ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗА ПОГОДЫ*

А.В. Старченко

Томский государственный университет

Одним из современных 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 гидродинамики и тепломассообмена и отличаются различными подходами параметризации атмосферных процессов: потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, образования конвективных систем, формирования пограничного слоя, микрофизики влаги, развития турбулентности атмосферы, тепло- и влагообмена в подстилающей поверхности [1].

Теоретическую основу для использования методов математического моделирования для исследования и прогноза погоды заложил в 1904 г. норвежский ученый В. Бьеркнес, который определил задачу прогноза погоды как задачу решения уравнений атмосферной термогидродинамики. Впервые численные методы для исследования и прогноза погоды были применены в 1922 г. Л. Ричардсоном. В 1939 г. К.-Г. Россби продемонстрировал применение линеаризованных уравнений гидродинамики к предсказанию погоды. Используя в своей работе допущение, что скорость воздуха в атмосфере не зависит от вертикальной координаты, ему удалось показать, что эволюция поля скорости может быть описана решением уравнения для завихренности. Однако первый успешный численный прогноз погоды был получен Дж. Чарни с соавторами лишь в 1950 г. на первом электронном компьютере ENIAC на основе модели Россби, в которую была добавлена нелинейная адвекция. Существенным шагом в теории прогноза явились работы Г. И. Марчука, Н. И. Булеева и К. Хинкельмана, в которых впервые учитывалось влияние процессов на большой площади на изменение атмосферных условий в пункте, для которого рассчитывается прогноз.

В современной классификации математические модели для исследования и прогноза атмосферных явлений делятся по пространственно-временным масштабам на глобальные, мезо- и микромасштабные. Глобальные модели ориентированы на изучение процессов с характерными горизонтальными масштабами от нескольких до сотен тысяч километров и

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 04-07-90219, 05-05-98010р_обь.

временными масштабами от нескольких дней до нескольких недель. К таким процессам относят глобальную циркуляцию, синоптические циклоны и антициклоны, атмосферные фронты и пр. Моделируемая область, как правило, покрывает либо всю поверхность земного шара, либо его полусферу. Мезомасштабными или локальными называют модели, описывающие процессы с пространственным масштабом от единиц до нескольких тысяч километров и характерным временем от часа до нескольких дней. Это крупномасштабная турбулентность, динамика кучевых облаков, грозы, бризовые и горно-долинные циркуляции, городской «остров тепла». К микромасштабным относят модели, предназначенные для исследования атмосферных процессов с характерными размерами, не превышающими нескольких километров: движение воздуха в уличных каньонах и вблизи отдельно стоящих зданий. Как правило, такие модели призваны решать задачи определения воздействия источников загрязнений (промышленные объекты, транспорт) в элементах городской застройки с целью снижения техногенной нагрузки.

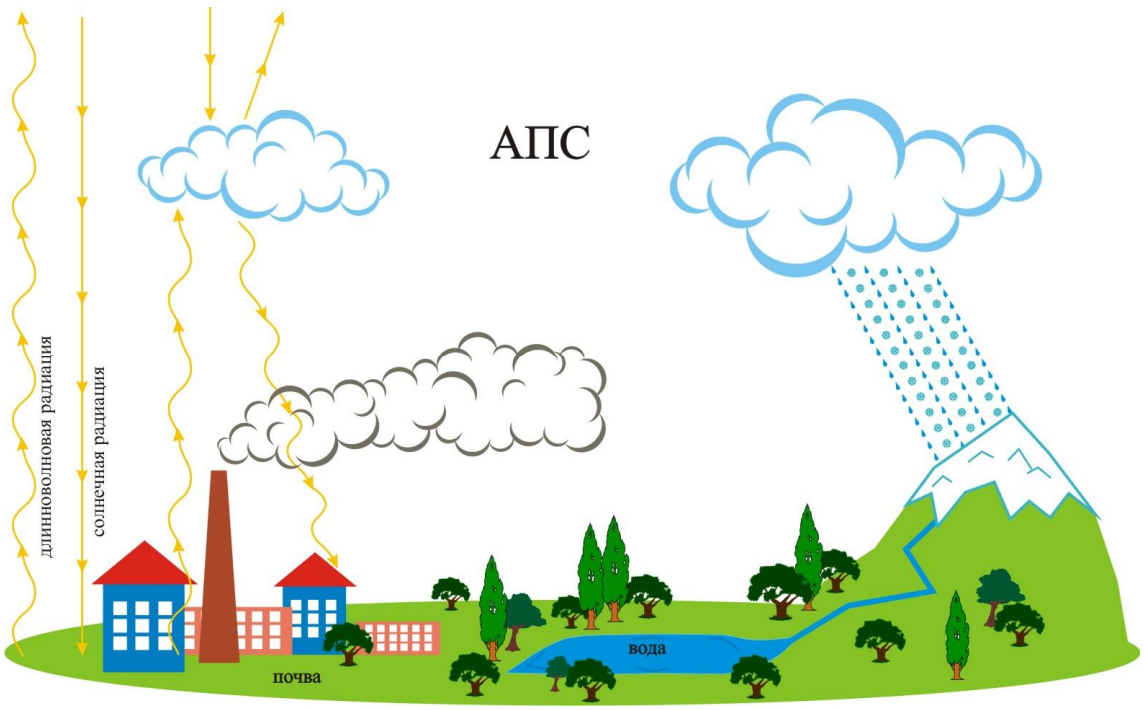


Рис. 1. Процессы и факторы, учитываемые в современных мезомасштабных моделях

Появившиеся в 60-х годах XX в. мезомасштабные модели атмосферы активно развивались последние четыре десятилетия и в настоящее время успешно применяются для решения различных прикладных задач: прогноз локальной погоды, изучение формирования атмосферных циркуляций, образования туманов и облачности, распространения примесей и их трансформации. Сегодня мезомасштабная метеорологическая модель – матема-

тическая модель для расчета погоды над ограниченной территорией с достаточно высоким разрешением. Мезомасштабные модели применяются там, где условия окружающей среды изменяются существенно во времени и пространстве. Мезомасштабные модели включают, как правило, нестационарные трехмерные уравнения гидротермодинамики и отличаются различными подходами параметризации атмосферных процессов и учета взаимодействия с подстилающей поверхностью (рис. 1).

Основные уравнения мезомасштабных моделей

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0. \qquad (1)$$

Уравнения движения:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\rho f v+K_H\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_Z^m\frac{\partial u}{\partial z}\right); \qquad (2)$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}-\rho f u+K_H\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_Z^m\frac{\partial v}{\partial z}\right); \qquad (3)$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}-\rho g+K_H\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_Z^m\frac{\partial w}{\partial z}\right). \qquad (4)$$

Уравнение баланса энергии

$$\rho\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}+u\frac{\partial \theta}{\partial x}+v\frac{\partial \theta}{\partial y}+w\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)=K_H\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_Z^h\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)+R+\Phi_\theta. \qquad (5)$$

Уравнение влагообмена

$$\rho\left(\frac{\partial q}{\partial t}+u\frac{\partial q}{\partial x}+v\frac{\partial q}{\partial y}+w\frac{\partial q}{\partial z}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_Z^h\frac{\partial q}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_Z^h\frac{\partial q}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_Z^h\frac{\partial q}{\partial z}\right)+\Phi_q. \qquad (6)$$

Уравнение состояния

$$p=\rho RT,\ R=R_0\left[\frac{1-q}{M_{air}}+\frac{q}{M_{H_2O}}\right];\ \ \theta=T(p_0/p)^{R/c_p}. \qquad (7)$$

Вычислительные технологии

В настоящее время решение уравнений (1)–(7) может быть получено лишь численно с использованием высокопроизводительных компьютеров. Вычислительные технологии отыскания приближенного решения опираются, как правило, на конечно-разностные методы, позволяющие перейти от дифференциальной задачи в области непрерывного изменения аргументов к конечно-разностной постановке (системе линейных уравнений) на сеточной области. Обычно в мезомасштабных моделях применяется сетка, равномерная по широте и долготе и не равномерная по высоте. Вычислительные уровни модели сгущаются при приближении к поверхности на основе подходящего преобразования [1,2]. После выбора сетки производится замена (аппроксимация) дифференциальных операторов (1)–(7) конечно-

разностными соотношениями, при этом используются схемы аппроксимации высоких порядков – второго или третьего по времени и второго – шестого по координатам. При численной реализации задачи (1)–(7) обычно применяются явно-неявные разностные схемы с расщеплением для учета быстропротекающих процессов, таких как звуковые волны, выпадение осадков и т.п. Некоторые слагаемые уравнений (1)–(7) аппроксимируются неявными разностными схемами для ослабления требований вычислительной устойчивости, выражающихся в ограничении временного шага численного интегрирования системы нелинейных уравнений (1)–(7). К таким слагаемым относятся члены, представляющие вертикальные звуковые волны и вертикальную диффузию. Получающиеся системы сеточных уравнений имеют трехдиагональную матрицу и решаются экономичным методом прогонки [4].

При численной реализации мезомасштабных моделей также применяются неявные разностные схемы, которые разрешаются на основе метода покоординатного расщепления или расщепления по физическим процессам [2] или высокоскоростных итерационных методов [3]. Использование неявных разностных схем при моделировании атмосферных процессов с высоким разрешением является более предпочтительным, поскольку снимается существенное ограничение на шаг интегрирования уравнений (1)–(7) по времени. В то же время применение неявных разностных схем требует больших вычислительных затрат вследствие необходимости обращения матрицы системы линейных уравнений, которые могут быть компенсированы путем использования высокопроизводительной вычислительной техники.

Параллельная реализация алгоритмов численного решения задачи (1)–(7) опирается на одномерную или двумерную декомпозицию сеточной области, которая проводится по горизонтальным координатным направлениям. На каждом шаге по времени параллельные вычисления осуществляются одновременно и независимо в каждой выделенной сеточной подобласти, однако для обеспечения расчетов на следующих временных слоях требуется пересылка данных соседним сеточным подобластям, связанным используемым шаблоном сетки. На многопроцессорной вычислительной технике с распределенной памятью время передачи одного числа между вычислительными узлами может на порядки превосходить время одной арифметической операции. Поэтому увеличение доли вычислений в общем объеме при одновременном сокращении временных затрат параллельной программы является одной из важнейших задач при проведении расчетов на мультикомпьютерах с локальной памятью [5].

Используемые мезомасштабные модели

В данной работе представлены результаты применения мезомасштабных метеорологических моделей MM5 [6], WRF [7] и модели ТГУ-ИОА

СО РАН [3] к исследованию развития региональных атмосферных процессов над территорией юга Западной Сибири с использованием кластерных систем ТГУ и ИОА СО РАН.

Разработанная в Национальном центре атмосферных исследований США в кооперации с университетом штата Пенсильвания метеорологическая моделирующая система пятого поколения MM5 (Mesoscale Model 5) [6] предназначена для исследования и прогноза локальных и региональных атмосферных процессов на мезо-бета- и мезо-гамма-масштабах (2–220 км). 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 односторонним или двухсторонним влиянием (рис. 2). Разработаны версии модели для многопроцессорной вычислительной техники. Модель тестировалась на суперкомпьютерах с различной архитектурой (Compaq Cluster, CrayT3E, HP SPP, IBM SP, SGI Origin, SUN, PC Linux Cluster) на основе двумерной декомпозиции сеточной области. Версия MM5 для МВС с распределенной памятью базируется на использовании стандарта MPI.

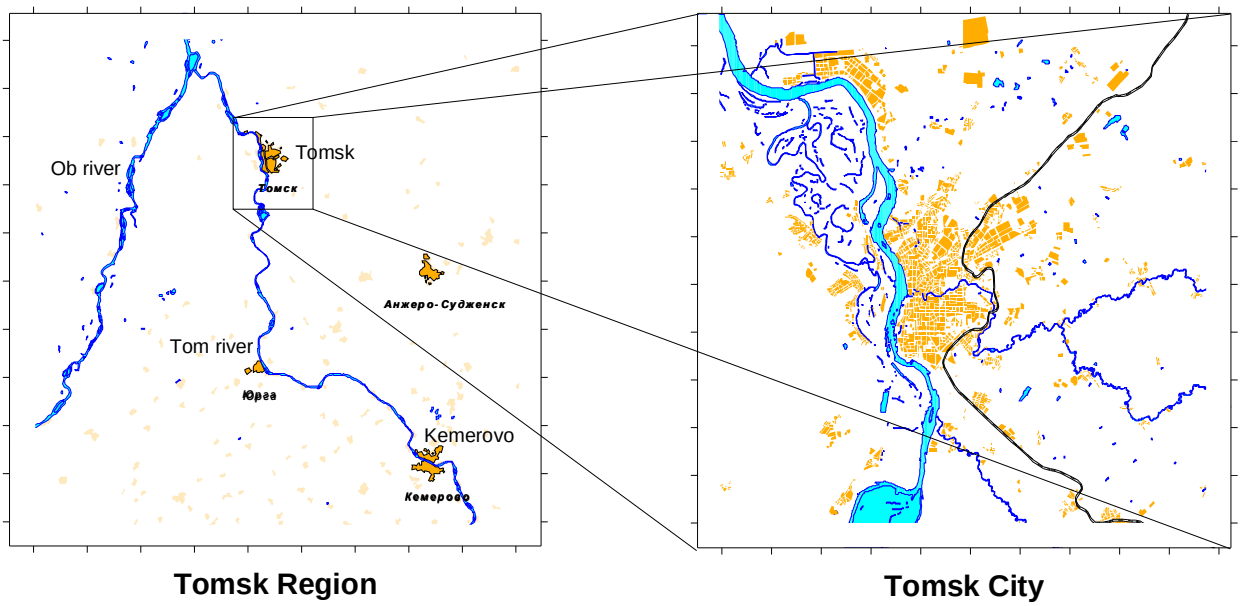


Рис. 2. Организация расчетов во вложенных областях с целью повышения разрешающей способности мезомасштабной модели

В результате расчетов MM5 генерирует метеорологические поля (горизонтальные и вертикальную компоненты вектора скорости ветра, давление, температуру, влажность воздуха, характеристики облачности и осадков, потоки тепла, влаги и количества движения, потоки коротковолновой и длинноволновой радиации и т.п.). Модель MM5 имеет большое количе-

ство схем параметризации подсеточных физических процессов, выбираемых пользователем, исходя из требований поставленной задачи и пространственного масштаба моделируемых процессов.

В настоящее время ММ5 установлена на веб-портале «АТМОС» (http://climate.atmos.iao.ru) и вычислительном кластере ИОА СО РАН, находится в открытом доступе и используется для коллективного решения задач физики атмосферного пограничного слоя для ограниченной территории (рис. 3).

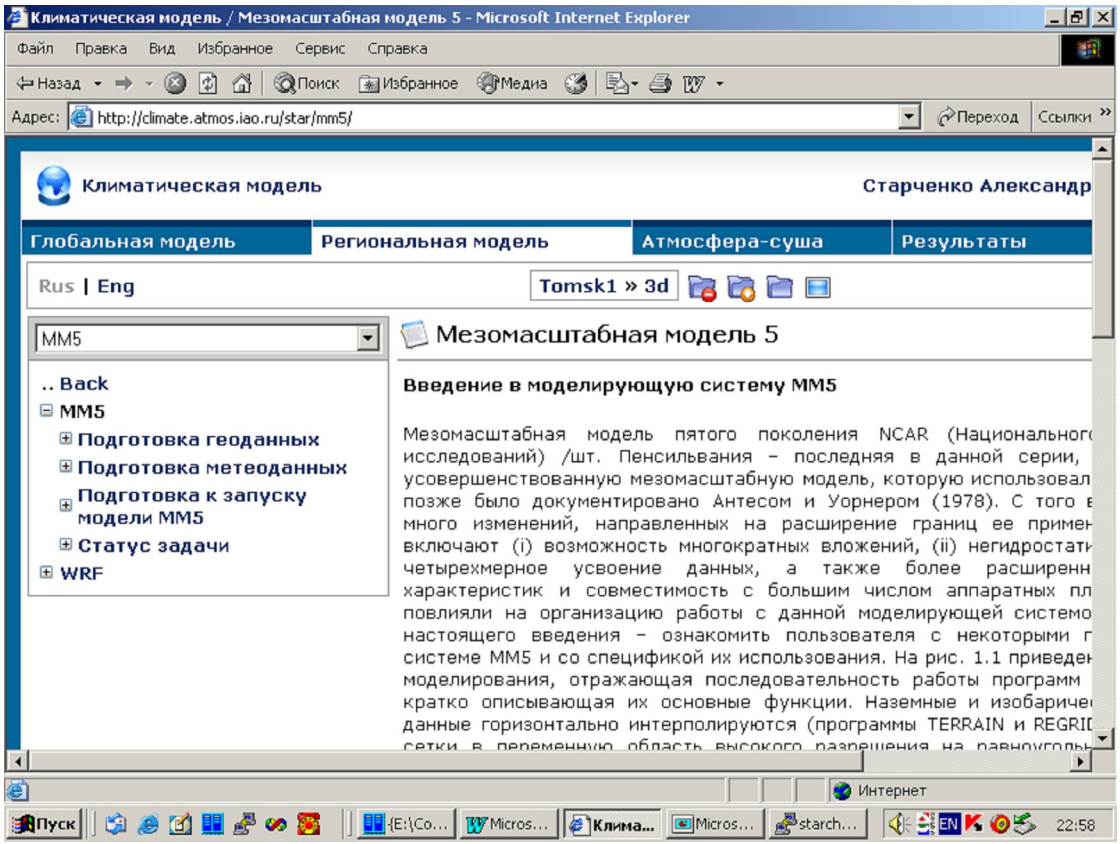


Рис. 3. Пользовательский интерфейс для запуска мезомасштабной модели ММ5 на вычислительном кластере ИОА СО РАН

Модель для исследования и прогноза погоды WRF (Weather Research and Forecast) разработана в Национальном центре атмосферных исследований США [7]. WRF-модель включает негидростатические уравнения для сжимаемого газа, учитывает неоднородность поверхности. В модели реализована технология организации расчетов во вложенных областях с односторонним или двухсторонним влиянием. Используются зависимая от поверхности система координат, сгущающиеся к поверхности Земли сетки.

WRF может использоваться при решении широкого круга задач в масштабах от сотен метров до тысяч километров, включая идеализированные течения, а также 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 можно совмещать в любом виде. Есть параллельная версия модели для многопроцессорных систем с общей или распределенной памятью. Параллельные вычисления на основе WRF-модели проводились на IBM SP системах, HP/Compaq Alpha рабочих станциях, PC Linux кластерах, Sun Solaris и SGI Origin суперкомпьютерах.

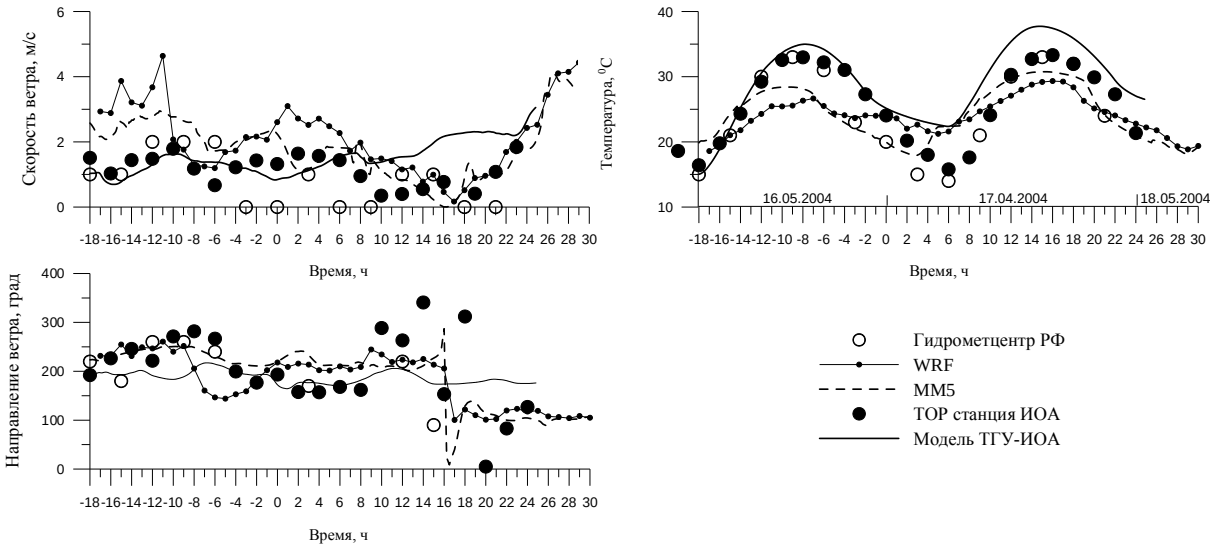


Рис. 4. Изменение скорости и температуры приземного воздуха в Томске

В Томском государственном университете и Институте оптики атмосферы СО РАН создана компьютерная моделирующая система для анализа распределения метеорологических параметров и концентрации примесей в атмосферном пограничном слое и их осаждения на поверхности с неоднородными свойствами [3]. Эта система применяется для параллельных расчетов на МВС с распределенной памятью важных с точки зрения оценки качества воздуха метеорологических параметров (направление и скорость ветра, турбулентная структура атмосферного воздуха) над урбанизированными территориями относительно небольших горизонтальных масштабов со сложным рельефом. Для повышения точности прогноза используется технология организации расчетов во вложенных областях.

Для географической привязки этих моделей (выбор области исследования, учет рельефа и распределения категорий землепользования подстилающей поверхности) используются топографические данные с высоким разрешением. Задание первого приближения метеорологических полей реализуется с помощью архивных данных либо данных предшествующего прогноза. В качестве архивных данных берутся данные реанализа Нацио-

нального центра охраны окружающей среды США или Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды.

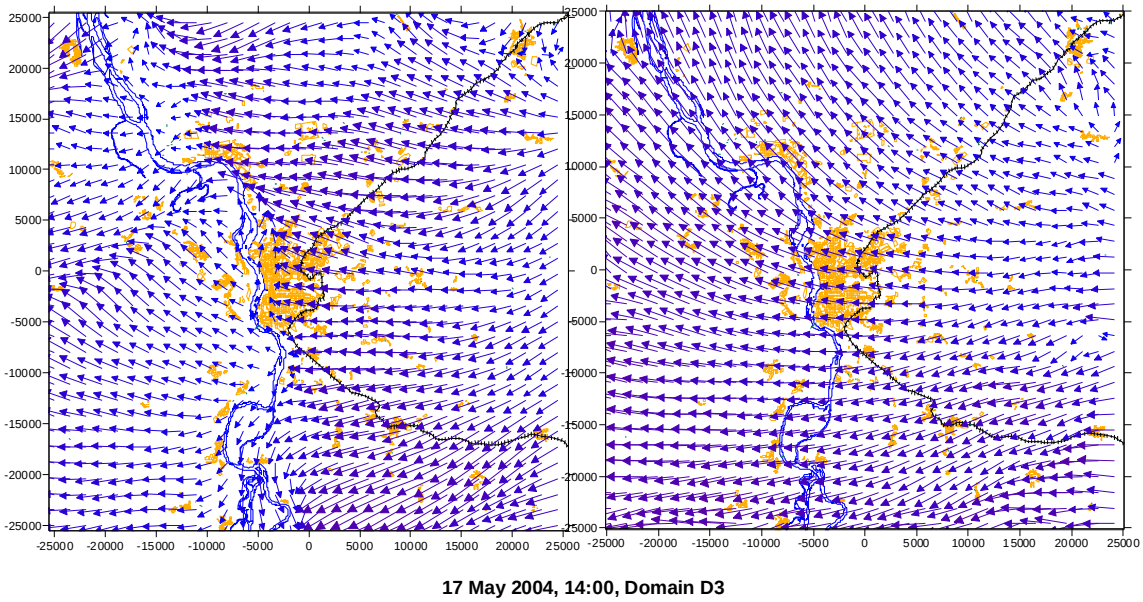


Рис. 5. Векторное поле скорости приземного ветра над Томским районом на 20 часов 17.05.2004 г. Слева – MM5, справа – WRF

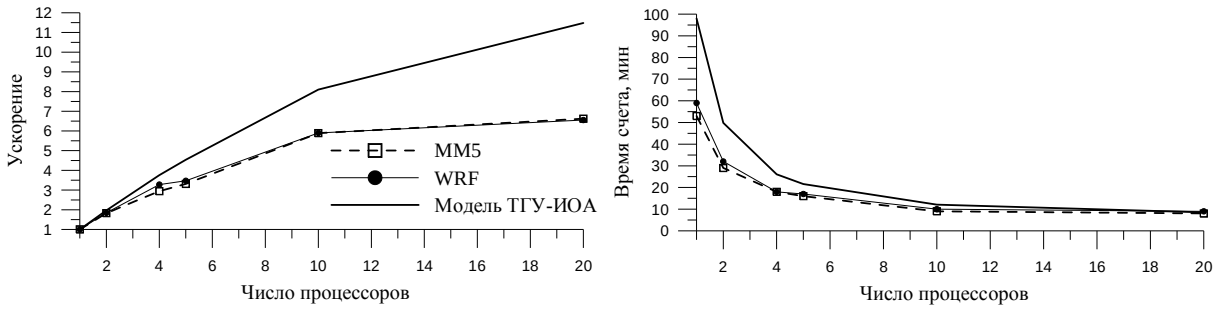


Рис. 6. Зависимость ускорения вычислений и времени счета от числа используемых процессоров

Рассматриваемые модели, опирающиеся на данные измерений и расчеты по глобальным моделям, прошли всестороннее тестирование для различных погодных условий для юга Западной Сибири и Томского района. На рис. 4 для периода времени 16–17 мая 2004 г. представлены результаты сравнения предсказанных значений скорости и направления приземного ветра, а также температуры воздуха на высоте 2 м в г. Томске (85^0 в.д., $56{,}5^0$ с.ш.) с данными наблюдений, выполненных Гидрометцентром РФ (http://meteo.infospace.ru) и на ТОР станции ИОА СО РАН (http://meteo.iao.ru). Использовались вычислительные сетки 52x52x31. Из рисунка видно, что выбранные для анализа метеорологические модели показывают хорошее качество воспроизведения направления и скорости приземного ветра. На рис. 5 приведено векторное поле ветра в приземном слое

воздуха для 20 часов 17 мая 2004 г., предсказанное с использованием моделей MM5 и WRF.

На рис. 6 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, полученного на одном процессоре, к времени счета многопроцессорного варианта программы. Как видно из рисунка, при использовании до десяти процессоров наблюдается практически линейный рост ускорения и значительное (в несколько 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.

Литература

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 // Вычислительные технологии. – 2004. – Т. 9, ч. 2. – С. 98−107.
4. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 591 с.
5. Старченко А.В., Есаулов А.О. Параллельные вычисления на многопроцессорных вычислительных системах – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 56 с.
6. 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.
7. Klemp J.B., Wilhelmson R. The simulation of three-dimensional convective storm dynamics // Journal of Atmospheric Sciences. – 1978. – Vol. 35. – P. 1070–1096.