

## ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ИССЛЕДОВАНИИ ЦИКЛОНОВ УМЕРЕННЫХ ШИРОТ



Н.А. Калинин,  
*доктор географических наук,  
заведующий кафедрой  
метеорологии и охраны  
атмосферы,  
Пермский государственный  
национальный исследовательский  
университет*



А.Л. Ветров,  
*кандидат географических наук,  
доцент кафедры метеорологии  
и охраны атмосферы,  
Пермский государственный  
национальный исследовательский  
университет*



А.А. Смирнова,  
*кандидат географических наук,  
доцент кафедры метеорологии  
и охраны атмосферы,  
Пермский государственный  
национальный исследовательский  
университет*

Впервые для территории Урала были проведены работы по стандартной и динамической верификации мезомасштабной модели атмосферы WRF. Выявлены ошибки модельной динамики и пределы применимости результатов модельных данных для количественных оценок запасов доступной потенциальной энергии, а также составляющих ее баланса на разных стадиях эволюции циклонических образований умеренных широт. Описано современное состояние вопроса моделирования атмосферных процессов и технологий визуализации полученных результатов.

За последние годы достигнуты значительные успехи в области численного прогнозирования погоды. Математические модели атмосферы, основанные на полных уравнениях гидротермодинамики, открывают широкие возможности в области гидрометеорологического обеспечения и являются универсальным инструментом исследования атмосферных процессов. В настоящее время практически во всех ведущих национальных прогностических центрах создаются иерархии численных моделей атмосферы от глобальных до мезомасштабных, большая часть которых имеет примерно одинако-

вое качество. Сопоставление мезомасштабных моделей не выделяет, как правило, лидера, дающего качество прогнозов всех метеорологических величин намного лучшее, чем в других моделях. В качестве примера можно привести некоторые модели (таблица).

Единственная модель, используемая как для оперативного прогноза, так и в исследовательских целях – это модель WRF – Weather Research and Forecasting [6]. По сравнению с оперативными моделями, эксплуатируемыми метеорологическими службами, WRF обладает одним несомненным преимуществом: имеется

Перечень мезомасштабных моделей атмосферы

Сокращенное наименование модели	Полное наименование модели	Страна разработчик
ALADIN	Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational	Франция
COSMO	The Consortium for Smallscale Modeling	Германия (в состав консорциума разработчиков входит Россия)
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model	Скандинавия
Unified Model	Unified Model	Великобритания
MSM	Mesoscale Model	Япония
WRF	Weather Research and Forecasting	США

выбор из двух динамических блоков и из нескольких процедур параметризаций по всем физическим процессам.

Кроме того, более открытая политика в части предоставления своих моделей пользователям из различных стран Национального центра атмосферных исследований США (NCAR) определяет выбор большинства ученых в пользу WRF [6]. Помимо самих программных средств, NCAR предоставляет пользователям подробные описания моделей и руководства по их эксплуатации, а также периодически проводит учебные семинары. Это делает вполне реальным освоение моделей NCAR в сравнительно короткие сроки и привлекательными для использования в научных и оперативных целях как внутри США, так и во многих странах мира.

Возможно ли применение гидродинамических моделей в целях изучения атмосферных процессов? Использование в оперативной практике гидродинамических моделей дает основание для утвердительного ответа. Кроме того, доказательством может служить серия экспериментов, направленных на оценку точности модели для различных территорий [3]. Так, для территории Урала была проведена серия экспериментов на модели MM5 (это ранняя версия модели WRF) и собственно на модели WRF.

В эксперименте в качестве начальных полей моделью MM5 использовались данные ре-анализа (NCEP/NCAR Reanalysis). Эти данные записаны в коде GRIB и имеют разрешение горизонтальной географической сетки 2,5 градуса, что соответствует расчетной сетки моде-

ли глобального масштаба. Первый этап расчета модели называется препроцессинг. В ходе препроцессинга начальные поля метеоэлементов на всех изобарических поверхностях интерполируются (с учетом картографической проекции и новой системы координат) с сетки глобального масштаба на мезомасштабную. В ближайших четырех узлах к каждой из боковых границ области происходит приспособление модели к граничным условиям, которое ослабевает по мере удаления от границ. Условия на нижней границе области содержат данные о температуре поверхности и снежном покрове. На верхней границе ставятся условия равенства нулю вертикальной скорости и вертикальных производных.

Область интегрирования модели – это территория Урала, ограниченная прямоугольником: меридиональная сторона 53,8–59,9 градусов северной широты, широтная сторона – 53,3–58,7 градусов восточной долготы. Разрешение модельной сетки 8 км. По горизонтали 42×85 узла, по вертикали 24  $\sigma$ -уровня. Верхняя граница в модели совпадает с изобарической поверхностью 100 гПа (примерно 16 км по высоте).

Результаты исследования, проведенные совместно с сотрудниками МГУ им. М.В. Ломоносова [5], показали, что при краткосрочном прогнозировании температуры воздуха у земли точность работы модели изменяется от 65 до 76 %. Коэффициенты корреляции в большинстве случаев превышают 0,80, что говорит о тесной связи между результатами моделирования и фактической температурой.

Графики автокорреляционной функции, рассчитанные для рядов фактической и модельной температуры, свидетельствуют о том, что восстановленные моделью ММ5 значения имеют большую связность, и следовательно, в краткосрочном прогнозе погоды в пределах рассматриваемого полигона, данная гидродинамическая модель может использоваться более эффективно, чем методика инерционного прогноза.

Точность прогноза модельных полей, в данном случае, оценивалась путем сравнения данных наблюдений на станциях с данными численного прогноза. Однако такая верификация не выявляет ошибки модельной динамики. Между тем эти ошибки можно обнаружить, а значит, дать разработчикам полезные ориентиры для работ по совершенствованию моделей. Для этого, в дополнение к стандартным процедурам расчета ошибок прогноза тех или иных метеорологических величин, целесообразно проводить расчеты динамически и физически содержательных диагностических характеристик по выходным данным моделей и сравнивать их с теми же величинами, рассчитанными по реальным данным. Такими реальными данными можно считать объективный анализ на срок прогноза или модельные данные на небольшие по заблаговременности сроки – до 24 часов.

Кроме данных о качестве восстановления отдельных метеорологических величин, были проведены работы по оценке воспроизводства моделью WRF некоторых динамических процессов.

Один из важнейших показателей состояния атмосферы – это запасы доступной потенциальной энергии (ДПЭ). Установлено, что наибольшие запасы ДПЭ в циклоне по высоте отмечаются в слое 800–850 гПа. Второй максимум наблюдается в слое 350–400 гПа. По данным мезомасштабной модели WRF подтвердился факт, что в процессе эволюции циклонов максимальные значения ДПЭ отмечаются на стадии максимального развития.

При сравнении прогностических и фактических значений ДПЭ отмечено, что прогностические запасы ДПЭ по сравне-

нию с фактическими завышены. Средний коэффициент корреляции между прогностическими и фактическими значениями ДПЭ по всем изобарическим поверхностям составляет 0,27, что соответствует слабой степени взаимосвязи. Среднее значение относительной ошибки по высотным слоям составляет 38 %. При прогнозе на вторые сутки наибольшие значения средней относительной ошибки отмечаются за первые три часа прогноза – 64 %. В последующие сроки ошибка равна 30–40 %. Мезомасштабная прогностическая модель WRF адекватно воспроизводит поля запасов ДПЭ, что свидетельствует о возможности использования ее для исследования циклонических вихрей.

Другой показатель – трансформация доступной потенциальной энергии вследствие длинноволновой радиации. Выявлено, что за счет притока длинноволновой радиации в циклоне происходит диссипация ДПЭ, однако ее величина крайне мала и составляет – 0,01 Вт/м<sup>2</sup>. При этом уменьшение значений трансформации ДПЭ в абсолютном выражении с высотой объясняется уменьшением влагосодержания. Особенностью этой энергетической характеристики являются два максимума диссипации ДПЭ в тропосфере: на стадии молодого циклона и при переходе его в стадию заполнения. Минимум диссипации отмечается в стадии максимального развития циклона. Максимальные значения диссипации ДПЭ в ходе эволюции циклона наблюдаются на основных тропосферных фронтах. Верификация модели показала, что величина абсолютной ошибки мало зависит от срока заблаговременности прогноза в пределах 48 ч. Систематическая ошибка указывает на то, что в слое 500–700 гПа модельные данные являются завышенными по отношению к фактическим, а в слое 400–500 гПа, наоборот, заниженными. Результаты расчета средней относительной ошибки говорят о том, что величина абсолютной погрешности соизмерима со значениями исследуемой характеристики. Особенно это касается слоя 500–700 гПа, где величина ошибки превышает значения диссипации ДПЭ в три раза и более. В слое

400–500 гПа минимальная относительная ошибка составляет порядка 60 % от величины исследуемой характеристики. При получении прогностических данных о генерации ДПЭ вследствие притока длинноволновой радиации были использованы сложные расчетные схемы, что сопряжено с неизбежным искажением исходных данных.

Трансформация ДПЭ вследствие притока коротковолновой радиации превосходит трансформацию ДПЭ за счет длинноволновой радиации на три порядка и составляет в среднем  $6 \text{ Вт/м}^2$ . Существует суточный ход трансформации ДПЭ в циклонах, причем за счет притока коротковолновой радиации происходит только ее генерация. Наибольший вклад в генерацию доступной потенциальной энергии вносят слои атмосферы от 950 до 850 гПа. Фронтальные системы также влияют на распределение трансформации ДПЭ: одной из областей наибольшей генерации является точка окклюзии. Наибольший вклад в генерацию ДПЭ за счет притоков коротковолновой радиации вносит облачность, находящаяся в слое 700–900 гПа.

В процессе углубления циклона кинетическая энергия в циклоне растет, а от стадии максимального развития циклона до момента его заполнения – уменьшается. Средние по циклону значения кинетической энергии максимальны в слое 300–250 гПа, что обусловлено увеличением скорости ветра под тропопаузой. Здесь же можно обнаружить и максимальные запасы ДПЭ. Таким образом, по крайней мере, в верхней части тропосферы подтверждается существование механизма перехода доступной потенциальной энергии в кинетическую. При распределении кинетической энергии по высоте между прогностическими и фактическими значениями есть расхождения, наиболее заметные в слое от 850 до 600 гПа, составляющие 10–20 Дж/кг.

Очаги наибольших значений кинетической энергии до среднего уровня тропосферы (около 5 км) приходятся на переднюю часть циклона, фронтальные разделы, теплый сектор, а также области с барическим градиентом более

3 гПа/100 км. На среднем уровне и выше очаги максимальных значений кинетической энергии становятся больше и соответствуют областям высотных фронтальных зон. На высоте расположения струйных течений области максимумов кинетической энергии представляют собой узкие вытянутые зоны, совпадающие с зонами максимальных ветров. До начала стадии заполнения циклона поле кинетической энергии прогнозируется довольно точно.

Важным элементом в исследовательском комплексе на основе гидродинамических моделей является система визуализации пространственных данных. Для обработки метеорологических данных на стыке информатики и метеорологии существуют гидрометеорологические геоинформационные системы (ГИС). ГИС реализуются на персональных компьютерах и позволяют получать метеорологическую информацию из мировых прогностических центров, унифицировать ее, заносить в базу данных, наносить на электронный бланк, производить стандартную метеорологическую обработку и синоптический анализ данных, выводить бланки карты на печать или сохранять готовую карту в графическом формате [1, 2, 4]. На гидрометеорологической сети наибольшее распространение получила геоинформационная система ГИС Метео. ГИС Метео – специализированная геоинформационная система, которая представляет собой интерактивный и работающий в режиме реального времени инструмент, предназначенный для использования в оперативной работе метеорологов. Разработка ГИС Метео началась в конце 80-х годов прошлого века научно-производственным центром МэпМейкер (Россия). Сейчас программный комплекс ГИС Метео – это универсальный инструмент метеоролога, служащий для изготовления, обработки и документирования метеорологических карт. ГИС Метео состоит из геоинформационной системы, ее различных компонент, метеорологической базы данных, отдельных приложений, а также из многочисленных технологических средств сбора и распространения

ния данных. Комплекс позволяет организовать с малым штатом сотрудников высокоэффективную технологию оперативного гидрометеорологического обеспечения при очень малых затратах на ее эксплуатацию.

ГИС Метео строит карты с оперативной метеорологической информацией, поступающей со всего земного шара. По данным различных гидродинамических моделей прогноза погоды, рассчитываемых в метеорологических центрах России (Москва, Новосибирск), Великобритании (Рединг, Эксетер), США (Вашингтон), Германии (Оффенбах), создаются карты с прогностическими параметрами различной заблаговременности (до 168 ч). По заранее подготовленному сценарию ГИС Метео автоматически или в интерактивном режиме создает многочисленные слои информации на фоне географической карты любого масштаба. Такое совмещение слоев на мониторе компьютера позволяет осуществлять «бесбумажную» технологию работы синоптика по анализу и прогнозу погоды. Кроме того, программный комплекс ГИС Метео используется для визуализации развития глобальной погоды. Так, практически все центральные телевизионные каналы при демонстрации блока прогноза погоды используют анимации, выполненные с по-

мощью ГИС Метео. И немного найдется людей, кто не заглядывал бы на сайт, разработанный специалистами МэпМейкер ([www.gismeteo.ru](http://www.gismeteo.ru)), на котором представлен большой ассортимент метеорологической продукции: от прогноза погоды раз-ной заблаговременности для городов России и зарубежья до прогностических карт погоды.

Подводя итоги, можно заключить, что в ходе ряда исследований, выполненных на кафедре метеорологии и охраны атмосферы ПГНИУ, рассмотрены общие закономерности пространственно-временного распределения энергетических характеристик в циклонах умеренных широт. Установлено, что запасы доступной потенциальной и кинетической энергии, трансформация доступной потенциальной энергии за счет притока коротковолновой и длинноволновой радиации достоверно воспроизводятся мезомасштабной моделью WRF–ARW. Полученные результаты можно использовать для построения физико-статистических схем прогноза эволюции барического образования и динамической верификации гидродинамических моделей. ГИС Метео является надежным и удобным способом визуализации результатов исследования циклонических вихрей.

#### Библиографический список

1. *Волынцева О.И., Смирнова А.А.* Анализ и прогноз погоды с помощью геоинформационной системы Метео. – М.: ВНИИГМИ МЦД. – 2005. – 190 с.
2. Геоинформационная система «Метео» и состояние ее использования в метеослужбах России и стран ближнего зарубежья / *А.А. Акулиничева, Л.В. Беркович, А.Ю. Соломахов, Ю.Л. Шмелькин, Ю.И. Юсупов* – Метеорология и гидрология. – 2001, № 11. – С. 90–97.
3. *Калинин Н.А., Ветров А.Л., Связов Е.М.* Исследование генерации доступной потенциальной энергии в глобальной прогностической модели Гидрометцентра России. В сб.: Вопросы прогноза погоды, климата, циркуляции и охраны атмосферы. – Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2003. С. 3–8.
4. *Калинин Н.А., Смирнова А.А., Ветров А.Л.* Географические информационные системы в метеорологии. – Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2007. – 368 с.
5. Оценка качества воспроизведения моделью MM5 температуры воздуха в июле на Урале / *Н.А. Калинин, А.В. Кислов, Е.Д. Бабина, А.Л. Ветров* – Метеорология и гидрология. – 2010, № 10. – С. 15–22.
6. A description of the advanced research WRF, version 2 / *W.C. Skamarock [et al.]* NCAR Tech. Note, 2005. – 100 p.