

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ\*

А. В. СТАРЧЕНКО

*Томский государственный университет, Россия*

e-mail: starch@math.tsu.ru

Results of application of mesoscale meteorological models MM5 and WRF to analyze a development of local atmospheric processes over the Western Siberia terrain are presented. The considered mesoscale models were realized with the help of multiprocessor computing system with distributed memory. For various weather conditions a comparison of predictions of wind speed, wind direction and near surface temperature with the results of meteorological observations, as well as formation of high level concentrations of ozone over the researched domain was performed.

## Введение

Одним из способов исследования и прогноза развивающихся над ограниченной территорией локальных атмосферных процессов является математическое моделирование, опирающееся на использование мезомасштабных метеорологических моделей [1–3]. Эти модели, как правило, включают нестационарные трехмерные уравнения гидротермодинамики и отличаются различными подходами параметризации атмосферных процессов: потоков коротко- и длинноволновой радиации, образования конвективных систем, формирования пограничного слоя, микрофизики влаги, развития турбулентности атмосферы, тепло- и влагообмена в подстилающей поверхности. Компьютерная реализация таких моделей основана на применении нетривиальных вычислительных алгоритмов и требует использования высокопроизводительных вычислительных ресурсов. В то же время в крупных мировых центрах исследования атмосферных процессов (NCAR, EPA, ECMWF) созданы и свободно распространяются исходные коды программ моделей такого уровня.

Целью данной работы является применение мезомасштабных метеорологических моделей MM5 и WRF для исследования развития региональных атмосферных процессов над территорией юга Западной Сибири и локальных — над городом Томском. Полученные метеорологические данные используются для анализа причин возникновения anomalно высокой концентрации озона, зафиксированной 16–20 мая 2004 года на ГОР-станции Института оптики атмосферы в Томске.

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 04-07-90219, № 05-05-98010-р\_обь).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2005.

# 1. Описание используемых метеорологических моделей

Разработанная в Национальном центре атмосферных исследований в кооперации с университетом штата Пенсильвания метеорологическая моделирующая система пятого поколения MM5 (Mesoscale Model 5) [4] предназначена для исследования и прогноза локальных и региональных атмосферных процессов. На мезо-бета- и мезо-гамма-масштабах (2...220 км) MM5 применяется для теоретического анализа атмосферных процессов, в частности развития мезомасштабных конвективных систем, прохождения фронтов, динамики береговых бризов, горно-долинной циркуляции, влияния городского острова тепла. Негидростатическая версия модели, в которой используется следящая за поверхностью координатная система, позволяет варьировать горизонтальное разрешение от сотен метров до десятков километров. Для достижения высокого разрешения в MM5 включена возможность организации проведения расчетов во вложенных областях с одно- или двухсторонним влиянием (до девяти последовательно вложенных сеток). Разработаны версии модели для многопроцессорной вычислительной техники. Предусмотрена возможность четырехмерного усвоения данных наблюдений. В результате расчетов MM5 генерирует метеорологические поля (горизонтальные и вертикальные компоненты вектора скорости ветра, давление, температуру, влажность воздуха, характеристики облачности и осадков, потоки тепла, влаги и количества движения, потоки коротко- и длинноволновой радиации и т. п.). Модель MM5 имеет большое количество схем параметризации подсеточных физических процессов, выбираемых пользователем исходя из требований поставленной задачи и пространственного масштаба моделируемых процессов [5]. Для конвективных процессов предусмотрено восемь схем параметризации. Если горизонтальный масштаб менее 5 км, то облачные процессы моделируются явно. Для представления процессов, протекающих в пограничном слое, рассматриваются шесть схем параметризации, применимость которых определяется количеством вертикальных слоев, используемых при моделировании. Расчет температуры и влажности почвы осуществляется на основе одной из четырех предлагаемых схем параметризации. Для моделирования переноса излучения в атмосфере имеются пять схем параметризации. Микрофизика влаги представляется восемью схемами, имеющими различные степень детализации и область применения.

Модель для исследования и прогноза погоды WRF (Weather Research and Forecast) разработана в Национальном центре атмосферных исследований США [6]. WRF-модель содержит эластические негидростатические уравнения, учитывает неоднородность поверхности. В модели реализована технология организации расчетов во вложенных областях с одно- или двухсторонним влиянием. Используются зависящая от поверхности система координат, сгущающиеся к поверхности Земли сетки, консервативные разностные схемы 2-го и 3-го порядков аппроксимации для нестационарных членов и 2–6-го порядка — для адвективных. Есть параллельная версия для многопроцессорных систем.

WRF может использоваться при решении широкого круга задач в масштабах от сотен метров до тысяч километров, включая идеализированные течения (например, LES, конвекция, бароклинные волны); для исследования возможности применения различных схем параметризации; для сравнения с данными наблюдений; при численном предсказании погоды в реальном времени. Кроме того, WRF-модель может использоваться как динамическое ядро в компьютерных моделирующих системах, предназначенных для исследования переноса примеси и анализа качества атмосферного воздуха над урбанизированными территориями.

В модели WRF предлагается большое количество схем параметризации, которые мож-

но совмещать в любом виде. В этой модели рассматриваются различные схемы представления процессов подсеточного масштаба от простых, эффективных схем до сложных, требующих трудоемких вычислений, от новых развивающихся до хорошо испытанных, которые используются в современных рабочих моделях [7]. Для моделирования микрофизики влаги предлагаются восемь схем параметризации, отличающихся областью применения и детализацией представления фазовых состояний атмосферной влаги. Для описания потоков длинноволновой радиации имеются две схемы, коротковолновой — три схемы. Температура и влажность подстилающей поверхности могут рассчитываться на основе одной из трех многослойных моделей тепло- и влагообмена в почве. Для представления параметров планетарного пограничного слоя предлагаются три схемы параметризации. Такое же количество схем реализовано в WRF-модели для параметризации конвективных процессов.

Для географической привязки этих моделей (выбор области исследования, учет рельефа и распределения категорий землепользования подстилающей поверхности) используются глобальные топографические данные различного разрешения — от одного градуса до 30 с. Задание первого приближения метеорологических полей реализуется с помощью архивных данных либо данных предшествующего прогноза. В качестве архивных данных берутся данные реанализа Национального центра охраны окружающей среды США (NCEP) или Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), глобальные данные НЦАИ, прошедшие процедуру усвоения, данные регионального анализа и прогноза. Начальные и граничные условия для локальных метеорологических моделей формируются с использованием данных объективного анализа. Объективный анализ метеорологических полей выполняется на основе обработки начального приближения метеорологических полей и синоптических данных, а также данных о геопотенциале, ветре, температуре и относительной влажности воздуха на изобарических поверхностях.

## 2. Условия применения моделей MM5 и WRF для исследования атмосферных процессов над территорией юга Западной Сибири

Рассмотренные выше мезомасштабные метеорологические модели применялись для исследования атмосферных процессов, развивающихся над территорией юга Западной Сибири. Расчеты проводились для вложенных областей размерами  $450 \times 450$ ,  $150 \times 150$  и  $50 \times 50$  км, центр которых имел географические координаты  $85^\circ$  в. д. и  $56,5^\circ$  с. ш. (г. Томск). Моделирование локальных атмосферных процессов выполнялось для исторических дат 16–17 мая 2004 года и 20–21 октября 2004 года, соответствующих весенне-летнему и осенне-зимнему сезонам. На рис. 1 представлены основная область исследования  $D1$  ( $450 \times 450$  км) и вложенные в нее области  $D2$  ( $150 \times 150$  км),  $D3$  ( $50 \times 50$  км), а также изолинии превышения земной поверхности над уровнем моря. Рассматриваемая территория характеризуется относительно равнинным рельефом с отметками, не превосходящими 300 м над уровнем моря, за исключением юго-востока, где имеет место подъем поверхности до высот 1000 м над уровнем моря. Для выбранной области основные категории землепользования — это водная поверхность, поля и пастбища, болота, кустарники с отдельно стоящими деревьями, лиственные, смешанные (более 50 % для области  $D1$ ), хвойные леса и незначительные участки урбанизированной территории.

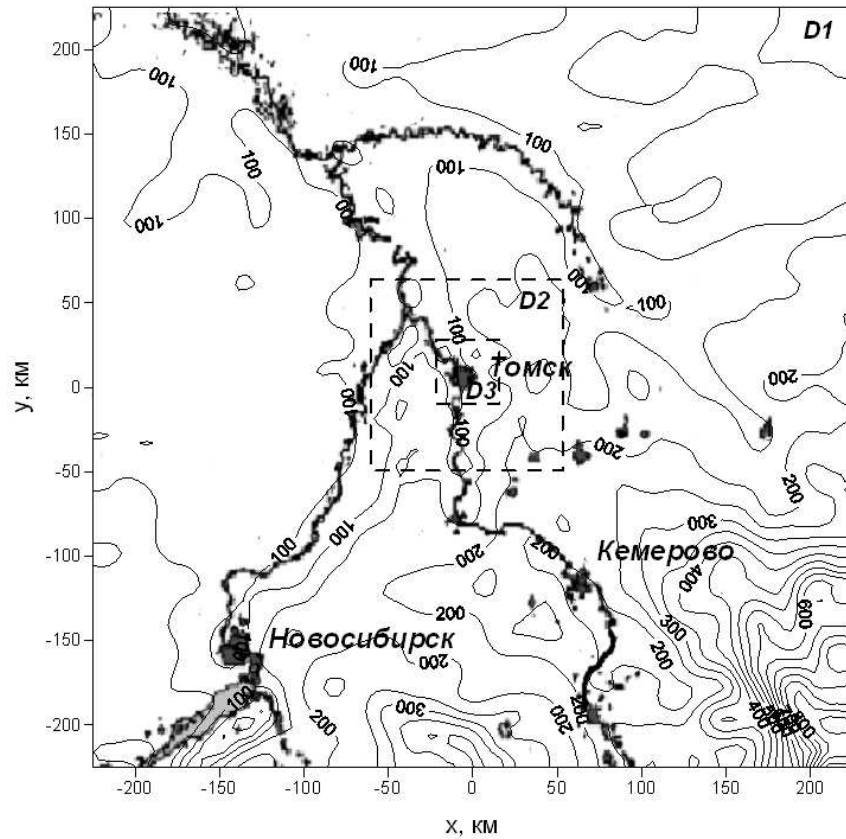


Рис. 1. Область исследования и изолинии превышения поверхности над уровнем моря.

При проведении расчетов для каждой области  $D1$ ,  $D2$ ,  $D3$  использовалась сетка  $52 \times 52 \times 31$  узлов, что обеспечивало горизонтальное разрешение 9 км для области  $D1$ , 3 км — для области  $D2$  и 1 км — для области  $D3$ . Высота каждой области исследования составляла 17 км, при этом использование  $\sigma_p$ -координаты позволяло выполнять расчеты на вертикальной сетке, сгущающейся к земной поверхности. При инициализации мезомасштабных моделей (задании начального приближения для метеорологических параметров) и определении граничных условий для основной области  $D1$  использовались данные окончательного анализа НЦАИ с горизонтальным разрешением  $1^\circ$  и периодичностью 6 ч (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/data/>). Поскольку расчеты одновременно проводились в областях  $D1$ ,  $D2$ ,  $D3$  с двухсторонним учетом получаемых результатов для повышения качества предсказания, граничные условия для вложенных областей генерировались в процессе вычислений. Для расчетов использовался вычислительный кластер Института оптики атмосферы (ИОА) СО РАН (10 двухпроцессорных локальных вычислительных узлов с процессорами Intel Pentium III 1 ГГц, ОЗУ 1 Гбайт, объединенных сетью Gigabit Ethernet 1 Гбит).

При численной реализации модели MM5 выбирались следующие схемы параметризации подсеточных физических процессов:

- схема Блэкадара [8] для атмосферного пограничного слоя, которая обычно используется в расчетах с высоким вертикальным разрешением, когда положение нижнего вычислительного уровня не превышает 100 м. Она учитывает четыре режима устойчивости атмосферного пограничного слоя, включая свободный конвективный слой перемешивания;

— схема смешанной фазы Рейснера [9] для представления микрофизики влаги, которая рассматривает пять фазовых состояний воды (водяной пар, облачную и дождевую влагу, ледяные кристаллы, снег) и учитывает взаимные фазовые переходы;

— RRTM-схема [10] для представления переноса тепла длинноволновой радиацией в атмосфере, которая в данной модели комбинируется со схемой коротковолнового излучения для облачного неба. Схема разработана для детального представления поведения спектра поглощения с учетом водяного пара, диоксида углерода и озона и учитывает влияние полей облачности и осадков;

— пятислойная схема для расчета температуры почвы с использованием уравнения теплопроводности.

При проведении расчетов с использованием WRF-модели применялись следующие схемы параметризации:

— схема Мэллора — Ямады — Джанича [11] для описания процессов в пограничном слое, в которой применяется одномерная прогностическая модель для турбулентной кинетической энергии. Приземный слой параметризуется с использованием функций подобия Мони́на — Обухова;

— шестиклассовая схема Феррье [12] для микрофизики влаги с учетом льда, снега и града, которая обеспечивает хорошую точность расчетов;

— RRTM-схема для длинноволновой радиации и простая схема [13] для коротковолнового излучения для облачного и ясного неба;

— пятислойная схема для расчета температуры почвы на основе уравнения теплопроводности.

### 3. Результаты расчетов

На рис. 2 представлены предсказанные и измеренные значения скорости и направления ветра вблизи поверхности, а также значения температуры воздуха на высоте 2 м для 16—17 мая и 20—21 октября 2004 года в г. Томске (см. рис. 1). Данные расчетов, полученных с использованием моделей MM5 и WRF, сравниваются с измерениями, выполненными Гидрометцентром РФ и на ТОР-станции Института оптики атмосферы (ИОА) СО РАН.

По сводкам Гидрометцентра, 16—17 мая 2004 года в Томске преобладала ясная сухая погода с небольшим ветром преимущественно юго-западного направления. Представленные на рис. 2, *а* результаты численного предсказания хорошо согласуются между собой и с данными метеорологических наблюдений по силе и направлению ветра, особенно для моментов времени, когда приспособление моделей к условиям проведения расчетов завершено. Обе рассматриваемые мезомасштабные модели удовлетворительно предсказывают штилевые условия во второй половине 17 мая и вечернее усиление ветра с изменением его направления. В то же время рассчитанные значения приземной температуры воздуха хуже соответствуют измеренным значениям — различия в дневных максимумах и ночных минимумах составляют около шести градусов. Однако вычисленные по рассматриваемым моделям значения температуры воздуха отличаются не более чем на два градуса.

20—21 октября 2004 года в Томске, по данным Гидрометцентра, также отмечался незначительный ветер с небольшим усилением в начале и конце периода моделирования. Направление ветра менялось с западного на восточный. В течение всего рассматриваемого интервала времени шел небольшой ливневый снег. Сравнение представленных на рис. 2, *б* результатов расчетов с данными наблюдений показывает, что модели дают несколько за-

вышенную скорость ветра. Расхождения достигают 4 м/с, причем наиболее значительными они становятся в начале и конце периода моделирования. В то же время имеется неплохое согласование по расчетам направления приземного ветра в Томске, в том числе хорошо предсказывается смена направления ветра между 18 и 24 часами 20 октября. Следует также отметить, что при условиях, близких к штилевым, WRF-модель хуже воспроизводит направление ветра вблизи поверхности, чем модель MM5. В рассматриваемый

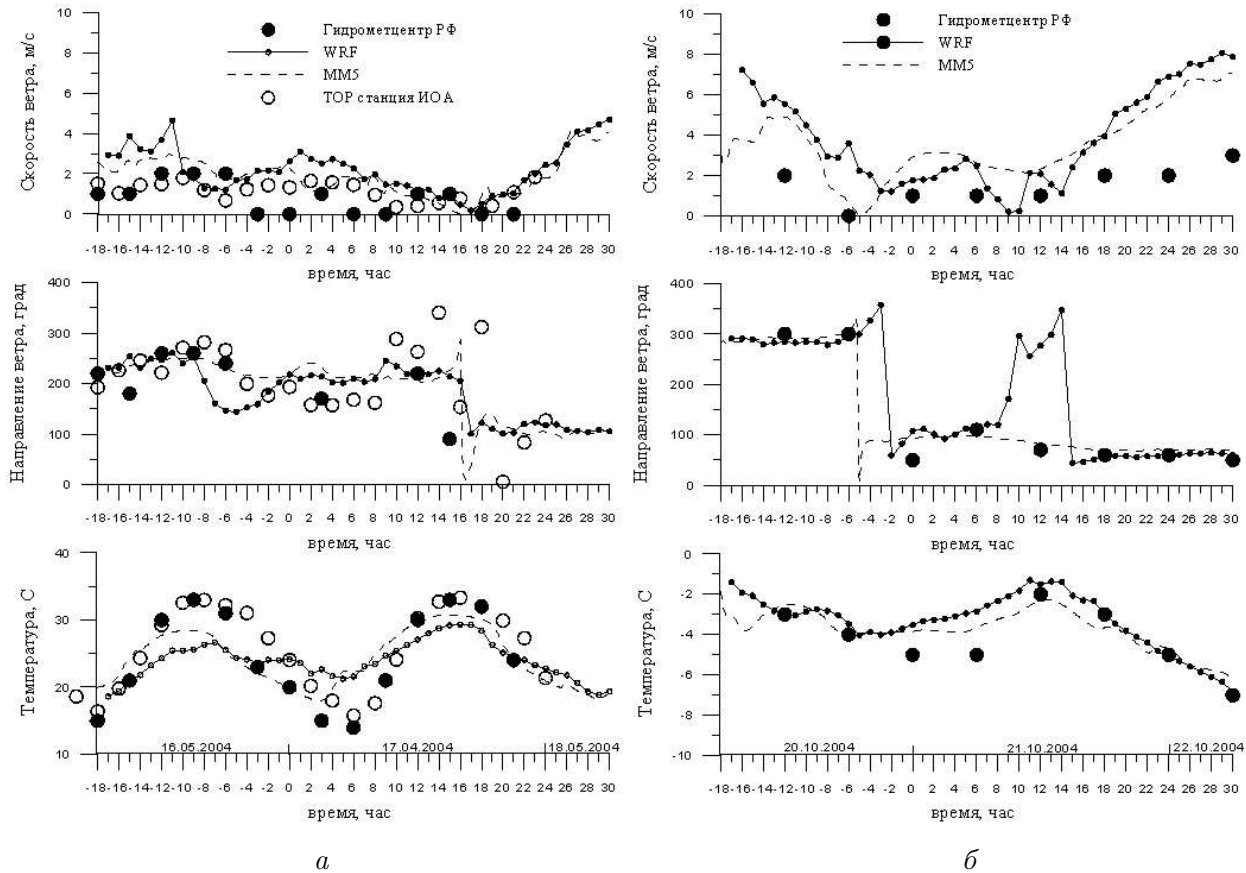


Рис. 2. Изменение скорости, направления приземного ветра и температуры воздуха на высоте 2 м для 16–17 мая (а) и 20–21 октября 2004 года (б) в г. Томске. Значки — данные наблюдений, кривые — расчет.

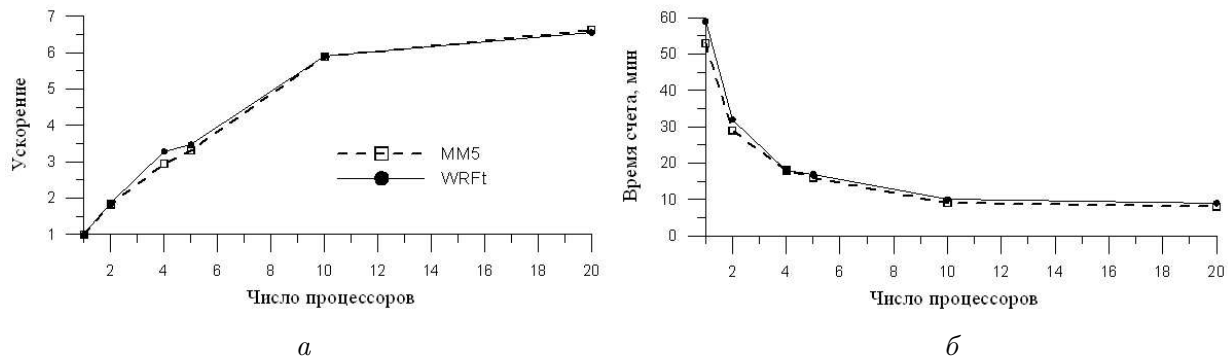


Рис. 3. Зависимость ускорения вычислений (а) и времени счета (б) от числа используемых процессоров.

период времени температура воздуха на высоте 2 м менялась незначительно, поэтому имеется удовлетворительное согласование рассчитанных и измеренных значений, расхождение не превышает 2 град. Результаты предсказания температуры по различным моделям хорошо согласуются между собой. Кроме того, обе рассмотренные модели предсказывали небольшой снегопад.

На рис. 3 приведены графики изменения ускорения и времени счета одного часа периода моделирования при различном числе используемых процессоров вычислительного кластера ИОА СО РАН. Ускорение рассчитывалось как отношение времени счета, полученное на одном процессоре, ко времени счета многопроцессорного варианта программы. Как видно из рисунка, при использовании до десяти процессоров наблюдаются практически линейный рост ускорения и значительное (до шести раз) сокращение времени счета. Далее при увеличении числа применяемых процессоров эффективность параллельной программы снижается, что можно объяснить, в первую очередь, особенностью архитектуры многопроцессорной системы с распределенной памятью, вычислительные узлы которой представляют двухпроцессорные функциональные устройства, а также тем, что при фиксированном общем объеме вычислительной работы при увеличении числа применяемых процессоров также увеличивается и доля временных затрат на пересылку данных. Тем не менее применение кластера позволяет существенно сократить временные затраты на получение решения.

## 4. Моделирование образования озона

Полученные поля метеорологических параметров использовались для исследования образования вторичных загрязнителей в атмосфере города. Измерения, проводимые на ГОР-станции ИОА СО РАН, зафиксировали в дневное время в период 16–20 мая 2004 года содержание озона в приземном слое воздуха, превосходящее максимальные разовые предельно допустимые концентрации ( $80 \text{ млрд}^{-1}$ ).

Для исследования причин возникновения повышенного уровня загрязнения атмосферного воздуха вторичными загрязнителями в данной работе привлекалась эйлерова модель турбулентной диффузии [14], включающая пространственные нестационарные уравнения переноса, параметризацию сухого осаждения примеси, а также полуэмпирическую кинетическую схему образования тропосферного озона Харли [15, 16], объединяющую восемь химических и фотохимических реакций, приводящих к генерации озона в воздухе, содержащем летучие углеводородные соединения.

При проведении расчетов по определению качества атмосферного воздуха над г. Томском 16–17 мая 2004 года учитывались многочисленные точечные, линейные и площадные источники выбросов загрязняющих атмосферу веществ, влияние солнечной радиации, рельефа и свойств подстилающей поверхности. Необходимые для расчета значения фоновых концентраций озона и оксидов азота вычислялись на основе боксовой модели, а концентрации летучих органических соединений и монооксида углерода (в работе принимается химически инертным) считались постоянными. Предсказание временной динамики пространственных полей первичных и вторичных загрязнителей воздуха проводилось для области  $D3$  (см. рис. 1) на сетке  $100 \times 100 \times 60$  с горизонтальным разрешением 500 м. При проведении расчетов использовался вычислительный кластер ИОА СО РАН.

На рис. 4 представлены графики изменения приземных концентраций озона, диоксида азота, монооксида углерода и интенсивности солнечного излучения 16–17 мая 2004 года

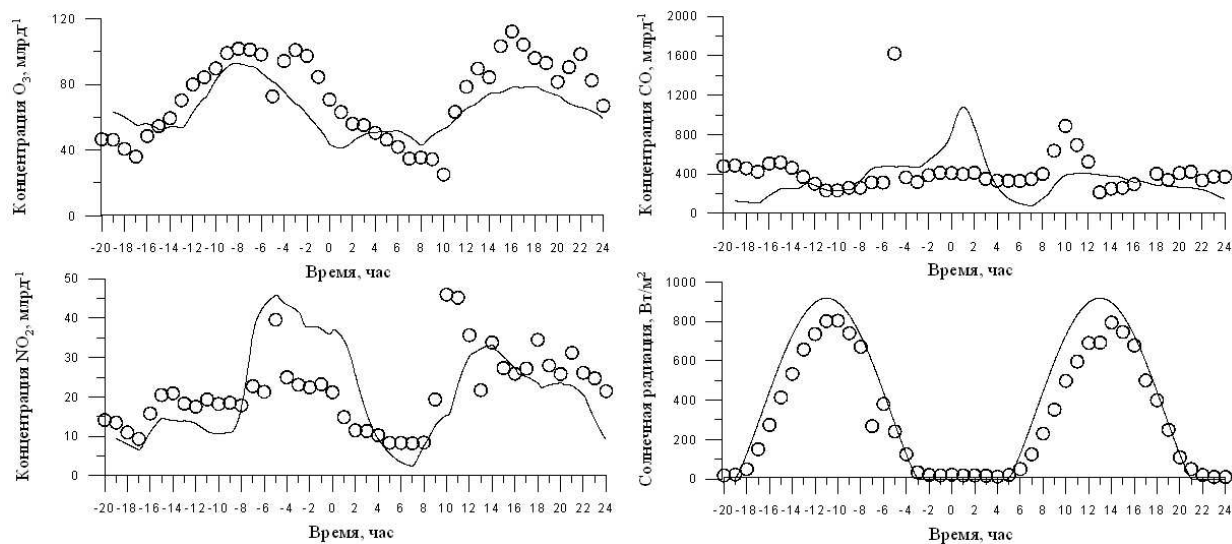


Рис. 4. Изменение приземных концентрации озона, диоксида азота, монооксида углерода и солнечного излучения 16–17 мая 2004 года. Сплошная кривая — расчет, значки — результаты измерений на ТОР-станции ИОА СО РАН. Отрицательные значения временной оси соответствуют первым суткам периода исследования, положительные — вторым.

над г. Томском. Начальные фоновые значения концентрации озона равны  $100 \text{ млрд}^{-1}$ , диоксида азота —  $15 \text{ млрд}^{-1}$ , оксида азота —  $0.1 \text{ млрд}^{-1}$ , летучих органических соединений —  $0.7 \text{ млрд}^{-1}$  [15]. Из рисунка видно, что применяемая транспортная фотохимическая модель, опирающаяся на метеорологические данные, получаемые с использованием модели ММ5, удовлетворительно предсказывает изменение концентрации первичных и вторичных загрязнителей городского воздуха. Относительно невысокие значения концентрации диоксида азота и монооксида углерода указывают на то, что основной причиной повышения содержания в приземном воздухе озона является фоновый поток, а не локальные выбросы городского автотранспорта и промышленных предприятий, расположенных в городской черте. Это подтверждают дополнительные расчеты, выполненные с фоновыми значениями концентрации озона, равными  $17 \text{ млрд}^{-1}$ , в том числе и при десятикратном увеличении интенсивности источников выбросов. Результаты расчетов показывают, что для таких условий концентрация приземного озона не превышает значения  $50 \text{ млрд}^{-1}$ . В то же время при увеличении фоновых значений концентрации летучих до  $2.1 \text{ млрд}^{-1}$  при  $(\text{O}_3)_{\text{фон}} = 17 \text{ млрд}^{-1}$  получаются распределения, подобные представленным на рис. 4.

## Заключение

Представлены результаты применения мезомасштабных моделей ММ5 и WRF для исследования развития локальных атмосферных процессов над территорией юга Западной Сибири. Сравнение данных метеорологических наблюдений в г. Томске для 16–17 мая и 20–21 октября 2004 года с расчетами по рассматриваемым моделям, выполненными при недостаточном количестве локальных измерений для инициализации моделей, показало возможность применения этих моделей при решении различных задач, связанных с природоохранной деятельностью. Расчетные метеорологические данные, полученные на основе модели ММ5, были использованы в транспортной фотохимической модели для исследования причин образования повышенных концентраций приземного озона в г. Томске.



## Список литературы

- [1] PIELKE R.A. Mesoscale Meteorological Modeling. Orlando: Academic Press, 1984. 622 p.
- [2] ПЕНЕНКО В.В., АЛОЯН А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 224 с.
- [3] СТАРЧЕНКО А.В. Численное моделирование городской и региональной атмосферы и оценка ее влияния на перенос примеси // Вычисл. технологии. 2004. Т. 9, ч. 2. С. 98–107.
- [4] DUDHIA J. A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front // Monthly Weather Review. 1993. Vol. 121. P. 1493–1513.
- [5] GRELL G.A., DUDHIA J., STAUFFER D.A. A Description of the Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech. Note, NCAR/TN-398+IA. 1993. 122 p.
- [6] KLEMP J.B., WILHELMSON R. The simulation of three-dimensional convective storm dynamics // J. of Atmospheric Sciences. 1978. Vol. 35. P. 1070–1096.
- [7] [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide/users\\_guide\\_chap5.html#Phy/](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide/users_guide_chap5.html#Phy/)
- [8] BLAKADAR A.K. High resolution models of the planetary boundary layer // Advances in Environmental Sci. and Eng. 1979. N 1. P. 50–85.
- [9] REISNER J., RASMUSSEN R.J., BRUINTJES R.T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1998. Vol. 124B. P. 1071–1107.
- [10] MLAWER E.J., TAUBMAN S.J., BROWN P.D. ET AL. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102(D14). P. 16663–16682.
- [11] JANJIC Z.I. Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso Model. NCEP Office Note. 2002. N 437. 61 p.
- [12] <http://meted.ucar.edu/nwp/pcu2/etapcp1.html>
- [13] DUDHIA J. Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model // J. Atmos. Sci. 1989. Vol. 46. P. 3077–3107.
- [14] СТАРЧЕНКО А.В., БЕЛИКОВ Д.А. Численная модель для оперативного контроля уровня загрязнения городского воздуха // Оптика атмосферы и океана. 2003. № 7. С. 657–665.
- [15] HURLEY P.J. The Air Pollution Model (TAPM) Version 1: Technical Description and Examples. CSIRO Atmospheric Research Technical Paper N 43. Aspendale: CSIRO, 1999. 39 p.
- [16] БЕЛИКОВ Д.А., СТАРЧЕНКО А.В. Численное исследование образования вторичных загрязнителей воздуха вблизи индустриального центра // Вычисл. технологии. 2005. (Настоящий выпуск).

*Поступила в редакцию 2 июня 2005 г.*