создание новых гидродинамических моделей атмосферы и усовершенствование существующих для прогноза метеорологических условий атмосферы и уровня ее загрязнения различными компонентами с необходимой заблаговременностью и достаточной дискретностью.

В Томском университете для решения такой задачи разрабатывается вычислительный комплекс, включающий мезомасштабную негидростатическую модель TSUNM3 [8], которая позволяет прогнозировать с горизонтальным разрешением 1 км метеорологические поля, а также фотохимическую модель переноса [9], в которой на основе рассчитанных метеорологических полей с разрешением 500 м оценивается распространение примесей от антропогенных и биогенных источников, расположенных в окрестностях города.

Целью данного исследования является описание математической модели переноса примеси, численного метода и некоторых результатов применения разрабатываемого вычислительного комплекса для исследования особенностей изменения метеорологической обстановки и качества атмосферного воздуха в городе Томске в условиях слабого ветра.

Описание математической модели переноса примеси

Для математического описания динамики химического состава приземного слоя атмосферы вследствие эмиссии примеси и химических реакций между ее компонентами используется эйлерова континуальная модель турбулентной диффузии [10, 11]. Уравнения этой математической модели наряду с нестационарным членом включают слагаемые, описывающие горизонтальную и вертикальную адвекцию, турбулентную диффузию, осаждение, поступление первичных загрязнителей атмосферного воздуха и химические реакции между активными компонентами примеси:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial UC_i}{\partial x} + \frac{\partial VC_i}{\partial y} + \frac{\partial WC_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) - \sigma_i C_i + S_i + R_i, \quad i = 1, \dots, n_s. \quad (1)$$

$$-L/2 \leq x \leq L/2; \quad -L/2 \leq y \leq L/2; \quad h(x, y) \leq z \leq H; \quad 0 \leq t \leq T.$$

Здесь C_i – концентрация i -й компоненты примеси; U, V – составляющие вектора горизонтальной скорости ветра; W – вертикальная компонента скорости примеси; K_{xy}, K_z – коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии; S_i – источниковый член, представляющий выбросы компонентов примеси в атмосферу за счет как приподнятых, так и наземных источников; R_i описывает образование и трансформацию вещества за счет химических и фотохимических реакций с участием компонентов примеси; σ_i – скорость осаждения примеси за счет осадков; n_s – количество химических компонентов примеси; x, y – горизонтальные координаты, ось Ox направлена на восток, Oy – на север; z – вертикальная координата; t – время, T – период моделирования. L – горизонтальные размеры области, H – высота области исследования, $h(x, y)$ – высота рельефа поверхности над уровнем моря. Верхняя граница области исследования задается на высоте 1 км, горизонтальные размеры $L = 50$ км.

Для системы уравнений (1) в качестве начальных условий используются фоновые значения концентраций компонентов примеси, которые для рассматриваемой области исследования могут быть получены из расчетов глобальной модели переноса примеси. На верхней границе применяются простые градиентные условия для концентраций. На боковых границах для входящего потока используются фоновые значения концентраций примеси, для выходящего – равенство нулю производной по направлению внешней нормали к границе. На нижней границе области исследования задаются условия сухого осаждения примеси за счет аэродинамического сопротивления r_a , сопротивления вязкого подслоя r_b и сопротивления, обусловленного распределением растительности r_c [12]:

$$-K_z \frac{\partial C_i}{\partial z} = Vd_i C_i, \quad Vd_i = \frac{1}{r_a + r_b + r_c};$$

$$r_a = \frac{\Psi(z/z_0, z/L_0)}{\kappa v_*}; \quad r_b = \frac{2(Sc_i/0,72)^{\frac{2}{3}}}{\kappa v_*}, \quad i = 1, \dots, n_s \quad (2)$$

Здесь Vd_i – скорость осаждения i -й компоненты примеси; z_0 – высота шероховатости; L_0 – масштаб турбулентности Обухова; Sc_i – число Шмидта для i -й компоненты примеси; $\kappa = 0.41$; v_* – динамическая скорость; Ψ – функция устойчивости [11].

Поступление первичных загрязнителей атмосферного воздуха (частицы, CO, NO_x, SO₂, летучие органические соединения) рассматривается от наземных источников – автомобильного транспорта, движущегося по автомобильным дорогам города, и от приподнятых источников – труб промышленных предприятий и объектов теплоэнергетики. При задании интенсивности поступления примеси учитываются такие параметры, как скорость, температура, расход и элементный состав эмиссии. Для приподнятых источников эти параметры имели постоянные значения в течение суток. Для наземных линейных источников нормированный расход эмиссии задавался по следующему закону [11]:

$$I_{Vehicle}(t_h) = \begin{cases} 0.05 + 0.95 \sin(\pi(t_h - 6)/18), & t_h \in [6, 24], \\ 0.05, & t_h \notin [6, 24]. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь t_h – местное время в часах.

Суммарное количество примеси, поступившей в атмосферу города за сутки от наземных и приподнятых источников, может быть рассчитано на основе информации о годовых объемах антропогенных выбросов вредных веществ в атмосферу для рассматриваемой территории. Например, для г. Томска такая информация доступна в отчетах Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области [13].

Наряду с антропогенными источниками загрязнения в данной работе рассматриваются выбросы природного происхождения, называемые биогенными [14]. Одним из биогенных прекурсоров озона является изопрен – биогенный углеводород, который в больших количествах выбрасывается в атмосферу растительностью. Изопрен составляет практически половину всех источников поступления летучих органических соединений в атмосферу. Объем таких выбросов зависит от типа растительности, интенсивности света и значительно возрастает с ростом температуры листьев растений. После выброса в атмосферу изопрен окисляется, что способствует образованию вторичных органических аэрозолей, а при высоком уровне оксидов азота – образованию озона. Для моделирования поступления изопрена от лесных массивов используется математическая параметризация [14], предложенная в модели MEGAN [15].

Для описания химических и фотохимических реакций (R_i в (1)) в данной работе предлагается использовать кинетическую схему, полученную с использованием двух хорошо апробированных сокращенных химических механизмов реакций [16, 17]. Модификация в основном коснулась полуэмпирического механизма General Reaction Set (GRS) [16], в котором компактно описывается образование вторичных загрязнителей воздуха (O₃, NO, NO₂, RP, H₂O₂, PM_{2.5} и др.). Такая модификация механизма GRS [16] дает возможность детально описывать процесс образования приземного озона и достаточно компактно моделировать эмиссию и дополнительную генерацию частиц размером 2,5 и 10 мкм в атмосфере города. В табл. 1 приведены итоговые химические реакции модифицированного химического механизма GRS.

**Химические реакции модифицированного сокращенного
кинетического механизма GRS**

Реакции	Скорости реакций
$R_{smog} + hv \rightarrow RP + R_{smog} + \eta SNGOC$	$r_1 = k_1 C_{R_{smog}}$
$RP + NO \rightarrow NO_2$	$r_2 = k_2 C_{RP} C_{NO}$
$RP + RP \rightarrow RP + \alpha H_2O_2$	$r_3 = k_3 C_{RP} C_{RP}$
$RP + NO_2 \rightarrow SGN$	$r_4 = k_4 C_{RP} C_{NO_2}$
$RP + NO_2 \rightarrow SNGN$	$r_5 = k_7 C_{RP} C_{NO_2}$
$RP + SO_2 \rightarrow SNGS$	$r_6 = k_6 C_{RP} C_{SO_2}$
$H_2O_2 + SO_2 \rightarrow SNGS$	$r_7 = k_7 C_{H_2O_2} C_{SO_2}$
$O_3 + SO_2 \rightarrow SNGS$	$r_8 = k_8 C_{O_3} C_{SO_2}$
$NO_2 + hv \rightarrow O(^3P) + NO$	$r_9 = k_9 C_{NO_2}$
$O_3 + hv \rightarrow O(^1D) + O_2$	$r_{10} = k_{10} C_{O_3}$
$O(^3P) + O_2 \rightarrow O_3$	$r_{11} = k_{11} C_{O(^3P)} C_{O_2}$
$O(^1D) + N_2 \rightarrow O(^3P) + N_2$	$r_{12} = k_{12} C_{O(^1D)} C_{N_2}$
$O(^1D) + O_2 \rightarrow O(^3P) + O_2$	$r_{13} = k_{13} C_{O(^1D)} C_{O_2}$
$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$	$r_{14} = k_{14} C_{O_3} C_{NO}$

Примечания. R_{smog} – реагирующая часть выбрасываемого транспортом и точечными источниками смога (летучих органических соединений), RP – органические радикалы, $O(^1D)$ – возбужденное состояние атомарного кислорода, $O(^3P)$ – основное состояние атомарного кислорода. $SNGOC$, $SNGN$, $SNGS$ – инертные негазообразные соединения углерода, азота и серы, представляющие собой составляющие образовавшихся в воздухе частиц PM2.5 и PM10 [16]. Константы скоростей реакций приведены в [16, 17].

Для расчета трехмерных полей скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии для (1) привлекалась негидростатическая мезомасштабная метеорологическая модель TSUNM3 [8], которая прогнозирует составляющие скорости ветра и температурно-влажностные характеристики в пограничном слое атмосферы на 50 вертикальных уровнях (до 10 000 м) для территории 150×150 км и вложенной в нее области с основанием 50×50 км (с центром в г. Томске, 85° в.д. и $56,5^\circ$ с.ш.). Инициализация модели TSUNM3 и обеспечение ее боковыми граничными условиями проводятся на основе результатов численного прогноза погоды оперативной глобальной моделью SL-AV [18] Гидрометцентра РФ. При проведении расчетов в метеорологической модели используется горизонтальное разрешение 1 км. При задании свойств подстилающей поверхности рассматриваются такие категории землепользования: водная поверхность, поверхность с незначительной растительностью, сельскохозяйственные угодья, лиственный, смешанный и хвойный лес, городская застройка. Эти категории отличаются по следующим параметрам: высота шероховатости, альbedo, теплофизические свойства почвы, параметр испарения, степень черноты, температура на глубине 2 м (для почвы).

Численный метод решения

Для численного решения уравнений вида (1) в данной работе применяются полунявные разностные схемы и метод конечного объема с использованием сеток с равномерным шагом по горизонтальным направлениям Ox и Oy и сгущающихся к поверхности Земли по вертикальному направлению Oz . Нижний расчетный уровень находится на высоте 10 м над поверхностью. При аппроксимации дифференциального уравнения (1) используется метод конечного объема со вторым порядком аппроксимации по пространственным переменным и полунявные схемы вида:

$$\frac{(C_i)_h^{n+1} - (C_i)_h^n}{\Delta t_n} = L_h \left[(C_i)_h^n \right] + \Lambda_h \left[(C_i)_h^{n+1} \right] - \sigma (C_i)_h^{n+1} + (S_i)_h^n + (P_i)_h^n - (L_i)_h^n (C_i)_h^{n+1}, \quad i = 1, \dots, n_s, \quad (4)$$

где $(C_i)_h^n$ – сеточная функция i -й концентрации примеси; n – номер временного слоя; L_h – конечно-разностный аналог адвективно-диффузионного оператора уравнения (1) за исключением вертикальной диффузии; Λ_h – разностный аналог дифференциального оператора вертикальной диффузии $\frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial}{\partial z} \right)$. Неявная

аппроксимация для вертикального диффузионного переноса, который имеет важное значение в пограничном слое атмосферы, позволяет уйти от более жесткого ограничения на шаг интегрирования по времени. При аппроксимации конвективных членов уравнения (1) используются монотонизированные линейные противопотоковые схемы MLU Ван Лира [19]. Для диффузионных членов (1) применяются обычные аппроксимации второго порядка точности. Для скоростей химических реакций R_i используется следующее представление [20]:

$$(R_i)_h^{n+1} = (P_i)_h^n - (L_i)_h^n (C_i)_h^{n+1}, \quad (5)$$

где $P_i(C)$ и $L_i(C)$ – коэффициенты образования и деструкции ($P_i \geq 0$ и $L_i \geq 0$) в линейном разложении скорости химической реакции $(R_i)_h^{n+1}$ (5). Такой способ аппроксимации слагаемого уравнения (1), отвечающего за химические реакции, дает возможность не использовать схемы расщепления по физическим процессам и при соответствующем выборе шага Δt_n эффективно интегрировать уравнения вида (1) для химических компонентов с различными временами химических превращений $\tau_i = 1/L_i$.

В результате таких аппроксимаций получается разностная схема, в которой для вычисления значений сеточной функции $(C_i)_h^{n+1}$ на новом временном слое $(n + 1)$ можно использовать метод прогонки для решения систем линейных уравнений с трехдиагональными матрицами независимо вдоль вертикальных сеточных линий. Такой способ конструирования разностной схемы (4) наделяет ее свойством линейной зависимости количества арифметических операций от размера сетки задачи и создает предпосылки идеального параллелизма вычислений.

Для модели переноса примеси с химическими реакциями (1) были разработаны параллельный алгоритм и программа, в основе которых лежит численный

метод (4), технология параллельного программирования MPI с двумерной декомпозицией сеточной области по горизонтальным направлениям [21]. В расчетах рассматривается 12 уравнений вида (1), и они решаются на сетке $100 \times 100 \times 50$ с горизонтальным шагом 500 м и шагом по времени ~ 15 с на области размером 50×50 км. В табл. 2 представлены значения ускорения параллельной программы для модели переноса примеси (1).

Таблица 2

Значения ускорения параллельной программы переноса примеси для различного числа процессов

Процессы	4	16	25	100
Ускорение	3.9	13.6	19.4	70.8

Из таблицы видно, что эффективность параллельных вычислений для рассматриваемой модели не опускается ниже 70%.

Выбор метеорологических ситуаций со слабым ветром и результаты моделирования

Рассматриваемая математическая модель и численный метод были применены для условий г. Томска. В 2019 г. здесь в течение первых десяти месяцев с помощью ультразвуковых метеостанций «Метео-2» и температурных профиломеров МТР-5 Центра коллективного пользования «Атмосфера», расположенных на территории лабораторного корпуса (пункт ИАО) и Базового экспериментального комплекса (пункт ВЕС) Института оптики атмосферы СО РАН, проводились наблюдения за изменением приземных характеристик воздуха и вертикальных профилей температуры. Метеостанции измеряли скорость и направление ветра, температуру, влажность и давление. Температурный профиломер МТР-5 восстанавливал с разрешением 50 м вертикальные профили температуры.

Выбор эпизодов со «слабым ветром» («штилей») проводился путем выделения тех случаев, когда в сопоставимых 10-минутных интервалах времени скорость горизонтального ветра одновременно была менее 1 м/с в точках наблюдения ИАО и ВЕС. При этом продолжительность таких периодов должна быть не меньше 3 ч. За рассматриваемый в работе период с 1 января по 31 октября 2019 г. таких эпизодов было 17. Они случались в основном в теплое время года (март–май, июль–сентябрь). В результате в соответствии с принятыми условиями были выделены интервалы времени, относящиеся к разряду «длительных штилей». Наиболее яркие случаи наблюдались 18 марта (03:35–09:35), 23 июля (03:05–08:55), 8 августа (01:55–07:35), 12 августа (02:35–07:15), 20 августа (03:15–08:45), 5 сентября (05:35–08:25). В скобках указаны начало и конец «длительных штилей» (часы, минуты). Из различных периодов года наибольшая повторяемость «штилей» для обоих пунктов отмечается в июле и августе. Минимальная длительность «штилей» характерна для января–апреля.

На рис. 1 представлены графики изменения измеренного в пунктах наблюдения ИАО и ВЕС модуля горизонтальной скорости V_h и рассчитанные значения этой характеристики на высоте 10 м с помощью модели TSUNM3 [8] для указанных выше дат моделирования. Из рис. 1 и табл. 3 видно, что модельные расчеты достаточно хорошо соответствуют результатам наблюдений (в [22, 23] указыва-

ется, что средняя абсолютная погрешность $MAE < 1-2$ м/с является хорошим критерием согласования предсказанных значений приземной скорости наблюдением), хотя модель TSUNM3 в отдельные сроки незначительно завышает скорость ветра.

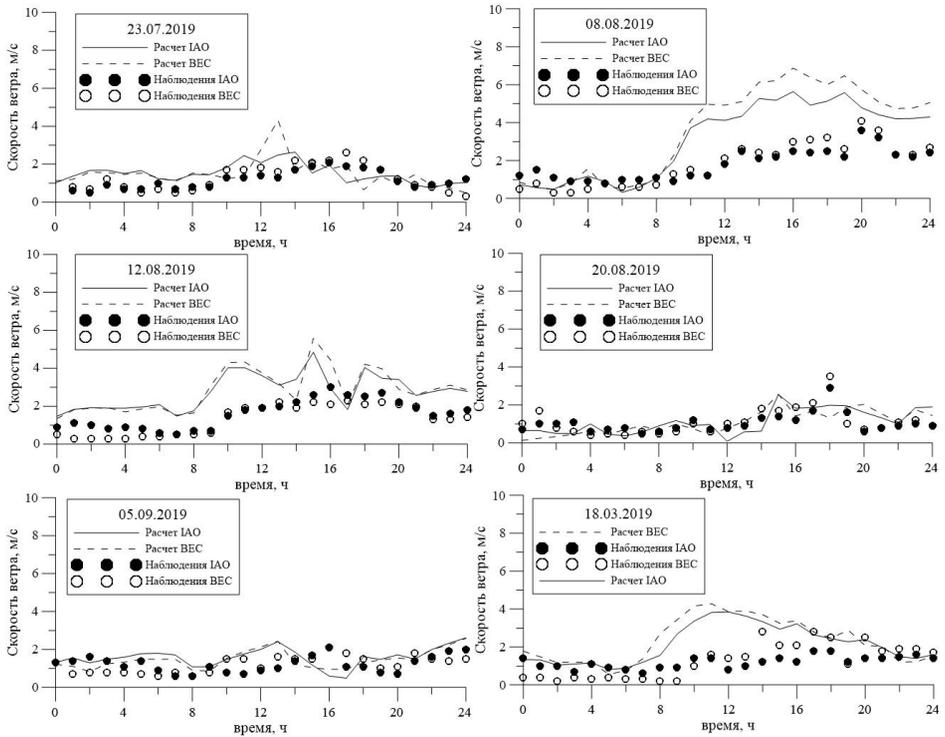


Рис. 1. Рассчитанные и измеренные значения приземной скорости ветра для указанных дат
Fig. 1. Calculated and measured values of surface wind speed for the selected dates

Таблица 3

Средняя абсолютная (MAE) и средняя квадратическая (RMSE) погрешности для предсказанных и измеренных значений приземной скорости ветра, изображенных на рис. 1

Date	18.03.2019	23.07.2019	08.08.2019	12.08.2019	20.08.2019	05.09.2019
MAE IAO	1.01	0.58	1.66	1.26	0.51	0.62
RMSE IAO	1.09	0.68	1.99	1.36	0.59	0.74
MAE BEC	1.22	0.64	1.96	1.59	0.51	0.55
RMSE BEC	1.57	0.84	2.40	1.75	0.72	0.64

Действительно, отмеченные в наблюдениях периоды времени в течение рассматриваемых суток, когда отмечался «слабый» ветер, практически во всех случаях подтверждаются расчетами. Так, 23 июля 2019 г. это наблюдалось в 03:05–08:55; 8 августа 2019 г. – 01:55–07:35; 20 августа 2019 г. – 03:15–08:45; 5 сентября 2019 г. – 05:35–08:25; 18 марта 2019 г. – 03:35–09:35. Время указано местное.

В темное время суток 12 августа 2019 г. с 02:35 до 07:15 модель также предсказала небольшой ветер, но завышение скорости в данном случае оказалось примерно 1 м/с. Поэтому прогнозируемые значения скорости на этот период времени имели значения 2 м/с. Можно отметить, что различие в значениях скорости ветра в двух пунктах измерений сопоставимо с погрешностью расчета.

Для демонстрации влияния «слабого» ветра на качество воздуха в городе были проведены расчеты по развиваемой модели переноса примеси (1)–(3) [9]. Расчеты проводились при одной и той же интенсивности приподнятых точечных (трубы) и линейных источников (автомобильные дороги), расположенных в рассматриваемой области. При использовании результатов расчетов, полученных по модели переноса примеси (1)–(3), для оценки качества воздуха в моделируемом населенном пункте рассматривался качественный показатель – Индекс загрязнения атмосферы (Air Pollution Index; API), который вычислялся на основе рассчитанных концентраций основных компонентов загрязняющих воздух примесей – CO, SO₂, NO₂, NO, O₃ – по следующей формуле:

$$API = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{C_i}{C_{i\infty}} \right)^{a_i}, \quad (6)$$

где $C_i = C(t, x, y, 10)$ – рассчитанная концентрация i -го вещества, мг/м³, на высоте 10 м от поверхности; $C_{i\infty}$ – его среднесуточная предельно допустимая концентрация, мг/м³; a_i – безразмерная константа, позволяющая привести степень вредности i -го загрязняющего вещества к степени вредности диоксида серы (для диоксида серы $a_i = 1$) [24]. Значения констант $C_{i\infty}$, a_i приведены в табл. 4. Из анализа данных регулярно проводимых наблюдений за загрязнением атмосферы городов России было установлено 4–5 газообразных примесей, которые вносят основной вклад в создание высокого уровня загрязнения, поэтому в (6) учитывается 5 загрязняющих веществ.

Таблица 4

Значения констант для расчета индекса API

	CO	SO ₂	NO ₂	NO	O ₃
$C_{i\infty}$	5.0	0.5	0.2	0.4	0.16
a_i	0.9	1.0	1.3	1.0	1.7

Индекс API, рассчитанный по (6), показывает, во сколько раз суммарный уровень загрязнения атмосферы превышает допустимое значение по рассматриваемой совокупности примесей в целом. Уровень загрязнения атмосферы считается повышенным при API от 5 до 6, высоким – при API от 7 до 13, очень высоким – при API не менее 14 [24].

На рис. 2 представлены рассчитанные с помощью модели численного прогноза погоды TSUNM3 и модели переноса примеси (1) значения API. Для выбранных дат отмечалась однотипная ясная или малооблачная погода, в отдельные даты и сроки – дымка или туман.

Из рис. 1 и 2 видно, что модельные расчеты подтвердили взаимосвязь уровня загрязнения атмосферы со скоростью приземного ветра. Коэффициент корреляции R между значениями индекса API и скоростью ветра в условиях слабого ветра для рассмотренных дат составил $-0,58$ и является значимым.

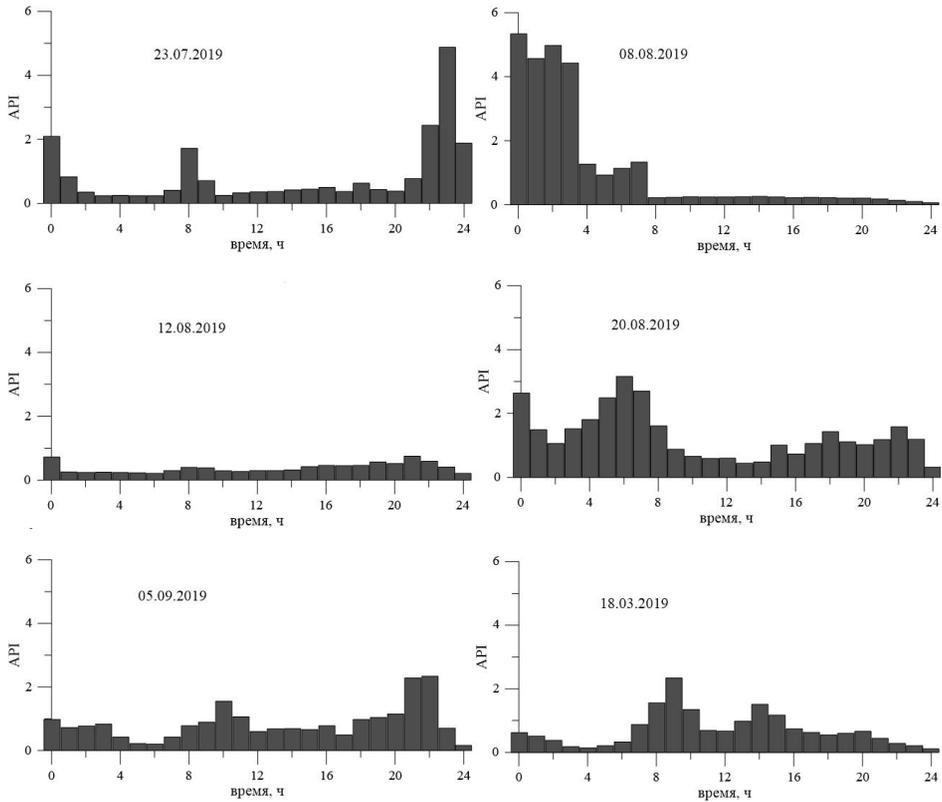


Рис. 2. Рассчитанные значения Индекса загрязнения воздуха для центра города для выбранных дат
Fig. 2. Calculated values of the Air Pollution Index for the city center for the selected dates

Кроме того, были численно получены увеличения значений API выше двух не только для указанных промежутков времени тихого ветра, но и для других моментов времени моделируемых суток, когда расчеты по мезомасштабной метеорологической модели показывали низкие значения скорости ветра на высоте 10 м. Особенно ярко ухудшение качества воздуха при снижении скорости ветра проявилось от 0 до 4 часов 8 августа, с 4 до 8 часов 20 августа, более слабо около 8 часов 23 июля, в 9 часов 5 сентября и 18 марта 2019 г. 12 августа 2019 г. расчеты не показали роста API в течение всего времени суток, поскольку в этот день модель TSUNM3 прогнозировала на рассматриваемых пунктах скорость приземного ветра от 2 до 4 м/с. Интересно, что расчеты модели переноса примеси предсказали повышенные значения API в периоды времени, не вошедшие в рекомендованную выборку промежутков времени со штилем: например, от 22 до 24 часов 23 июля, с 00 до 02 часов 8 августа и около 22 часов 5 сентября 2019 г. В первые две даты отмечались наиболее высокие значения индекса ($API \geq 5$). Результаты расчетов и анализ погоды в этих случаях указывают на наличие «слабого» ветра и в период, предшествующий повышению уровня загрязнения (например, штилевые условия отмечались 7 августа со второй половины суток), что способствова-

ло накоплению примесей. Заметим, что, помимо «слабого» ветра, на повышение уровня загрязнения приземного воздуха могла оказать дополнительное влияние устойчивая стратификация атмосферы, приводящая к накоплению примеси вблизи поверхности земли [1, 2]. Интересно еще и то, что из шести рассмотренных дат в трех повышение АРІ сопровождалось наличием дымки или тумана, а также наблюдалась высокая относительная влажность (23 июля дымка в 01–04 ч, туман в 03–05 ч; 20 августа дымка в 04 ч, туман 07–10 ч; 18 марта дымка в 07–10 ч). Как известно, образование туманов является дополнительным фактором, приводящим к повышению концентраций примесей в воздухе [2].

Для оценки влияния устойчивости атмосферы на повышение уровня загрязнения были выполнены расчеты вертикального профиля температуры в слое 0–600 м. В качестве примера на рис. 3, 4 представлены измеренные и рассчитанные температурные профили для двух случаев. Оценка вертикального профиля температуры показала, что для всех рассмотренных дат характерно наличие приземной инверсии или изотермии в сроки 00, 04, 24 ч, приземной или приподнятой – в 08 ч. В сроки 12, 16, 20 ч инверсия не наблюдалась. При наличии инверсии или изотермии повышения АРІ отмечались либо синхронно, либо повышение загрязнения отмечалось через некоторое время после появления инверсии (например, последние часы суток 23 июля и период 00–04 ч 8 августа). На рисунках сплошные линии – это расчеты по модели, кружки – измерения с помощью температурного профилера МТР-5.

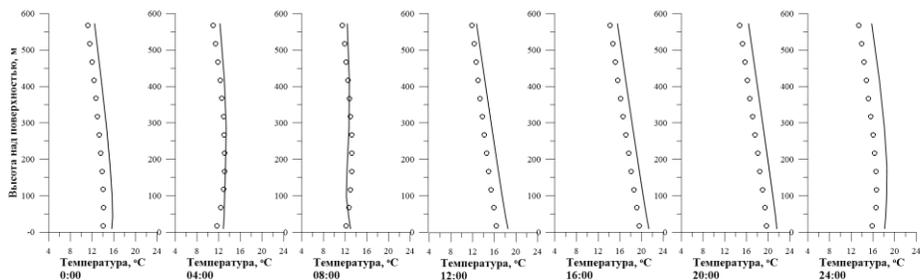


Рис. 3. Вертикальные температурные профили рассчитанные TSUNM3 и измеренные МТР-5 для 23.07.2019 для пункта ИАО. Время местное
Fig. 3. Vertical temperature profiles calculated by TSUNM3 and measured by MTP-5 for July 23, 2019 for the IAO state position. Local time

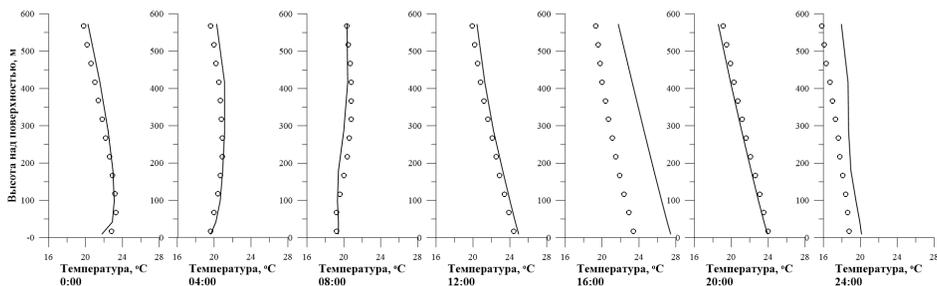


Рис. 4. Вертикальные температурные профили рассчитанные TSUNM3 и измеренные МТР-5 для 08.08.2019 для пункта ИАО. Время местное
Fig. 4. Vertical temperature profiles calculated by TSUNM3 and measured by MTP-5 for Aug. 8, 2019 for the IAO state position. Local time

Была составлена табл. 5, показывающая соотношение между наличием инверсии (изотермии) и повышенными значениями Индекса загрязнения воздуха. Каждый случай соответствует сроку, когда были рассчитаны индекс API и вертикальный профиль температуры.

Таблица 5

Соответствие между рассчитанными характером вертикального профиля температуры и API (число случаев, в скобках проценты)

Инверсия	Ход API		Всего
	Повышен (повышение)	Не повышен (не повышается)	
Есть инверсия, изотермия	13 (31)	7 (17)	20 (48)
Нет инверсии, изотермии	0 (0)	22 (52)	22 (52)
Всего	13 (31)	29 (69)	42 (100)

Таким образом, в 83% случаев существует прямая связь между наличием (отсутствием) инверсии и повышением (не повышением) индекса API. В 17% случаев при наличии инверсии уровень API не повышался. При отсутствии инверсии повышение API не отмечено.

По результатам расчетов для выбранных дат теплого периода 2019 г. было получено, что для всех рассмотренных случаев наибольший вклад в API вносят угарный газ (до 40%) и диоксид азота (до 35%). Несколько меньший вклад дают оксид азота (до 27%) и диоксид серы (до 19%). Роль озона как вторичного загрязнителя в нашем случае оказалась небольшой, его вклад в API не превысил 6%. В суточном ходе наибольшая концентрация CO отмечалась ночью и рано утром, в период с 22 до 7 часов (его содержание достигало 2,3 ПДК). Повышенное содержание NO₂, NO, SO₂ также зафиксировано в ночное время (22–03 ч), а концентрация первых двух загрязнителей может превышать ПДК в 1,7 и 1,5 раза соответственно. Содержание SO₂ не превышает половины предельно допустимой концентрации. В отличие от рассмотренных примесей содержание O₃ больше днем (10–17 ч), а концентрация его не превышает 0,2 ПДК.

Было выполнено сравнение результатов расчетов для двух участков города, расположенных на расстоянии 4 км и находящихся в разных условиях (центр города и пересечение транспортных магистралей). Получено, что по всем загрязнителям имеются общие временные тенденции их изменений: периоды увеличения или уменьшения концентрации, время наступления максимальных значений сохраняются. Однако концентрация веществ выше в условиях, где отмечается большое скопление транспорта. Больше и средние, и разовые значения всех примесей, за исключением NO: среднесуточные значения выше примерно в 1,5 раза (по O₃ – в 2 раза), а часовые значения в этих точках могут различаться в 3 раза. Концентрация NO мало изменяется по территории.

Заключение

С помощью ультразвуковых метеостанций «Метео-2», температурного профилера МТР-5 ЦКП «Атмосфера» и мезомасштабной модели численного прогноза погоды с горизонтальным разрешением 1 км TSUNM3 исследованы метеорологические ситуации над г. Томском, сопровождающиеся проявлением

«слабого» (< 1 м/с) ветра. Постоянное использование метеостанций с 1 января по 31 октября 2019 г. позволило выявить периоды, когда скорость приземного ветра на протяжении 5–6 ч во всех пунктах наблюдений была менее 1 м/с. Для этих дат 2019 г. было проведено численное моделирование погодных условий и качества атмосферного воздуха в городе. Сравнение расчетов с наблюдениями показало, что модель TSUNM3 в большинстве случаев подтверждает расчетами продолжительность и сам факт условий «слабого» ветра. Однако в ряде случаев модель TSUNM3 завышает значения скорости приземного ветра по сравнению с данными наблюдений. Применение развиваемой модели качества атмосферного воздуха подтвердило взаимосвязь «слабого» приземного ветра с ухудшением качества воздуха в городе. Особенно это проявляется в комбинации «слабого» ветра с условиями устойчивой стратификации приземного слоя воздуха. При оценке степени качества атмосферного воздуха с использованием индекса загрязнения атмосферы очень важен точный прогноз скорости ветра.

Выполненные расчеты по пяти загрязнителям атмосферы подтвердили важную роль метеорологических условий, в частности слабого ветра, а также роль антропогенного фактора в экологическом состоянии атмосферы Томска. Отметим, что для рассмотренных условий слабого ветра достоверно существует обратная корреляционная связь между уровнем загрязнения (значениями индекса API) и скоростью ветра ($R = -0,58$). А по данным наблюдений для реализаций, включающих разные скорости ветра, для разных загрязнителей (за исключением озона) коэффициент корреляции составил от $-0,59$ до $-0,89$.

Предложенные в работе методы расчета метеорологических параметров и концентрации основных загрязнителей показали, что полученные по моделям результаты адекватно отражают основные закономерности пространственно-временной изменчивости рассчитанных характеристик.

Анализ результатов метеорологических наблюдений, выполненных с помощью комплекса приборов ЦКП «Атмосфера», показал, что для района Томска наиболее неблагоприятные экологические условия, обусловленные низкой скоростью ветра и инверсиями температуры, складываются в летний период. Однако нужно иметь в виду, что в работе получены результаты по «длительным штормам», непрерывная продолжительность которых превышает 3 ч. Такие ситуации оказались преобладающими в теплое время года. «Слабый» ветер, имеющий меньшую непрерывную продолжительность, отмечался и в другое время года. Зимой, при преобладании над территорией Западной Сибири Азиатского антициклона, также могут отмечаться «слабые» ветры в сочетании с инверсионным распределением температуры, что тоже способствует повышенному загрязнению атмосферы. Условия в переходные сезоны способствуют лучшему очищению атмосферы.

Список источников

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1991. 267 с.
2. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. Л. : Гидрометеоиздат, 1991. 251 с.
3. Sokhi R.S., Baklanov A.A., Shlunzen K.H. Mesoscale modelling for meteorological and air pollution application. Anthem Press, 2018. 376 p.

4. Baklanov A., Korsholm U., Nuterman R., Mahura A., Nielsen K.P., Sass B.H., Rasmussen A., Zakey A., Kaas E., Kurganskiy A., Sørensen B., González-Aparicio I. Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2) // *Geosci. Model Dev.* 2017. V. 10. P. 2971–2999. doi: 10.5194/gmd-10-2971-2017
5. Srivastava I., Yarragunta S., Kumar R., Mitra D. Distribution of surface carbon monoxide over the Indian subcontinent: Investigation of source contributions using WRF-Chem // *Atmospheric Environment*, 2020. V. 243. Art. 117838. doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117838
6. Нахаев М.И., Березин Е.В., Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н. и др. Экспериментальные расчеты концентрации PM10 и CO комплексом моделей CHIMERE и COSMO-Ru7 // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 25, № 6. С. 485–492.
7. Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Березин Е.В., Коновалов И.Б., Блинов Д.В., Курсанов А.А. Сравнение рассчитанных с помощью химических транспортных моделей приземных концентраций загрязняющих веществ с данными измерений в Московском регионе // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30, № 01. С. 53–59. doi: 10.15372/AOO20170107.
8. Старченко А.В., Барт А.А., Кижнер Л.И., Данилкин Е.А. Мезомасштабная метеорологическая модель TSUNM3 для исследования и прогнозирования состояния метеопараметров приземного слоя атмосферы над крупным населенным пунктом // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, 2020. № 66. С. 35–55. doi: 10.17223/19988621/66/3
9. Starchenko A., Shelmina E., Kizhner L. Numerical Simulation of Meteorological Conditions and Air Quality above Tomsk, West Siberia // *Atmosphere*. 2020. V. 11 (11). Art. 1148. doi: 10.3390/atmos11111148
10. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М. : Наука, 1982. 319 с.
11. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1985. 256 с.
12. Wesley M.L. Parameterisation of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models // *Atmospheric Environment*. 1989. V. 23 (6). P. 1293–1304. doi: 10.1016/0004-6981(89)90153-4
13. *Об экологической ситуации в Томской области в 2020 году : государственный доклад / Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области.* Томск, 2021. 134 с.
14. Bart A.A., Starchenko A.V. Modelling of urban air pollution by anthropogenic and biogenic source emissions // *Proc. SPIE*. 2014. Vol. 9292. P. 929248-1–929248-8.
15. Guenrther A.B., Jiang X., Heald C.L., Sakulyanontvittaya T., Duhl T., Emmons L.K., Wang X. The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions // *Geosci. Model Dev.* 2010. V. 5. P. 1471–1492.
16. Hurley P. TAPM V4. Part 1: Technical Description : CSIRO Marine and Atmospheric Research Paper No. 25. 2008. 59 p.
17. Stockwell W.R., Goliff W.S. Comment on «Simulation of a reacting pollutant puff using an adaptive grid algorithm» by R.K. Srivastava et al. // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 4643–4650.
18. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Заринов Р.Б., Киктев Д.Б., Махнорылова С.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С. Многомасштабная глобальная модель атмосферы ПЛАВ: результаты среднесрочных прогнозов погоды // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 11. С. 90–99.
19. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. II. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme // *Journal of Computational Physics*. 1974. V. 14. P. 361–370.

20. Shen J., Zhao Q. Comparison of some atmospheric chemical modelling schemes // *Journal of Environmental Sciences*. 1997. V. 9 (2). P. 183–201.
21. Старченко А.В., Беруин В.Н. Методы параллельных вычислений. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2013. 223 с.
22. Rife D.L., Davis C.A., Liu Y., Warner T.T. Predictability of Low-Level Winds by Mesoscale Meteorological Models // *Monthly Weather Review*. 2004. V. 132. P. 2553–2569. doi: 10.1175/MWR2801.1
23. Olauson J., Samuelsson J., Bergström H., Bergkvist M. Using the MIUU Model for Prediction of Mean Wind Speed At Low Height // *Wind engineering*. 2015. V. 39 (5). P. 507–518. doi: 10.1260/0309-524X.39.5.507
24. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. Руководящий документ. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения : дата введения 01.02.2006. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200067118> (дата обращения 16.02.2022)

References

1. Berlyand M.E. (1991) *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery* [Prediction and Regulation of Atmosphere Pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
2. Bezuglaya E.Yu., Rastorgueva G.P., Smirnova, I.V. (1991) *Chem dyshit promyshlennyi gorod?* [What does an industrial city breathe in?], Leningrad: Gidrometeoizdat.
3. Sokhi R.S., Baklanov A.A., Shlunzen K.H. (2018) *Mesoscale Modelling for Meteorological and Air Pollution Application*. ANTHEM PRESS.
4. Baklanov A., Korsholm U., Nuterman R., Mahura A., Nielsen K.P., Sass B.H., Rasmussen A., Zakey A., Kaas E., Kurganskiy A., Sørensen B., González-Aparicio I. (2017) Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2). *Geoscientific Model Development*. 10. pp. 2971–2999. doi: 10.5194/gmd-10-2971-2017.
5. Srivastava I., Yarragunta S., Kumar R., Mitra D. (2020) Distribution of surface carbon monoxide over the Indian subcontinent: Investigation of source contributions using WRF-Chem. *Atmospheric Environment*. 243(15), p. 117838. doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117838.
6. Nakhaev M.I., Berezin E.V., Shalygina I.Yu., Kuznetsova I.N., Konovalov I.B., Blinov D.V., Lesina E.A. (2015) Eksperimental'nyye raschety kontsentratsii RM10 i SO kompleksom modeley CHIMERE i COSMO-Ru7 [Pilot calculations of PM10 and CO concentrations with complex models CHIMERE and COSMO-Ru7]. *Optika Atmosfery i Okeana*. 28(6). pp. 569–578. doi: 10.15372/AOO20150613.
7. Shalygina I.Yu., Nahaev M.I., Kuznetsova I.N., Berezin E.V., Konovalov I.B., Blinov D.V., Kirsanov A.A. (2017) Sravneniye rasschitannykh s pomoshch'yu khimicheskikh transportnykh modeley prizemnykh kontsentratsiy zagryaznyayushchikh veshchestv s dannymi izmereniy v Moskovskom regione [Comparison of the ground concentration of polluting substances calculated by means of chemical transport models with data of measurements in the Moscow region]. *Optika Atmosfery i Okeana*. 30(1). pp. 53–59. doi: 10.15372/AOO20170107.
8. Starchenko A.V., Bart A.A., Kizhner L.I., Danilkin E.A. (2020) Mezomasshtabnaya meteorologicheskaya model' TSUNM3 dlya issledovaniya i prognozirovaniya sostoyaniya meteoparametrov prizemnogo sloya atmosfery nad krupnym naseленным пунктом [The TSUNM3 mesoscale meteorological model for the study and forecast of meteorological parameters of the atmospheric surface layer over a major population center]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 66. pp. 35–55. doi: 10.17223/19988621/66/3.
9. Starchenko A., Shelmina E., Kizhner L. (2020) Numerical Simulation of Meteorological Conditions and Air Quality above Tomsk, West Siberia. *Atmosphere*. 11(11). p. 1148.

10. Marchuk G.I. (1986) *Mathematical Models in Environmental Problems*. Elsevier Science.
11. Penenko V.V., Aloyan A.E. (1985) *Modeli i metody dlya zadach okhrany okruzhayushchey sredy* [Models and methods for environmental problems]. Novosibirsk: Nauka.
12. Wesley M.L. (1989) Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. *Atmospheric Environment*. 23(6). pp. 1293–1304. doi: 10.1016/0004-6981(89)90153-4.
13. *Gosudarstvennyy doklad “Ob ekologicheskoy situatsii v Tomskoy oblasti v 2020 godu”* [State report “On the Environmental Situation in Tomsk Oblast in 2020” (2021) Tomsk. Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Tomsk Region.
14. Bart A.A., Starchenko A.V. (2014) Modelling of urban air pollution by anthropogenic and biogenic source emissions *Proceedings of SPIE*. 9292. pp. 929248-1-929248-8. doi: 10.1117/12.2075132.
15. Guenther A.B., Jiang X., Heald C.L., Sakulyanontvittaya T., Duhl T., Emmons L.K., Wang X. (2010) The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*. 5. pp. 1471–1492.
16. Hurlley P. (2008) TAPM V4. Part 1: Technical Description. *CSIRO Marine and Atmospheric Research Paper no. 25*.
17. Stockwell W.R., Goliff W.S. (2002) Comment on “Simulation of a reacting pollutant puff using an adaptive grid algorithm” by R. K. Srivastava et al. *Journal of Geophysical Research*. 107(D22). pp. 4643–4650.
18. Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Goyman G.S., Zaripov R.B., Kiktev D.B., Makhnorylova S.V., Mizyak V.G., Rogutov V.S. (2018) Multiscale global atmosphere model SL-AV: the results of medium-range weather forecasts. *Russian Meteorology and Hydrology*. 43(11), pp. 773–779. doi: 10.3103/S1068373918110080.
19. Van Leer B. (1974) Towards the ultimate conservative difference scheme. II. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme. *Journal of Computational Physics*. 14. pp. 361–370.
20. Shen J., Zhao Q. (1997) Comparison of some atmospheric chemical modelling schemes. *Journal of Environmental Sciences*. 9(2). pp. 183–201.
21. Starchenko A.V., Bertsun V.N. (2013) *Metody parallel’nykh vychisleniy* [Parallel Computing Methods]. Tomsk: Tomsk State University.
22. Rife D.L., Davis C.A., Liu Y., Warner T.T. (2004) Predictability of low-level Wwinds by mesoscale meteorological models. *Monthly Weather Review*. 132. pp. 2553–2569. doi: 10.1175/MWR2801.1.
23. Olauson J., Samuelsson J., Bergström H., Bergkvist M. (2015) Using the MIUU model for prediction of mean wind speed at low height. *Wind Engineering*. 39(5). pp. 507–518. doi: 10.1260/0309-524X.39.5.507.
24. Electronic fund of legal and normative-technical documents. Documents on the state of air pollution in cities to inform state bodies, the public, and the population. Guidance document 52.04.667-2005. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200067118>.

Сведения об авторах:

Старченко Александр Васильевич – профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой вычислительной математики и компьютерного моделирования Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: starch@math.tsu.ru

Шельмина Елена Александровна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вычислительной математики и компьютерного моделирования Томского государственного университета; доцент кафедры экономической математики, информатики и статистики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия. E-mail: eashelmina@mail.ru

Кижнер Любовь Ильинична – доцент, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и климатологии Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: kdm@mail.tsu.ru

Одинцов Сергей Леонидович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН, Томск, Россия. E-mail: odintsov@iao.ru

Information about the authors:

Starchenko Alexander V. (Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department of Computational Mathematics and Computer Modelling, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: starch@math.tsu.ru

Shelmina Elena A. (Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Computational Mathematics and Computer Modeling, Tomsk State University; Associate Professor of the Department of Economic Mathematics, Informatics and Statistics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation). E-mail: eashelmina@mail.ru

Kizhner Lyubov I. (Associate Professor, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Meteorology and Climatology, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: kdm@mail.tsu.ru

Odintsov Sergey L. (Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Atmospheric Optics of V.E. Zuev, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: odintsov@iao.ru

Статья поступила в редакцию 21.02.2022; принята к публикации 03.10.2022

The article was submitted 21.02.2022; accepted for publication 03.10.2022