

А.В. Старченко, Д.А. Беликов, Д.А. Вражнов, А.О. Есаулов

Применение мезомасштабных моделей MM5 и WRF к исследованию атмосферных процессов

*Томский государственный университет
Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 27.01.2005 г.

Представлены результаты применения некоторых мезомасштабных метеорологических моделей для исследования развития региональных атмосферных процессов над территорией Западной Сибири и локальных — над г. Томском. Для анализа привлекаются широко используемые мировым научным сообществом модели, разработанные в Национальном центре атмосферных исследований США, — метеорологическая модель пятого поколения MM5 и модель для исследования и прогноза погоды WRF. Указанные модели были реализованы на многопроцессорных вычислительных системах ТГУ и ИОА для выбранной территории. Полученные результаты расчетов включают динамику изменения силы и направления ветра, температуру вблизи поверхности, а также пространственное распределение метеорологических параметров для различных моментов времени. Предсказанные значения сравниваются с данными метеорологических наблюдений 16–17 мая 2004 г. в период аномально высоких приземных концентраций озона в г. Томске.

Введение

В настоящее время для исследования и прогноза локальных атмосферных процессов, протекающих над ограниченной территорией, широко используются мезомасштабные метеорологические модели [1, 2], которые опираются на нестационарные трехмерные уравнения гидротермодинамики атмосферы и параметризацию атмосферных процессов (потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, конвективных процессов, пограничного слоя, микрофизики влаги, турбулентности атмосферы, тепло- и влагообмена в подстилающей поверхности). Компьютерная реализация таких моделей основана на применении нетривиальных вычислительных алгоритмов и высокопроизводительных вычислительных ресурсов.

В крупных мировых центрах (NCAR, EPA, ECMWF, NERC) для исследования атмосферных процессов созданы и свободно распространяются исходные коды программ моделей такого уровня. Использование этих моделей в исследовательской и прикладной работе в России ограничено. Это обусловлено, с одной стороны, недостаточным распространением необходимых вычислительных ресурсов, с другой — отсутствием необходимого числа специалистов разного профиля. Поэтому актуальным становится создание открытой информационно-вычислительной системы (ИВС), опирающейся на использование современных моделей, для исследования физико-химических процессов, протекающих в пограничном слое атмосферы над ограниченной территорией (городской и региональный масштаб).

Цель данной работы заключается в применении некоторых мезомасштабных метеорологических мо-

делей, включенных в разрабатываемую ИВС, для исследования развития региональных атмосферных процессов над территорией Западной Сибири и локальных — над г. Томском. Для анализа привлекаются широко используемые мировым научным сообществом модели, разработанные в Национальном центре атмосферных исследований США (NCAR), — мезомасштабная модель пятого поколения MM5 и модель для исследования и прогноза погоды WRF.

Описание моделей MM5 и WRF

Разработанная в Национальном центре атмосферных исследований в кооперации с университетом штата Пенсильвания метеорологическая моделирующая система пятого поколения MM5 (Mesoscale Model 5) [3, 4] предназначена для исследования локальных и региональных атмосферных процессов. Кроме того, она может применяться для решения широкого спектра теоретических проблем атмосферного пограничного слоя, а также при прогнозе метеорологических ситуаций для выбранного региона. На мезобета- и мезогамма-масштабах (2–220 км) MM5 может использоваться для исследования атмосферных процессов, в частности для исследования развития мезомасштабных конвективных систем, прохождения фронтов, динамики береговых бризов, горно-долинной циркуляции, влияния городского острова тепла. MM5 в настоящее время является метеорологической компонентой информационно-прогностической системы Model-3, предназначенной для решения задач прогнозирования качества атмосферного воздуха и его оптических свойств [4].

Имеются негидростатическая и гидростатическая версии модели, в которых применяется следящая за поверхностью координатная система. Негидростатическая модель позволяет варьировать горизонтальное разрешение от сотен метров до десятков километров. Модель MM5 включает возможность организации проведения расчетов во вложенных областях с односторонним или двухсторонним влиянием (до 9 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 вертикальную компоненты вектора скорости ветра, давление, температуру, влажность воздуха, характеристики облачности и осадков, потоки коротковолновой и длинноволновой радиации и т.п.). Система уравнений модели в (x, y, σ) -координатной системе включает уравнение для давления p' , уравнения движения для компонент скорости u, v, w , уравнение притока тепла:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g w + \gamma p \nabla \mathbf{v} = -\mathbf{v} \nabla p' + \frac{\gamma p}{T} \left(\frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{p} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial x} \right) = -\mathbf{v} \nabla u + v \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - e w \cos \alpha - \frac{u w}{r_{earth}} + D_u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{p} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial y} \right) = -\mathbf{v} \nabla v - u \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) + e w \sin \alpha - \frac{v w}{r_{earth}} + D_v, \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\rho_0}{\rho} \frac{g}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{g p'}{\gamma p} = -\mathbf{v} \nabla w + g \frac{p_0}{p} \frac{T'}{T_0} - \frac{g R_d}{c_p} \frac{p'}{p} + e(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_{earth}} + D_w, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{v} \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left(\frac{\partial p'}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla p' - \rho_0 g w \right) + \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta. \quad (5)$$

Здесь $\mathbf{v} = (u, v, w)$ – вектор скорости ветра; ρ, p, T, θ – плотность, давление, абсолютная температура и потенциальная температура воздуха (с индексом «0» базовые значения для «стандартной» атмосферы); $p' = p - p_0$; $\sigma = (p - p_T)/(p_S - p_T)$; $p^* = p_S - p_T$, p_S, p_T – давление на поверхности и на верхней границе области; g – ускорение силы тяжести; γ – показатель адиабаты; c_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении; R_d – газовая постоянная для сухого воздуха; \dot{Q} – приток тепла; m – масштабный коэффициент, учитывающий неоднородность

рельефа подстилающей поверхности; $e = 2\Omega \cos \lambda$, λ – широта; Ω – угловая скорость вращения Земли; f – параметр Кориолиса; $\alpha = \varphi - \varphi_c$; φ, φ_c – текущая и центральная долгота в области исследования; D_u, D_v, D_w, D_θ – источники члены в соответствующих уравнениях.

В модели используются также прогностические уравнения для водяного пара и переменных параметризации микрофизики, таких как облачность и осадки. Эти уравнения включают в себя адвективно-диффузионные и источники члены.

Система 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 имеется пять схем параметризации. Микрофизика влаги представляется восьмью схемами, имеющими различную 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 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.

WRF-модель содержит эластические негидростатические уравнения, учитывает неоднородность поверхности. В модели реализована технология организации расчетов во вложенных областях с односторонним 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. Показано, что эта модель имеет более высокую производительность, чем модель MM5.

Основные прогностические уравнения WRF-модели в (x, y, z) -координатной системе имеют следующий вид:

$$\partial_t p' + \nabla \mathbf{V} = 0, \quad (6)$$

$$\partial_t U + \nabla(\mathbf{v}U) + \partial_x p' = F_U, \quad (7)$$

$$\partial_t V + \nabla(\mathbf{v}V) + \partial_y p' = F_V, \quad (8)$$

$$\partial_t W + \nabla(\mathbf{v}W) + \partial_z p' + gp' = F_W, \quad (9)$$

$$\partial_t \Theta + \nabla(\mathbf{v}\Theta) = F_\Theta, \quad (10)$$

где

$$U = \rho u; V = \rho v; W = \rho w; \Theta = \rho \theta;$$

$$\mathbf{V} = (U, V, W) = \rho(u, v, w) = \rho \mathbf{v}; F_U, F_V, F_W, F_\Theta$$

— источниковые члены в уравнениях (7)–(10).

Давление определяется из диагностического уравнения состояния

$$p = p_0(R_d \Theta / p_0)^{\gamma}. \quad (11)$$

Возмущения основных термодинамических переменных представляют собой отклонения от инвариантного по времени гидростатического состояния:

$$p = p_0(z) + p', \quad \rho = \rho_0(z) + \rho', \quad \Theta = \rho_0(z)\theta_0(z) + \Theta'.$$

Модель WRF предлагает большое количество схем параметризации, которые можно совмещать в любом виде. В этой модели рассматриваются различные схемы представления процессов подсеточного масштаба: от простых, эффективных схем до сложных, требующих трудоемких вычислений, и 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. 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 1° до 30". Задание первого приближения метеорологических полей реализуется с помощью архивных данных или 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.

Условия применения моделей MM5 и WRF

Выбранные для анализа мезомасштабные модели метеорологии использовались при исследовании локальных атмосферных процессов, развивающихся над территорией юга Западной Сибири. Для расчетов была выбрана область размером 450 × 450 км, в центре которой находится г. Томск (85° в.д., 56,5° с.ш.). Для получения детальной картины распределения метеорологических параметров вблизи этого города проводились расчеты для трех вложенных областей (D1, D2, D3, рис. 1), имеющих горизонтальные размеры 450 × 450, 150 × 50 и 50 × 50 км.

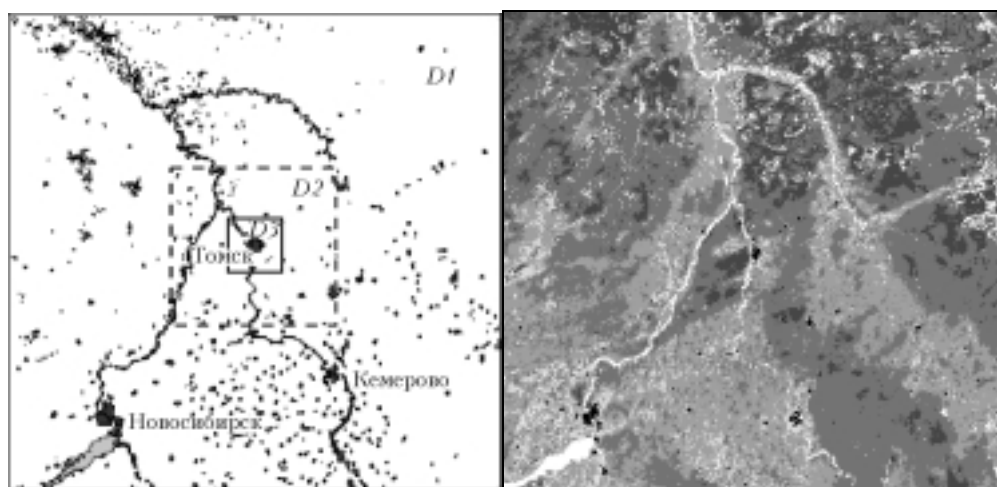


Рис. 1. Область исследования и распределение категорий землепользования

На рис. 1 представлены исследуемая область, а также распределение категорий землепользования (водная поверхность, пашня, незначительная растительность, лиственный лес, смешанный лес, хвойный лес, урбанизированная территория). Расчеты проводились с двухсторонним влиянием определяемых параметров во вложенных областях и граничных условий основной области (*D1*) использовались данные окончательного анализа НЦАИ (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/data/>) с горизонтальным разрешением 1° и периодичностью 6 ч. Условия проведения расчетов (сетки, шаги по вре-

мени и по пространству, выбранные схемы параметризации) представлены в таблице.

Результаты сравнения моделей

На рис. 2 представлены векторные поля скорости приземного ветра на высоте 10 м, полученные с использованием выбранных моделей в 20 ч 17 мая 2004 г. для области *D1* (см. рис. 1). Видно, что над исследуемой территорией имеет место разворот приземного ветра. Область с наименьшими значениями модуля вектора скорости располагается к востоку от г. Томска. В целом, имеет место хорошее согласование результатов как по направлению, так и по силе ветра.

Условия проведения расчетов

Параметр расчетов	MM5	WRF
Вычислительные сетки для каждой области <i>D1</i> , <i>D2</i> , <i>D3</i>	52 × 52 × 31 узлов	52 × 52 × 31 узлов
Горизонтальное разрешение для областей <i>D1</i> , <i>D2</i> , <i>D3</i>	9; 3; 1 км	9; 3; 1 км
Шаг по времени в областях <i>D1</i> , <i>D2</i> , <i>D3</i>	27; 9; 3 с	60; 30; 10 с
Высота расчетной области	17 км	17 км
Вычислительная техника	Кластер ИОА	Кластер ИОА
<i>Выбранные схемы параметризации</i>		
Микрофизика	Смешанная фаза [5]	Схема Ferrier [8]
Длинноволновая радиация	RRTM схема [9]	RRTM схема [9]
Приземный слой	Схема Монина—Обухова	Схема Монина—Обухова
Пограничный слой	Схема Блэкадара [10]	Схема Меллора—Ямады—Джанича [11]
Параметры почвы	Уравнение теплопроводности	Схема Noah
Облачность	Явное разрешение	Явное разрешение

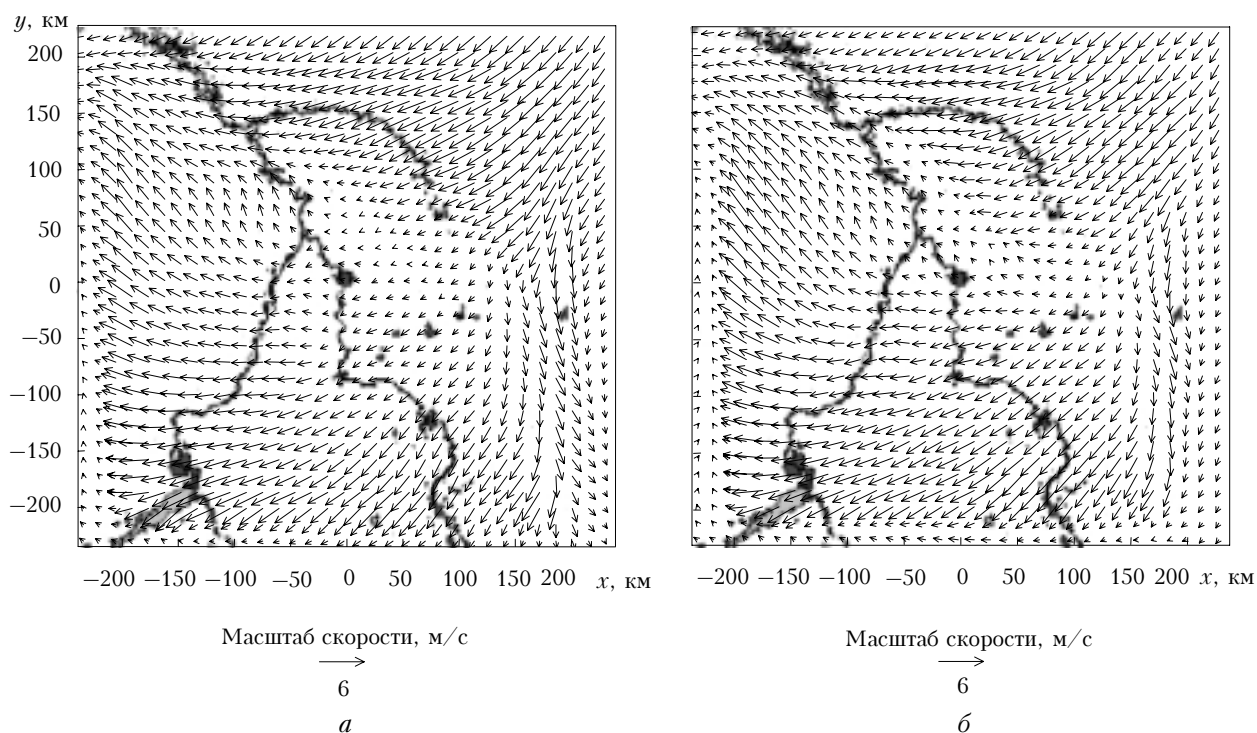


Рис. 2. Поле приземного ветра для области *D1* (450 × 450 км, географические координаты центра области — 85° в.д., $56,5^\circ$ с.ш.), рассчитанное с использованием моделей MM5 (*a*) и WRF (*b*) 17 мая 2004 г., 20:00

На рис. 3 для рассматриваемого момента времени приведены предсказанные поля приземного ветра над областью *D3* (см. рис. 1). Расчеты показывают, что над этой территорией доминирующим является восточное направление приземного ветра. В правой половине области наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных данных по силе и направлению ветра. Однако наличие протяженной водной магистрали (р. Томь), пересекающей область исследования с юга на север, различным образом учитывается в выбранных метеорологических моделях.

Так, результаты, полученные с использованием WRF-модели (рис. 3,б), указывают на отсутствие существенного влияния реки, находящейся в ложбине, на поле приземного ветра. В то же время расчетные данные модели MM5 (рис. 3,а) фиксируют уменьшение скорости ветра вблизи реки и даже его разворот. Из-за такого влияния протяженной водной поверхности значения модуля скорости приземного ветра за рекой ниже, чем те, которые предсказывает WRF-модель, хотя по направлению ветра имеется неплохое соответствие. Одной из причин расхождения полученных результатов является использование в моделях различных схем параметризации пограничного

слоя, тепло- и влагообмена в подстилающей поверхности.

На рис. 4 сравниваются предсказанные значения скорости и направления приземного ветра, а также температуры воздуха на высоте 2 м в г. Томске (85° в.д., 56,5° с.ш.) с данными наблюдений, выполненных Гидрометцентром РФ и на ТОР-станции ИОА СО РАН.

Отметим, что в силу недостаточного количества измерений объективный анализ метеопараметров не проводился и в качестве начального приближения при инициализации моделей использовались данные окончательного анализа NCAR. По этой причине, по-видимому, расхождение предсказанных значений скорости ветра от измеренных в первые сутки периода моделирования (время равно -24...0 ч, рис. 4) значительно. В то же время выбранные для анализа метеорологические модели показывают хорошее качество воспроизведения направления приземного ветра.

Уровень соответствия рассчитанных и измеренных значений температуры воздуха невелик — различия в дневных максимумах и ночных минимумах составляют около 6°. Заметим, что вычисленные по различным моделям значения температуры воздуха отличаются не более чем на 2°.

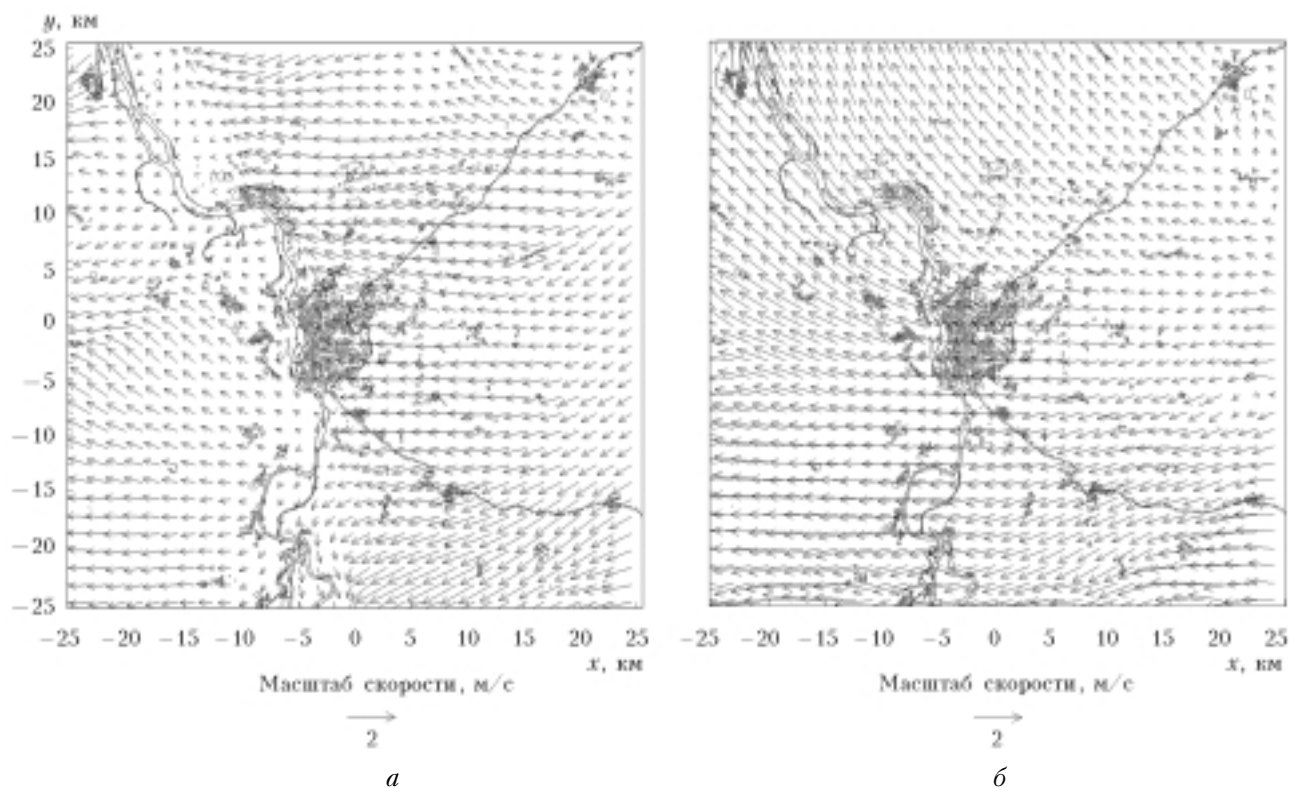


Рис. 3. Поле приземного ветра для области *D3* (50 × 50 км, географические координаты центра области — 85° в.д., 56,5° с.ш.), рассчитанное с использованием моделей MM5 (а) и WRF (б) 17 мая 2004 г., 20:00

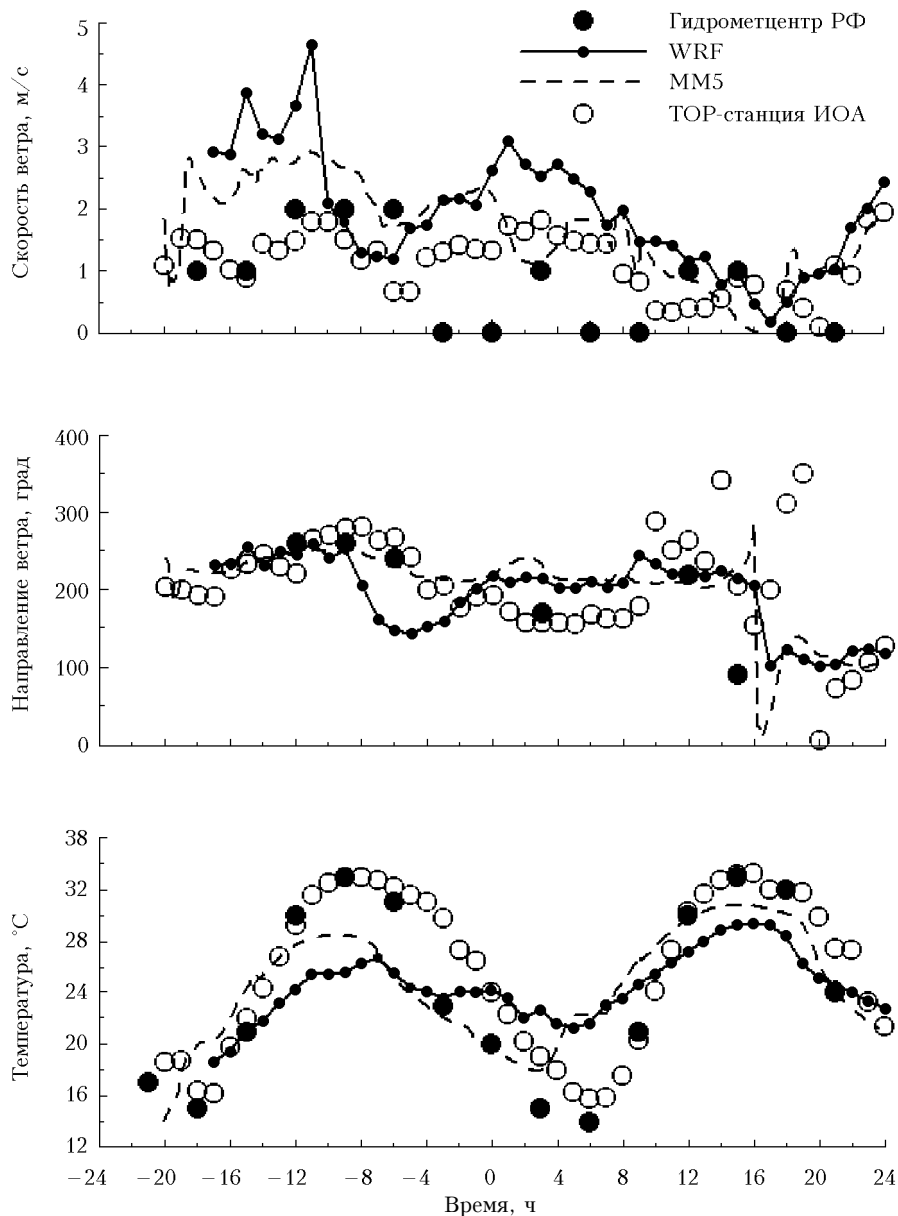


Рис. 4. Изменение скорости и направления приземного ветра, а также температуры вблизи поверхности в г. Томске (85° в.д., 56,5° с.ш.), рассчитанное с использованием моделей MM5 и WRF. Значками отмечены данные метеорологических наблюдений Гидрометцентра РФ и ТОР-станции ИОА СО РАН. Отрицательные значения временной оси соответствуют 16 мая 2004 г., положительные – 17 мая 2004 г.

Заклучение

Представлены результаты применения мезомасштабных моделей MM5 и WRF для исследования развития локальных атмосферных процессов над территорией юга Западной Сибири и г. Томском. Сравнение с данными наблюдений для 16–17 мая 2004 г. показало возможность использования этих моделей при решении различных задач, связанных с природоохранной деятельностью, в том числе для прогнозирования качества атмосферного воздуха, моделирования последствий техногенных аварий и катастроф, а также для получения необходимой информации о параметрах атмосферы. В то же

время требуется дополнительное тестирование моделей MM5 и WRF с целью выбора наиболее адекватных схем параметризации взаимодействия атмосферного пограничного слоя с подстилающей поверхностью.

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

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. Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: validation tests and

- simulation of an Atlantic cyclone and cold front // Mon. Weather Rev. 1993. V. 121. P. 1493–1513.
4. Солдатенко С.А., Шербаков А.Ю., Слоан Дж., Блоксэм Р., Мисра Р.К. Моделирование процессов переноса и трансформации примесей на основе системы Model-3 // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 4. С. 308–314.
 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. Atmos. Sci. 1978. V. 35. N 6. P. 1070–1096.
 7. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide/users_guide_chap5.html#Phy
 8. <http://meted.ucar.edu/nwp/pcu2/etapcp1.html>
 9. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102. N 14. P. 16663–16682.
 10. Blakadar A.K. High resolution models of the planetary boundary layer // Adv. in Environ. Sci. and Engineer. 1979. N 1. P. 50–85.
 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.

A.V. Starchenko, D.A. Belikov, D.A. Vrazhmov, A.O. Yesaulov. Application of MM5 and WRF mesoscale models to research of regional atmospheric processes.

Results of application of MM5 (Mesoscale Model 5, <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html>) and WRF (Weather Research and Forecast, <http://wrf-model.org>) mesoscale meteorological models to analyze a development of local atmospheric processes over the Western Siberia are presented. These models take into account a surface curvature and underlying surface properties, allow selecting various parameterization schemes of subgrid physical processes (short-wave and long-wave radiation, moisture microphysics, convective parameterization in clouds, planetary boundary layer, development of soil temperature and moisture) depending on the spatial scale of the investigated problem. Also these models allow predictions in the nested domains with one-way or two-way interaction. The considered mesoscale models were realized with usage of multiprocessor computing system with distributed memory. For various weather conditions, a comparison of predictions of wind speed and wind direction and near-surface temperature and humidity with results of meteorological observations over the research domain was performed.