

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №6 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-6>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/75TVN615.pdf>

DOI: 10.15862/75TVN615 (<http://dx.doi.org/10.15862/75TVN615>)

**УДК 004.4:519.85**

**Ботыгин Игорь Александрович**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Россия, Томск<sup>1</sup>

Доцент кафедры «Информатики и проектирования систем»

Кандидат технических наук

E-mail: [bia@tpu.ru](mailto:bia@tpu.ru)

**Шерстнёв Владислав Станиславович**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Россия, Томск

Доцент кафедры «Вычислительной техники»

Кандидат технических наук

E-mail: [vss@tpu.ru](mailto:vss@tpu.ru)

**Шерстнёва Анна Игоревна**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Россия, Томск

Доцент кафедры «Высшей математики»

Кандидат физико-математических наук

E-mail: [sherstneva@tpu.ru](mailto:sherstneva@tpu.ru)

## **Программные средства построения мезомасштабных атмосферных моделей**

---

<sup>1</sup> 634034, Россия, г. Томск, ул. Советская, д. 84/3, оф. 406

**Аннотация.** Показано, что математически сложные вычислительные модели природно-климатических процессов, требующие огромные ряды пространственно-распределенных данных инструментальных наблюдений предопределяют особую роль современных информационных технологий в этой области. Представлен обзор программных средств построения мезомасштабных атмосферных моделей. Детально исследуется для решения задач моделирования и прогнозирования климатических условий современная прогностическая система моделирования Weather Research and Forecasting Model, обеспечивающая реализацию широкого спектра метеорологического приложений с масштабом от десятков метров до тысячи километров. Приведены источники, из которых можно получить начальные и краевые условия, необходимые для работы создаваемой модели. Акцентируется важность настройки создаваемой модели, включающая настройку среды выполнения модели, базовых параметров модели, определяющих типы физических процессов в атмосфере и на поверхности, входных данных. Выходная информация содержит около двухсот наименований переменных, характеризующих состояние атмосферы, подстилающей поверхности и почвы, включая гидрологические характеристики типа поверхностного и грунтового стока. Отмечено, что даже изучение климатических процессов в глобальном и региональном масштабах, нацеленное на выявление особенностей общей динамики и экстремальных явлений только регионального климата, определение влияния этих особенностей на различные локальные экосистемы, требует не только комплексного использования набора апробированных статистических методов, но и современной высокопроизводительной инфраструктуры информационно-вычислительных средств.

**Ключевые слова:** численное моделирование климата; прогноз погоды; прогностическая система; мезомасштабная атмосферная модель; временной ряд; факторный анализ; геофизическое поле; экспериментальные данные.

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Ботыгин И.А., Шерстнёв В.С., Шерстнёва А.И. Программные средства построения мезомасштабных атмосферных моделей // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №6 (2015)  
<http://naukovedenie.ru/PDF/75TVN615.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/75TVN615

Статья опубликована 25.11.2015.

Изучение глобальных и региональных природно-климатических процессов всегда было одним из наиболее важных направлений научных исследований. Развитие компьютерных технологий мониторинга, моделирования и прогнозирования климата в настоящее время предоставляют исследователю огромное многообразие пространственно-распределенных данных об окружающей среде и открывают перед ним, действительно, неограниченные возможности комплексного решения природно-климатических задач различного уровня сложности. Даже, если не рассматривать проблему систематизации, хранения и доступа к большим объемам данных, то только разнородность форматов представления исходных данных значительно усложняет их обработку. Например, многообразие методик получения только климатической информации из различных источников существенно затрудняет сравнение результатов анализа и существенно уменьшает его достоверность. «Наука о системе Земля» [1] учитывает вклад различных дисциплин (физических, химических, биологических и др.) в протекание природно-климатических процессов и их взаимодействие, отсюда становится очевидной необходимостью междисциплинарного подхода к решению задач из этой области. При таком подходе необходима комплексная обработка и осмысливание полученных рядов наблюдений, но не все организации готовы предоставить свободный доступ к имеющейся у них информации. Безусловно, это усложняет процесс комплексной интерпретации данных и получение прогнозных оценок.

Все эти обстоятельства ставят перед исследователями задачи систематизации и стандартизации методов обработки больших массивов метеорологических и климатических данных, накапливаемых в различных центрах. Эти цели могут быть достигнуты разработкой соответствующих тематических научных порталов и серверных станций, аккумулирующих в рамках одной виртуальной системы разнородные данные многолетних систематических наблюдений за метеорологическими величинами и реализующие ряд апробированных методик для описания динамики их изменения.

Основным преимуществом подобных систем является доступность для анализа больших архивов метеоданных, представленных многолетними рядами инструментальных наблюдений и результатами расчетов глобальных и региональных метеорологических моделей. Визуализация может отражать данные в виде графиков временного хода, диаграмм, двух- и трехмерных карт поверхности, что позволяет охватить широкий спектр исследовательских интересов. Однако, набор методов анализа и сравнения данных, реализуемый разработанными информационно-вычислительными системами (стандартными: Excel, Statistica, ArcGIS, MatLab и др.; специализированными: веб-приложение для статистического анализа климатических данных – KNMI Climate Explorer [2], European Climate Assessment and Dataset (ECA&D) [3], Giovanni-4 [4], NOAA National Data Center (NNDC) Climate Data Online [5], National Center for Atmospheric Research (NCAR) с командным языком NCL [6, 7], ECMWF с проектом ERA-CLIM2 [8, 9] и др.), до сих пор находится на базовом уровне, так как их основной направленностью остается распространение данных, а не анализ.

В настоящее время предполагается наличие антропогенной модуляции климатического сигнала, как на глобальном, так и на региональном уровне. При этом регистрируемые региональные природно-климатические изменения естественного и антропогенного происхождения обуславливают новые режимы функционирования подсистем окружающей среды, что приводит, в свою очередь, к появлению дополнительных факторов воздействия на глобальную климатическую систему. Изменяющиеся режимы интерактивного взаимодействия геосферно-биосферных подсистем (литосферы, атмосферы, гидросферы, биосферы и др.) обуславливают, также, изменения условий человеческой деятельности. Таким образом, не только влияние глобальных процессов на региональные изменения климата, но и влияние региональных изменений на глобальные определяют необходимость

междисциплинарных исследований, одновременно проходящих физических, химических и биологических процессов.

Сложность таких исследований, требующих привлечения специалистов разных научных дисциплин, математически сложные вычислительные модели природно-климатических процессов, огромные ряды пространственно-распределенных данных инструментальных наблюдений определяют особую роль современных информационных технологий в этой области. Углубленное изучение климатических процессов в глобальном и региональном масштабах, нацеленное на выявление особенности общей динамики и экстремальных явлений регионального климата, определения их влияния на различные экосистемы, требует комплексного использования набора апробированных статистических методов. Однако необходимо заметить, что моделирование региональных климатических процессов предполагает и специфическую детализацию используемых данных для адекватного учета природно-климатических особенностей региона, а также разработку новых эффективных методов анализа.

Огромное количество экспериментальной информации привело к развитию, наряду с построением глобальных моделей, направления, связанного с поиском эмпирических закономерностей, извлечением информации из данных и созданием на их основе базы знаний. Этим можно объяснить большое разнообразие методов и подходов, применяемых в настоящее время для решения подобных задач. Одной из целей применения такого рода подходов является поиск ответов на ряд очень важных вопросов, таких как: какие измеряемые величины могут выступать в качестве базисных для определения понятия состояния климатической системы; каковы области сильной связи между переменными и существуют ли далекодействующие корреляции; существуют ли механизмы на планете, помимо природных феноменов Эль-Ниньо и Ла-Нинья, определяющие запуск того или иного сценария развития климатических процессов.

Заметим, что основной тенденцией в настоящее время является детализация исследований, обеспечивающая возможность более глубоко и подробно изучать разнообразные явления, однако порождающая стремительный рост объемов получаемых данных. Последнее обстоятельство, безусловно, приводит к необходимости использовать и высокопроизводительные вычислительные кластеры, и разрабатывать специфические алгоритмы обработки и анализа данных.

Если обратить внимание на исследование атмосферных процессов, то – это одна из актуальнейших проблем многочисленных наук о системе Земля. Накоплены огромные массивы данных различных наблюдений, сформированы еще более огромные массивы модельных данных, разработаны разнообразные математические методы анализа геопривязанной информации, но прогнозные оценки, даже только изменения метеорологических данных под воздействием каких-либо внешних факторов, далеки от совершенства. А если рассматривать фундаментальные задачи внутренней изменчивости климата, то проблемы оценки климатологических данных с требуемой точностью переходят, на сегодняшний день, в ранг неразрешимых. Тем не менее, одним из перспективных направлений в практической метеорологии является численное моделирование климата [12, 13].

Не вдаваясь в детальный ретроспективный анализ методов численного анализа метеоданных (эмпирических, спектральных, вариационных, статистических), заметим, что метод оптимальной интерполяции является доминирующим, разработанный еще в 70-х годах прошлого века на кафедре Метеорологических прогнозов РГГМУ (г. Санкт-Петербург) советским ученым Львом Семеновичем Гандиным [14]. Именно модификации этого метода, так или иначе, используются отечественными и зарубежными исследователями для

построения моделей атмосферы различного масштаба. Так, например, в Национальных центрах по прогнозированию окружающей среды (National Centers for Environmental Prediction, NCEP; объединяет девять центров США) разработаны статистическая интерполяция, вариационный анализ [15]. В Российской Федерации – трехмерная многоэлементная оптимальная интерполяция [16].

Таким образом, сравнительные оценки успешности прогнозов элементов климата, будь то глобальная, региональная или мезомасштабная модели, заранее обречены на выдачу тождественных друг с другом показателей и не дающих однозначности их ранжирования. Тем не менее, практическое исследование, даже частичное, инструментария построения атмосферных моделей различного масштаба дает возможность улучшения качества результатов моделирования, технологичности их получения и адаптации моделей к применению в различных ситуациях.

PSU/NCAR – мезомасштабная атмосферная модель. Мезомасштабная модель PSU/NCAR (известная также как MM5) получена как результат исследователей Университета штата Пенсильвания США (Pennsylvania State University, PSU) совместно с исследователями Национального центра атмосферных исследований США (National Center for Atmospheric Research, NCAR). Данная модель (Mesoscale Model, MM5) предназначена для моделирования и/или предсказаний мезомасштабной атмосферной циркуляции.

Работа модели поддерживается несколькими программами пред- и постобработки, которые в совокупности и называются «системой моделирования MM5». Программное обеспечение MM5 (в основном) написано на языке Fortran сообществом разработчиков Университета штата Пенсильвания и Национальным центром атмосферных исследований. Программное обеспечение системы моделирования MM5 является бесплатным и формально поддерживается группой «Мезомасштабного прогнозирования» в подразделении «Мезомасштабной и микромасштабной метеорологии» Национального центра атмосферных исследований США. Объем исходного кода данной модели языке Fortran составляет не менее 5 Мб (в заархивированном виде).

Самая свежая (последняя) версия работоспособного программного обеспечения системы моделирования датирована декабрём 2004 года, что говорит об отсутствии её поддержки и развития на протяжении последних 11 лет. Тем не менее, есть примеры работ [17-18], где данная модель успешно применялась для решения задач моделирования и прогнозирования метеорологических условий.

NH3D – модель мезомасштабных атмосферных процессов. Программное обеспечение модели NH3D разрабатывалось с 1992 по 2005 гг. на языке Fortran исследователями P. Miranda, M. Teixeira, R. Room, et al. (Univ. Reading, Lisbon and Tartu), V. Stepanenko (Moscow State University). Последняя версия модели, имеющаяся в свободном доступе на web-сайте Факультета естественных наук Университета Лиссабона (Португалия), датирована 2005 годом. Этот факт также говорит об отсутствии развития и сопровождения данного программного обеспечения. Объем архива с исходным кодом данной модели языке Fortran составляет не менее 0,2 Мб.

COSMO – аббревиатура из COnsortium for Small-scale Modelling. Модель разработана немецкими и швейцарскими исследователями. Сейчас используется во многих странах для прогнозирования, в том числе и в России. Особенностью модели является её направленность на моделирование погоды на небольших по размеру территориях, что хорошо подходит для задач прогнозирования климата европейских стран.

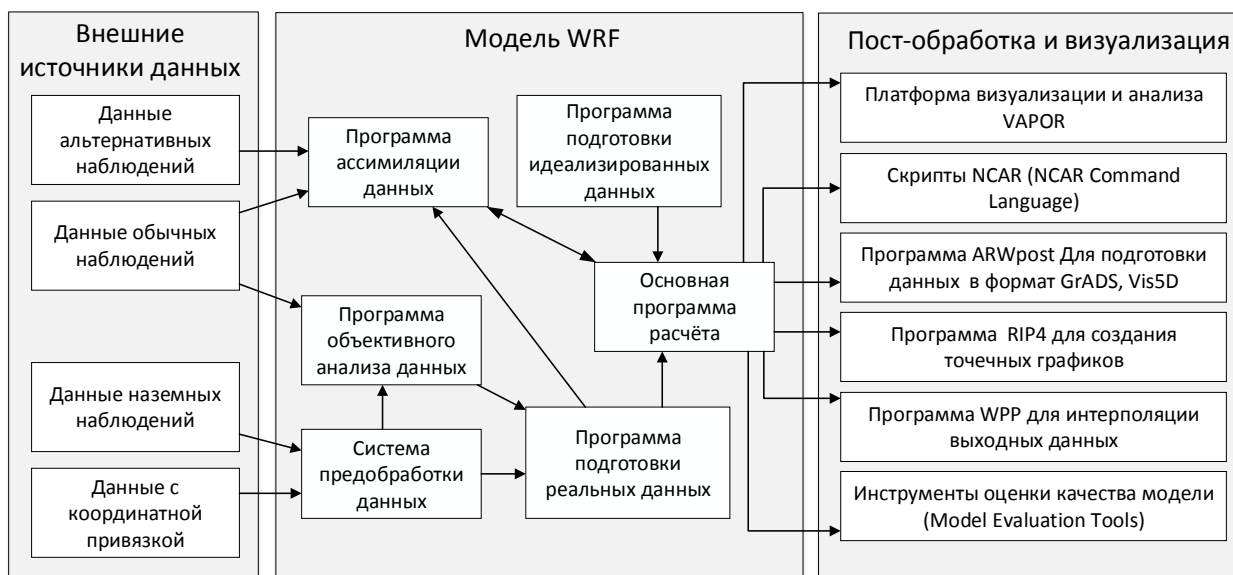
Есть модификация для российских условий COSMO-RU, созданная отечественными исследователями. Существуют несколько отдельно функционирующих моделей

покрывающих различные части России. Например, COSMO-RU/Sib, используемая в Сибирском региональном научно-исследовательском гидрометеорологическом институте (ФГБУ «СИБНИГМИ»).

WRF – модель метеорологических исследований и прогнозирования. Модель WRF разработана в Национальном центре атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research, NCAR) совместно с Университетской корпорацией атмосферных исследований (University Corporation for Atmospheric Research, UCAR). Позиционируется как модель-приемник MM5 (PSU/NCAR). Как и предыдущие системы моделирования, модель WRF также написана на языке Fortran и является свободно распространяемым программным обеспечением. Известны многие примеры использования данной модели для решения задач моделирования и прогнозирования климатических условий по всему миру.

Модель WRF постоянно развивается с 2004 года. Последняя версия модели (v.3.6.1) выпущена 14 августа 2014 года [20]. Объём архива с исходным кодом данной модели языке Fortran составляет более 38 Мб. Большинство версий модели WRF предназначены для работы под управлением операционных систем семейства Unix, но есть единичные варианты дистрибутивов WRF модели, ориентированные на работу под управлением операционных систем семейства Windows.

Модель WRF представляет собой систему взаимодействующих модулей: модуль, обеспечивающий подготовку начальных и граничных данных (WRF Preprocessing System), собственно вычислительный модуль – решающее ядро (Advanced Research WRF), модуль завершения вычислений (WRF Postprocessing System). Как уже было отмечено выше, основная часть модели, выполняющая все расчётные функции, написана на языке Fortran. Для обмена сообщениями используется программный интерфейс библиотеки MPI. На языке C созданы сервисные модули для работы с входными и выходными данными. Обобщённая архитектура взаимодействия модулей программного пакета WRF представлена ниже.



Обобщённая схема взаимодействия модулей системы прогнозирования WRF

В целом, система WRF состоит из следующих основных блоков:

- блок предварительной обработки (WRF Preprocessing System, WPS);
- блок инициализации данных (WRFDA);
- блок WRF (динамических модулей ARW или NMM и параметризаций);

- блок подготовки и вывода модельной продукции. Для модели ARW существует дополнительный блок трехмерного вариационного усвоения наблюдений.

В свою очередь, блок предварительной обработки (WPS) представляет собой комплекс из трех базовых программ, который готовит входные данные для программы инициализации `real.exe` (при расчетах по реальным начальным данным):

- в первой программе `regrid` определяются модельные области, и производится интерполяция географических и статических переменных в узлы сетки;
- во второй программе `ungrib` выбираются поля из сводок ГРИБ;
- в третьей программе `metgrid` производится горизонтальная интерполяция метеорологических полей в узлы модельных сеток, определенных в программе `geogrid`.

Блок инициализации (усвоения) данных (WRFDA) в модели WRF-ARW производится в программе `real` (название `real` относится к случаю прогнозов по реальным данным). В этой программе производится вертикальная интерполяция начальных данных в орографические координаты модели и формируются граничные условия на срок прогноза по данным материнской модели. На этой стадии может быть подключен блок трехмерного вариационного усвоения данных, который обеспечивает дополнительное усвоение обычных, спутниковых и радиолокационных измерений.

Блок WRF включает две части: динамическое ядро и набор параметров физических процессов. Наборы параметров для инициализации модели выбираются заданием соответствующих признаков (переключателей) в списках вводимых переменных (NAMELIST).

Блок подготовки и вывода модельной продукции содержит модули диагностики, которые рассчитывают достаточно большое количество дополнительных переменных, используемых в практике синоптических прогнозов. Кроме этого в блоке вывода модельной продукции обеспечивается возможность интерполяции переменных с модельных уровней на изобарические поверхности или геометрические высоты. Предусмотрена также возможность представления выходной продукции в коде ГРИБ для ее распространения по линиям связи. Выходная информация содержит около 200 наименований переменных, характеризующих состояние атмосферы, подстилающей поверхности и почвы, включая гидрологические характеристики типа поверхностного и грунтового стока.

Для работы с моделью WRF требуется использование данных в качестве начальных и краевых условий. Теоретически эта необходимая информация может быть получена из нескольких источников:

- данные из Гидрометеоцентра России [21] с шагом  $2,5 \times 2,5$  гр. По широте и долготе, проводимый 2 раза в сутки (00 и 12 СГВ) и прогнозы по глобальной спектральной прогностической модели, версии T194L31 (в базе через 12 часов до 5 суток);
- данные из Гидрометеоцентра России (лаборатория усвоения данных метеорологических наблюдений) с шагом 1,25 гр., проводимые 2 раза в сутки (00 и 12 СГВ) и прогнозы по глобальной полулагранжевой модели [22] (в базе через 12 часов до 5 суток);
- объективный анализ и прогнозы NCAR/NCEP – США в 1 градусной сетке, получаемые по сети Интернет 4 раза в сутки (00, 06, 12 и 18 СГВ) и прогнозы от каждого анализа (через 6 часов до 5 суток);

- международная сеть GLORIAD.

Как отмечается в ряде источников [23], наиболее серьёзное влияние на качество прогноза оказывают достоверность входных данных и параметризация моделей. Для успешной работы системы прогнозирования погодных метеоусловий на основе модели WRF требуется получение актуальных значений краевых и начальных данных по прогнозируемому региону.

Для успешного моделирования с использованием WRF требуется настройка:

- среды выполнения модели (подключение необходимых библиотек модели, настройка переменных окружения операционной системы и т.д.);
- входных данных;
- базовых параметров модели, определяющих типы физических процессов в атмосфере и на поверхности.

Для работы модели WRF требуется загрузка её исходных программных кодов. Для исследований была использована модель версии 3.6.1. с официального сайта сообщества развивающего модель [20]. Произведена компиляция исходных кодов модели с получением исполняемых файлов.

Входные данные для проверки адекватности модели и последующих расчётов можно брать с сайтов Национального центра охраны окружающей среды США (NCEP) и Национального центра прогнозов окружающей среды США (NCAR).

Описание физических процессов в атмосфере и подстилающей поверхности осуществляется с помощью следующих блоков параметров:

1. Блок параметров, определяющих микрофизику влаги:
  - a) Схема Кесслера («теплый дождь»). Схема для «теплого дождя» (т.е. безо льда) используется в основном в изучении идеальных моделей облаков [24].
  - b) Схема Лин и др. Усложненная схема с учетом льда, снега и града, подходящая для моделирования с высокой точностью по реальным данным [25].
  - c) Трехклассовая схема NCEP. Простая и эффективная схема, учитывающая процессы со снегом и льдом, применимая для мезомасштабных сеток [26].
  - d) Пятиклассовая схема NCEP. Более сложный вариант трехклассовой схемы, позволяющий описывать процессы в смешанном состоянии и сверхохлажденную воду [26].
  - e) Схема Феррье, использующая прогностические процессы смешанной фазы [27].
2. Блок параметров, определяющих облачность:
  - a) Схема Каина–Фритца (Kain–Fritsch) для учета слабой и сильной конвекции, использующая подход потока массы с нисходящими потоками и использующая метод CAPE [28].
  - b) Схема Беттса–Миллера–Джанича (Betts–Miller–Janjic). Рабочая схема Eta. Схема изменение влажности в воздушном столбе с релаксацией по направлению хорошо перемешанного профиля [29].
  - c) Схема Grell–Devenyi. Мультизамкнутый, мультипараметрический, ансамблевый метод с обычными 144 подсеточными членами [30].



3. Блок параметров, определяющих длинноволновое излучение:
  - a) Схема RRTM. Модель Переноса Быстрой Радиации. Точная схема, использующая таблицы поиска для эффективности. Подходит для многополосных частот, трассеров и особых микрофизических объектов [31].
  - b) Схема GFDL. Рабочая радиационная схема Eta. Более старая многополосная схема с учетом диоксида углерода, озона и микрофизических эффектов [32].
4. Блок параметров, определяющих коротковолновое излучение в атмосфере:
  - a) Схема Дадиа (Dudhia), позволяющая на основе простого интегрирования вести эффективно расчет поглощения и рассеивания для облачного и безоблачного неба [33].
  - b) Коротковолновая схема Годдарда (Goddard). Двухпоточная многополосная схема с озоном из климатических и облачных эффектов [34].
  - c) Коротковолновая GFDL схема. Рабочая схема Eta. Двухпоточная многополосная схема с озоном из климатических и облачных эффектов [35].
5. Блок параметров, определяющих подстилающую поверхность:
  - a) 5-слойная температурная диффузия, схема только для температуры почвы [36].
  - b) Модель поверхности земли Ноа (Noah). Объединенная 4-слойная схема NCEP/NCAR/AFWA с температурой и влажностью почвы, фрагментным снежным покрытием и физикой замороженной почвы [37].
  - c) Модель поверхности земли RUC. Рабочая 6-слойная схема с температурой и влажностью почвы, многоуровневым снегом и физикой замороженной почвы [38].
  - d) Модель поверхности ЗЕМЛИ OSU/Eta. Данная модель способна прогнозировать температуру и влажность почвы на глубине 10, 30, 60 и 100 см, а также влажность от растительного покрова и толщину снега в водяном эквиваленте. Она также выводит данные для поверхностных и подземных накоплений стоков. В модели поверхности суши для обработки данных проникновения водяного пара в почву используются растительность и тип почвы. Среди выходных данных – значения для электропроводности почвы и гравитационного потока влажности. Эта схема использует диагностическое уравнение для получения температуры поверхностного слоя, а коэффициенты обмена должны ее учитывать путем использования соответствующего слоя молекулярной диффузии, который будет выступать в качестве сопротивления переносу тепла [37].
6. Блок параметров, определяющих планетарный пограничный слой:
  - a) Схема Университета Йонсей (Yonsei University). Нелокальная K-схема с явным представлением слоя вовлечения и параболическим профилем K в неустойчивом слое смешения [36].
  - b) Схема Меллора–Ямада–Джанича (Mellor–Yamada–Janjic). Рабочая схема Eta. Одномерная прогностическая схема турбулентной кинетической энергии с локальным вертикальным смешением [39].
  - c) Схема MRF. Более старая версия схемы Йонсей с неявным представлением слоя вовлечения как части нелокального по K слоя смешения [40].

Применимость некоторых блоков параметров были ранее практически опробована рядом исследователей [41], выполнявшим моделирование климата с помощью модели WRF, применительно к территории России.

Согласно работе [42], лучшим набором параметров оказался набор, предложенный в [43] для Polar WRF (оптимизированная для работы в высоких широтах). В частности, в нём используется подавление вертикальных движений в верхних семи километрах (w-Rayleigh dumping). По результатам экспериментов [42] рекомендуется задавать 43 уровня от поверхности земли и использовать следующий набор параметров для конфигурирования модели:

- микрофизические процессы, двухмоментная схема Томпсона;
- облачность (конвекция), схема Grell-Devenyi;
- длинноволновое радиационное излучение, схема RRTM;
- коротковолновое радиационное излучение, схема Dudhia;
- подстилающая поверхность (почвенные процессы): схема Noah;
- планетарный пограничный слой, схема университета Yonsei;
- приземный слой, схема Мони́на-Обухова.

Согласно другой работе [44], следует пользоваться следующим набором параметров для конфигурирования модели:

- микрофизические процессы, схема с пятью классами гидрометеоров;
- облачность (конвекция), схема Беттса–Миллера–Джанича;
- коротковолновое радиационное излучение, схема RRTM;
- длинноволновое радиационное излучение, схема RRTM;
- подстилающая поверхность (почвенные процессы), схема Noah;
- планетарный пограничный слой, схема Меллора–Ямада–Джанича (MYJ);
- приземный слой, схема Мони́на-Обухова.

Краткие характеристики используемых наборов параметров и ссылки на их более детальные описания приводятся в [45, 46].

К настоящему времени в науке сложилась ситуация, когда многочисленные и многократные попытки построения моделей описания и прогнозирования погодно-климатических процессов не дают уверенного долгосрочного прогноза погоды и климатических изменений, что, в большей степени, связано со спецификой самой климатической системы с ее многомерностью и сложнейшими причинно-следственными связями. В мире накоплены гигантские объёмы природно-климатических данных, используемых для прогнозов погоды и изучения климата, требующих систематизации и обобщения. Выполнение этого возможно только в случае использования больших вычислительных мощностей с параллельной архитектурой и соответствующих методов обработки экспериментальных данных. Необходимо заметить, изучение климатических процессов в глобальном и региональном масштабах, особенно моделирование региональных климатических процессов, нацеленное на выявление особенности общей динамики и экстремальных явлений регионального климата, определения их влияния на различные

экосистемы, требует не только комплексного использования набора апробированных статистических методов, но и разработку новых эффективных методов анализа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Brasseur G. 3rd IGBP Congress overview. Global Change Newsletter, 2003. – №55. – PP. 2-4.
2. KNMI Climate Explorer. URL: [http://climexp.knmi.nl/about.cgi?id=someone@some where](http://climexp.knmi.nl/about.cgi?id=someone@some%20where).
3. European Climate Assessment & Dataset. URL: <http://eca.knmi.nl/>.
4. Giovanni – Interactive Visualization and Analysis. URL: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>.
5. NNDC Climate Data Online. URL: <http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo#TOP>.
6. National Center for Atmospheric Research. URL: <http://ncar.ucar.edu/>.
7. NCAR Command Language. URL: <http://www.ncl.ucar.edu/overview.shtml>.
8. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF. URL: <http://www.ecmwf.int/>.
9. ERA-CLIM2. URL: <http://www.ecmwf.int/en/research/projects/era-clim2>.
10. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер с англ. / Дж.–О. Ким [и др.]; под ред. И.С. Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
11. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности: Справ. Изд. / С.А. Айвазян [и др.]; под ред. С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
12. Дымников В.П. Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов. – М.: ИВМ РАН, 2007. – 283 с.
13. Володин Е.М. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы. – М.: ИВМ РАН, 2007. – 89 с.
14. Гандин Л.С. Четырехмерный анализ метеорологических полей. –Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 61 с.
15. NOAA/ National Weather Service. National Centers for Environmental Prediction. URL: <http://www.ncep.noaa.gov/>.
16. Багров А.Н., Гордин В.А., Цырульников М.Д. Оперативная схема объективного анализа в тропосфере и стратосфере // Метеорология и гидрология. – 1990. – №8. – С. 37-45.
17. Зарипов Р.Б. Обзор современных методов повышения детализации метеорологических полей. URL: [http://old.ugrasu.ru/uploads/files/EDCC\\_1\\_1\\_Zaripov.pdf](http://old.ugrasu.ru/uploads/files/EDCC_1_1_Zaripov.pdf).
18. Шокуров М.В. Численное моделирование катастрофических погодных явлений в черноморском регионе. URL: <http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/56884/22-ShokurovNEW.pdf?sequence=1>.
19. NH3D model // Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa. URL: [http://194.117.7.100/nh3d/nh3d\\_download.htm](http://194.117.7.100/nh3d/nh3d_download.htm).
20. WRF Source Codes and Graphics Software. URL: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_sources.html#V361](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources.html#V361).

21. Отдел гидродинамических краткосрочных прогнозов погоды Гидрометеоцентра России. URL: <http://meteoinfo.ru/about/hmcstructure/1398-1246618396>.
22. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ. Гидрометцентр России, Институт вычислительной математики РАН, 2010. – 24 с. URL: [http://method.meteorf.ru/publ/books/80\\_years/tolstih.pdf](http://method.meteorf.ru/publ/books/80_years/tolstih.pdf).
23. Толстых М.А. Современные глобальные модели среднесрочного прогноза погоды и пути их дальнейшего развития // Научная школа-семинар «Современные технологии прогнозирования погоды», 2008. URL: <http://www.meteoinfo.ru/media/bugaev100/Tolstyh.ppt>.
24. Kessler E. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation, Meteor. Monogr., 32, Amer. Meteor. Soc., 1969. – 84 p.
25. Lin Y.-L., Farley R.D. and Orville H.D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model // J. Climate Appl. Meteor. – 1983. – №22. – PP. 1065–1092.
26. Hong S.-Y., Juang H.-M.H. and Zhao Q. Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model // Mon. Wea. Rev., 1998. – V. 126. – PP. 2621–2639.
27. Ferrier B.S., Lin Y., Black T., Rogers E. and DiMego G. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. Preprints, 15th Conference on Numerical Weather Prediction, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc. 2002. – PP. 280-283.
28. Kain J.S. The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update // Journal of Applied Meteorology. – 2004. – V. 43. – №1. – PP. 170–181.
29. Janjic Z.I. The step–mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes // Monthly Weather Review. –1994. – №122. – PP. 927–945.
30. Grell G.A. and Devenyi D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques // Geophys. Res. Lett. – 2002. – V. 29(14). – PP. 1693.
31. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J. and Clough S.A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // J. Geophys. Res. – 1997. – V. 102 (D14). – PP. 16663–16682.
32. Fels S.B. and Schwarzkopf M.D. The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations // J. Atmos. Sci. – 1975. – V. 32. – PP. 1475-1488.
33. Dudhia, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model // J. Atmos. Sci. – 1989. – V. 46. – PP. 3077–3107.
34. Chou M.-D. and Suarez M.J. An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models // NASA Tech. Memo. 104606. – 1994. – V. 3. – PP. 85.
35. Lacis A.A. and Hansen J.E. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth’s atmosphere // J. Atmos. Sci. – 1974. – V. 31 – PP. 118–133.

36. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang and W. Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 2, NCAR Tech Note, NCAR/TN-468+STR, 200588 pp. URL: [http://box.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v2.pdf](http://box.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf).
37. Chen F. and Dudhia J. Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State / NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation // *Mon. Wea. Rev.* – 2001. – V. –129. – PP. 569–585.
38. Tatiana G. Smirnova, John M. Brown and Stanley G. Benjamin Performance of Different Soil Model Configurations in Simulating Ground Surface Temperature and Surface Fluxes // *Mon. Wea. Rev.* – 1997. – V. 125. – PP. 187-1884.
39. Janjic Z.I. The step–mountain coordinates: physical package // *Monthly Weather Review.* – 1990. – V. – 118. – PP. 1429–1443.
40. Hong S.-Y. and Pan H.-L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model // *Mon. Wea. Rev.* – 1996. – V. 124 – PP. 2322–2339.
41. Отчет Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института (ГУ «СибНИГМИ») о научно-исследовательской деятельности в 2007 году. URL: <http://sibnigmi.ru/documents/report2007.pdf>.
42. Отчет о научно-исследовательской работе развитие оперативной технологии выпуска краткосрочных гидродинамических прогнозов на базе технологии мезомасштабного моделирования COSMO-RU и WRF ARW. Крупчатников В.Н., ФГБУ «СибНИГМИ» URL: <http://sibnigmi.ru>.
43. Duda M.G., Manning K.W., Powers J.G. AMPS: A real-time application of WRF over Antarctica. – Presentation at NCAR-NCAS WRF Workshop 2009. URL: [http://www.mmm.ucar.edu/people/duda/files/duda\\_2009.ppt](http://www.mmm.ucar.edu/people/duda/files/duda_2009.ppt).
44. Кижнер Л.И., Нахтигалова Д.П., Барт А.А. Использование прогностической модели WRF для исследования погоды Томской области // *Вестник Томского Государственного Университета.* – 2012. – №358. – С. 219-224.
45. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM. – Сб. статей «80 лет Гидрометцентру России». – 2009. – С. 94-135.
46. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. – NCAR/TN-475+STR, NCAR Technical Note, June 2008.3. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. – М.: Изд-во МГУ, – 2004. – 582 с.

**Рецензент:** Статья рецензирована членами редколлегии журнала.

**Botygin Igor' Aleksandrovich**

National Research Tomsk Polytechnic University  
Russia, Tomsk  
E-mail: [bia@tpu.ru](mailto:bia@tpu.ru)

**Sherstnev Vladislav Stanislavovich**

National Research Tomsk Polytechnic University  
Russia, Tomsk  
E-mail: [vss@tpu.ru](mailto:vss@tpu.ru)

**Sherstneva Anna Igorevna**

National Research Tomsk Polytechnic University  
Russia, Tomsk  
E-mail: [sherstneva@tpu.ru](mailto:sherstneva@tpu.ru)

## Software for the construction of mesoscale atmospheric models

**Abstract.** It is shown that mathematically complicated computational models of natural and climatic processes that require a high number of spatially distributed data of instrumental observations play a special role of modern information technologies in this area. An overview of the software tools for creating mesoscale atmospheric models is presented. A modern prediction modeling environment Weather Research and Forecasting Model is studied in detail as a possible solution for modeling and prediction tasks. It can solve a wide array of meteorological tasks with a scope varying from tens of meters to thousands of kilometers. It lists the sources to acquire the initial and boundary conditions required for a fresh created model to function. The importance of proper setting for the created models is stressed. Settings include adjusting the runtime model, input data and the basic parameters of the model that determining the types of physical processes in the atmosphere and on the surface. The output contains about two hundred names of variables that characterize the state of the atmosphere, land surface and soil, including hydrological characteristics of the type of surface and groundwater flow. It was noted that even the study of climatic processes on a global and regional level, aimed at identifying the characteristics of the overall dynamics and extreme events of the regional climate, to determine the effect of these features on a variety of local ecosystems, requires the integrated use of a set of proven statistical techniques as well as modern high-performance infrastructure information and computing resources.

**Keywords:** numerical climate modeling; weather forecasting; prediction system; mesoscale atmospheric model; time series; factor analysis; geophysical field; experimental data.

## REFERENCES

1. Brasseur G. 3rd IGBP Congress overview. Global Change Newsletter, 2003. – №55. – PR. 2-4.
2. KNMI Climate Explorer. URL: <http://climexp.knmi.nl/about.cgi?id=someone@somewhere>.
3. European Climate Assessment & Dataset. URL: <http://eca.knmi.nl/>.
4. Giovanni – Interactive Visualization and Analysis. URL: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>.
5. NNDC Climate Data Online. URL: <http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo#TOP>.
6. National Center for Atmospheric Research. URL: <http://ncar.ucar.edu/>.
7. NCAR Command Language. URL: <http://www.ncl.ucar.edu/overview.shtml>.
8. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF. URL: <http://www.ecmwf.int/>.
9. ERA-CLIM2. URL: <http://www.ecmwf.int/en/research/projects/era-clim2>.
10. Faktornyy, diskriminantnyy i klasternyy analiz: per s angl. / Dzh.–O. Kim [i dr.]; pod red. I.S. Enyukova. – M.: Finansy i statistika, 1989. – 215 s.
11. Prikladnaya statistika: klassifikatsiya i snizhenie razmernosti: Sprav. Izd. / S.A. Ayvazyan [i dr.]; pod red. S.A. Ayvazyana. – M.: Finansy i statistika, 1989. – 607 s.
12. Dymnikov V.P. Ustoychivost' i predskazuemost' krupnomasshtabnykh atmosferykh protsessov. – M.: IVM RAN, 2007. – 283 s.
13. Volodin E.M. Matematicheskoe modelirovanie obshchey tsirkulyatsii atmosfery. – M.: IVM RAN, 2007. – 89 s.
14. Gandin L.C. Chetyrekhmernyy analiz meteorologicheskikh poley. –JI.: Gidrometeoizdat, 1976. – 61 s.
15. NOAA/ National Weather Service. National Centers for Environmental Prediction. URL: <http://www.ncep.noaa.gov/>.
16. Bagrov A.N., Gordin V.A., Tsyru'nikov M.D. Operativnaya skhema ob"ektivnogo analiza v troposfere i stratosfere // Meteorologiya i gidrologiya. – 1990. – №8. – S. 37-45.
17. Zaripov R.B. Obzor sovremennykh metodov povysheniya detalizatsii meteorologicheskikh poley. URL: [http://old.ugrasu.ru/uploads/files/EDCC\\_1\\_1\\_Zaripov.pdf](http://old.ugrasu.ru/uploads/files/EDCC_1_1_Zaripov.pdf).
18. Shokurov M.V. Chislennoe modelirovanie katastroficheskikh pogodnykh yavleniy v chernomorskom regione. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/56884/22-ShokurovNEW.pdf?sequence=1>.
19. NH3D model // Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa. URL: [http://194.117.7.100/nh3d/nh3d\\_download.htm](http://194.117.7.100/nh3d/nh3d_download.htm).
20. WRF Source Codes and Graphics Software. URL: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_sources.html#V361](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources.html#V361).
21. Otdel gidrodinamicheskikh kratkosrochnykh prognozov pogody Gidrometeotsentra Rossii. URL: <http://meteoinfo.ru/about/hmcstructure/1398-1246618396>.



22. Tolstykh M.A. Polulagranzheva model' atmosfery PLAV. Gidromettsentr Rossii, Institut vychislitel'noy matematiki RAN, 2010. – 24 с. URL: [http://method.meteorf.ru/publ/books/80\\_years/tolstih.pdf](http://method.meteorf.ru/publ/books/80_years/tolstih.pdf).
23. Tolstykh M.A. Sovremennye global'nye modeli srednesrochnogo prognoza pogody i puti ikh dal'neyshego razvitiya // Nauchnaya shkola-seminar «Sovremennye tekhnologii prognozirovaniya pogody», 2008. URL: <http://www.meteoinfo.ru/media/bugaev100/Tolstyh.ppt>.
24. Kessler E. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation, Meteor. Monogr., 32, Amer. Meteor. Soc., 1969. – 84 p.
25. Lin Y.-L., Farley R.D. and Orville H.D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model // J. Climate Appl. Meteor. – 1983. – №22. – RR. 1065–1092.
26. Hong S.-Y., Juang H.-M.H. and Zhao Q. Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model // Mon. Wea. Rev., 1998. – V. 126. – PP. 2621–2639.
27. Ferrier B.S., Lin Y., Black T., Rogers E. and DiMego G. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. Preprints, 15th Conference on Numerical Weather Prediction, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc. 2002. – PP. 280-283.
28. Kain J.S. The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update // Journal of Applied Meteorology. – 2004. – V. 43. – №1. – PP. 170–181.
29. Janjic Z.I. The step–mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes // Monthly Weather Review. –1994. – №122. – RR. 927–945.
30. Grell G.A. and Devenyi D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques // Geophys. Res. Lett. – 2002. – V. 29(14). – RR. 1693.
31. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J. and Clough S.A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // J. Geophys. Res. – 1997. – V. 102 (D14). – RR. 16663–16682.
32. Fels S.B. and Schwarzkopf M.D. The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations // J. Atmos. Sci. – 1975. – V. 32. – RR. 1475-1488.
33. Dudhia, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model // J. Atmos. Sci. – 1989. – V. 46. – RR. 3077–3107.
34. Chou M.-D. and Suarez M.J. An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models // NASA Tech. Memo. 104606. – 1994. – V. 3. – RR. 85.
35. Lacis A.A. and Hansen J.E. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere // J. Atmos. Sci. – 1974. – V. 31 – RR. 118–133.
36. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang and W. Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 2, NCAR Tech Note, NCAR/TN–468+STR, 200588 pp. URL: [http://box.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v2.pdf](http://box.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf).

37. Chen F. and Dudhia J. Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State / NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation // *Mon. Wea. Rev.* – 2001. – V. –129. – RR. 569–585.
38. Tatiana G. Smirnova, John M. Brown and Stanley G. Benjamin Performance of Different Soil Model Configurations in Simulating Ground Surface Temperature and Surface Fluxes // *Mon. Wea. Rev.* – 1997. – V. 125. – RR. 187-1884.
39. Janjic Z.I. The step–mountain coordinates: physical package // *Monthly Weather Review.* – 1990. – V. – 118. – RR. 1429–1443.
40. Hong S.-Y. and Pan H.-L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model // *Mon. Wea. Rev.* – 1996. – V. 124 – RR. 2322–2339.
41. Otchet Sibirskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta (GU «SibNIGMI») o nauchno-issledovatel'skoy deyatel'nosti v 2007 godu. URL: <http://sibnigmi.ru/documents/report2007.pdf>.
42. Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote razvitie operativnoy tekhnologii vypuska kratkosrochnykh gidrodinamicheskikh prognozov na baze tekhnologii mezomasshtabnogo modelirovaniya COSMO-RU i WRF ARW. Krupchatnikov V.N., FGBU «SibNIGMI» URL: <http://sibnigmi.ru>.
43. Duda M.G., Manning K.W., Powers J.G. AMPS: A real-time application of WRF over Antarctica. – Presentation at NCAR-NCAS WRF Workshop 2009. URL: [http://www.mmm.ucar.edu/people/duda/files/duda\\_2009.ppt](http://www.mmm.ucar.edu/people/duda/files/duda_2009.ppt).
44. Kizhner L.I., Nakhtigalova D.P., Bart A.A. Ispol'zovanie prognosticheskoy modeli WRF dlya issledovaniya pogody Tomskoy oblasti // *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta.* – 2012. – №358. – S. 219-224.
45. Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D. Chislennye prognozy pogody po negidrostaticheskim modelyam obshchego pol'zovaniya WRF-ARW i WRF-NMM. – *Sb. statey «80 let Gidromettsentru Rossii».* – 2009. – S. 94-135.
46. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. – NCAR/TN–475+STR, NCAR Technical Note, June 2008.3. Khromov S.P., Petrosyants M.A. *Meteorologiya i klimatologiya.* – M.: Izd-vo MGU, – 2004. – 582 s.