

# ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОЛЛЕКТИВНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ\*

Д. А. БЕЛИКОВ

*Томский государственный университет, Россия*

Н. А. ЛАВРЕНТЬЕВ, А. З. ФАЗЛИЕВ

*Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия*

А. В. СТАРЧЕНКО

*Томский государственный университет*

*Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия*

e-mail: faz@iao.ru, lnick@iao.ru

The results obtained during the first stage of implementation of the informational-computational system are presented. The mesoscale MM5 model is a basis for the system. MM5 is oriented on the digital weather forecast and it is employed for a study of the mesoscale convective systems, heat islands in the cities, etc. User interfaces of this system are described. The interfaces allow a user to vary the input data, to perform calculations on the cluster and to present the results in a graphical format.

## Введение

В настоящее время при исследовании и прогнозе локальных атмосферных процессов широко используются мезомасштабные метеорологические модели [1], которые включают нестационарные трехмерные уравнения гидротермодинамики атмосферы и различные схемы параметризации атмосферных процессов (потоков коротко- и длинноволновой радиации, конвективных процессов, влияния 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, ERA, ECMWF, NERC) для исследования атмосферных процессов созданы и свободно распространяются исходные коды программ моделей такого уровня.

---

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

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

Использование этих моделей в исследовательской и прикладной работе в России ограничено. Это обусловлено, с одной стороны, недостаточным распространением необходимых вычислительных ресурсов, а 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 масштабы).

В данной работе представлены результаты первого этапа разработки такой системы (<http://climate.atmos.iao.ru/star/mm5>), в основу которой положена мезомасштабная модель ММ5 [2]. Моделирующая система ММ5 ориентирована главным образом на численный прогноз погоды, но она также применяется для исследования мезомасштабных конвективных систем, городского острова тепла и т. д. В предлагаемой работе описаны интерфейсы, предоставляющие клиенту возможность изменять входные данные модели, запускать модель ММ5 на счет на выделенном вычислительном кластере и получать результаты вычислений в графическом виде. Созданная информационная система основана на трехуровневой архитектуре клиент-сервер, в которой запрос клиента обрабатывается на сервере, а непосредственно вычисления производятся на кластере. Программное обеспечение для формирования ИВС описано в работе [3].

## 1. Описание модели ММ5

Разработанная в Национальном центре атмосферных исследований в кооперации с университетом штата Пенсильвания метеорологическая моделирующая система пятого поколения ММ5 (Mesoscale Model 5) [2, 4, 5] предназначена для исследования локальных и региональных атмосферных процессов. Она может применяться для решения широкого спектра теоретических проблем атмосферного пограничного слоя, а также при прогнозе метеорологических ситуаций для выбранного региона. На мезобета- и мезогаммасштабах (2...220 км) ММ5 может использоваться для исследования атмосферных процессов, в частности развития мезомасштабных конвективных систем, прохождения фронтов, динамики береговых бризов, горно-долинной циркуляции, влияния городского острова тепла. Модель в настоящее время является метеорологическим компонентом ряда информационно-прогностических систем, предназначенных для решения задач прогнозирования качества атмосферного воздуха [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 ММ5 включает возможность организации проведения расчетов во вложенных областях с одно- или двухсторонним влиянием (до девяти последовательно вложенных сеток). Разработаны версии модели, совместимые с большим числом аппаратных платформ, в том числе и для многопроцессорной вычислительной техники. Предусмотрена возможность четырехмерного усвоения данных наблюдений.

В результате расчетов ММ5 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.). Система уравнений модели в  $(x, y, z, t)$ -координатной системе включает уравнение для давления, уравнения движе-

ния для компонент скорости, уравнение притока тепла. Также в модели используются прогностические адвективно-диффузионные уравнения для водяного пара и переменных параметризации микрофизики, таких как облачность и осадки.

Система ММ5 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 восемью схемами, имеющими различные степени детализации и области применения.

Так как моделирующая система ММ5 предназначена прежде всего для работы с реальными данными, она требует привлечения таких массивов данных, как:

— рельеф и землепользование (в категориях), распределение растительности по месяцам;

— нанесенные на сетку данные об атмосфере с учетом как минимум таких переменных, как атмосферное давление на уровне моря, ветер, температура, относительная влажность и высота геопотенциала, при приповерхностном давлении в 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 150 и 100 мбар.

## 2. Данные высотных и наземных наблюдений

Пользователь мезомасштабной модели должен предоставить основной набор данных о рельефе, землепользовании и растительности, имеющих глобальный охват для всей моделируемой территории. Для географической привязки модели ММ5 (выбор области исследования, учет рельефа и распределение 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 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. Отдел по информационной поддержке при Национальном центре атмосферных исследований (Data Support Section of Scientific Computing Division at NCAR — <http://www.scd.ucar.edu/dss/index.html>) располагает обширным архивом данных об атмосфере — от анализа на сетке до наблюдений.

Начальные и граничные условия для локальных метеорологических моделей формируются с использованием данных объективного анализа метеорологических полей, который выполняется на основе обработки начального приближения метеорологических полей и синоптических данных, а также данных о ветре, температуре и относительной влажности воздуха на изобарических поверхностях.

На рис. 1 приведена схема полной системы моделирования ММ5, отражающая последовательность работы программ в ней, поток данных и кратко описывающая их основ-

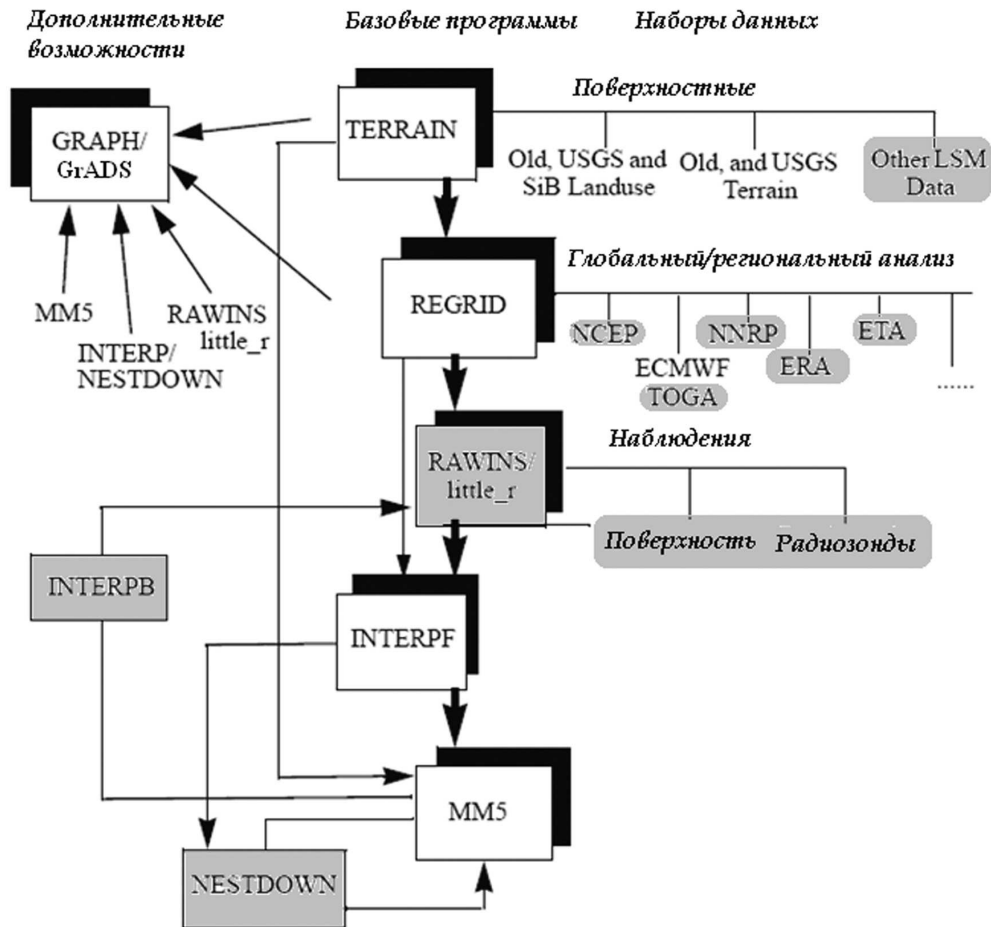


Рис. 1. Схема моделирующей системы MM5.

ные функции. Поверхностные и изобарические метеорологические данные горизонтально интерполируются (программы TERRAIN и REGRID) на широтно-долготную сетку в переменную область высокого разрешения на равноугольной проекции Ламберта, полярной стереографической проекции или проекции Меркатора. Поскольку такая интерполяция не дает мезомасштабных метеорологических деталей, качество интерполированных данных может быть улучшено (программа RAWINS) путем использования наблюдений со стандартной сети наземных и высотных станций (радиозондов) на основе многомерной квадратичной интерполяции или схемы Крессмана. Программа INTERP проводит вертикальную интерполяцию данных (начальных и граничных условий) с изобарических уровней в сигма-систему координат модели MM5. Сигма-уровни вблизи поверхности земли повторяют рельеф, а по мере удаления от земли приближаются к изобарным поверхностям.

### 3. Ввод данных

На рис. 1 показаны наборы данных, с которыми может работать программа MM5. В настоящее время не все возможные наборы данных имеются в нашем распоряжении. Серым цветом выделены отсутствующие в нашей реализации наборы данных. Данные для инициализации метеорологических полей представлены наборами Европейского центра сред-

**Инициализация рельефа, категорий землепользования, растительности и других стационарных географических параметров выбранных областей**

Центр расчетной области			
Долгота	85 °	Широта	56.5 °
Максимальная для всех областей горизонтальная сетка			
Число узлов по долготе	52	Число узлов по широте	52
Тип картографической проекции	Равноугольная коническая Ламберта		
Сглаживание	Двойной проход сглаживание/разглаживание		
Типы растительности	24 категории землепользования USGS		
Количество вложений	13 старых категорий землепользования		
	24 категории землепользования USGS		
	16 категорий землепользования SiB		
Число слоев по вертикали	31		
Проводить объективный анализ по данным наблюдений	<input checked="" type="checkbox"/>		

Выбрать

Рис. 2. Интерфейс для реализации первого этапа ввода данных.

несрочных прогнозов за 1991–2002 гг. Возможности, связанные с использованием данных о поверхности и данных зондирования атмосферы с помощью радиозондов, в настоящее время конечному пользователю недоступны.

Последовательность подготовки пользователем данных включает в себя три этапа. На первом из них определяются регион моделирования и количество вложенных областей, тип картографической проекции, размеры горизонтальной вычислительной сетки, на которой проводятся инициализация рельефа, распределение категорий землепользования и типов растительности (рис. 2), выбираются размеры вертикальной сетки. На втором этапе задаются период времени моделирования, временной интервал, через который имеются исходные метеорологические данные, и перечень высот, на которых необходимо проведение расчетов. На заключительном этапе для каждой из заданных пользователем вложенных областей проводится выбор схем параметризации микрофизики влаги, облачности, планетарного пограничного слоя и излучения в атмосфере. Также определяется частота сохранения трехмерных метеорологических полей, приповерхностных распределений и промежуточных выданных модели. Подготовленные с помощью web-интерфейсов параметры для проведения расчетов преобразуются в файлы, необходимые для запуска расчетной части модели MM5.

## 4. Организация вычислений

Сформированные в диалоговом режиме файлы с входными данными передаются с web-сервера на вычислительный кластер. Постановка вычислительной задачи в очередь и управление очередью осуществляются менеджером Torque [6]. Вычислительные модули программы MM5 зависят от количества вложенных областей, выбранных пользователем для исследования, поэтому при решении каждой задачи программа компилируется. Ошибки, возникающие при вычислениях, предоставляются конечному пользователю в виде, определенном разработчиками программы MM5. В зависимости от настройки, проводимой администратором кластера, в вычислениях могут использоваться от двух до двадцати процессоров.

## 5. Представление результатов вычислений

Выходные данные, получаемые при расчете, составляют довольно значительный массив. Так, например, для расчета изменения локальной метеорологии за сутки с шагом в 27 с размер массива результатов достигает несколько сотен мегабайт. Эти данные хранятся на кластере и имеют уникальные идентификаторы, позволяющие связывать их с пользователем и решенными им задачами. Передача значительных объемов числовой информации пользователям по сети Интернет в настоящее время является экономически необоснованной. Поэтому пользователю предоставляется возможность строить отображение результатов в виде карт с изолиниями, цветной заливкой или отображением векторных полей. Примеры такой графики представлены на рис. 3 для температуры, нисходящей длинноволновой радиации и линий тока приземного ветра, вычисленных для 1 апреля 1999 г. в области размером  $450 \times 450$  км с центром в г. Томске (85 град. в.д. и 56.5 град. с.ш.). Представление результатов вычислений в графическом виде выполняется с использованием пакета GrADS. Работа по представлению результатов построена таким образом, что отправленные пользователю изображения не хранятся в ИВС.

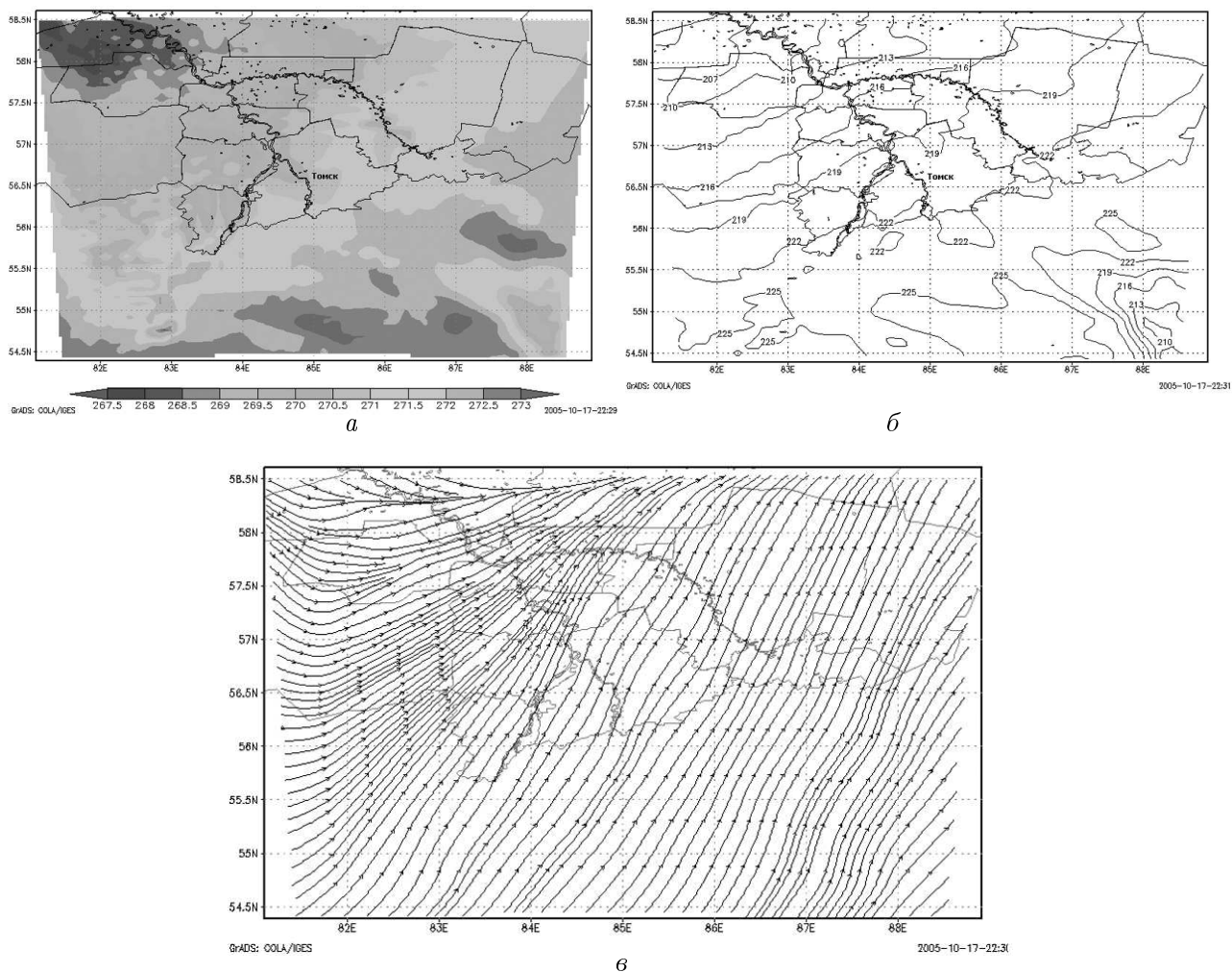


Рис. 3. Варианты графического представления результатов вычислений: *а* — температура (закрашенные области); *б* — нисходящая длинноволновая радиация (изолинии); *в* — линии тока приземного ветра (векторные поля).

**Температура конденсации**

Долгота	81.10 °	<input type="checkbox"/>
Широта	54.39 °	<input type="checkbox"/>
Высота	0.83000 мбар	<input checked="" type="checkbox"/>
Время	0.99650 0.98650 0.97300 0.95800 0.94150 0.92300 0.90250 0.88050 0.85650	20 Октябрь 2004 <input checked="" type="checkbox"/>
Вид графика	0.83000	Закрашенная контурная карта
Размер изображения		800 × 600
Выбрать	0.83000	

Рис. 4. Организация вывода данных в графическом виде на примере формирования изображения для физического параметра “температура конденсации”

Пользователь при работе с выходными данными определяет физические характеристики, необходимые ему для отображения. После выбора инициируется выделение этих характеристик из массива выходных данных в формате, требуемом программой GrADS. Для задания исследуемого момента времени, высоты, на которой исследуется физическая характеристика, типа графика и размеров растрового изображения используется интерфейс, показанный на рис. 4.

## Заключение

В работе описаны возможности проведения расчетов с помощью ИВС, доступной через Интернет, позволяющей вычислять около сотни параметров, характеризующих состояние атмосферы и поверхности земли на основе данных Европейского центра среднесрочных прогнозов за период времени 1991–2002 гг. Описаны интерфейсы ввода данных, организация вычислений и графическое представление результатов.

Дальнейшее развитие функциональных возможностей ИВС связано с предоставлением пользователю инструмента для проведения объективного анализа (программа RAWINS). Запланированы экстенсивное расширение данных ECMWF и подключение данных моделей NCEP и ETA.

Возможности представления результатов в графическом виде предполагается улучшить введением программного обеспечения, позволяющего on-line масштабировать размеры изображения, генерируемого на основе векторных карт.

Авторы выражают благодарность А.Е. Хмельнову за подготовку карт в формате, требуемом программой GrADS, и администратору вычислительного кластера А.В. Козодоеву.

## Список литературы

- [1] PIELKE R.A. Mesoscale Meteorological Modeling. Orlando: Acad. Press, 1984. 622 p.

- [2] 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, N 5. P. 1493–1513.
- [3] АХЛЕСТИН А.Ю., ФАЗЛИЕВ А.З. Программное обеспечение для создания научного портала // *Тр. Всерос. науч. конф. “Научный сервис в сети Интернет”*, Новороссийск, 22–27 сентября 2003. С. 195–197.
- [4] СОЛДАТЕНКО С.А., ЩЕРБАКОВ А.Ю., СЛОАН Дж. и др. Моделирование процессов переноса и трансформации примесей на основе системы Model-3 // *Оптика атмосферы 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] TORQUE Resource Manager, <http://www.clusterresources.com>

*Поступила в редакцию 29 сентября 2006 г.*