

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 551.509.32

*Л.И. Кижнер, Д.П. Нахтигалова, А.А. Барт***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ WRF
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГОДЫ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ**

Представлены результаты расчета температуры воздуха, атмосферного давления и осадков с использованием современной и перспективной прогностической системы моделирования WRF. Расчеты выполнены на суперкомпьютере Томского государственного университета «СКИФ Siberia». Проведено сравнение фактических и прогностических значений метеорологических величин для разных сезонов года и погодных условий, в том числе опасных, при использовании различных параметризаций физических процессов в атмосфере. Предложен набор параметризаций, дающий лучшие результаты для территории Томской области.

Ключевые слова: прогноз погоды; прогностическая система WRF; параметризации физических процессов.

Введение

Физико-математические численные модели стали основным средством научных исследований. В России созданы и функционируют разные по масштабу и периоду прогнозов гидродинамические модели [1–6]. Дальнейшее исследование погоды, улучшение прогноза погоды и отдельных метеовеличин связывают с использованием более точных прогностических систем и применением многопроцессорной вычислительной техники. Улучшение качества численных моделей атмосферы обуславливают следующие факторы: повышение пространственного разрешения, уточнение начальных полей, совершенствование и использование наиболее адекватных и точных параметризаций. Практическая реализация моделей требует изучения особенностей их работы в различных регионах Российской Федерации при разных сезонах и погодных ситуациях, оценки точности прогнозов общего назначения, специализированных, в том числе прогнозов осадков, гроз и других явлений.

Актуальность работы обусловлена необходимостью дальнейшего внедрения самых современных прогностических систем на всей территории России, в том числе в Сибири, оценкой их работоспособности с целью повышения качества прогнозов погоды и в особенности прогнозов опасных метеорологических явлений.

В настоящее время оправдываемость краткосрочных прогнозов составляет 90–97%, прогнозов опасных явлений для разных отраслей – 75–90% [7]. Анализ существующих методик прогноза показывает, что их качество для территории России лучше в зимний период. В теплое время года прогнозы имеют несколько меньшую оправдываемость [8. С. 16]. Это связано с отсутствием механизма выявления локальных конвективных явлений, имеющих ограниченные размеры в пространстве (десятки, сотни километров) и во времени (минуты, часы). Эти мезомасштабные процессы вызывают такие опасные явления, как ливневые осадки, шквалы, грозы, град.

В Западной Сибири отмечается большая повторяемость опасных явлений в разные сезоны года. Так, по данным за 2010 г. из 8 федеральных округов на долю Сибирского федерального округа, включающего Запад-

ную Сибирь, приходится самое большое количество опасных и неблагоприятных метеорологических явлений – 28% [9. С. 50].

В данной статье представлены результаты вычислительных экспериментов прогноза температуры воздуха, атмосферного давления и зон осадков, выполненных с помощью мезомасштабной негидростатической метеорологической модели WRF для Томской области, и проведена оценка прогностических величин на основе данных метеорологических станций.

Описание модели

Модель WRF (Weather Research and Forecasting) является одной из наиболее универсальных и современных систем моделирования атмосферы. Являясь свободно распространяемым программным продуктом, она широко и успешно используется для метеорологического прогнозирования в научных центрах и метеослужбах различных стран и продолжает непрерывно развиваться. Как эффективный инструмент решения многих задач физики атмосферы модель используется в исследовательских целях: мониторинг загрязнения атмосферы [10. С. 15; 11. С. 455], изучение климата, моделирование разнообразных мезомасштабных явлений (в частности, бризов [12. С. 118], конвективных и других явлений [13. С. 5; 14. С. 5]). Существуют хорошие перспективы использования модели в радиометеорологии [15. С. 59].

Модель основана на численном решении системы уравнений гидротермодинамики атмосферы с учетом процессов в верхнем слое суши или воды. Процессы подсеточного масштаба учитываются с помощью параметризаций. В модели WRF может быть использовано большое количество схем параметризаций физических процессов, которые можно комбинировать. В работе использовалась версия модели WRF 3.1 [16]. Для описания физических процессов внутрисеточного масштаба в атмосфере и подстилающей поверхности предлагается следующий набор блоков:

1. Микрофизика включает в себя такие процессы, как водяной пар, облака, осадки. В модели можно использовать восемь различных схем микрофизических процессов, от простых, в которых учитывается только

жидкая фаза – вода, до самых сложных, учитывающих все имеющиеся в природе виды гидрометеоров и их взаимодействия.

2. Параметризации радиационных процессов учитывают длинноволновую и коротковолновую солнечную радиацию. Длинноволновая радиация определяется излучением от подстилающей поверхности, которое зависит от типа землепользования, а также температуры поверхности земли. Коротковолновое излучение включает диапазон видимых длин волн, которые составляют спектр солнечного света. При прогнозировании с помощью модели атмосферного излучения анализируются и рассчитываются поглощение, отражение и рассеяние солнечной радиации в атмосфере согласно теоретическому распределению участвующих в этих процессах компонент. Предлагаемые в модели четыре параметризации длинноволнового излучения и четыре – для коротковолнового излучения позволяют учесть облачность, распределение водяного пара, углекислый газ, озон, малые концентрации других значимых газов.

3. Параметризации поверхностного слоя учитывают процессы обмена теплом и влагой между атмосферой и подстилающей поверхностью. Модель предлагает пять вариантов параметризаций.

4. Параметризации подстилающей поверхности и процессов в почве (четыре варианта) позволяют учесть распределение температуры и влажности в почве в нескольких слоях, процессы замерзания и оттаивания почвы, физику снежного покрова и замороженной почвы, процессы над ледовыми щитами и заснеженными областями, а также физику многослойного снега [17. С. 569].

5. Параметризации планетарного пограничного слоя учитывают турбулентность в пограничном слое и свободной атмосфере, вертикальные градиенты температуры воздуха и ветра, высоту пограничного слоя, процессы облакообразования. В модели предложено шесть вариантов параметризаций, которые могут быть использованы в разных конкретных погодных условиях [18. С. 5].

6. Параметризации облачности позволяют прогнозировать свойства как восходящих, так и нисходящих потоков, учитывать процессы перемешивания воздуха в облаках и в окружающей среде, моделировать разгрузку облаков и осадков, оценивать продуктивность осадков. Представленные 4 варианта параметризаций позволяют оценивать процессы развития как сплошной облачности, так и отдельных облаков [18. С. 15].

На первом этапе выполнены работы, необходимые для запуска WRF в вычислительном центре Томского государственного университета на многопроцессорном вычислительном комплексе «СКИФ Siberia»: отображены метеорологические ситуации, исходные данные, карты погоды, выполнена визуализация результатов расчетов, построены карты.

Для географической привязки были выбраны три вложенные области с разным пространственным разрешением: первая – Западная Сибирь, вторая – Томская область, третья – южная часть Томской области. Для первой области выбрано временное разрешение 10 минут, для двух других – привязка с разрешением в 30 секунд. В качестве архивных данных были использованы данные реанализа Национального центра охраны окру-

жающей среды США (NCEP) и Национального центра прогнозов окружающей среды (NCAR).

Для визуализации результатов использован пакет GrADS. Полученные результаты моделирования были обработаны утилитой ARWpost, входящей в состав комплекса моделирования WRF, для дальнейшей визуализации результатов. Утилита ARWpost переводит данные из формата, в котором представлены результаты моделирования (netCDF, URL: <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>), в формат системы GrADS (URL: <http://www.iges.org/grads/>). Используя систему GrADS, можно изображать распределение метеорологических характеристик в виде двумерных полей, а также привязывать данные к географической сетке и подкладывать под расчеты карту местности.

На втором этапе работы решалась задача определения оптимального для района исследований набора параметризаций, с тем чтобы оценить их влияние на успешность работы системы и результаты прогноза.

На основе выполнения моделирований получены прогнозы температуры воздуха и давления по территории Томской области для разных сезонов года за следующие периоды: 7–9 ноября 1999 г.; 6–8 мая 1999 г.; 2–4 июля 2000 г.

При выборе дат намеренно выбирались такие синоптические процессы, при которых отмечались дни с опасными явлениями или неблагоприятными явлениями погоды.

При подборке параметризаций для каждого синоптического случая модель WRF запускалась по три раза. При каждом новом запуске устанавливались разные теоретически обоснованные параметризации и выполнялись расчеты для различных наборов параметризаций физических процессов, характерных для сезона и синоптического положения. Для моделирований, которые были завершены успешно, проводилась оценка качества полученного прогноза по четырем станциям, расположенным в разных частях области: Томск, Александровское, Колпашево, Пудино. Фактические данные о погоде были взяты с сайта [19].

При оценке качества работы модели использовалась вторая вложенная область, качество прогноза оценивалось по средней ошибке ε и среднеквадратической ошибке ε_k [20. С. 303]:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum (x_f - x_v), \quad (1)$$

$$\varepsilon_k = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_f - x_v)^2}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) приняты следующие обозначения: x_f – прогнозируемое значение метеорологической величины; x_v – соответствующее наблюдаемое (проверочное) значение; N – число оцениваемых сроков.

Анализ результатов численных экспериментов

Отметим, что для каждой метеорологической ситуации в зависимости от сезона года к каждому прогнозу были подобраны наиболее реально описывающие данные погодные условия параметризации, но наборы параметризаций не повторялись. При выполнении рас-

Оценка качества численного прогноза на 6–8 мая 1999 г.

Станция	Характеристики качества	Температура воздуха, °С	Давление, гПа
Томск	ϵ	-0,8	-0,8
	ϵ_k	3,2	3,0
Александровское	ϵ	-0,8	2,2
	ϵ_k	3,2	4,2
Колпашево	ϵ	-0,8	-0,8
	ϵ_k	3,3	5,9
Пудино	ϵ	-0,8	2,2
	ϵ_k	3,1	3,6

Среднеквадратическая погрешность прогноза температуры не превысила 3°С. Отметим, что в данном случае прогнозы с разными параметризациями физических процессов в облаках (схема Кесслера и пятиклассовая схема) дали схожие по точности результаты. Более подходящей для данной ситуации явилась схема WRF с пятью классами (WSM5, mp_physics = 4).

Оценка качества численного прогноза на 2–4 июля 1999 г.

Станция	Характеристики качества	Температура воздуха, °С	Давление, гПа
Томск	ϵ	-0,1	-0,9
	ϵ_k	3,0	1,2
Александровское	ϵ	1,7	-1,3
	ϵ_k	2,7	2,0
Колпашево	ϵ	0,0	1,2
	ϵ_k	2,6	5,0
Пудино	ϵ	-0,4	-0,1
	ϵ_k	3,0	0,8

Прогноз сильного ливневого дождя 1 июня 2001 г. Анализ синоптических карт на 03 и 12 ч всемирного скоординированного времени (ВСВ) показал, что территория Томской области в 03 ч находилась под влиянием обширного циклона с минимальным давлением 1000,7 гПа. Центральную часть области пересекал теплый фронт. Далее циклон смещался на северо-восток, при этом давление в центре падало до 998 гПа. Вместе с циклоном смещался и фронт. На территории Томской области наблюдались шквалы, грозы и ливневые осадки. В северной и западной частях территории наблюдались сильные ливневые осадки (03 ч). Температура воздуха изменялась по территории от 12 до 23°С. Через 9 часов ливневые осадки наблюдались только в центральной части области (Колпашево, Молчаново, Первомайское). Наиболее интенсивные конвективные явления сместились севернее рассматриваемой территории. Температура воздуха возросла с 8 до 17°С.

Прогноз конвективных явлений, в том числе ливневых осадков, достаточно труден. Не всегда удается дать вовремя штормовое предупреждение о надвигающемся явлении. Томским ЦГМС на 1 июня 2001 г. было составлено штормовое предупреждение с заблаговременностью в 6 часов о надвигающихся шквале и грозе, но сильный ливневой дождь с количеством осадков 54 мм/12 ч (станция Напас) не был предусмотрен. В прогнозе Томского ЦГМС по городу и области ожидалась гроза, ливневой дождь, град, ветер 15–20 м/с.

Прогноз летних конвективных явлений по модели WRF включал расчет таких параметров, как давление воздуха, вертикальные токи, удельная влажность, тем-

четов в отдельных случаях возникали некоторые нестандартные ситуации:

– прекращение счета по истечении некоторого времени, программа выдавала ошибки, обусловленные несоответствием параметризаций для планетарного пограничного слоя и поверхностного слоя;

– возникновение аномально больших ошибок, обусловленных взаимным влиянием разнонаправленных факторов, в том числе за счет конфликта параметризаций;

– прекращение счета из-за конфликта параметризаций в разделах «коротковолновая и длинноволновая радиация».

В большинстве случаев программа успешно завершала прогноз. Ниже представлены сравнительные результаты прогностических и фактических данных для некоторых прогнозов.

7–9 ноября 1999 г. на территории Томской области наблюдалась облачная с осадками погода. В этот период было отмечено установление снежного покрова, т.е. наблюдалась совокупность неустойчивых во времени прямых и обратных связей между элементами погоды как в пограничном слое атмосфере, так и на подстилающей поверхности. Модель запускалась на трое суток с интервалом выдачи результатов 3 часа. В табл. 1 представлены погрешности прогноза температуры воздуха и атмосферного давления.

Таблица 1

Оценка качества численного прогноза на 7–9 ноября 1999 г.

Станция	Характеристики качества	Температура воздуха, °С	Давление, гПа
Томск	ϵ	-1,7	-0,9
	ϵ_k	2,7	7,1
Александровское	ϵ	0,0	-0,5
	ϵ_k	4,2	2,5
Колпашево	ϵ	2,1	-0,6
	ϵ_k	4,2	1,7
Пудино	ϵ	2,2	-1,8
	ϵ_k	4,5	3,1

По результатам расчета средней ошибки видно, что прогностические величины получились как выше, так и ниже фактических значений. Среднеквадратическая погрешность прогноза температуры воздуха на рассматриваемых станциях составила от 2,7 до 4,5°С, давления воздуха – от 1,7 до 7,1 гПа.

Прогноз на 6–8 мая 1999 г. 6 мая 1999 г. на территории Томской области наблюдалась малооблачная без осадков погода. 7 мая 1999 г. на 12 станциях области отмечалось усиление ветра, который сопровождался ливневым дождем с грозой.

Режим счета был аналогичным. Результаты сравнения представлены в табл. 2. Прогностические значения температуры воздуха для всех станций оказались в среднем заниженными. Среднеквадратическая погрешность прогноза температуры воздуха на рассматриваемых станциях составила чуть больше 3°С, давления – от 3 до 5,9 гПа.

Прогноз на 2–4 июля 2000 г. На территории Томской области в этот период отмечалась облачная погода. Осадки наблюдались только в некоторых частях области. 3 июля на севере области было зарегистрировано опасное явление – гроза со шквалом и ливневыми осадками. Результаты прогностических расчетов даны в табл. 3.

пература воздуха и водозапас облачности. Распределения этих величин были получены для 1 июня 2001 г. за каждый час для всех трех вложенных областей.

В соответствии с прогностическими данными получено, что температура воздуха 1 июня на территории Томской области изменялась от 9°C на севере (19 ч) до 29°C на юге (09 ч). Сильные ливневые осадки наблюдались на севере области (Александровский, Каргасок-

ский районы), также в отдельных районах южной части области (Кривошеинский, Молчановский, Шегарский районы). Критерия опасного явления они могли достигнуть на севере области.

Результаты расчета водозапаса в облаках приведены на рис. 1 и 2. Цифры на рисунках по горизонтали и по вертикали – соответственно долгота и широта места в градусах.

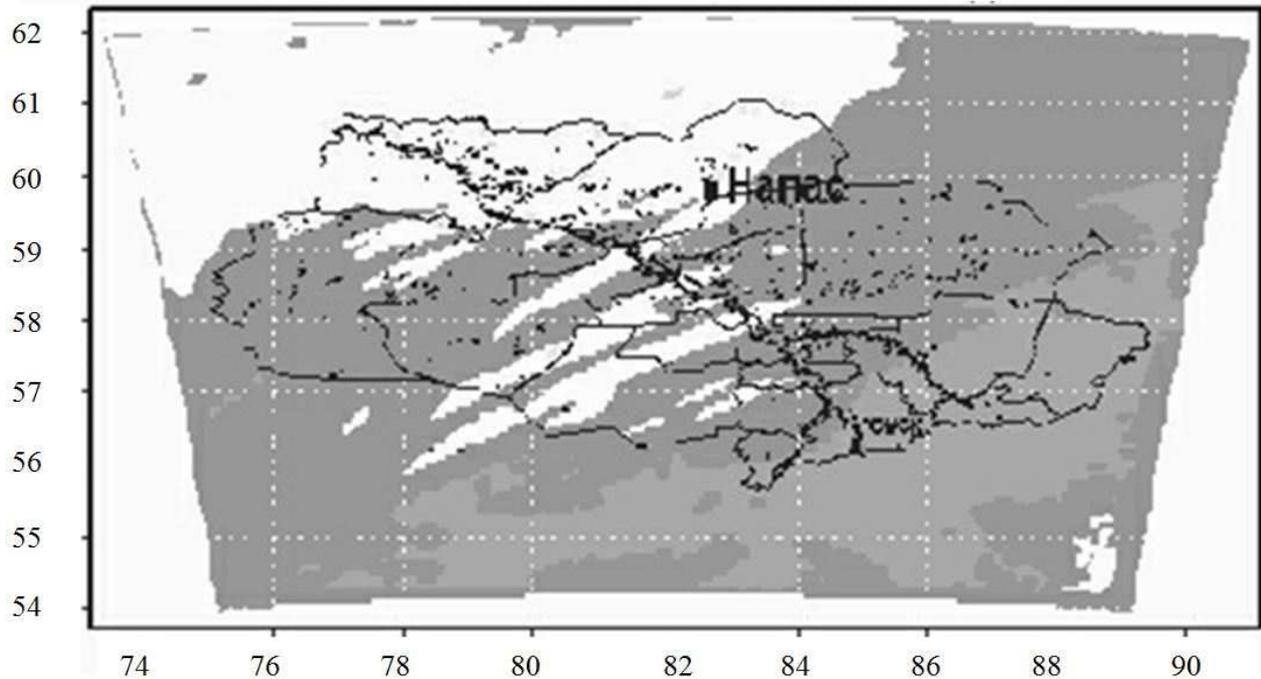


Рис. 1. Распределение запаса влаги в облаках по территории Томской области в 03 ч ВСВ 1 июня 2001 г. Более темные области соответствуют малым величинам, светлые – большим значениям влагозапаса

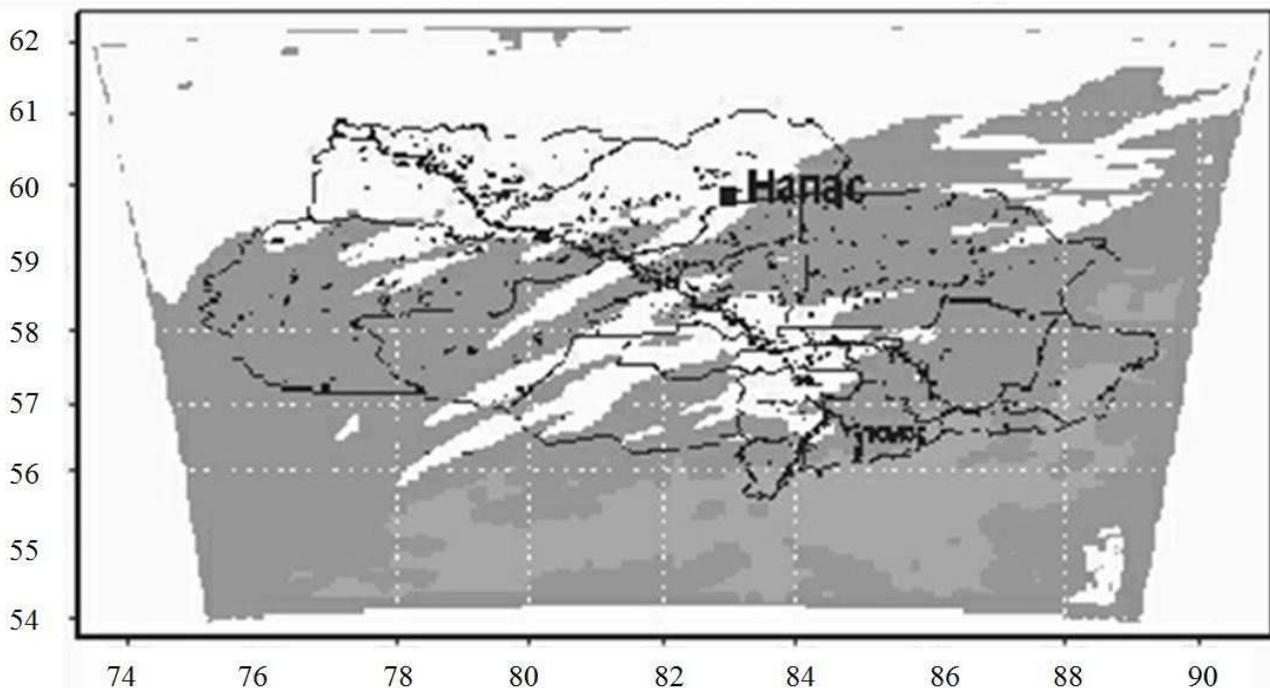


Рис. 2. Распределение запаса влаги в облаках в 13 ч ВСВ 1 июня 2001 г. по территории Томской области. Обозначения те же, что и на рис. 1

При сравнении фактических данных метеовеличин на станциях Томской области с данными, рассчитанными по модели WRF, были получены следующие ре-

зультаты: фактические и прогностические температуры воздуха отличались не более чем на 3°C, атмосферное давление – не более чем на 4 гПа.

В соответствии с фактическими данными осадки по территории области распределены неравномерно. Максимальное количество осадков зарегистрировано на станции Напас (54 мм). Сравнение фактических осадков с рассчитанным по программе запасом влаги в облаках в сроки 03 и 13 ч ВСВ показало, что в срок 03 ч фактически осадки выпадали на севере области вдоль линии теплового фронта на станциях Александровское, Напас, Ванжиль-Кынак, Каргасок. Прогностическая карта за тот же срок, построенная по модели WRF, в точности соответствовала фактическим данным. Зоны с максимальным водозапасом в облаках также располагались вдоль линии фронта.

В срок 12 ч ВСВ линия фронта сместилась на восток, и вслед за ней постепенно сместилась зона осадков. По данным метеостанций осадки наблюдались на 3 станциях: Колпашево, Молчаново и Ванжиль-Кынак. Рассчитанные по модели WRF значения запаса воды в облаках также хорошо подтвердили реальные данные.

Таким образом, прогностические поля давления воздуха, температуры и зон осадков, полученные по модели, хорошо совпали с фактической погодой.

Несмотря на то что прогностические значения температуры и давления воздуха несколько отличались от фактических значений, результаты моделирования можно считать успешными, поскольку для экспериментов изначально были выбраны сложные погодные условия, описать всю совокупность физических процессов в которых можно лишь с большой степенью приближения.

Огромным достижением явилось выявление в результате расчетов потенциальных зон осадков. При анализе рассчитанных карт можно достоверно и детализированно указать районы выпадения осадков, в том числе сильных ливней. Этот результат особенно важен, поскольку прогноз мезомасштабных явлений погоды, обусловленных развитием конвекции, остается слабым звеном во многих моделях, используемых сегодня для прогноза погоды.

Выводы:

1. Реализация модели прогноза для Томской области показала хорошие перспективы использования ее в различные сезоны года и при разных метеорологических условиях, в том числе при неблагоприятных и опасных явлениях погоды.

2. Рассчитанные характеристики точности модели представляются удовлетворительными на данном этапе.

3. В результате численных экспериментов выбирались различные схемы параметризаций. Были подобраны комбинации, наилучшим образом описывающие физические процессы в атмосфере с учетом погодных условий и пространственного масштаба. Для теплового периода года лучшим по точности полученных прогнозов оказался следующий набор параметризаций физических процессов:

– микрофизика – схема WRF с пятью классами гидрометеоров (при запуске программы эта схема обозначается WSM5). Схема представлена пятью категориями гидрометеоров: пар, дождь, снег, лед в облаках и облачная вода, она позволяет учитывать переохлажденную воду и постепенное таяние снега [16];

– длинно- и коротковолновая радиация – схема RRTMG. Для длинноволнового излучения в ней учитывается поглощение излучения водяным паром, углекислым газом, озоном, оксидом азота, метаном. В спектре длинноволновой радиации выделено 16 полос поглощения, для которых определены основные и слабые поглотители. Расчет переноса радиации осуществляется по слоям. Метод очень точен и реалистично воспроизводит процессы в атмосфере [16]. При распределении коротковолновой радиации учитывается воздействие атмосферного водяного пара, озона и двуокиси углерода, а также облака со случайным перекрытием;

– поверхностный слой – схема подобия Янича. Описывает процессы в приземном слое. Основана на теории подобия Мони́на – Обухова. Схема включает в себя вязкий слой, уровень шероховатости, слой постоянных турбулентных потоков [16];

– подстилающая поверхность – схема Noah LSM. Параметризация позволяет описывать и прогнозировать температуру и влажность в 5 слоях почвы (до 100 см), а также водный эквивалент и толщину снега. Учитывает поверхностный и внутрипочвенный стоки, физику снежного покрова и замороженной почвы. Новая модификация, добавленная в версии 3.1, предназначена для лучшего представления процессов над заснеженными областями [16];

– планетарный пограничный слой – схема Меллора – Ямады – Янича (MYJ). Учитывает полный диапазон атмосферной турбулентности;

– облачность – схема Беттса – Миллера. Учитывает изменение влажности в воздушном столбе с учетом процессов перемешивания [13. С. 9].

4. Для холодного времени года лучшими оказались те же параметризации, но с включением снежного покрова (`ifsnow = 1`).

5. При расчетах учитывались перенос тепла и влаги с поверхности (`isflx = 1`), облачность при расчете радиации (`icloud = 1`), количество слоев в почве (`num_soil_layers`) равно 5.

6. Прогноз летних метеовеличин показал более достоверный результат.

7. Работу по изучению возможностей модели WRF и других моделей с целью определения лучшей и ее дальнейшему внедрению в практику прогнозирования следует продолжить.

Работа представляет интерес для усовершенствования мезомасштабного прогноза погоды на аналогичных по физико-географическим условиям и других территориях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садоков В.П., Вильфанд Р.М. Новые результаты в разработке статистических методов долгосрочных прогнозов погоды и технология их выпуска // 70 лет Гидрометцентру России. СПб. : Гидрометеоздат, 1999.
2. Мелешико В.П., Гаврилина В.М., Матюгин В.А. и др. Результаты сравнения гидродинамико-статистических методов ГГО и Гидрометцентра России прогноза метеорологических величин на срок до месяца // Информационный сборник № 30. Результаты испытания новых и усовершенствованных методов и моделей гидрометеорологических прогнозов. 2003.

3. Розинкина И.А., Киктев Д.Б., Пономарева Т.Я. Оперативный выпуск гидродинамических прогнозов погоды на средние сроки по спектральной модели Гидрометцентра России // Труды ГМЦ РФ. 2001. Вып. 334.
4. Лосев В.М. Гидродинамическая конечно-разностная модель регионального прогноза на ЭВМ CRAY // Труды ГМЦ РФ. 2000. Вып. 334.
5. Багров А.Н. Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов : информационный сборник ГМЦ РФ / под ред. Г.К. Веселовой. М., 2008. № 35.
6. Pielke R.A. Mesoscale Meteorological Modeling. Orlando : Academic Press, 1984.
7. Характеристики успешности прогнозов температуры воздуха по УГМС/ЦГМС и административным центрам субъектов РФ. Опасные явления. Оценки прогнозов / Методический кабинет Гидрометцентра России. URL: <http://method.hydromet.ru/> (дата обращения: 2.12.2011).
8. Обзор деятельности Росгидромета за 2007 г. Обнинск, 2008.
9. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 год. М., 2011.
10. Барт А.А., Беликов Д.А., Старченко А.В. Математическая модель для прогноза качества воздуха в городе с использованием суперкомпьютеров // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 3.
11. Старченко А.В., Беликов Д.А., Вражнов Д.А., Есаулов А.О. Применение мезомасштабных моделей MM5 и WRF к исследованию атмосферных процессов // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 05–06. С. 455–461.
12. Степаненко В.М., Миранда П.М., Лыкосов В.Н. Численное моделирование мезомасштабного взаимодействия атмосферы и гидрологически неоднородной суши // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11, ч. 3.
13. Вельтицев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология. 2011. № 1.
14. Песков Б.Е., Дмитриева Т.Г. Уточнение мезомасштабного численного прогноза сильных ливней // Метеорология и гидрология. 2010. № 9.
15. Мещеряков А.А., Госенченко С.Г., Кижнер Л.И. Влияние изменчивости индекса преломления тропосферы на дальность прямой видимости и погрешности измерения координат радиолокационных целей // Известия Томского политехнического университета. Математика и механика. Физика. 2011. Т. 318, № 2.
16. ARW Version 3 Modeling System User's Guide // NCAR. July 2010. URL: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v3/ (date of access: 20.12.2010).
17. Chen F., Dudhia J. Coupling an advanced land-surface / hydrology model with the Penn state / NCAR MM5 modeling system. Part 1 : Model implementation and sensitivity // Mon. Wea. Rev. 2001. Vol. 129, № 4. P. 569–585.
18. Janjic Z.I. Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model // NCEP Office Note. 2002. № 437.
19. Погода России. Архив погоды. URL: <http://meteo.infospace.ru> (дата обращения: 12.02.2011).
20. Бараикова Н.К., Кижнер Л.И., Кужевская И.В. Атмосферные процессы: динамика, численный анализ, моделирование : учеб. пособие / науч. ред. Г.О. Заде. Томск : ТМЛ-Пресс, 2010.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 15 февраля 2012 г.