

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ЧИСЛЕННЫХ ПРОГНОЗОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РАЙОНЕ г. ТОМСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ WRF

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (Соглашение № 14.В37.21.0667) и гранта № 12-05-31240.

Выполнена оценка качества прогноза температуры, влажности воздуха, атмосферного давления, ветра, осадков и облачности с использованием современной прогностической системы моделирования WRF в летний период 2012 г. в районе города Томска. Расчеты выполнялись на суперкомпьютере Томского государственного университета «СКИФ Cyberia». Приведены основные характеристики успешности, применяемые при оценке работы прогностических моделей. Установлено, что точность модели не уступает другим аналогичным мезомасштабными моделям, используемым в Гидрометцентре, для прогноза температурно-влажностных характеристик, но требуется усовершенствование блока расчета приземного давления.

**Ключевые слова:** численный прогноз погоды; прогностическая система WRF; оценка точности локального прогноза, параметризация физических процессов.

Современная метеорология характеризуется бурным развитием математических моделей атмосферы и их применением в разных сферах деятельности. Этому способствуют развитие компьютерных технологий, совершенствование математических методов и систем наблюдений за состоянием окружающей среды, а также международное сотрудничество и кооперация. Основное назначение метеорологических моделей – получение прогноза погоды для разных территорий и на разные сроки.

В России используются глобальные, региональные модели, модели мезо- и микромасштаба (локальные), которые решают задачи прогноза различных метеовеличин и атмосферных явлений. Одна из важных задач, стоящих перед специалистами в области метеорологии, – исследовать возможности и качество прогнозов как отечественных, так и зарубежных моделей с тем, чтобы выбрать и использовать наиболее подходящие.

В Томском государственном университете на протяжении нескольких лет используется атмосферная прогностическая модель WRF (Weather Research & Forecasting, версия 3.4.1). Она также широко применяется в научных центрах и метеослужбах разных стран для оценки физического состояния атмосферы и прогнозирования погодных условий.

Модель основана на численном решении системы уравнений гидротермодинамики атмосферы [1]. Было показано, что она дает удовлетворительные результаты при прогнозе метеорологических параметров [2, 3].

В данной работе выполнена оценка прогноза основных метеовеличин, полученных с помощью прогностической системы WRF в ее локальном варианте.

Материалом для исследования послужили данные моделирования и прогностические метеополя за период с 18 ч 15 июня по 12 ч 17 июня 2012 г., которые сравнивались с фактической погодой.

Большое внимание уделено возможности прогноза осадков и облачности. С этой целью составлен прогноз погоды с использованием разных параметризаций микрофизических процессов в облаках. Применены схемы Лина (Lin), WSM5, ETA, WSM6, Томпсона [1].

В качестве начальных и граничных условий в модели WRF использовались результаты численного прогноза по глобальной модели ПЛАВ ГУ Гидрометцентр

России [4, 5]. Выходная продукция модели WRF – ежечасные прогностические поля метеовеличин.

Исследование проводилось путем многократного запуска моделирующей системы WRF с изменением параметризации микрофизики влаги, в то время как параметризации пограничного слоя, радиации, подстилающей поверхности оставались одинаковыми.

Расчеты выполнялись на трех вложенных областях с общим центром, имеющим координаты 56,5° с.ш., 85° в.д. (г. Томск). Размер наибольшей области – 450×450 км, шаг сетки – 9 км, второй вложенной области – 150×150 км, шаг сетки – 3 км, третьей – 50×50 км, шаг сетки – 1 км [1]. Для большей области учитывалось образование конвективных осадков по параметризации облачности по схеме Betts-Miller-Janjic.

Все три области включали аэропорт Богашево, Томскую гидрометеорологическую станцию и ТОР-станцию ИОА СО РАН (восточная часть г. Томска).

Рассчитывался слой атмосферы от поверхности земли до высоты 30 км, в котором использовалась неравномерная вертикальная сетка из 34 уровней, сгущающихся к земной поверхности. Оценка качества прогноза выполнена для третьей области.

Фактическая погода оценивалась с помощью аэродромной метеорологической информационно-измерительной системы АМИС-РФ для аэропорта Богашево (г. Томск) (здесь и далее используется среднее время по Гринвичу, GMT) и данных стандартных метеонаблюдений на метеорологической станции Томск (ГМС) [6].

*Синоптическая ситуация*, или общий макрофизический атмосферный процесс, в период эксперимента с 15 по 17 июня 2012 г. проанализирован с помощью набора синоптических и аэрологических карт за соответствующие сроки. Томск находился под влиянием высотной ложбины с циклоническим центром на АТ-500 юго-западнее Новосибирска, прослеживавшимся до уровня 200 гПа.

Воздушная масса над территорией области была достаточно увлажненная, от поверхности земли и до уровня 700 гПа дефициты составляли 1–2°C, что способствовало возникновению при сильном дневном прогреве до 28°C условий для образования мощной кучевой облачности, а в ночные и утренние часы – дымок и туманов.

Барическое поле у земли характеризовалось как малоградиентное циклоническое.

По западной части области проходила полярно-фронтальная окклюзия, а с юга шло надвигание теплого участка вторичного фронта. Для фронта имелась ложбина холода на АТ-850.

По синоптическим данным, ливневой дождь в Томске был отмечен 16 июня в 00 ч. В срок 03 часа ливень ещё продолжался, а между сроками была отмечена гроза. Таким образом, оба явления можно объяснить близостью фронтов (размытого полярного и окклюзии).

### Оценка точности прогноза основных метеовеличин

Современный уровень развития гидродинамических методов прогноза дает возможность количественного прогноза различных метеорологических элементов и явлений погоды (атмосферного давления, температуры, осадков, скорости и направления ветра, опасных и стихийных явлений и др.) как в отдельных пунктах, так и на больших территориях.

Большое количество прогнозируемых элементов и методов их предвычисления диктует необходимость унификации и автоматизации процесса испытаний. Единообразие используемых оценок, выполненных с использованием руководящих документов [7, 8], позволяет установить надежность проверяемых численных методов прогноза.

Оценка надежности прогностических значений температуры, влажности и ветра у поверхности Земли и на изобарических поверхностях производится путем сравнения данных численного прогноза с данными фактических измерений.

Точность прогноза температуры, давления, влажности воздуха, скорости и направления ветра, количества осадков оценивается по следующим характеристикам:

– средняя абсолютная ошибка прогноза (с точностью до 0,1):

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_n - x_{\phi}|;$$

– средняя квадратическая ошибка прогноза:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_n - x_{\phi})^2};$$

– средняя арифметическая (систематическая) ошибка:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_n - x_{\phi}).$$

где  $N$  – число элементов в выборке;  $x_n$  – прогностическое значение метеовеличины;  $x_{\phi}$  – фактическое (наблюдаемое) значение.

Дополнительно рассчитывается оценка, показывающая процент оправдавшихся прогнозов температуры воздуха по заданным градациям ошибок ( $\leq 1$ ,  $\leq 2$ ,  $\leq 3$ ,  $\leq 4$ ,  $\leq 5^{\circ}\text{C}$ ).

Качество прогнозов осадков устанавливается по двум показателям: по факту их наличия или отсутствия и количеству осадков путем сравнения рассчитанных данных об осадках с данными на станции. При оценке прогноза осадков по факту рассчитывается

общая оправдываемость  $U$ , оправдываемость прогноза «осадки»  $U_{oc}$  и «без осадков»  $U_{bo}$ , предупрежденность случаев с осадками  $P_{oc}$ , без осадков  $P_{bo}$  (все эти значения рассчитываются в %) и критерий качества Пирси – Обухова  $Pir$  [8].

Для получения этих характеристик строится таблица сопряженности, показывающая соотношение между количеством случаев прогноза и фактом выпадения осадков.

При оценке количества осадков рассчитываются средняя абсолютная ошибка, средняя систематическая ошибка и повторяемость ошибок прогноза количества осадков ( $P_Q$ ) при заданных значениях градаций ( $\leq 1$ ,  $\leq 2$ ,  $\leq 3$ ,  $\geq 3$  мм за 12 ч в холодный период года и  $\leq 1$ ,  $\leq 2$ ,  $\leq 3$ ,  $\leq 5$ ,  $\leq 8$ ,  $\geq 8$  мм за 12 ч в теплый период года).

Для скорости ветра также рассчитывается оправдываемость прогноза при заданных градациях ошибок ( $\leq 5$ ,  $\leq 10$ ,  $\leq 15$  м/с).

В работе была выполнена оценка качества прогноза температуры, давления, влажности воздуха, скорости и направления ветра, осадков и облачности по 43 часовым реализациям модели ( $N = 43$ ), которые позволяли произвести оценку точности прогноза с привлечением средних, средних квадратических и средних абсолютных ошибок.

Ниже представлены погрешности расчета метеовеличин по результатам ежечасных совместных фактических и прогностических данных и краткая их характеристика (табл. 1).

*Температура воздуха.* При использовании разных параметризаций микрофизики модель занижает температуру на  $0,3$ – $0,6^{\circ}\text{C}$ . Несколько лучшие результаты – при использовании схем ETA и WSM5. Средняя квадратическая погрешность составляет  $2,7$ – $3,0^{\circ}\text{C}$ , что соответствует другим моделям ( $2$ – $3,5^{\circ}\text{C}$  [9, 10]).

*Скорость ветра.* Скорость ветра прогнозируется моделью достаточно точно: в среднем она завышается на  $1$ – $1,3$  м/с, что незначительно превышает погрешность измерения скорости ветра прибором М-63 [11]. Средняя квадратическая погрешность составляет  $1,8$ – $2,3$  м/с, в оперативных моделях –  $2,0$ – $2,9$  м/с [10].

*Удельная влажность.* В нашем случае модель завышает влажность воздуха на  $0,4$ – $0,9$  г/кг. Средняя квадратическая погрешность составила для разных параметризаций  $1,5$ – $1,7$  г/кг, что соответствует примерно  $10$ – $13\%$  от наблюдаемых значений удельной влажности.

При оценке прогноза влажности обычно учитывается погрешность расчета температуры точки росы [8]. Модель рассчитывает значения удельной влажности, поэтому в работе по давлению, температуре и удельной влажности воздуха вычислены фактические и прогностические значения температуры точки росы.

В результате оценки получено, что, в отличие от температуры воздуха, расчеты по всем параметризациям микрофизики завышают температуру точки росы на  $0,6$ – $1,1^{\circ}\text{C}$ . Средняя квадратическая ошибка составила примерно  $2^{\circ}\text{C}$ , абсолютная ошибка – от  $1,2$  до  $1,7^{\circ}\text{C}$ . Значения  $\delta$  и  $\sigma$  показывают, что точность прогноза температуры точки росы приблизительно на  $1^{\circ}\text{C}$  лучше, чем в других моделях [9, 10].

*Атмосферное давление на уровне станции.* Давление рассчитывается с большей погрешностью (завы-

шение), чем по другим моделям. Средняя и средняя квадратическая погрешность давления составляет около 6 гПа (в других моделях 1–3 гПа [9, 10]).

*Осадки.* Результаты оценки оправдываемости прогнозов осадков по факту наличия по Томску представлены в табл. 2.

Таблица 1  
Погрешности расчета основных метеорологических величин с использованием разных схем в модели WRF

Метеорологический параметр	Характеристика точности	ETA	Thompson	WSM5	WSM6	Lin
Температура, °C	$\varepsilon$	-0,3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,6
	$\sigma$	3,0	2,8	2,7	2,7	2,9
	$\delta$	2,4	2,1	2,0	2,1	2,3
Скорость ветра, м/с	$\varepsilon$	1,0	1,3	1,1	1,2	1,0
	$\sigma$	1,8	2,3	2,0	1,9	2,0
	$\delta$	1,4	1,7	1,4	1,5	1,5
Удельная влажность, г/кг	$\varepsilon$	0,8	0,8	0,9	0,4	0,6
	$\sigma$	1,6	1,6	1,7	1,5	1,5
	$\delta$	1,2	1,1	1,3	1,0	1,1
Температура точки росы, °C	$\varepsilon$	1,1	1,1	1,3	0,6	0,9
	$\sigma$	2,1	2,1	2,2	1,8	1,9
	$\delta$	1,6	1,5	1,7	1,2	1,5
Давление, гПа	$\varepsilon$	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
	$\sigma$	6,0	5,9	6,0	6,0	6,0
	$\delta$	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9

Таблица 2  
Показатели успешности прогноза осадков в период эксперимента

Схемы	Характеристика					
	$U$	$U_{oc}$	$U_{oo}$	$P_{oc}$	$P_{oo}$	$P_{ir}$
ETA	79	33	91	50	84	0,34
Thompson	81	50	85	25	94	0,19
WSM5	86	80	87	44	97	0,41
WSM6	79	33	86	29	89	0,18
Lin	70	27	84	38	77	0,15

Общая оправдываемость прогноза осадков составила 70–86%. Этот показатель соответствует качеству прогноза для других моделей [9, 10], за исключением схемы Lin.

По прогнозу факта наличия осадков схемы Thompson и WSM5 показали значительно лучшие результаты в сравнении с [10]. Современные модели имеют этот показатель, равным около 30%. Прогноз факта отсутствия осадков оказался удачным для всех параметризаций: полученные значения  $U_{oo}$  существенно выше достигнутых показателей [10], не превышающих 50%, и сопоставимы с [9].

Предупрежденность факта наличия и отсутствия осадков превышает аналогичные показатели других моделей, для которых эти характеристики не превышают 30 и 57% соответственно. Критерий Пирси – Обухова, по нашим данным, несколько ниже, чем по другим моделям, где он составляет 0,4–0,6.

Таким образом, по факту наличия осадков лучшие результаты показали схема WSM5 и ETA. Схема Lin оказалась наименее удачной.

Результаты оценки по количеству осадков представлены в табл. 3, 4.

В табл. 3 даны фактические значения осадков по двум пунктам (АМСГ Богашево и ГМС Томск). Сравнение проводилось по пункту, данные которого давали лучшие результаты (методика [8] позволяет это делать, если расстояние между пунктами не превышает 50 км).

Из табл. 3 видно, что количество осадков за 12-часовые интервалы, вычисленное по модели с разными параметризациями микрофизики, существенно различается, при этом в основном прогностические суммы осадков больше фактических, особенно для двух последних схем. Результаты оценки по грациям ошибок представлены ниже.

Таким образом, по количеству выпавших осадков лучшие результаты показала схема ETA: в 75% случаев различие составило меньше 8 мм, а по общей сумме осадков за период различие не превысило 5 мм. Худшие результаты у схемы Lin: в большинстве случаев (75%) различие по количеству осадков прогноз – факт составило более 8 мм.

*Облачность.* Модель WRF оценивала общее количество облачности (балл) в зависимости от высоты над поверхностью земли. Смоделированный режим облачности (балл, расположение нижней и верхней границ, мощность) в целом соответствует реальным процессам конденсации влаги и образования осадков.

Все параметризации предсказали мощную облачность и относительно небольшую высоту нижней границы в период развития процессов перед началом осадков (в 18 ч 15.06), наиболее мощную и низкую облачность – в период выпадения интенсивных осадков (00 ч 16.06), более высокую и менее мощную облачность через 12 ч после прекращения осадков.

Данные по количеству фактически выпавших и рассчитанных по модели осадков, мм/12 ч

Метод определения осадков		На 00 ч. 16.06.2012	На 12 ч. 16.06.2012	На 00 ч. 17.06.2012	На 12 ч. 17.06.2012	Общая сумма, мм
Р а с ч е т	Схема ETA	6,1	6,3	0	9,8	22,2
	Схема Томпсона	13,3	29,8	0,1	1,8	45
	Схема WSM5	31,3	28,5	0,1	0,4	60,3
	Схема WSM6	37,9	68,1	0	0,3	106,3
	Схема Lin	31,9	28,4	3,4	18,1	81,8
Ф а к т	АМСГ	15,2	2,6	0	0	17,8
	ГМС	13	2	0	0	15

Таблица 4

Оправдываемость прогноза осадков при заданных градациях ошибок, %

Метод определения (измерения) осадков	Градация ошибок, мм						Погрешность расчета общего количества, мм
	<1	<2	<3	<5	<8	>8	
Схема ETA	25	25	25	50	75	25	<5
Схема Томпсона	50	75	75	75	75	25	>8
Схема WSM5	50	50	50	50	50	50	>8
Схема WSM6	50	50	50	50	50	50	>8
Схема Lin	0	0	0	25	25	75	>8

Дальнейшее развитие облаков обусловило последнюю порцию осадков утром 17.06. Высоты верхней границы облачности все параметризации рассчитали приблизительно одинаковыми, от 10 до 12–13 км, что является вполне реальным (кучево-дождевые облака могут располагаться до высот 10–12 км и более).

Высоты нижней границы облаков для разных параметризаций в момент наиболее интенсивных осадков составили от 1 до 3 км с возрастанием в дальнейшем до 5–7 км. В целом прогностическое значение высоты нижней границы облаков оказалось завышенным на 1–2 км.

Изменения относительной влажности приземного воздуха за период численного эксперимента находятся в хорошем согласии с режимом выпадения фактических осадков. Относительная влажность для всех параметризаций в периоды выпадения осадков (с 20 ч 15.06 до 04 ч 16.06) и наличия тумана (с 16 ч 16.06 до 01 ч 17.06) была близка к 100%. В периоды отсутствия осадков (утро – день 16.06 и ночь – раннее утро 17.06) воздух был далек от насыщения.

Таким образом, фактическая и смоделированная картины распределения облачности, осадков и относительной влажности воздуха взаимно дополняют и физически согласуются между собой.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

1. Реализация локальной модели WRF (версия 3.4.1), для прогноза различных метеовеличин и явлений для Томска продемонстрировала хорошие возможности и перспективы использования ее при оценке локальных условий погоды.

2. В результате проведенного исследования получено, что рассчитанные характеристики точности модели представляются удовлетворительными:

– точность прогноза температуры воздуха соответствует достигнутому уровню для других современных моделей (например, Cosmo-ru);

– прогноз температуры точки росы, скорости ветра оказался несколько лучше, чем у известных моделей; прогноз осадков по количеству и факту их наличия сопоставим с используемыми мезомоделями и по некоторым характеристикам оказался лучше;

– прогноз высоты нижней границы облаков и их мощности оказался вполне реалистичным, однако высота нижней границы облаков завышается на величину до 1–2 км.

Дополнительное привлечение прогностических данных по относительной влажности воздуха позволяет уточнить высоту их нижней границы и при высокой влажности (более 90%) диагностировать наличие тумана или дымки.

Прогноз атмосферного давления на уровне станции требует дополнительного совершенствования вследствие того, что давление рассчитывается с большей погрешностью, чем по другим моделям.

3. Различные параметризации микрофизических процессов в модели привели к разной точности прогноза основных метеовеличин, но в целом они сопоставимы. При прогнозе осадков лучшие результаты дали схемы WSM5 и ETA. Худшие результаты оказались у схемы Lin.

В целом требуется большая детализация модельных параметров по облачности для нижнего 1–2-километрового слоя, который является особенно важным при локальном прогнозе погоды. Работу по изучению возможностей модели WRF и других моделей с целью определения лучшей и ее дальнейшего внедрения в практику прогнозирования следует продолжить.

Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования мезомасштабного и локального численного прогноза погоды (метеорологических величин и атмосферных явлений).

## ЛИТЕРАТУРА

1. ARW Version 3 Modeling System User's Guide // NCAR. Mesoscale & Microscale Meteorology Division. Nacional Center of Atmospheric Research. January 2010. 312 p. URL: [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v3.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf)
2. 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.
3. 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.
4. Толстых М.А., Булдовский Г.С. Усовершенствованный вариант глобальной полулагранжевой модели прогноза полей метеозадающих элементов в версии с постоянным разрешением заблаговременностью до 10 суток и результаты его оперативных испытаний // Фундаментальные и прикладные гидрометеорологические исследования. СПб. : Гидрометеоиздат, 2003. С. 24–47.
5. Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Юрова А.Ю. Полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ, Гидрометцентр России 80 лет. М. : Триада, 2010. С. 193–216.
6. Погода в России и мире, прогноз погоды от Метеоцентра. URL: <http://www.meteocenter.net>
7. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Руководящий документ РД52.27.724-2009. Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2009. 50 с.
8. РД 52.27.284-91 Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Дата введения 1992-01-01. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/1200068360>
9. 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 / ГМЦ РФ. Информационный сборник № 35 ; под ред. Г.К. Веселовой. М., 2008. С. 3–20.
10. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В. Мезомасштабная модель COSMO-RU07 и результаты ее оперативных испытаний // Информационный сборник № 39. 2012. С. 15–48.
11. Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам. Л. : Гидрометеоиздат, 1976. С. 19–22.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 16 сентября 2013 г.