

## Информационно-вычислительная система для краткосрочного прогноза качества воздуха над территорией г. Томска

А.А. Барт<sup>1</sup>, А.В. Старченко<sup>1</sup>, А.З. Фазлиев<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 2.02.2012 г.

Описана действующая информационно-вычислительная система (ИВС), ориентированная на прогноз качества атмосферного воздуха над территорией города и его окрестностей. Рассмотрены математические модели, используемые в ИВС, приведены ее компоненты, порядок выполнения приложений и визуализация результатов вычислений. Прогноз концентраций озона, оксида углерода и закиси азота качественно согласуется с результатами измерений TOR-станцией ИОА СО РАН.

*Ключевые слова:* информационно-вычислительная система, перенос и образование вторичных загрязнителей воздуха, параллельные вычисления; information-computational system, transport and formation secondary pollutants, mathematical modeling, parallel computing.

### Введение

Прогноз качества воздуха над урбанизированной территорией не имеет такого широкого спроса у потребителей, как прогноз погоды. Такое положение обусловлено недостаточным пониманием долговременных последствий, обусловленных наличием примесей в воздухе, слабой нормативной базой и неразвитой системой химических постов, разнообразием подходов к оценке качества атмосферного воздуха в среде специалистов. Изменение ситуации требует комплексной системы действий, в частности создания информационных систем, ориентированных на проблемы урбанизированных территорий. Вычислительные компоненты подобных систем должны быть основаны на математической модели, описывающей механизмы формирования и переноса примесей.

Такие системы созданы во многих городах Европы и Северной Америки. Примерами информационно-вычислительных систем (ИВС) являются система EURAD, созданная в Институте геофизики и метеорологии при университете Кельна [1] и система суперкомпьютерного центра Барселоны [2]. Прогнозы, представленные на этих ИВС, дают картину распространения примеси над урбанизированной территорией. В России делались попытки создания подобных систем, но они оказались невостребованными из-за низкой платежеспособности потребителей. Уп-

рошенные информационные системы, демонстрирующие результаты измерений концентраций примесей в атмосфере, являются единственным видом систем, существующим в российском сегменте Web. Примерами таких систем являются Web-сайты ГПУ «Мо-сэкомониторинг» [3] и Лаборатории климатологии атмосферного состава ИОА СО РАН [4]. Описанные выше проблемы и ситуация с информационными ресурсами в России явились предпосылками разработки ИВС оценки качества воздуха над территорией г. Томска.

Создание ИВС опиралось на фотохимическую модель переноса примеси [5, 6], разработанную в Томском государственном университете для проведения исследований, направленных на изучение тенденций загрязнения атмосферного воздуха над территорией г. Томска и окрестностей, а также на предоставление прогноза качества атмосферного воздуха на ближайшие сутки.

В настоящей статье представлены математические модели, являющиеся основой ИВС, и данные, используемые при моделировании, кратко описаны организация вычислений и представление полученных результатов пользователю, а также дана интерпретация результатов моделирования.

### 1. Математические модели

Выбор математической модели определяется задачами, которые необходимо решить в результате применения модели. Такой задачей в работе является прогноз качества воздуха над территорией города

\* Андрей Андреевич Барт; Александр Васильевич Старченко (starch@math.tsu.ru); Александр Зарипович Фазлиев (faz@iao.ru).

и его окрестностей. Размеры территории, на которой распространяются результаты моделирования, составляют квадрат со стороной 50 км, в его центре находится центральная площадь города. При моделировании эта территория разбита на  $10^4$  квадратов размерами  $0,5 \times 0,5$  км, из которых чуть более 1500 приходится на Томск. Остальная часть расположена в Томском районе. При моделировании также используются данные о рельефе и категориях землепользования (24 категории USGS) с пространственным разрешением 30 с.

Большая часть источников загрязнений находится на территории Томска, а объемы загрязнений от городских и внегородских источников почти одинаковые. При моделировании используются данные о выбросах из точечных источников с указанием координат (долгота и широта), о высоте и диаметре источника (м), скорости (м/с) и температуре ( $^{\circ}\text{C}$ ) поступления выбросов в атмосферу, а также о расходе выбросов 17 различных веществ (мг/с): пыль, сажа, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, CH<sub>2</sub>O, C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH, CH, C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>, CH<sub>3</sub>OH и др.

Следующий набор приближений связан с использованием метеорологических величин при расчете переноса примесей. В модели предполагается, что горизонтальные компоненты скорости ветра над выделенной территорией изменяются только по времени и вертикальной координате. Такое допущение обусловлено слабо меняющимся рельефом рассматриваемой области исследования и незначительными вариациями свойств подстилающей поверхности. Тем не менее это допущение необходимо учитывать при интерпретации результатов вычислений. Наконец, отметим ограничения на химические процессы, включенные в модель, кинетическое рассмотрение которых ограничено газофазными реакциями. По этой причине поведение сажи и пыли не анализируется.

В рамках описанных приближений для вычислений используются три системы уравнений, решаемых согласованно. Эти системы описывают пограничный слой, газофазные реакции и перенос примеси.

При моделировании переноса и образования вторичных компонентов примеси используются осредненные компоненты скорости ветра, потенциальная температура и влажность, полученные из модели атмосферного пограничного слоя.

Модель атмосферного пограничного слоя служит для усвоения метеорологических данных и позволяет получить более детальное распределение по вертикали компонент ветра и значения турбулентных характеристик.

### 1.1. Модель переноса примеси

Для расчета концентрации компонентов примеси с учетом химических реакций применяется эйлерова модель турбулентной диффузии, включающая транспортные уравнения с описанием адвекции, турбулентной диффузии, химических реакций, поступления примеси от источников и влажное осаждение примеси:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial UC_i}{\partial x} + \frac{\partial VC_i}{\partial y} + \frac{\partial WC_i}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x} \langle c_i u \rangle - \frac{\partial}{\partial y} \langle c_i v \rangle -$$

$$-\frac{\partial}{\partial z} \langle c_i w \rangle - \sigma_i C_i + S_i + F_i, \quad i = 1, \dots, n_s, \quad (1)$$

где  $C_i$ ,  $c_i$  – осредненная и пульсационная составляющие концентрации  $i$ -й компоненты примеси;  $U$ ,  $V$ ,  $u$ ,  $v$  – осредненные и пульсационные составляющие вектора горизонтальной скорости ветра;  $W$ ,  $w$  – осредненная и пульсационная составляющие вертикальной компоненты скорости ветра;  $\langle \rangle$  – осреднение по Рейнольдсу;  $S_i$  – источниковый член, представляющий собой выбросы компонентов примеси в атмосферу;  $F_i$  описывает образование и трансформацию вещества за счет химических и фотохимических реакций с участием компонентов примеси;  $\sigma_i$  – скорость влажного осаждения примеси за счет осадков;  $n_s$  – количество химических компонентов примеси, концентрации которых необходимо определить;  $x$ ,  $y$  – горизонтальные координаты, ось  $Ox$  направлена на восток,  $Oy$  – на север;  $z$  – вертикальная координата;  $t$  – время;  $0 \leq t \leq T$ ,  $-L_x/2 \leq x \leq L_x/2$ ,  $-L_y/2 \leq y \leq L_y/2$ ,  $0 \leq z \leq h$ ,  $T$  – время моделирования,  $L_x$ ,  $L_y$  – горизонтальные размеры области,  $h$  – высота расчетной области [5].

Для достоверного прогноза загрязнения воздуха необходимо учитывать химические и фотохимические реакции, происходящие в атмосфере между продуктами первичной эмиссии (антропогенные выбросы промышленных предприятий и транспорта) и компонентами воздуха, которые приводят к образованию новых соединений, многие из которых токсичны (озон, формальдегид). С этой целью в систему уравнений переноса примеси добавлен член, описывающий изменение концентрации компонента примеси. При расчете  $F_i$  используется фотохимическая модель, построенная на основе сокращенного химического механизма образования приземного озона и применяющаяся в Датском метеорологическом институте для исследования и прогноза качества атмосферного воздуха. Эта модель была разработана в [7, 8] и модифицирована А. Zakey (DMI) для учета образования паров серной кислоты из диоксида серы. В ней учитываются 20 химических реакций между следующими компонентами: NO<sub>2</sub>, NO, O(<sup>1</sup>D), O(<sup>3</sup>P), O<sub>3</sub>, HO, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, HO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, HC, HCHO, RO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (таблица). В силу малого влияния рассматриваемых химических реакций на значения концентрации трех последних соединений они принимаются постоянными. Здесь  $R = C_x N_y$ .

### 1.2. Модель атмосферного пограничного слоя

В разрабатываемой информационно-вычислительной системе прогноза химической погоды в городе в настоящее время используется одномерная стационарная математическая модель атмосферного пограничного слоя (АПС), которая позволяет подробно рассчитать вертикальную структуру нижней тропосферы и ее турбулентные характеристики. Математическая модель АПС представляет собой следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle uw \rangle + f(V - V_g) + \frac{U_S - U}{\tau_S}, \quad (2)$$

**Реакции фотохимической схемы,  
используемой в DMI**

1	$\text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{O}(^3P) + \text{NO}$
2	$\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O}(^1D) + \text{O}_2$
3	$\text{HCHO} + h\nu \rightarrow 2\text{HO}_2 + \text{CO}$
4	$\text{HCHO} + h\nu \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$
5	$\text{RO}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{HO}_2 + \text{HCHO}$
6	$\text{HCHO} + \text{HO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$
7	$\text{RO}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{ROOH} + \text{O}_2$
8	$\text{RO}_2 + \text{RO}_2 \rightarrow \text{products}$
9	$\text{O}(^3P) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3$
10	$\text{O}(^1D) + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}(^3P) + \text{N}_2$
11	$\text{O}(^1D) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}(^3P) + \text{O}_2$
12	$\text{O}(^1D) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HO}$
13	$\text{HO}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{HO}$
14	$\text{O}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$
15	$\text{CO} + \text{HO} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CO}_2$
16	$\text{HC} + \text{HO} \rightarrow \text{RO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
17	$\text{HO} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{HNO}_3$
18	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$
19	$2\text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$
20	$\text{HO} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HO}_2$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle vw \rangle - f(U - U_g) + \frac{V_S - V}{\tau_S}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle \theta w \rangle + \frac{\Theta_S - \Theta}{\tau_S}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle qw \rangle + \frac{Q_S - Q}{\tau_S}. \quad (5)$$

Здесь вертикальную составляющую считаем пренебрежимо малой (т.е.  $W \approx 0$ );  $\Theta$ ,  $\theta$  – средняя и пульсационная составляющие потенциальной температуры воздуха;  $Q$ ,  $q$  – средняя и пульсационная составляющие абсолютной влажности воздуха;  $U_g$ ,  $V = \frac{1}{\rho f} \left( -\frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial x} \right)$  – компоненты скорости геострофического ветра,  $f = 2\Omega \sin \phi$  – параметр Кориолиса,  $\phi$  – географическая широта рассматриваемой области,  $\Omega$  – угловая скорость вращения Земли;  $\langle uw \rangle$ ,  $\langle vw \rangle$ ,  $\langle w\theta \rangle$ ,  $\langle wq \rangle$  – турбулентные корреляции пульсаций вертикальной составляющей скорости с пульсациями горизонтальных компонент скорости, температуры и влажности соответственно. С индексом «S» обозначены метеорологические поля синоптического масштаба, получаемые на основе результатов прогностических расчетов по глобальной модели модели ПЛАВ;  $\tau_S$  – период времени (частота) обновления результатов численного прогноза [9].

Для замыкания системы уравнений (2)–(5) применяется трехпараметрическая модель турбулентности, включающая уравнения переноса для энергии

$k$ , масштаба турбулентных пульсаций  $l$  и уравнение для дисперсии турбулентных пульсаций потенциальной температуры  $\langle \theta^2 \rangle$ :

$$\frac{\partial k}{\partial t} = -\langle uw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} - \langle vw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{g}{\Theta} \langle w\theta \rangle + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma_e \sqrt{k} l \frac{\partial k}{\partial z} \right) - \frac{C_D k^2}{l}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial l}{\partial t} = C_{l1} \left( -\langle uw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} - \langle vw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{g}{\Theta} \langle w\theta \rangle \right) \frac{l}{k} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma_e \sqrt{k} l \frac{\partial l}{\partial z} \right) + C_{l2} \sqrt{k} \left[ 1 - \left( \frac{l}{\kappa z} \right)^2 \right], \quad (7)$$

$$\frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( C_\theta \sqrt{k} l \langle w \rangle^2 \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial z} \right) - 2 \langle w\theta \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial z} - 2 \frac{\langle \theta^2 \rangle}{\tau_\theta}, \quad (8)$$

где  $k = 0,5(\langle u^2 \rangle + \langle v^2 \rangle + \langle w^2 \rangle)$  – кинетическая энергия турбулентности;  $l$  – интегральный масштаб турбулентности;  $\sigma_e = 0,54$ ;  $C_{l1} = -0,12$ ,  $C_{l2} = 0,2$ ,  $C_D = 0,19$ ,  $C_\theta = 1,3$  – числовые коэффициенты;  $\kappa = 0,41$  – константа фон Кармана;  $\tau_\theta = C_\theta l / C_D \sqrt{k}$  – временной масштаб турбулентных пульсаций. Турбулентные потоки импульса  $\langle uw \rangle$ ,  $\langle vw \rangle$ , тепла  $\langle w\theta \rangle$  и влаги  $\langle wq \rangle$  определяются при помощи алгебраических соотношений [10].

### 1.3. Численный метод и его параллельная реализация

При построении разностной схемы для уравнения (1) использовалась сетка с переменным по  $z$  шагом, сгущающаяся к поверхности Земли. При замене дифференциального уравнения (1) его разностным аналогом применялись явно- неявные разностные схемы с первым порядком аппроксимации по времени и вторым по координатам. Все члены уравнения (1) аппроксимируются на  $k$ -м слое по времени, за исключением вертикальной диффузии и членов, отвечающих за влажное осаждение примеси, поступление примеси от источников и химические реакции, которые берутся на  $k + 1$ -м слое по времени.

Для получения конечно-разностного аналога уравнения (1) применяется метод конечных объемов. Для аппроксимации диффузионных потоков используется центрально-разностный оператор, для аппроксимации адвективных членов – направленная противопотоковая схема MLU [11].

Параллельная версия алгоритма была построена с использованием двумерной декомпозиции сеточной области. Декомпозиция осуществлялась по направлениям  $Ox$  и  $Oy$ . При такой декомпозиции можно использовать большое количество процессоров суперкомпьютера, а доля временных затрат, связанных с необходимостью на каждом шаге по времени передавать данные между процессорными элементами, меньше, чем при одномерной декомпозиции.

## 2. Информационно-вычислительная система

### 2.1. Постановка задачи

Основные задачи информационно-вычислительной системы – организация и проведение ежедневного прогноза качества атмосферного воздуха над территорией Томска и представление результатов прогнозов в Web посредством информационного сайта. Система взаимодействует со следующими компонентами (рис. 1):

- с сервером Гидрометцентра России по протоколу ftp (откуда получает данные прогноза по оперативной среднесрочной глобальной модели ПЛАВ в виде файлов в формате grib),
- с кластером ТГУ СКИФ Cyberia по протоколу ssh,
- с удаленными пользователями по протоколу http.

### 2.2. Взаимодействие компонент системы

По договоренности между Томским государственным университетом и Гидрометцентром России ежедневно по мере выполнения расчета по глобальной модели ПЛАВ (через каждые 12 ч) на ftp-сервер Гидрометцентра выкладываются результаты расчетов для области, включающей г. Томск. Данные на ftp-сервере представляют собой файлы в формате grib [12]. В файлах содержится информация о следующих метеорологических характеристиках: температура воздуха, относительная влажность, северная и восточная компоненты вектора ветра, давление (на высоте 2 м), аккумулярованные за 6 ч осадки, давление на уровне моря, влажность почвы, высота геопотенциала.

Данные предоставляются на географической сетке: от 49,68 до 63,36° с.ш. с шагом 0,72° и от 80,1 до 97,2° в.д. с шагом 0,9°, вертикальная сетка неравномерна, сгущается к поверхности и соответствуют следующим уровням давления: 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 мбар.

Ежедневно получаемый метеорологический прогноз используется для прогностических расчетов переноса и образования вторичных загрязнителей. Для этого данные, получаемые из grib-файлов (температура воздуха, относительная влажность, компоненты вектора ветра и давление), усваиваются математической моделью атмосферного пограничного слоя для последующей передачи в модель переноса примеси. На данном этапе происходит декодирование данных grib-файла в текстовый формат при помощи скрипта на языке bash, использующего утилиту wgrib [13]. А затем программой, реализующей математическую модель атмосферного пограничного слоя, написанной на языке программирования Fortran, проводятся усвоение данных прогноза Гидрометцентра РФ и их пересчет на более подробную вертикальную сетку. Файлы, полученные усвоением метеорологического прогноза, загружаются на кластер в рабочую директорию модели переноса примеси по протоколу ssh. После загрузки файлов на кластер сервер отправляет команду начать расчет по модели переноса примеси. В модели учитываются перенос примеси (рассчитывается с шагом по времени – 60 с), образование вторичных компонентов примеси (рассчитывается с шагом по времени – 6 с) и осаднение примеси за счет осадков и взаимодействия с подстилающей поверхностью.

Модель переноса примеси реализована для супер-ЭВМ на языке Fortran с использованием стандарта передачи сообщений MPI. Для расчета используется 16–100 ядер кластера. При использовании 16 ядер

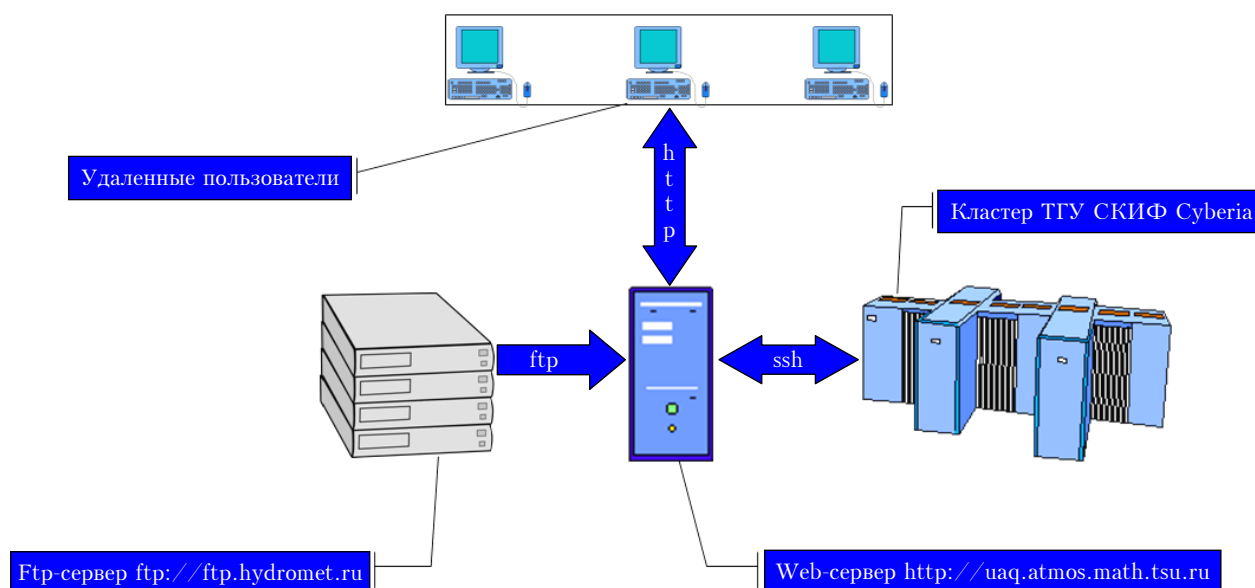


Рис. 1. Схема взаимодействия компонент ИВС «Городская химическая погода»

время выполнения одного прогностического расчета составляет 1 ч. После того как задача поставлена в очередь, сервер получает уникальный номер, который был присвоен задаче при добавлении ее в очередь. По этому номеру сервер отслеживает статус задачи. Когда расчет выполнен, сервер по протоколу ssh загружает результаты для дальнейшей обработки. После завершения моделирования результаты вычислений записываются в файлы различных форматов. Одним из вариантов являются файлы, представляющие собой выдачу концентраций всех рассматриваемых в модели компонентов примеси с интервалом 1 ч в формате системы анализа и визуализации GrADS. С результатами моделирования можно ознакомиться, используя интерфейс Web-сайта.

### 2.3. Представление результатов прогноза

Информационный сайт, входящий в состав информационно-вычислительной системы, служит для отображения метеорологического прогноза по глобальной модели ПЛАВ и результатов ежедневного моделирования качества атмосферного воздуха над урбанизированной территорией. Информационный сайт содержит разделы:

– Метеорологический прогноз. В графическом виде представлен метеорологический прогноз по глобальной оперативной модели ПЛАВ Гидрометцентра РФ.

– Прогноз качества воздуха. В графическом виде представлен прогноз качества атмосферного воздуха: оценка качества воздуха проводится с использованием безразмерной комплексной характеристики – Индекса загрязнения атмосферы [14].

– Прогноз распространения примеси. Представлен прогноз изменения концентрации атмосферных загрязнителей в виде полей, нанесенных на карту местности.

Представление данных на сайте [15] реализовано на языке разметки HTML и языках скриптов php и javascript.

В разделе «Метеорологический прогноз» представлен среднесрочный прогноз на 2 сут с интервалом 6 ч следующих метеорологических характеристик: температура воздуха на высоте 2 м (°C), количество осадков, накопленных за 6 ч (мм), давление на уровне моря (мбар). Метеорологические характеристики представлены в виде двумерных полей, нанесенных на карту местности. Область, для которой представляется прогноз, имеет следующее географическое расположение: от 52 до 62° с.ш. и от 81 до 91° в.д. и охватывает территорию гг. Томск, Новосибирск, Кемерово и Барнаул [9].

В разделе «Прогноз качества воздуха» представлены результаты прогноза, рассчитанные по модели переноса примеси. Они выводятся в виде комплексного показателя – индекса загрязнения атмосферы над рассматриваемой территорией, представляющей собой квадрат со стороной 50 км, в центре которого расположен г. Томск. Индекс загрязнения атмосферы

(ИЗА) – это комплексный показатель степени загрязнения атмосферы, рассчитываемый в соответствии с методикой, предложенной в «Руководстве по контролю загрязнения атмосферы» [14], как сумма средних концентраций в единицах ПДК с учетом класса опасности соответствующего загрязняющего вещества.

Индекс загрязнения атмосферы в настоящей статье рассчитывается по 5 основным загрязняющим веществам (CO, NO<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) на каждый час (сумма средних концентраций, нормированных на максимальную разовую ПДК, с учетом класса опасности) по следующей формуле:

$$\text{ИЗА} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{q_i}{\text{ПДК}_i} \right)^{\alpha_i},$$

где  $q_i$  – концентрация  $i$ -го вещества, мкг/м<sup>3</sup>; ПДК <sub>$i$</sub>  – максимальная разовая предельно допустимая концентрация  $i$ -го вещества, установленная Минздравсоцразвития России [14], мкг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_i$  – безразмерная константа приведения степени вредности  $i$ -го вещества к вредности диоксида серы, зависящая от того, к какому классу опасности принадлежит загрязняющее вещество. Значения  $\alpha_i$  равны 1,5; 1,3; 1,0 и 0,85 соответственно для 1, 2, 3 и 4-го классов опасности загрязняющего вещества [16].

На информационном сайте в разделе «Прогноз распространения примеси» для пользователя представлена возможность просмотреть прогноз распространения и образования вторичных компонентов примеси (рис. 2).

Интерфейс позволяет добавлять на карту местности дополнительные слои: жилые дома, промышленные объекты, дорожную сеть, рельеф (верхний ряд пиктограмм); выбирать отображаемую компоненту примеси (второй ряд гиперссылок). Справа от карты расположена панель навигации, позволяющая пользователю переходить к следующему/предыдущему моменту времени, передвигать изображение в горизонтальной плоскости, увеличивая или уменьшая его, а также осуществлять переход между вертикальными уровнями.

### 3. Интерпретация результатов вычислений

Представленная выше информационно-вычислительная система использовалась для исследования распределения приземной концентрации озона над территорией г. Томска и его пригородом. На рис. 3 представлено такое распределение для различных моментов времени: 11:00, 15:00, 19:00 и 23:00 местного времени 7 апреля 2010 г.

В этот день температура воздуха изменялась от –18° утром до –5° вечером, облачность отсутствовала, средняя сила ветра в течение дня 2 м/с, преобладающее направление ветра – западное и северо-западное. Видно, что в утренние и вечерние часы концентрация озона над городом существенно ниже, чем концентрация озона на периферии (см.

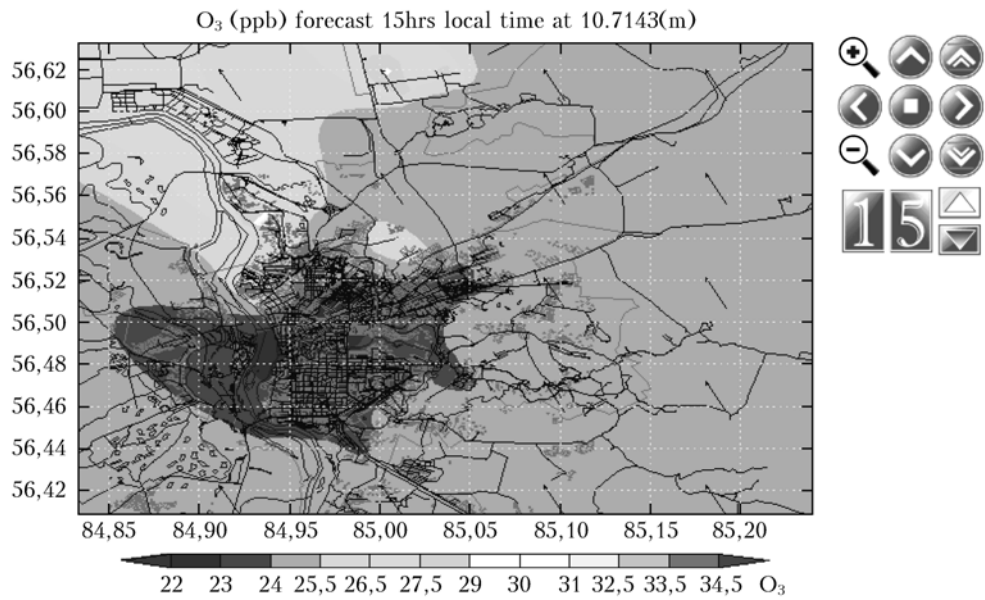
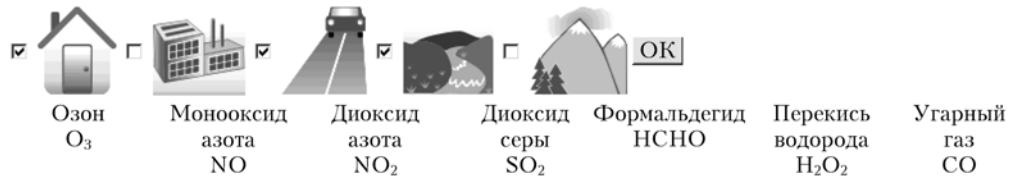


Рис. 2. Интерфейс вывода результатов

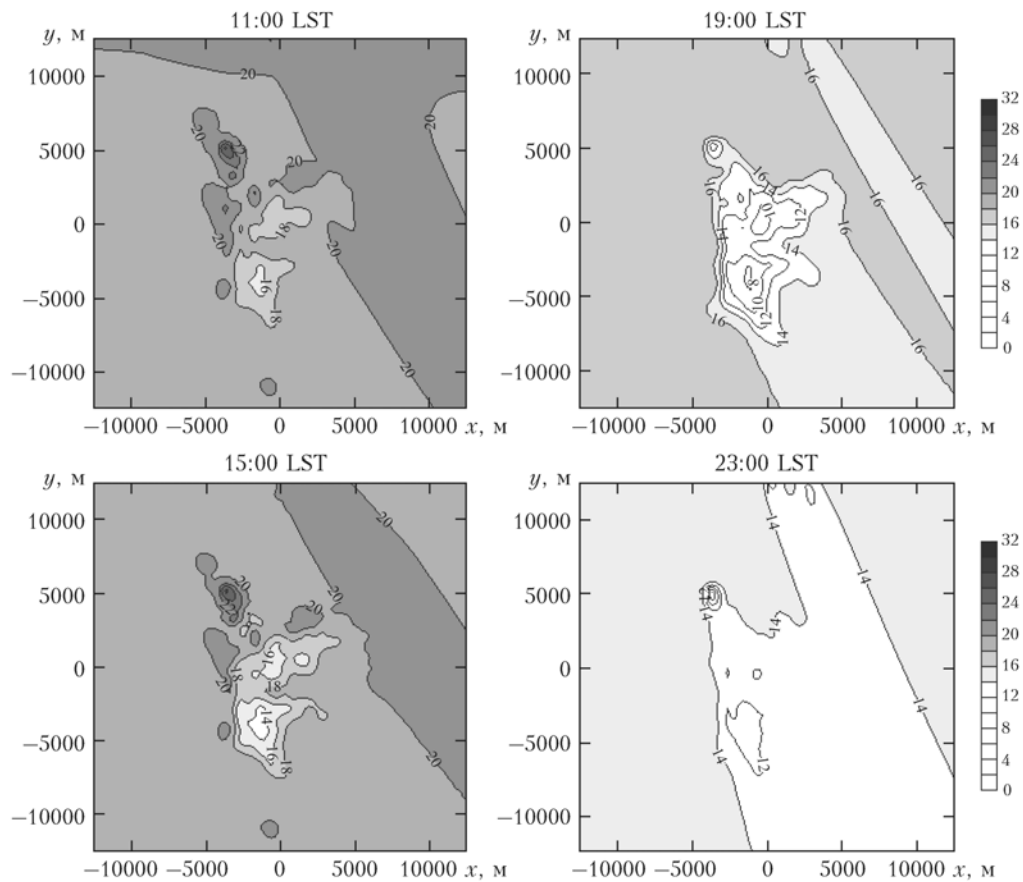


Рис. 3. Предсказанное распределение приземной концентрации озона  $O_3$  над городом и его окрестностями для различных моментов времени 7 апреля 2010 г.

[17, 18]). Причина в том, что в это время озон вступает во взаимодействие с оксидом азота, поэтому в городе, особенно вдоль автодорог с интенсивным движением, концентрация озона наименьшая. Часть примеси с центра города сносится ветром на окраину, и за городом по ходу движения воздушных масс образуется протяженный шлейф пониженной концентрации озона. Причем утром возможно образование зон и с повышенной приземной концентрацией озона.

В дневное время (15:00 и 19:00 местного времени), когда интенсивность фотохимических реакций близка к максимальной, уровень приземной концентрации озона над городом существенно увеличивается.

На рис. 4 кривыми обозначены результаты расчетов по модели переноса примеси, символами — результаты измерений.

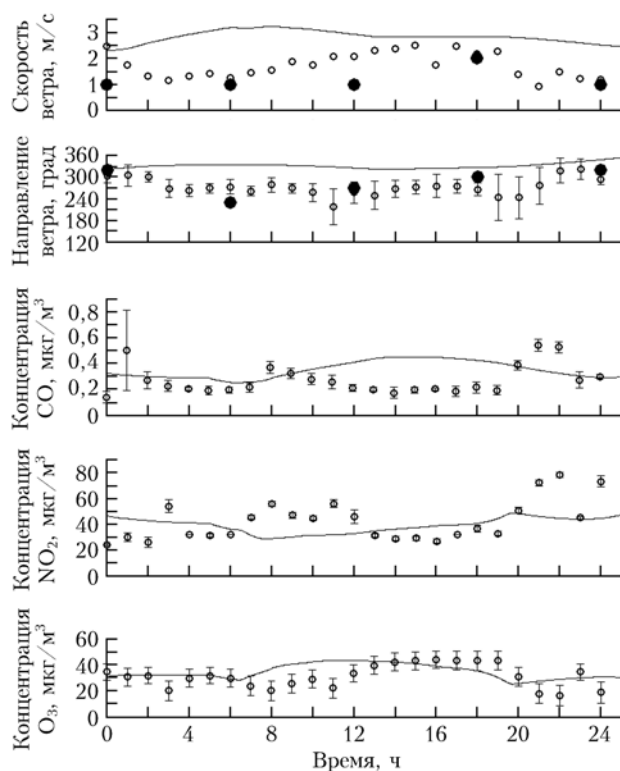


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов с измерениями, проводимыми на TOR-станции ИАО СО РАН для 7 апреля 2010 г.

На графиках изменения направления и силы ветра темными точками обозначены результаты измерений метеорологической станции г. Томска, проводимые через каждые 6 ч. Имеет место хорошее согласование, как по метеорологическим характеристикам, так и по концентрациям основных загрязнителей городского воздуха.

### Заключение

Представлена информационно-вычислительная система «Городская химическая погода», предназна-

ченная для ежедневного прогноза качества приземного атмосферного воздуха над городом и его окрестностями. Сформулирован и подробно описан необходимый перечень компонентов такой ИВС: система получения и усвоения метеорологических прогностических и геофизических данных для исследуемой области, математическая и численная модели переноса примеси с химическими реакциями, ориентированные на суперкомпьютерную технику, пользовательский интерфейс, обеспечивающий представление результатов прогноза в различных форматах.

Предлагаемая ИВС применена для условий г. Томска и позволяет получать определяемый индексом загрязнения атмосферы прогноз уровня качества атмосферного воздуха над районами города и его пригородом. Кроме того, с помощью ИВС «Городская химическая погода» было проведено исследование образования приземного озона над г. Томском в весенний период. Установлены характерные черты распределения минимумов и максимумов приземных концентраций озона в различное время суток. Результаты численного прогноза хорошо согласуются с данными измерений, выполненными на TOR-станции ИАО СО РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 12-01-00433-а.

1. *Das EURAD-PROJEKT* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.eurad.uni-koeln.de>
2. *Barcelona Supercomputing Center* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bsc.es/>
3. *ГПБУ «Москоммониторинг»* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mosecom.ru/>
4. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Покровский Е.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н.* Автоматический пост для мониторинга малых газовых составляющих воздуха // *Метеорол. и гидрол.* 1999. № 3. С. 110–118. Лаборатория климатологии атмосферного состава [Электронный ресурс]. URL: <http://lor.iao.ru/>
5. *Беликов Д.А., Старченко А.В.* Численная модель турбулентного переноса примеси в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 8. С. 667–673.
6. *Беликов Д.А., Старченко А.В.* Исследование образования вторичных загрязнителей (озона) в атмосфере г. Томска // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 5–6. С. 435–443.
7. *Srivastava R.K., McRae D.S., Odman M.T.* Simulation of a reacting pollutant puff using an adaptive grid algorithm // *J. Geophys. Res. D.* 2001. V. 106, N 20. P. 24245–24257.
8. *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. D.* 2002. V. 107. P. 4643–4650.
9. *Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Юрова А.Ю.* Полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада, 2010. С. 193–216.
10. *Старченко А.В.* Моделирование переноса примеси в однородном атмосферном пограничном слое // *Труды Междун. конф. ENVIROMIS-2000.* Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2000. С. 77–82.
11. *Барт А.А., Беликов Д.А., Старченко А.В.* Математическая модель для прогноза качества воздуха в городе

- с использованием суперкомпьютеров // Вестн. Том. гос. ун-та. 2011. № 3. С. 15–24.
12. *Introduction to GRIB Edition1 and GRIB Edition 2* [Электронный ресурс]. URL: [http://www.wmo.int/pages/prog/www/WMOCodes/Guides/GRIB/Introduction\\_GRIB1-GRIB2.doc](http://www.wmo.int/pages/prog/www/WMOCodes/Guides/GRIB/Introduction_GRIB1-GRIB2.doc)
  13. *WGrib* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.src.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib.html>
  14. *Гигиенические нормативы «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест»*. ГН 2.1.6.1338-03. М., 2003.
  15. *Городская химическая погода* [Электронный ресурс]. URL: <http://uaq.atmos.math.tsu.ru>
  16. *Ежегодник «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2007 г.»* ГУ «ГГО» Росгидромета. СПб., 2009. 195 с.
  17. *Ужегова Н.В., Антохин П.Н., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Фофанов А.В.* Выделение антропогенного вклада в изменение температуры, влажности, газового и аэрозольного состава городского воздуха // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 7. С. 589–596.
  18. *Ужегова Н.В., Антохин П.Н., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Фофанов А.В.* Исследование суточной динамики характеристик воздуха в г. Томске в холодный период года // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 9. С. 782–789.

*A.A. Bart, A.V. Starchenko, A.Z. Fazliev.* **Information-computational system for air quality short-range prognosis over territory of Tomsk.**

This paper describes the implemented information-computational system (ICS), oriented to the forecast of air quality over the area of the city and its suburbs. The concise description of the mathematical models, components of the ICS, the order of application execution, and visualization of calculation results are given. The qualitative coincidence of computed prognosis of concentrations of ozone, carbone oxide, and nitrous oxide with measurements of IAQ SB RAS TOR-station is demonstrated.